

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

PAULO HENRIQUE SILVEIRA CARDOSO

Inclusão de elementos potencialmente tóxicos nas funções DRIS e CND para
avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto

Piracicaba

2023

PAULO HENRIQUE SILVEIRA CARDOSO

Inclusão de elementos potencialmente tóxicos nas funções DRIS e CND para
avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto
Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na
Agricultura da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no
Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu-Junior

Piracicaba
2023

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Cardoso, P. H. S.

Inclusão de elementos potencialmente tóxicos nas funções DRIS e CND para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto / Paulo Henrique Silveira Cardoso; orientador Cassio Hamilton Abreu Junior. - - Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

133 p.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Adubo de lodo 2. Eucalipto 3. Fertilidade do solo 4. Lodo de esgoto 5. Nutrição vegetal I. Título

CDU 631.879.2 : 582.776

Elaborada por:

Marilia Ribeiro Garcia Henyei

CRB-8/3631

Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

Às minhas irmãs e à minha mãe, pessoas insubstituíveis e importantes em minha vida,
com amor, admiração, gratidão e apoio ao longo
do período de elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter abençoado e fortalecido em todos os momentos de minha vida, principalmente os mais difíceis.

À minha mãe Lindaura pelo apoio de sempre e pelos ensinamentos; às minhas irmãs Gabriella e Rafaela pelo companheirismo.

Aos meus amigos que mesmo de longe foram imprescindíveis para meu bem-estar e desenvolvimento. Em especial agradeço a Renata, Ana Clara e Fernanda.

À Paula pelo incentivo e compreensão do começo e ao final dessa jornada, te admiro imensamente.

Ao Prof. Cassio pela orientação, incentivo, ensinamentos, dedicação e confiança.

Aos companheiros de laboratório e campo, Thays, Antônio, Josimar, Francine, Rhayra, Rosana, Bruno, Beatriz e Sérgio e à Inês, Everaldo e Suzi. Agradeço a amizade, companheirismo e auxílio no decorrer da minha estadia no CENA/USP.

Ao Setor de Transportes do CENA, nas pessoas do Sr. Claudio e Sr. Luiz (Luizinho) pela companhia constante nas viagens à campo.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, pela oportunidade ofertada.

À Suzano S.A. pelo apoio fornecido à pesquisa, em especial ao Dileto e Clayton, pelo apoio técnico e por serem sempre tão solícitos; à Heringer pelo fornecimento dos fertilizantes minerais utilizados no experimento; e à Companhia de Saneamento Básico de Jundiaí pelo fornecimento do lodo de esgoto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, Processo nº 2017/26375-1, pelo financiamento do projeto de pesquisa, tornando possível a produção desta tese.

"Maior que a tristeza de não haver vencido é a vergonha de não ter lutado!"

Rui Barbosa

RESUMO

CARDOSO, P.H.S. **Inclusão de elementos potencialmente tóxicos nas funções DRIS e CND para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto.** 2023. 133 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

A aplicação de lodo de esgoto (LE) em áreas agrícolas e florestais apresenta grande potencial de destinação desse subproduto. No entanto, a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) em sua composição pode inviabilizar ou limitar seu uso em áreas cultivadas. A utilização de métodos de avaliação do estado nutricional de cultivos tratados com LE faz-se necessário para estudar a influência dos EPTs no desenvolvimento das plantas. Assim, o uso de ferramentas como o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) e a Diagnose da Composição Nutricional (CND) pode auxiliar na avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com LE. Assim, objetivou-se com esse trabalho avaliar a produtividade de madeira, os teores de nutrientes e EPTs e determinar normas e avaliar o estado nutricional de *Eucalyptus*, com e sem a inclusão de EPTs, pelos métodos DRIS, CND-*clr* (*centered log ratio*) e CND-*ilr* (*isometric log ratio*), em diferentes idades de um plantio de *Eucalyptus urograndis* com diferentes manejos de adubação com LE. O experimento foi instalado em 2015 em delineamento em blocos casualizados, com 10 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos consistiram em: *i*) controle; *ii*) dois tratamentos com duas doses de fertilização mineral; *iii*) e sete tratamentos com aplicação de LE, com ou sem a complementação com P e/ou B. Os inventários e amostragem de folhas para avaliação do estado nutricional das plantas foram realizados aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio de *Eucalyptus* adubado com LE classe B. Os tratamentos com aplicação de LE a fornecer 100% da recomendação de N, complementado com 66% da recomendação de P, com ou sem aplicação de B, atingiu produtividade em incremento médio anual de 34, 57, 56 e 44 m³ ha⁻¹ por ano aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio de *Eucalyptus*, respectivamente. Essas produtividades foram semelhantes aos observados nos tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais. Com a modelagem das funções DRIS com os EPTs foi possível subestimar a “deficiência” e superestimar o excesso dos EPTs, gerando índices de balanço nutricional, o qual foi possível verificar que o Ba foi o elemento mais limitante por excesso. A concordância de diagnóstico nutricional (equilibrado, deficiência e excesso) com ou sem a inclusão dos EPTs variou de 60 a 99% das populações pelos métodos DRIS e CND-*clr*. A inclusão dos EPTs nas normas e funções CND-*clr* para *Eucalyptus* não alteram a interpretação do estado nutricional da cultura. Com o método CND-

ilr a subpopulação de alta produtividade e nutricionalmente balanceada apresentou, em sua maioria, populações de *Eucalyptus* tratado com aplicação de LE para fornecer 100% da recomendação de N, com acurácia de 58 e 61% para as avaliações sem e com a inclusão dos EPTs aos 76 meses após o plantio, respectivamente. Assim, a inclusão dos EPTs nas funções DRIS, CND-*clr* e CND-*irl* pode trazer informações importantes quanto a qual elemento está trazendo mais prejuízos às plantas. Salienta-se a necessidade de normas específicas para cada região, idade e/ou análise do plantio.

Palavras-chave: *Centered log ratio*. Diagnose nutricional. *Isometric log ratio*. Metais pesados. Nutrição florestal.

ABSTRACT

CARDOSO, P.H.S. **Inclusion of potentially toxic elements in the DRIS and CND functions to evaluate the nutritional status of *Eucalyptus* treated with sewage sludge.** 2023. 133 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

The application of sewage sludge (SS) in agricultural and forestry areas has great potential for the disposal of this by-product. However, the presence of potentially toxic elements (PTEs) in its composition may prevent or limit its use in cultivated areas. The use of methods to assess the nutritional status of crops treated with SS is necessary to study the influence of PTEs on plant development. Thus, the use of tools such as the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) and the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) can help in the evaluation of the nutritional status of *Eucalyptus* treated with SS. Thus, the objective of this work was to evaluate wood productivity, nutrient and PTEs contents and to determine norms and evaluate the nutritional status of *Eucalyptus*, with and without the inclusion of PTEs, by the DRIS, CND-*clr* (centered log ratio), and CND-*ilr* (isometric log ratio) methods, at different ages of a *Eucalyptus urograndis* plantation with different SS fertilization managements. The experiment was installed in 2015 in a randomized block design, with 10 treatments and 4 replications. Treatments consisted of: i) control; ii) two treatments with two doses of mineral fertilization; iii) and seven treatments with SS application, with or without supplementation with P and/or B. Inventories and leaf sampling to assess the nutritional status of the plants were carried out at 22, 44, 54, and 76 months after planting *Eucalyptus* treated with SS class B. Treatments with SS application providing 100% of the N recommendation, supplemented with 66% of the P recommendation, with or without application of B, reached productivity in an average annual increment of 34, 57, 56, and 44 m³ ha⁻¹ per year at 22, 44, 54, and 76 months after *Eucalyptus* planting, respectively. These productivities were similar to those observed in treatments with application of mineral fertilizers. By modeling the DRIS functions with the PTEs, it was possible to underestimate the “deficiency” and overestimate the excess of the PTEs, generating nutritional balance indices, which made it possible to verify that Ba was the most limiting element due to excess. The nutritional diagnosis agreement (balanced, deficiency, and excess) with or without the inclusion of PTEs ranged from 60 to 99% of the populations by the DRIS and CND-*clr* methods. The inclusion of PTEs in the CND-*clr* norms and functions for *Eucalyptus* does not change the interpretation of the nutritional status of the crop. With the CND-*ilr* method, the high productivity and nutritionally balanced subpopulation presented, for

the most part, populations of *Eucalyptus* treated with LE application to provide 100% of the N recommendation, with accuracy of 58 and 61% for the evaluations without and with the inclusion of PTEs at 76 months after planting, respectively. Thus, the inclusion of PTEs in the DRIS, CND-*clr*, and CND-*irl* functions can bring important information as to which element is causing more damage to the plants. The need for specific norms for each region, age and/or analysis of planting is highlighted.

Keywords: Centered log ratio. Forest nutrition. Heavy metals. Isometric log ratio. Nutritional diagnosis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	15
Referências	19
2 PRODUTIVIDADE, NUTRIÇÃO MINERAL E ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM <i>Eucalyptus</i> MANEJADO COM DIFERENTES ADUBAÇÕES COM LODO DE ESGOTO CLASSE B	25
Resumo	25
Abstract	25
2.1 Introdução	26
2.2 Material e Métodos	28
2.2.1 Área experimental	28
2.2.2 Caracterização do lodo de esgoto	29
2.2.3 Experimento de campo	30
2.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal	32
2.2.5 Análise química do material vegetal	32
2.2.6 Análise estatística	32
2.3 Resultados e Discussão	33
2.4 Conclusão	40
Referências	41
3 INCLUSÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS FUNÇÕES DRIS PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DE <i>Eucalyptus</i> ADUBADO COM LODO DE ESGOTO CLASSE B	45
Resumo	45
Abstract	45
Keywords: forest nutrition, heavy metals, mineral nutrition, nutritional diagnosis.	46
3.1 Introdução	46
3.2 Material e Métodos	47
3.2.1 Área experimental	47
3.2.2 Caracterização do lodo de esgoto	48
3.2.3 Experimento de campo	49
3.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal	50
3.2.5 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal	52
3.2.6 Análise química do material vegetal	52
3.2.7 Análise dos dados	53
3.3 Resultados e Discussão	56
3.4 Conclusões	70

Referências	70
4 INCLUSÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS FUNÇÕES CND-<i>clr</i> PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DE <i>Eucalyptus</i> ADUBADO COM LODO DE ESGOTO CLASSE B.....	75
Resumo	75
Abstract	75
4.1 Introdução.....	76
4.2 Material e Métodos.....	77
4.2.1 Área experimental.....	77
4.2.2 Caracterização do lodo de esgoto	79
4.2.3 Experimento de campo	79
4.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal.....	81
4.2.5 Análise química do material vegetal.....	81
4.2.6 Análise dos dados	82
4.3 Resultados e Discussão.....	83
4.4 Conclusão	96
Referências	96
5 INCLUSÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS FUNÇÕES CND-<i>ilr</i> PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DE <i>Eucalyptus</i> ADUBADO COM LODO DE ESGOTO CLASSE B.....	99
Resumo	99
Abstract	99
5.1 Introdução.....	100
5.2 Material e Métodos.....	101
5.2.1 Área experimental.....	101
5.2.2 Caracterização do lodo de esgoto	102
5.2.3 Experimento de campo	103
5.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal.....	105
5.2.5 Análise química do material vegetal.....	105
5.2.6 Análise dos dados	106
5.3 Resultados e Discussão.....	110
5.4 Conclusão	115
Referências	115
APÊNDICES	119

1 INTRODUÇÃO GERAL

Considerado por especialistas como um setor de alta relevância para o desenvolvimento socioeconômica do Brasil, o setor florestal foi responsável por uma parcela significativa do produto interno bruto, chegando a R\$ 116,6 bilhões, e apresentando acréscimo de 10,2% no período de 2010 a 2020 (IBA, 2021). Nesse contexto, o cultivo de *Eucalyptus*, uma das culturas comerciais mais difundidas e utilizadas no setor, abrange cerca de 73% de toda área de florestas plantadas no Brasil e, ainda assim, é considerada uma cultura em expansão. Alguns fatores contribuem para isso, como o rápido crescimento, alta produtividade e expansão de empresas dos segmentos de madeira, papel e celulose.

Em sua maioria, o plantio comercial de *Eucalyptus* é destinado a solos de baixa fertilidade natural (Sgarbi, 2002; Silva et al., 2011), onde não é possível o cultivo de modo rentável da cultura sem a adição de fertilizantes (Fernandez et al., 2000). O plantio de *Eucalyptus* apresenta elevada mobilização e exportação de nutrientes em função do seu rápido crescimento. Dessa forma, há alto custo no uso de fertilizantes em grandes áreas de plantio devido à quantidade necessária requerida pela cultura, fazendo com que a adubação represente cerca de 40% dos custos (Rodigheri et al., 2007). Assim, a sustentabilidade do sistema, a curto e longo prazo, está condicionada ao monitoramento nutricional e à utilização de fertilizantes (Silveira et al., 2001). Torna-se necessário, portanto, a busca por adubos alternativos que melhorem a relação custo-benefício de um plantio de *Eucalyptus*. Assim, o potencial do uso de lodo de esgoto em plantações florestais é muito grande (Abreu-Junior et al., 2017), uma vez que os produtos dessas culturas não são voltados para alimentação humana ou animal (Silva et al. 2011).

A utilização de resíduos como adubo orgânico possui um longo histórico na agricultura, sendo um deles o lodo de esgoto. As informações mais conhecidas da utilização de lodo de esgoto são originárias da China. Por volta de 1800, na Inglaterra foram desenvolvidos muitos projetos para a sua utilização agrícola (Bettiol; Camargo, 2007). Na Europa, o uso do lodo de esgoto na agricultura é expressivo (Kelessidis; Stasinakis, 2012). Já no Brasil, 37% da disposição do lodo é realizada em aterros sanitários, 13% são dispostos em rios e apenas 14% é reaproveitado (IBGE, 2008). Entretanto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305, restringe a destinação de resíduos para aterros sanitários que ainda sejam passíveis de reutilização (Brasil, 2012), como o lodo de esgoto (Moretti et al., 2015).

Por conter elevado teor de matéria orgânica, de 40 a 80% da base seca (Saito, 2007), e elementos essenciais às plantas, o lodo pode substituir, ainda que parcialmente, os fertilizantes minerais (Nascimento et al., 2015). Além disso, a aplicação do lodo tem-se tornado uma alternativa atraente do ponto de vista socioeconômico e ambiental devido aos altos custos e impactos ambientais advindos do uso dos demais fertilizantes (Galdos et al., 2004).

Sendo assim, o lodo de esgoto pode proporcionar inúmeros benefícios ao solo, tais como a elevação do pH, do teor de C orgânico, da CTC (Albuquerque et al., 2015; Bonini et al., 2015; Cavalcante et al., 2015), melhorar as propriedades físicas do solo (Sampaio et al., 2012) e maior retorno econômico em comparação à fertilizante químico (Quintana et al., 2009). Portanto, o lodo de esgoto tem se mostrado um potencial insumo orgânico para as culturas agrícolas, como o milho e cana-de-açúcar (Nogueira et al., 2013; Athamenth et al., 2015), assim como para espécies florestais, como o *Eucalyptus* e pinus (Bourioug et al., 2014; Marron, 2015; Xue et al., 2015) e espécies vegetais com capacidade de restaurar áreas em degradação (Sampaio et al., 2016).

Entretanto, o lodo de esgoto pode conter elementos potencialmente tóxicos (EPTs), como As, Ba, Cd, Co, Cr, Hg, Pb e Se, que podem causar danos ao ambiente e distúrbios nutricionais às plantas. Com isso, há a necessidade de se conhecer os efeitos do uso do lodo com EPTs na agricultura, sendo esse um fator imprescindível a ser levado em consideração no uso deste resíduo na agricultura (Bettiol; Camargo, 2007). Ainda, de modo geral, verifica-se que o lodo de esgoto se apresenta de forma desbalanceada em relação à concentração de seus nutrientes e a necessidade das culturas. Desse modo, pode ser prejudicial, seja pelo excesso ou escassez de nutrientes, ambos fatores limitantes à produtividade.

Elementos essenciais, não essenciais ou requeridos em pequenas quantidades, muitas vezes são encontrados em grandes concentrações no lodo de esgoto. Quando um elemento contempla a classificação de nutriente e elemento traço ao mesmo tempo, sua relevância deve ser avaliada quanto aos aspectos ambiental e nutricional. Porém, o limiar entre deficiência e toxidez é muito estreito. São encontrados no lodo de esgoto Cu, Zn, Fe, Mn, Mo (Oliveira, 2008) na condição de nutriente e elemento traço, além dos elementos de potencial toxidez, como Cd, Cr, Hg, Pb, dentre outros (Chang et al., 1997).

Assim, desequilíbrios entre os teores dos nutrientes provocam influências na disponibilidade, absorção e translocação na planta (Fernandes; Carvalho, 2001). Macedo (2009), trabalhando com doses de lodo na cultura do milho e comparando com adubação

mineral, verificou que o consumo de luxo de N pela planta proporcionou deficiência de S, mesmo este sendo fornecido na dose 180 kg ha⁻¹, via adubo mineral.

Mesmo com todos estes desequilíbrios, a literatura é vasta em resultados que apontam aumento de produtividade de cultivos submetidos ao tratamento com lodo em relação ao tratamento controle (Ros et al., 1993; Dimitriou; Rosenqvist, 2011). Silva et al. (2011) comparando o efeito da aplicação de lodo úmido e seco termicamente com adubo mineral e tratamento controle em plantio de *Eucalyptus*, concluíram que tratamentos com lodo e adubo mineral apresentaram aumento de 86% na biomassa.

Embora cada elemento atue de forma diferenciada nas plantas, os sintomas visuais dos efeitos dos EPTs são: redução do crescimento, clorose e atrofia foliar (Cunha et al., 2008). Alguns estudos indicam a influência destes elementos sobre a nutrição de plantas, entretanto, os trabalhos ainda são incipientes e contraditórios (Tezotto et al., 2012). Com base nisso, segundo a literatura temos: Cd causando deficiência (Benavides et al., 2005) ou aumentando da absorção de Fe (Paiva et al., 2001); Cr aumentando (Gupta et al., 2000) ou reduzindo o teor de P (Castilhos et al., 2001); Pb proporcionando redução (Huan; Cunningham 1996) ou não influenciando o teor de K (Nogueira et al., 2013); e As aumentando ou reduzindo (Farnese et al., 2014), ou não influenciando na absorção de Cu (Campos et al., 2015).

Ante a possibilidade de os EPTs poderem causar desequilíbrios nas funções fisiológicas das plantas, evidencia-se a necessidade de um método de avaliação nutricional que considere a interferência destes elementos, especialmente na diagnose foliar do *Eucalyptus*. Métodos de interpretação de análises químicas em folhas que pressupõem a comparação dos teores de nutrientes com valores de referência (níveis críticos ou faixas de suficiências) são questionáveis, uma vez que apenas expressam a proporcionalidade dos elementos em relação à matéria seca. A exemplo disso, o teor dos elementos essenciais foi maior no tecido foliar em função do EPT reduzir a produção de matéria seca (Paiva et al., 2002).

Assim, a avaliação do estado nutricional de plantas, por meio da aplicação dos métodos de diagnose foliar, relacionando os teores de nutrientes entre si, tem-se destacado dos métodos tradicionais de diagnose que consideram os teores dos nutrientes individualmente. O Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS), proposto por Beaufils (1973), é o principal método bivariado utilizado e objetiva classificar os nutrientes quanto à ordem de limitação ao crescimento das plantas (Costa, 1999). A partir do DRIS, são calculados índices que expressam o equilíbrio relativo dos nutrientes na planta, por meio da comparação de relações duais (N/P, P/K, K/Ca, Ca/Mg etc.) na amostra com valores padrões ou normas (Alvarez; Leite, 1999),

partindo-se da premissa de que as relações duais entre nutrientes apresentam maior constância comparativamente aos seus teores na planta. O método DRIS estabelece índices que significam, em uma escala numérica contínua, o efeito de cada nutriente no balanço nutricional da planta. Esses índices são expressos por valores positivos, negativos e nulo, correspondendo a excessos, deficiências e equilíbrio nutricional, respectivamente (Jones, 1981; Beverly, 1991).

O DRIS vem sofrendo adaptações quanto a uniformidade entre cultivar avaliada e população de referência (Letzsch; Sumner, 1984), divisão em subpopulações pela produtividade (Beverly, 1991), regionalização das normas (Reis Júnior; Monnerat, 2003), épocas de coleta da folha diagnose (M-DRIS) (Hallmark et al., 1987) e até mesmo diferenciação das populações de referência quanto aos tratos culturais, como adubação orgânica ou mineral (Partelli et al., 2006). Nesse sentido, as adaptações realizadas foram devido às peculiaridades de cada sistema, o que proporcionou maior confiabilidade dos resultados. Estas variações das normas DRIS são possíveis devido o método original se tratar de um modelo para identificação de fatores limitantes à produtividade.

Já o método da Diagnose da Composição Nutricional nas relações do *log* centralizado (CND-*clr*), desenvolvido por Parent e Dafir (1992), baseia-se na obtenção de variáveis multinutrientes, ponderada pela média geométrica da composição nutricional, isto é, as relações entre o teor de um nutriente e a média geométrica dos teores dos demais componentes (inclusive aqueles não avaliados analiticamente) da matéria seca da folha (Khiari et al. 2001), de maneira a verificar a influência destes sob o estado nutricional das culturas.

Devido à base de cálculo do DRIS não levar em consideração a composição total da matéria seca e o CND-*clr* não possuir um modelo conceitual de interpretação das interações dos nutrientes, além de ambos considerarem todas as interações possíveis dos nutrientes, esses métodos são vistos de forma limitada para a interpretação da diagnose nutricional de plantas (Parent, 2011). Para solucionar estes problemas, Parent (2011) propôs a utilização das coordenadas da relação isométrica (*ilr*) para integrar a base de cálculo CND-*ilr*, que utiliza de partições de nutrientes binárias ortonormais, ao invés de relações duplas, de acordo com conhecimentos prévios das interações entre nutrientes.

O desenvolvimento de novas funções DRIS e CND pode representar uma importante alternativa para modelar a resposta biológica das culturas às variações na disponibilidade de nutrientes. Assim, com base no princípio metodológico aplicado, é possível incluir os EPTs junto aos elementos essenciais nas funções DRIS e CND. Walworth e Sumner (1987)

propuseram a introdução nas relações binárias dos elementos não essenciais Si e Na e, ainda, de moléculas de nitrato e amônio em expressões dentro do método.

Na avaliação do estado nutricional em cultivos agrícolas e, ou, florestais tratados com lodo de esgoto, ainda não há uma ferramenta que permita avaliar de maneira confiável a influência dos EPTs sobre o estado nutricional das culturas. Assim, a inclusão dos EPTs na avaliação do estado nutricional de cultivo de *Eucalyptus* prevê não apenas a modificação das fórmulas usuais. Desta forma, a hipótese deste *Eucalyptus* é que a inclusão destes elementos na avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*, nas relações binárias do método DRIS e pelos métodos CND-*clr* e CND-*ilr*, poderão determinar a ordem do efeito tóxico, relacionando qual(is) elemento(s) causa(m) maior desequilíbrio nutricional e, conseqüentemente, maior interferência na resposta produtiva da cultura.

Portanto, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de lodo de esgoto doméstico classe B com ou sem adição de P e/ou de B, no cultivo de *Eucalyptus*, em comparação ao manejo convencional com adubo mineral NPK+B+Cu+Zn, para: i) estudar a influência dos EPTs no desenvolvimento e estado nutricional do *Eucalyptus*; ii) estabelecer normas DRIS, CND-*clr* e CND-*ilr* que garantam a segurança para uso do lodo de esgoto em plantio florestal.

Referências

ABREU-JUNIOR, C.H.; FIRME, L.P.; MALDONADO, C.A.B.; MORAES NETO, S.P.; ALVES, M.C.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; GAVA, J.L.; HE, Z.; NOGUEIRA, T.A.R.; CAPRA, G.F. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increases wood production in *Eucalyptus* plantations. **Journal of Environment Management**, v. 203, p.51-58, 2017.

ALBUQUERQUE, H.C.; ZUBA JUNIO, G.R.; SAMPAIO, R.A.; FERNANDES, L.A.; ZONTA, E.; BARBOSA, C.F. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.553-559, 2015.

ALVAREZ, V.H.; LEITE, R.A. Fundamentos estatísticos das fórmulas usadas para cálculos dos índices DRIS. **Boletim Informativos SBCS**, v.24, p.20-24, 1999.

ATHAMENH, B.; SALEM, N.; ET-ZURAIQI, S.; SULEIMAN, W.; RUSAN, M. Combined land application of treated wastewater and biosolids enhances crop production and soil fertility. **Desalinated Water Treatment**, v.53, p.3283–3294, 2015.

BEAUFILS, E.R. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS): a general scheme of experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. Pietermaritzburg: University of Natal, 1973. 132 p.

BENAVIDES, M.P.; GALLEGO, S.M.; TOMARO, M.L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.17, p.21-34, 2005.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Lodo de esgoto na agricultura: Potencial de uso e problemas**. Disponível em: www.cnpma.embrapa.br. Acesso em: 22 jul. 2017.

BEVERLY, R.B. **A practical guide to the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. Athens: Micro-Macro, 1991. 87p.

BONINI, C.S.B.; ALVES, M.C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.388-393, 2015.

BOURIOUG, M.; ALAOU-SOSSÉ, L.; LAFFRAY, X.; RAOUF, N.; BENBRAHIM, M.; BADOT, P.M.; ALAOU-SOSSÉ, B. Evaluation of sewage sludge effects on soil properties, plant growth, mineral nutrition state, and heavy metal distribution in European Larch Seedlings (*Larix decidua*). **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.39, p.5325–5335, 2014.

BRASIL. Ministério da Casa Civil. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2.ed. Brasília, 2012. Disponível em: fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf. Acesso em: 27 set. 2016).

CAMPOS, N.V.; ARCANJO-SILVA, S.; BATISTA, B.L.; LOUREIRO, M.E.; RIBEIRO, C.; AZEVEDO, A.A. Arsenic-induced responses in *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link: Arsenic speciation, mineral nutrition and antioxidant defenses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.97, p.28-35, 2015.

CASTILHOS, D.D.; COSTA, C.N.; PASSIANOTO, C.C.; LIMA, A.C.R.; LIMA, C.L.R.; MULLER, V. Efeitos da adição de Cromo hexavalente no crescimento, nodulação e absorção de nutrientes em soja. **Ciência Rural**, v.31, p. 969-972, 2001.

CAVALCANTI, T.F.M.; ZUBA JUNIO, G.R.; SAMPAIO, R.A.; CARNEIRO, J.P.; OLIVEIRA, E.S.A.; RODRIGUES, M.N. Yield of castor bean fertilized with sewage sludge and potassium and magnesium sulphate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.773-779, 2015.

CHANG, A.C.; HYUN, H.-NAM; PAGE, A.L. Cadmium uptake for Swiss chard grown on composted sewage sludge treated field plots: plateau or time bomb? **Journal of Environmental Quality**, 26:11-19, 1997.

COSTA, A.N. Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS). **Boletim Informativos SBCS**, v.24, p.13-15, 1999.

CUNHA, K.P.V.; NASCIMENTO, C.W.A.; PIMENTEL, R.M.M.; ACCIOLY, A.M.A.; SILVA, A.J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1319-1328, 2008.

DIMITRIOU, I.; ROSENQVIST, H. Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production—biological and economic potential. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p.835-842, 2011.

FARNESE, F.S.; OLIVEIRA, J.A.; FARNESE, M.S.; GUSMAN, G.S.; SILVEIRA, N.M.; SIMAN, L.I. Uptake arsenic by plants: Effects on mineral nutrition, growth, and antioxidant capacity. **IDESIA**, v.32, p.99-106, 2014.

- FERNANDES, A.R.; CARVALHO, J.G. Crescimento de mudas de pupunheira (*Bactris gasipaes* h.b.k.) em função de relações do K com o Ca e com o Na, em solução nutritiva. **Cerne**, v.7, p.084-089, 2001.
- FERNANDEZ, J.Q.P.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; MORAES, E.J. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rat and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. **Forest Ecology and Management**, v.127, p.93-102, 2000.
- GALDOS, M.V.; MARIA, I.C.; CAMARGO, O.A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutroférrico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.569-577, 2004.
- GUPTA, K.; MEHTA, R.; KUMAR, N.; DAHIYA, D.S. Effect of chromium (VI) on phosphorus fractions in developing sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.). **Crop Research**, v.20, p.46-51, 2000.
- HALLMARK, W.B.; MOOY, C.J.; PESEK, J. Comparison of two DRIS methods for diagnosing nutrient deficiencies. **Journal of Fertilizer Issues**, v.4, p.151-158, 1987.
- HUAN, J.W.; CUNNINGHAM, S.D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. **New Phytologist**, v.134, p.75-84, 1996.
- IBA. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBA 2021**. IBA: São Paulo – SP, 2021. 93p. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2008. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoadevida/pnsb2008/defaulttabzip_esgot_san.shtm. Acesso em: 27 set. 2016.
- JONES, W.W. Proposed modifications of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for interpreting plant analyses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.12, p.785-794, 1981.
- KELESSIDIS, A.; STASINAKIS, A.S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. **Waste Management**, v.32, p.1186–1195, 2012
- KHIARI, L.; PARENT, L.; TREMBLAY, N. Critical Compositional Nutrient Indexes for Sweet Corn at Early Growth Stage. *Agronomy Journal*, v.93, p.809-814, 2001a.
- LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. Effect of population size and yield level in selection of diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) norms. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.15, p.997-1006, 1984.
- MACEDO, F.G. **Propriedades químicas de um Latossolo tratado com lodo de esgoto e efeitos na cultura do milho**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.
- MARRON, N. Agronomic and environmental effects of land application of residues in short-rotation tree plantations: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v.81, p.378–400, 2015.

MORETTI, S.M.L.; BERTONCINI, E.I.; ABREU JUNIOR, C.H. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em Nitossolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1796-1805, 2015.

NASCIMENTO, A.L.; SAMPAIO, R.A.; FERNANDES, L.A.; ZUBA JUNIO, G.R.; CARNEIRO, J.P.; RODRIGUES, M.N.; ALBUQUERQUE, H.C. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge stabilized by different processes. **Revista Ceres**, v.60, p.683-689, 2015.

NOGUEIRA, T.A.R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU-JUNIOR, C.H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.168-77, 2013.

OLIVEIRA, L.R. **Metais pesados e atividade enzimática em Latossolos tratados como lodo de esgoto e cultivado com milho**. 2008. 108 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.

PAIVA, H.N.; CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O. Efeito da aplicação de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.). **Ciência Florestal**, v.11, p.153-162, 2001.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J.O. Influência da aplicação de doses crescentes de chumbo sobre o teor e conteúdo de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.). **Scientia Forestalis**, v.61, p.40-48, 2002.

PARENT, L.E.; DAFIR, M. A theoretical concept of Compositional Nutrient Diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, p.239-242, 1992.

PARENT, L.E. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, p.321-334, 2011.

PARTELLI, F.L.; VIEIRA, H.D.; MONNERAT, P.H.; VIANA, A.P. Estabelecimento de normas DRIS em cafeeiro conilon orgânico ou convencional no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.443-451, 2006.

QUINTANA, N.R.G.; CARMO, M.S.; MELO, W.J. Viabilidade econômica do uso de lodo de esgoto na agricultura, estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v.39, p.31-36, 2009.

REIS JÚNIOR, R.A.; MONNERAT, P.H. Norms establishment of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for nutritional diagnosis of sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.277-282, 2003.

RODIGHERI, H.R.; SILVA, H.D.; TUSSOLINI, E.L. **Indicadores de custos, produtividade e renda de plantios de eucaliptos para energia na região de Guarapuava, PR**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2007. 7 p. (Comunicado Técnico, 179).

ROS, C.O.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.257-261, 1993.

SAITO, M.L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2007. 35 p. (Documentos, 64).

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; BACKES, C.; HELIODORO, J.C.A.; RONCHI, H.S.; TANGANELLI, K.M.; CARVALHO, N.C.; OLIVEIRA, F.C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: Efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1637-1645, 2012.

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; OTERO, X.L.; VAZQUEZ, F.M.; BOGIANI, J.C.; OLIVEIRA, F.C.; GAVA, J.L.; CIOL, M.A.; LITTKKE, K.M.; HARRISON, R.B. The impact of biosolid application on soil and native plants in a degraded Brazilian Atlantic rainforest soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.227, 2016. DOI: 10.1007/s11270-015-2689-7.

SGARBI, F. **Produtividade do *Eucalyptus* sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do estado de São Paulo**. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, P.; POGGIANI, H.M.; LACLAU, J.P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, 2011. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/710614>.

SILVEIRA, R.L.V.A.; MUNIZ, M.R.A.; SGARBI, F.; HIGACHI, E.N. **Seja doutor do seu eucalipto**. Piracicaba, SP. 2001. p.1-32. (Arquivo do Agrônomo, 12).

TEZOTTO, T.; FAVARIN, J.R.; AZEVEDO, R.A.; ALLEONI, L.R.F.; MAZZAFERA, P. Coffee is highly tolerant to cadmium, nickel and zinc: Plant and soil nutritional status, metal distribution and bean yield. **Field Crop Research**, v.125, p.25-34, 2012.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **Advances in Soil Science**, v.6, p.149-188, 1987.

XUE, J.; KIMBERLEY, M.O.; ROSS, C.; GIELEN, G.; TREMBLAY, L.A.; CHAMPEAU, O.; HORSWELL, J.; WANG, H. Ecological impacts of long-term application of biosolids to a radiata pine plantation. **Science of the Total Environment**, v.530, p.233-240, 2015.

2 PRODUTIVIDADE, NUTRIÇÃO MINERAL E ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM *Eucalyptus* MANEJADO COM DIFERENTES ADUBAÇÕES COM LODO DE ESGOTO CLASSE B

Resumo

A aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais apresenta grande potencial de destinação desse subproduto. No entanto, a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) em sua composição pode inviabilizar ou limitar seu uso em áreas cultivadas. Assim, objetivou-se com esse trabalho avaliar a produtividade de madeira e os teores de nutrientes e EPTs em diferentes idades de um plantio de *Eucalyptus urograndis* com diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto. O experimento foi instalado em 2015 em delineamento em blocos casualizados, com 10 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos consistiram em: i) controle; ii) dois tratamentos com dois níveis de fertilização mineral; iii) e sete tratamentos com aplicação de lodo de esgoto, com ou sem a complementação com P e/ou B. Os inventários e amostragem de folhas para avaliação do estado nutricional das plantas foram realizados aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio. Os tratamentos com aplicação de lodo de esgoto a fornecer 100% da recomendação de N, complementado com 66% da recomendação de P, com ou sem aplicação de B, atingiu produtividade em incremento médio anual de 34, 57, 56 e 44 m³ ha⁻¹ por ano aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio de *Eucalyptus*, respectivamente. Esses valores foram semelhantes aos observados nos tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais. A aplicação de B, complementando a aplicação de lodo de esgoto, é indicado como uma prática de manejo de adubação florestal com lodo de esgoto, no entanto, recomenda-se o estudo de doses para essa prática melhor manejo da adubação e nutrição da planta. No geral, o uso de lodo de esgoto como fonte de nutrientes também não alterou o teor de nutrientes e EPTs nas folhas de *Eucalyptus* em comparação ao uso de fertilizantes minerais, evidenciando seu potencial como fertilizante orgânico para a cultura do *Eucalyptus*, com baixo risco de contaminação por EPTs.

Palavras-chave: fertilizante orgânico, manejo de adubação, manejo florestal, metais pesados, nutrição florestal.

Abstract

The application of sewage sludge in agricultural and forestry areas has great potential for the destination of this by-product. However, the presence of potentially toxic elements (PTEs) in its composition can prevent or limit its use in cultivated areas. Thus, the objective of this work was to evaluate wood productivity and nutrient and PTEs contents at different ages of a *Eucalyptus urograndis* plantation with different managements of fertilization with sewage sludge. The experiment was installed in 2015 in a randomized block design, with ten treatments and four replications. The treatments consisted of: i) control; ii) two treatments with two levels of mineral fertilization; iii) and seven treatments with the application of sewage sludge, with or without supplementation with P and/or B. The inventories and sampling of leaves to assess the nutritional status of the plants were carried out at 22, 44, 54, and 76 months after planting.

Treatments with application of sewage sludge to provide 100% of the N recommendation, complemented with 66% of the P recommendation, with or without application of B, reached productivity in an average annual increment of 34, 57, 56, and 44 m³ ha⁻¹ per year at 22, 44, 54, and 76 months after planting *Eucalyptus*, respectively. These values were similar to those observed in treatments with mineral fertilizer application. The application of B, complementing the application of sewage sludge, is indicated as a management practice of forest fertilization with sewage sludge, however, it is recommended to study doses for this practice better management of fertilization and plant nutrition. In general, the use of sewage sludge as a source of nutrients also did not change the content of nutrients and PTEs in *Eucalyptus* leaves compared to the use of mineral fertilizers, evidencing its potential as an organic fertilizer for the *Eucalyptus* crop, with low risk of contamination by PTEs.

Keywords: fertilizer management, forest management, forest nutrition, heavy metals, organic fertilizer.

2.1 Introdução

O setor florestal apresenta alta relevância para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, sendo responsável por uma parcela significativa do produto interno bruto, chegando a R\$ 116,6 bilhões, com acréscimo de 10,2% no período de 2010 a 2020 (IBA, 2021). Nesse contexto, o *Eucalyptus* é uma das culturas comerciais mais difundidas e utilizadas no setor, abrangendo cerca de 73% de toda área de florestas plantadas no Brasil e em expansão. Alguns fatores contribuem para isso, como o rápido crescimento, alta produtividade e expansão de empresas dos segmentos de madeira, papel e celulose.

Normalmente, o plantio comercial de *Eucalyptus* é realizado em solos de baixa fertilidade natural (Sgarbi, 2002; Silva et al. 2011), onde não é possível o cultivo de modo rentável da cultura sem a adição de fertilizantes (Fernandez et al., 2000). O plantio de *Eucalyptus* apresenta elevada mobilização e exportação de nutrientes em função do seu rápido crescimento. Dessa forma, há alto custo no uso de fertilizantes, fazendo com que a adubação represente cerca de 40% dos custos (Rodigheri et al., 2007). Assim, a sustentabilidade do sistema, a curto e longo prazo, está condicionada ao monitoramento nutricional e à utilização de fertilizantes (Silveira et al., 2001). Torna-se necessário, portanto, a busca por adubos alternativos que melhorem a relação custo-benefício de um plantio de *Eucalyptus*. Assim, o potencial do uso de lodo de esgoto em plantações florestais é muito grande (Abreu-Junior et al., 2017), além de que, os produtos dessas culturas não são voltados para alimentação humana ou animal (Silva et al. 2011).

Por conter matéria orgânica e elementos essenciais às plantas, como nitrogênio, fósforo e micronutrientes (Nascimento et al., 2020), o lodo de esgoto pode substituir parcialmente ou totalmente o uso de fertilizantes minerais em solos agrícolas e florestais. O lodo de esgoto pode proporcionar inúmeros benefícios ao solo, tais como a elevação dos valores de pH em solos ácidos, do teor de C orgânico e da CTC do solo (Albuquerque et al., 2015; Bonini et al., 2015; Cavalcanti et al., 2015), além de melhorias nas propriedades físicas do solo (Sampaio et al., 2012) e maior custo-benefício em comparação aos fertilizantes minerais (Quintana et al., 2009).

Mesmo com essas vantagens, a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no lodo de esgoto, como As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb e Se, pode inviabilizar ou restringir seu uso na agricultura e silvicultura. Na planta, embora cada elemento atue de forma diferenciada, os sintomas visuais dos efeitos dos EPTs são: redução do crescimento, clorose e atrofia foliar (Cunha et al., 2008). Alguns estudos indicam a influência destes elementos, sob a nutrição de plantas, entretanto, os trabalhos ainda são incipientes e contraditórios (Tezotto et al., 2012).

Devido a isso, atualmente, a definição de critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodo de esgoto no Brasil, é amparada pela Resolução CONAMA nº 498 (Brasil, 2020). Nesta resolução é preconizado que a dose de aplicação de lodo deve ser realizada de acordo com o critério do N, ou seja, a necessidade de N pela cultura e o teor e mineralização de N do lodo. No entanto, há restrições no uso do lodo quanto ao seu teor máximo de EPTs e acúmulo máximo aportado desses elementos ao solo. Devido a essas limitações e uma vez que, no geral, os produtos de plantações florestais não são voltados para alimentação humana ou animal (Silva et al., 2011), há grande potencial de destinação do lodo de esgoto em áreas de plantios florestais (Abreu-Junior et al., 2017),

Dessa forma, a hipótese deste trabalho é que a aplicação do lodo de esgoto complementado com fertilizantes minerais em plantio de *Eucalyptus* aumenta a produtividade de madeira, melhora o estado nutricional da cultura e não aumenta os teores dos EPTs nas folhas de *Eucalyptus*. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade de madeira e os teores de nutrientes e EPTs em diferentes idades de um plantio de *Eucalyptus* com diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área experimental

O experimento foi instalado em fevereiro de 2015, ocupando área total de 2,7 ha em plantio comercial de *Eucalyptus* no município de Boa Esperança do Sul, SP (21°59'33" S e 48°23'27" O), à uma altitude de 516 metros. A área experimental foi cultivada comercialmente com *Eucalyptus* pelos últimos 40 anos e nunca houve aplicação de lodo de esgoto.

O clima da região é classificado como Cwa – zona subtropical úmida com verão quente e inverno seco, de acordo com Köppen, com precipitação média anual de 1074 mm e temperatura média fria de 17,5 °C e quente de 30,1 °C (Figura 2.1). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd) (Embrapa, 1999). A análise química foi realizada de acordo com método descrito em Raij et al. (2001) e análise granulométrica pelo método da pipeta (Camargo et al., 1986) (Tabela 2.1).

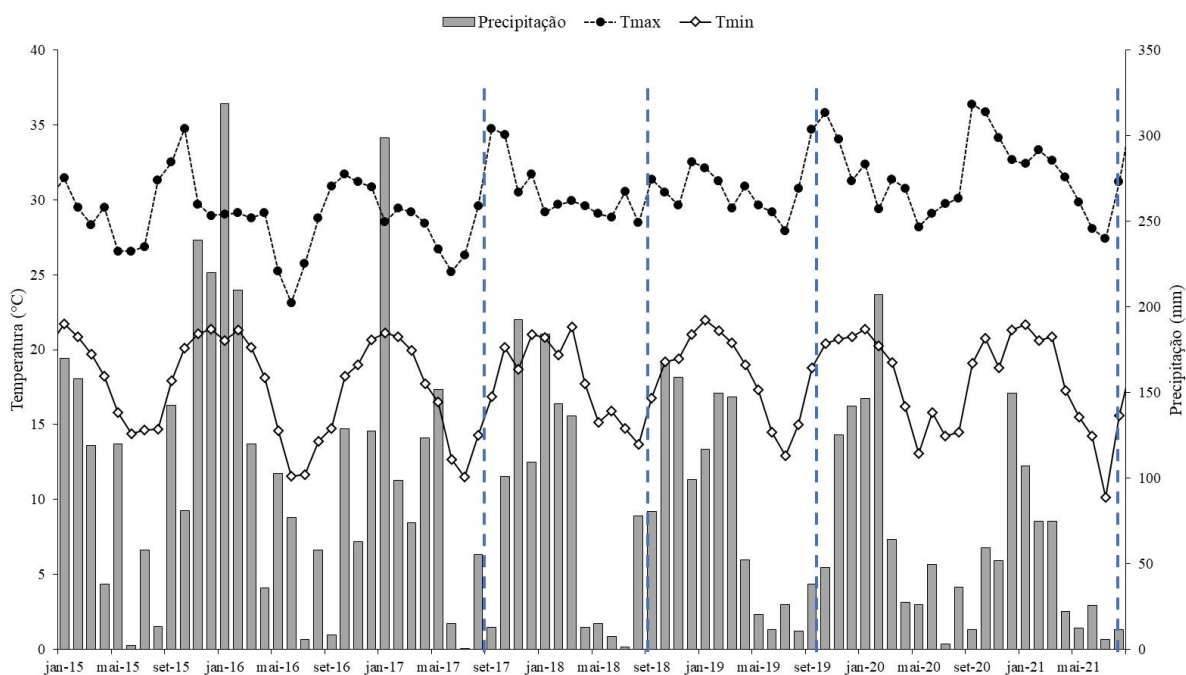


Figura 2.1. Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) no município de Boa Esperança do Sul-SP. Linhas verticais e tracejadas representam as épocas de amostragem e inventário aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio.

Tabela 2.1. Caracterização química¹ e física² do solo antes da instalação do experimento.

Atributos	Unit	Camada (cm)			
		0-5	5-10	10-20	20-40
pH _(CaCl₂)	-	5,3	5,4	5,7	4,9
Matéria Orgânica	g dm ⁻³	14	10	7	3
P _{resina}	mg dm ⁻³	7	6	3	2
K	mmol dm ⁻³	0,3	0,3	0,5	0,4
Ca ⁺²	mmol dm ⁻³	23	18	16	9
Mg ⁺²	mmol dm ⁻³	2	2	2	1
Al ⁺³	mmol dm ⁻³	0,0	0,0	0,0	0,5
H+Al	mmol dm ⁻³	20	19	15	18
S-SO ₄	mg dm ⁻³	5	5	2	5
Capacidade de troca de cátions	mmol dm ⁻³	46	40	34	29
Saturação por bases	%	56	51	54	38
B	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,2
Cu	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,3
Fe	mg dm ⁻³	32	28	35	28
Mn	mg dm ⁻³	2,0	1,0	2,0	0,7
Zn	mg dm ⁻³	0,6	0,2	0,6	0,8
Areia (> 0,05 mm)	g kg ⁻¹	900	900	900	900
Silte (> 0,002 and < 0,05 mm)	g kg ⁻¹	10	10	20	20
Argila (< 0,002 mm)	g kg ⁻¹	90	90	80	80

¹Raij et al. (2001) e ²Camargo et al. (1986).

2.2.2 Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado foi gerado na ETE de Jundiaí, SP, onde o esgoto passa por um sistema de lagoas aeradas de mistura completa e lagoas de decantação, sendo o desaguamento feito com floculação à base de polímero catiônico, seguido de centrifugação. Na Tabela 2.2 são apresentadas a composição química desse material, utilizando-se a metodologia proposta pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007).

Tabela 2.2. Caracterização física e química do lodo de esgoto proveniente da ETE Jundiaí

Atributos	Lodo de esgoto	Atributos	Lodo de esgoto
pH-H ₂ O	6,8		----- mg kg ⁻¹ -----
	----- % -----	B	1,0
Umidade	62	As	3,3 (41) ¹
Sólidos voláteis	49	Ba	629 (1.300)
Cinzas	51	Cd	2,4 (39)
	----- g kg ⁻¹ -----	Cu	308 (1.500)
Carbono orgânico	166	Cr	61 (1.000)
N _(total)	22	Hg	< 0,05 ² (17)
P _(total)	30	Mo	8,0 (50)
K	1,7	Ni	31 (420)
Na	1,8	Pb	45 (300)
S	24	Se	< 0,05 ² (100)
Ca	21	Zn	667 (2.800)
Mg	5,0		

Determinação de EPT no lodo de esgoto, segundo método 3051A (USEPA, 2007). ¹Limites estabelecidos para o uso agrônomico do lodo de esgoto, pela Resolução 498 do CONAMA (Brasil, 2020). ²Não detectado.

2.2.3 Experimento de campo

O preparo do solo ocorreu em janeiro de 2015, com subsolagem na profundidade de 0,4 m entre as linhas do plantio anterior, onde as mudas de *Eucalyptus* foram plantadas. Antes do plantio, aplicou-se 1,8 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 80%) visando aporte de Ca e Mg ao solo. O material genético utilizado no experimento foi um híbrido oriundo do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*). As mudas foram produzidas via propagação vegetativa para clonagem. O plantio foi realizado de forma manual em fevereiro de 2015, com espaçamento de 3 x 2,25 m, totalizando 1.481 árvores por hectare.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso com dez tratamentos e quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. Cada parcela foi constituída por 100 plantas (10 x 10 plantas), sendo as 36 plantas centrais correspondentes a área útil e as demais 64 plantas da área de bordadura. Os tratamentos consistiram em um controle (sem adubação); dois tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais em dosagens diferentes; e sete tratamentos com aplicação de lodo de esgoto. A fertilização mineral 1 (FM1) é uma recomendação técnica utilizada internamente pela Suzano S.A. A fertilização mineral 2 (FM2) é a recomendação oficial do Estado de São Paulo (Gonçalves et al., 1997). O detalhamento da quantidade de nutrientes aplicado por tratamento encontra-se na Tabela 2.3.

Os fertilizantes minerais foram aplicados no sulco de plantio e as adubações de cobertura foram aplicados em meia coroa ao redor da muda, em dosagens apresentadas na Tabela 2.3. A dosagem de lodo de esgoto a ser aplicada foi calculada para que tivesse o equivalente à 50, 100 e 150% da recomendação técnica 1 de N (FM1), ou seja, 192 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a 14,5; 29 e 43,5 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente, em base seca. A taxa de aplicação do lodo de esgoto foi com base no critério do N, conforme descrito na Resolução no 375 (Brasil, 2006). O lodo de esgoto foi distribuído superficialmente no solo em uma faixa de 0,60 m de largura à 0,20 m de distância do sulco de plantio, sete meses após o plantio das mudas (setembro de 2015). Todos os demais tratamentos silviculturais (controle de plantas espontâneas) seguiram o padrão adotado pela empresa em seus plantios comerciais.

Tabela 2.3. Quantidade de nutrientes aplicado por tratamento pelos fertilizantes minerais e lodo de esgoto (LE). Valores entre parênteses representam os nutrientes aplicados pelo LE.

Tratamentos	N	P	K	B	Zn	Cu
----- kg ha ⁻¹ -----						
Controle (C)	0	0	0	0	0	0
Fertilização Mineral 1 (FM1)	192	26	137	6,5	2,8	2,8
Plantio	30	26	25	1,5	1,5	1,5
Fertilização 1 ^{3/}	45	0	112	1,8	1,3	1,3
Fertilização 2 ^{4/}	54	0	0	1,5	0	0
Fertilização 3 ^{5/}	63	0	0	1,7	0	0
Fertilização Mineral 2 (FM2)	60	17,5	84	4,2	1,8	1,8
Plantio	20	17,5	17	1,0	1,0	1,0
Fertilização 1 ^{3/}	27	0	67	1,1	0,8	0,8
Fertilization 2 ^{4/}	16	0	0	2,1	0	0
Lodo (50%)^{2/} + P (83%) - B + K (L1P1)	96 ^{6/}	22	137	0	0	0
	(319)	(435)	(290)	(0,015)	(9,7)	(4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (50%)^{2/} + P (83%) + B + K (L1P1B)	96 ^{6/}	22	137	6,5	0	0
	(319)	(435)	(290)	(0,015)	(9,7)	(4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%)^{2/} + P (66%) - B + K (L2P2)	192 ^{6/}	17,5	137	0	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9,0)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (100%)^{2/} + P (66%) + B + K (L2P2B)	192 ^{6/}	17,5	137	6,5	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%)^{2/} - P + B + K (L2B)	192 ^{6/}	0	137	6,5	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	19,3	9
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (150%)^{2/} - P - B + K (L3)	288 ^{6/}	0	137	0	0	0
	(957)	(1.305)	(870)	(0,045)	(29)	(13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (150%)^{2/} - P + B + K (L3B)	288 ^{6/}	0	137	6,5	0	0
	(957)	(1.305)	(870)	(0,045)	(29)	(13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0

^{1/} Fertilização de plantio (superfosfato triplo, KCl e ulexita) em 12/02/2015. ^{2/} Aplicação de lodo de esgoto em 12/09/2015, 207 dias após transplantio, nas doses de 14,5; 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca) correspondendo a 50, 100 e 150% da recomendação de N (192 kg ha⁻¹). ^{3/} Primeira adubação de cobertura realizada em 05/11/2015, 261 dias após transplantio. ^{4/} Segunda adubação de cobertura realizada em 21/12/2015, 307 dias após transplantio. ^{5/} Terceira adubação de cobertura realizada em 02/02/2016, 350 dias após transplantio. ^{6/} Dose de N disponível aplicado pelo lodo de esgoto, considerando taxa de mineralização de N de 30% para lodo de esgoto aeróbio (Brasil, 2006).

2.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal

Em setembro de 2017 (22 meses após plantio), setembro de 2018 (44 meses após plantio), setembro de 2019 (54 meses após plantio) e em julho de 2021 (76 meses após plantio) foi mensurada a circunferência a altura do peito (CAP – 1,3 m) e altura (H) de todas as árvores das parcelas úteis do experimento. Isso foi realizado para se estimar a produtividade de volume de madeira, utilizando o modelo logarítmico de Schumacher e Hall (1933), ajustada com inventário de biomassa realizado aos 22 meses após o plantio, e posterior cálculo do incremento médio anual (IMA).

O CAP medido também foi utilizado para selecionar as árvores para desbaste e coleta das folhas para diagnose nutricional e EPTs. As árvores foram selecionadas aleatoriamente dentro do intervalo de $\pm 5\%$ do CAP mediano, sendo utilizado uma árvore por parcela, exceto aos 76 meses após o plantio, quando foi desbastada duas árvores por parcela. Após o desbaste, foram coletadas amostras de folhas dos quatro pontos cardiais no terço superior da copa das árvores, conforme recomendação de Malavolta et al. (1997) e Raij et al. (1997).

2.2.5 Análise química do material vegetal

No laboratório, as folhas coletadas foram lavadas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante, moídas em moinho de facas tipo Willey e acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificados, até momento da análise. As amostras foram digeridas conforme procedimento descrito por Araújo et al. (2002). Pesou-se 250 mg de material vegetal, que foi digerido em solução com 7,5 mL de HNO_3 3,11 mol L^{-1} e 2,5 mL de H_2O_2 30% (v/v), em sistema fechado de micro-ondas. Os teores dos elementos essenciais, exceto o nitrogênio, e potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado, utilizando um ICP-MS Agilent modelo 7500ce. O teor de N foi determinado pelo método Kjeldahl (Malavolta et al., 1997).

2.2.6 Análise estatística

Os dados de incremento médio anual (IMA) do volume do tronco (em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e do teor dos elementos avaliados referentes aos 22, 44, 54 e 76 meses após plantio foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). As análises foram realizadas com auxílio do *software* R (R Core Team, 2019).

2.3 Resultados e Discussão

O incremento médio anual (IMA) aumentou de 32,3 a 54,9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ dos 22 aos 44 meses após plantio e houve leve redução (53,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) aos 54 meses após plantio (Tabela 2.4). O aumento do IMA ocorreu devido a menor competição entre as árvores por luz, água e nutrientes, que ocorre até, aproximadamente, os 36 meses após plantio. Após esse período, ocorre fechamento da copa, maior participação da ciclagem de nutrientes na nutrição e crescimento das árvores e estabilidade do IMA (Ferraz et al., 2016). No entanto, aos 76 meses houve redução acentuada no incremento de madeira, resultado semelhante foi observado por Stape et al. (2010), em plantio de *Eucalyptus* aos 6 anos de idade (72 meses após o plantio). Esse resultado pode ser explicado pelo declínio do crescimento de árvores não dominantes, devido à redução da captação e do uso eficiente da luz, em decorrência do aumento da competição por este recurso com as árvores dominantes (Stape et al., 2010). Além disso, o inventário foi realizado em julho de 2021 (devido à colheita do plantio), época de inverno, com menor temperatura e precipitação, reduzindo o diâmetro das árvores e a estimativa de produtividade (Cardoso et al., 2022).

Tabela 2.4. Incremento médio anual (IMA - m³ ha⁻¹ ano⁻¹; n=4) de *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B após 22, 44, 54 e 76 meses após plantio

Trat.	22 meses	44 meses	54 meses	76 meses
C	30,4 d	51,2 c	49,1 b	37,1 c
FM1	33,1 abc	54,3 abc	55,2 ab	43,5 ab
FM2	33,8 ab	55,0 ab	54,1 ab	41,9 ab
L1P1	32,6 bc	55,4 ab	54,4 ab	42,2 ab
L1P1B	31,6 cd	54,5 abc	51,4 ab	39,9 bc
L2B	31,8 cd	55,4 ab	53,2 ab	42,6 ab
L2P2	34,5 a	57,0 a	55,8 a	44,2 a
L2P2B	33,0 abc	57,3 a	56,0 a	44,0 a
L3	30,7 d	52,9 bc	50,5 ab	41,0 ab
L3B	31,6 cd	56,0 ab	55,8 a	42,1 ab
Média	32,3	54,9	53,6	41,9
CV (%)	3,47	4,02	5,00	5,53

Trat. – Tratamentos; C – Controle; FM1 – Fertilização mineral 1; FM2 – Fertilização mineral 2; L1P1 – Lodo (50%) + P(83%) - B + K; L1P1B – Lodo (50%) + P(83%) + B + K; L2P2 – Lodo (100%) + P (66%) - B + K; L2P2B – Lodo (100%) + P (66%) + B + K; L2B – Lodo (100%) - P + B + K; L3 – Lodo (150%) - P - B + K; L3B – Lodo (150%) - P + B + K. Médias seguidas de letras iguais na coluna não apresentaram diferença estatística significativa pelo teste de Duncan (p<0,05).

A utilização de lodo de esgoto na dose correspondente a 100% da necessidade de N suplementado com 66% da recomendação de P, com ou sem B (L2P2B e L2P2), propiciou o maior IMA, em comparação ao tratamento controle, e não diferiu daqueles que receberam

fertilização mineral. Ainda assim, esses tratamentos apresentaram IMA semelhante aos com fertilização mineral (FM1 e FM2). Os valores de IMA obtidos nas diferentes idades avaliadas, exceto aos 22 meses após plantio, são superiores à média brasileira ($36,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) registrada em 2020 (IBÁ, 2021). Estes valores são semelhantes ao reportado na literatura para plantios com fertilização para alta produtividade (Stape et al., 2010).

Não houve diferença estatística entre os tratamentos para os teores de macronutrientes na folha diagnose de *Eucalyptus*, exceto para P aos 22 meses após plantio e para K e Ca aos 44 meses após plantio, respectivamente (Tabela 2.5). Para o P, o tratamento L2P2 apresentou teor de $1,58 \text{ g kg}^{-1}$, estatisticamente superior aos demais tratamentos aos 22 meses após plantio. Obteve maior teor de K com o uso de lodo e fertilizantes em comparação ao controle após 44 meses do plantio. Nessa idade do plantio, o teor de K também apresentou correlação positiva ($r = 0,56$; $p < 0,05$) com o IMA do *Eucalyptus*. Já para o Ca, os tratamentos C e FM2 apresentaram maiores teores do nutriente que os tratamentos com maiores doses de lodo de esgoto (L2B, L2P2, L2P2B e L3).

Baseando-se nos valores adequados de macronutrientes oficiais do estado de São Paulo (Gonçalves et al., 2022), no geral, os teores de N ($19,7\text{-}21,4 \text{ g kg}^{-1}$) encontraram-se dentro da faixa adequada de $20\text{-}24 \text{ g kg}^{-1}$, exceto aos 76 meses após o plantio ($14,5 \text{ g kg}^{-1}$; Tabela 2.5). Já os teores de P encontraram-se em excesso nos tratamentos L2P2 ($1,58 \text{ g kg}^{-1}$) e L3B ($1,50 \text{ g kg}^{-1}$) aos 22 meses após o plantio e dentro da faixa adequada de $0,9\text{-}1,4 \text{ g kg}^{-1}$ para os demais tratamentos e idades ($1,01\text{-}1,43 \text{ g kg}^{-1}$). Os teores de K encontraram-se em excesso nos tratamentos com maiores doses de lodo de esgoto (L2P2, L2P2B e L3B - $10,0 \text{ g kg}^{-1}$) e fertilizante mineral (FM2 - $9,7 \text{ g kg}^{-1}$) aos 44 meses após o plantio e dentro da faixa adequada de $7,0\text{-}9,5 \text{ g kg}^{-1}$ para as demais idades do plantio ($7,8\text{-}9,3 \text{ g kg}^{-1}$). Por sua vez, os teores de Ca ($9,4\text{-}13,9 \text{ g kg}^{-1}$) e S ($1,06\text{-}1,53 \text{ g kg}^{-1}$) encontraram-se em excesso ou em consumo de luxo nos quatro períodos de avaliação, considerando as faixas adequadas de $5,5\text{-}8,0$ e $0,6\text{-}0,7 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente. Por fim, os teores de Mg encontravam-se abaixo da faixa adequada de $2,5\text{-}4,0 \text{ g kg}^{-1}$ nos quatro períodos de avaliação ($1,99\text{-}2,23 \text{ g kg}^{-1}$).

A constatação de diferença estatística entre os manejos de adubação apenas aos 22 meses para os teores de P pode ser explicado pela maior influência da ciclagem de nutrientes e menor efeito da adubação após os 36 meses de idade, em decorrência do fechamento da copa das árvores (Ferraz et al., 2016). Fator este que também pode explicar a falta de diferença estatística entre os manejos de adubação para os teores de N. Já para os demais macronutrientes,

não houve diferenças estatísticas entre os manejos de adubação devido aplicação de uma dose em toda área experimental, exceto para K no controle, onde não houve aplicação (Tabela 2.3).

Tabela 2.5. Teor de macronutrientes (g kg^{-1}) em folha de diagnose de *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B após 22, 44, 54 e 76 meses após plantio ($n=4$)

Trat.	22 meses						44 meses					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
C	19,5 a	1,44 bc	7,6 a	11,2 a	2,01 a	1,03 a	18,1 a	1,30 a	7,3 b	17,3 a	1,83 a	0,95 a
FM1	21,0 a	1,45 bc	7,4 a	10,2 a	2,14 a	1,12 a	22,2 a	1,24 a	8,8 a	14,1 ab	1,98 a	1,07 a
FM2	19,5 a	1,34 c	7,7 a	11,4 a	2,09 a	1,00 a	19,1 a	1,39 a	9,7 a	17,3 a	1,84 a	0,98 a
L1P1	19,7 a	1,43 bc	8,0 a	11,4 a	2,24 a	1,07 a	20,3 a	1,34 a	8,9 a	13,4 ab	2,15 a	1,09 a
L1P1B	20,6 a	1,37 bc	8,2 a	10,8 a	2,14 a	1,10 a	20,4 a	1,32 a	9,6 a	13,3 ab	1,88 a	1,04 a
L2B	20,7 a	1,41 bc	7,9 a	10,1 a	2,16 a	1,06 a	22,0 a	1,24 a	9,5 a	11,3 b	2,04 a	1,12 a
L2P2	19,0 a	1,58 a	8,0 a	10,9 a	2,23 a	1,06 a	20,6 a	1,30 a	10,0 a	12,6 b	1,88 a	1,09 a
L2P2B	19,6 a	1,40 bc	8,1 a	10,4 a	1,98 a	1,04 a	21,2 a	1,30 a	10,1 a	12,2 b	2,04 a	1,11 a
L3	19,2 a	1,41 bc	7,5 a	11,0 a	2,11 a	1,03 a	23,5 a	1,37 a	10,0 a	12,3 b	2,01 a	1,23 a
L3B	18,6 a	1,50 ab	7,7 a	10,2 a	2,06 a	1,04 a	19,7 a	1,40 a	9,5	15,4 ab	2,21 a	1,06 a
Média	19,7	1,43	7,8	10,8	2,12	1,06	20,7	1,32	9,3	13,9	1,99	1,07
CV (%)	14,1	5,7	12,4	13,6	12,7	15,2	14,6	10,4	9,1	19,5	12,9	15,5

Trat.	54 meses						76 meses					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
C	21,5 a	1,37 a	8,5 a	9,4 a	1,95 a	1,49 a	14,4 a	0,98 a	8,3 a	11,8 a	1,96 a	1,02 a
FM1	21,7 a	1,34 a	9,2 a	9,6 a	1,97 a	1,50 a	15,1 a	1,06 a	9,5 a	11,5 a	2,25 a	1,12 a
FM2	20,6 a	1,34 a	7,9 a	9,1 a	1,89 a	1,52 a	13,9 a	1,01 a	9,2 a	11,4 a	2,08 a	1,02 a
L1P1	20,6 a	1,41 a	8,9 a	9,6 a	1,93 a	1,55 a	14,6 a	1,05 a	9,4 a	10,1 a	2,52 a	1,10 a
L1P1B	21,3 a	1,44 a	9,0 a	10,0 a	1,96 a	1,56 a	14,4 a	1,01 a	9,3 a	8,4 a	2,38 a	1,12 a
L2B	20,8 a	1,43 a	9,0 a	8,9 a	2,03 a	1,62 a	14,8 a	1,07 a	9,2 a	11,6 a	2,41 a	1,13 a
L2P2	21,7 a	1,40 a	9,4 a	9,5 a	2,02 a	1,51 a	14,8 a	1,02 a	8,8 a	10,2 a	2,21 a	1,08 a
L2P2B	23,0 a	1,39 a	9,8 a	9,8 a	2,00 a	1,51 a	13,8 a	1,08 a	9,8 a	10,8 a	2,15 a	1,08 a
L3	21,0 a	1,30 a	9,2 a	9,9 a	2,19 a	1,44 a	15,1 a	1,08 a	9,0 a	11,5 a	2,12 a	1,07 a
L3B	21,5 a	1,43 a	8,5 a	8,8 a	1,94 a	1,62 a	14,3 a	1,02 a	9,1 a	11,7 a	2,25 a	1,08 a
Média	21,4	1,39	9,0	9,4	1,99	1,53	14,5	1,04	9,2	10,9	2,23	1,08
CV (%)	7,3	6,6	11,7	12,5	9,4	7,7	7,1	11,3	8,3	13,6	11,2	6,0

Trat. – Tratamentos; C – Controle; FM1 – Fertilização mineral 1; FM2 – Fertilização mineral 2; L1P1 – Lodo (50%) + P(83%) - B + K; L1P1B – Lodo (50%) + P(83%) + B + K; L2P2 – Lodo (100%) + P (66%) - B + K; L2P2B – Lodo (100%) + P (66%) + B + K; L2B – Lodo (100%) - P + B + K; L3 – Lodo (150%) - P - B + K; L3B – Lodo (150%) - P + B + K. Médias seguidas de letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

De modo geral, os teores de Cu ($3,0\text{-}4,5 \text{ mg kg}^{-1}$) e Zn ($15,4\text{-}16,2 \text{ mg kg}^{-1}$) encontraram-se dentro da faixa adequada de $3,0\text{-}5,0$ e $15\text{-}25 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente, exceto aos 44 meses após o plantio, onde houve menores teores desses elementos na planta ($2,8$ e $13,4 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) em situação de deficiência (Tabela 2.6), segundo os valores propostos por Gonçalves et al. (2022). Os teores de Fe ($123\text{-}142 \text{ mg kg}^{-1}$) encontraram-se dentro da faixa adequada de $75\text{-}200 \text{ mg kg}^{-1}$ nos quatro períodos de avaliação. Para o Mn, os teores

encontraram-se em excesso ou consumo de luxo ($281-291 \text{ mg kg}^{-1}$) aos 44 e 76 meses após o plantio e adequados ($222-249 \text{ mg kg}^{-1}$) aos 22 e 54 meses após o plantio, considerando a faixa adequada de $100-250 \text{ mg kg}^{-1}$.

Tabela 2.6. Teor de micronutrientes (mg kg⁻¹) em folha de diagnose de *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B após 22, 44, 54 e 76 meses após plantio (n=4)

Trat.	22 meses						44 meses					
	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
C	59 b	2,9 a	145 a	210 a	0,06 a	14,1 a	37 c	2,7 a	145 a	344 a	0,04 de	11,4 a
FM1	63 ab	3,1 a	104 a	324 a	0,03 a	15,6 a	58 b	2,6 a	104 a	259 a	0,03 e	12,7 a
FM2	70 ab	3,0 a	127 a	249 a	0,07 a	15,7 a	73 a	2,4 a	127 a	331 a	0,03 e	12,5 a
L1P1	49 b	3,1 a	122 a	247 a	0,07 a	15,9 a	41 c	3,0 a	122 a	266 a	0,06 bcde	14,2 a
L1P1B	73 ab	3,0 a	115 a	279 a	0,06 a	16,5 a	62 ab	2,8 a	115 a	247 a	0,05 de	12,6 a
L2B	77 ab	3,1 a	142 a	253 a	0,07 a	16,6 a	62 ab	2,7 a	142 a	245 a	0,06 bcd	14,2 a
L2P2	52 b	2,7 a	125 a	209 a	0,07 a	15,2 a	45 c	2,7 a	125 a	272 a	0,05 cde	13,3 a
L2P2B	90 a	2,8 a	125 a	240 a	0,08 a	16,2 a	67 ab	3,0 a	125 a	305 a	0,07 abc	15,0 a
L3	50 b	3,0 a	137 a	231 a	0,11 a	15,2 a	43 c	3,0 a	137 a	248 a	0,08 ab	14,9 a
L3B	89 a	2,9 a	122 a	244 a	0,11 a	15,0 a	65 ab	2,6 a	122 a	296 a	0,09 a	12,7 a
Média	67	3,0	126	249	0,07	15,6	55,3	2,8	126	281	0,06	13,4
CV (%)	26,1	17,9	36,2	21,6	44,4	13,6	16,0	12,2	17,1	26,0	29,7	13,0
Trat.	54 meses						76 meses					
	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
C	24 d	3,9 a	140 a	250 a	0,02 bc	17,0 a	36 d	3,8 a	117 a	302 a	0,05 cd	12,9 c
FM1	38 abc	4,6 a	145 a	244 a	0,01 bc	17,3 a	72 a	4,6 a	131 a	273 a	0,05 d	15,9 ab
FM2	32 cd	4,2 a	144 a	267 a	0,01 c	16,8 a	52 bc	4,7 a	120 a	324 a	0,04 d	13,4 bc
L1P1	29 cd	4,3 a	157 a	199 a	0,01 bc	15,2 bc	45 cd	4,5 a	109 a	299 a	0,10 b	16,5 a
L1P1B	34 bc	4,7 a	150 a	210 a	0,02 bc	15,2 bc	59 b	4,3 a	104 a	219 a	0,14 a	14,9 abc
L2B	43 ab	4,4 a	148 a	206 a	0,02 bc	16,4 ab	55 bc	4,7 a	141 a	312 a	0,02 c	15,6 ab
L2P2	24 d	4,5 a	132 a	195 a	0,02 bc	16,9 a	50 bc	4,5 a	117 a	279 a	0,06 cd	16,5 a
L2P2B	42 ab	4,3 a	133 a	234 a	0,02 bc	15,9 abc	55 bc	4,4 a	118 a	273 a	0,06 cd	15,8 ab
L3	29 cd	4,2 a	132 a	204 a	0,03 a	16,0 abc	40 d	4,4 a	147 a	296 a	0,06 cd	15,8 ab
L3B	46 a	4,0 a	143 a	207 a	0,02 ab	14,9 c	57 b	5,2 a	125 a	332 a	0,06 cd	16,8 a
Média	34	4,3	142	222	0,018	16,2	52	4,5	123	291	0,07	15,4
CV (%)	17,5	12,6	11,2	20,3	34,8	5,5	12,5	13,1	15,8	22,1	15,8	10,2

Trat. – Tratamentos; C – Controle; FM1 – Fertilização mineral 1; FM2 – Fertilização mineral 2; L1P1 – Lodo (50%) + P(83%) - B + K; L1P1B – Lodo (50%) + P(83%) + B + K; L2P2 – Lodo (100%) + P (66%) - B + K; L2P2B – Lodo (100%) + P (66%) + B + K; L2B – Lodo (100%) - P + B + K; L3 – Lodo (150%) - P - B + K; L3B – Lodo (150%) - P + B + K. Médias seguidas de letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa pelo teste de Duncan (p<0,05).

Para o B, geralmente, os teores encontraram-se em excesso aos 22, 44 e 76 meses após o plantio (52-67 mg kg⁻¹), exceto para os tratamentos sem aplicação de B (C-36 mg kg⁻¹; L1P1-43 mg kg⁻¹; L2P2-47 mg kg⁻¹; e L3-41 mg kg⁻¹) aos 44 e 76 meses (Tabela 2.6), em que os teores se encontraram dentro da faixa de 25-50 mg kg⁻¹ (Gonçalves et al., 2022). Ainda, aos 54 meses após o plantio, os teores encontraram-se dentro do adequado (34 mg kg⁻¹), exceto nos tratamentos controle e L2P2, em situação de deficiência (24 mg kg⁻¹).

Houve diferença estatística entre os tratamentos para os teores de B nos quatro períodos de avaliação, para Mo aos 44, 54 e 76 meses e para Zn aos 54 e 76 meses após o plantio (Tabela 2.6). Em relação ao B, os tratamentos com aplicação de B (FM1, FM2, L1P1B, L2B, L2P2B e L3B) apresentaram os maiores teores de B na folha diagnose, proporcionando teores em situação de excesso aos 22, 44 e 76 meses após o plantio e dentro do adequado aos 54 meses após o plantio. O teor de B aos 44 meses após plantio foi positivamente correlacionado ($r = 0,38$; $p < 0,05$) com o IMA de *Eucalyptus*. Estes resultados indicam que a aplicação do lodo juntamente com B é benéfica com o decorrer do cultivo, sendo indicada como uma prática de manejo de adubação florestal (Cardoso et al., 2022). No entanto, devido a situações de excesso nutricional nas diferentes idades avaliadas, pode-se avaliar que é necessário um estudo de doses desse nutriente a fim de complementar a adubação de lodo de esgoto e que este elemento seja disponibilizado de forma adequada à cultura para seu pleno desenvolvimento e produção, levando-se em consideração a dinâmica do elemento no solo, condições climáticas, em especial, disponibilidade hídrica.

Para o Mo, as maiores doses de aplicação de lodo de esgoto (L3 e L3B) proporcionaram maiores teores do elemento na folha diagnose aos 44 e 54 meses após o plantio (Tabela 2.6). Os maiores teores de Zn aos 54 meses após o plantio foram observados nos tratamentos C, FM1, FM2 e L2P2B (Tabela 2.6). Já aos 76 meses após o plantio, os tratamentos L1P1, L2P2 e L3B proporcionaram aumento no teor de Zn na folha diagnose. Em ambos os períodos, os teores de Zn encontravam-se dentro do estabelecido como adequado para a cultura (Gonçalves et al., 2022).

Os teores dos elementos potencialmente tóxicos (Al, As, Ba, Cd, Cr e Pb) em folhas diagnose de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B, aos 22, 44, 54 e 76 meses após plantio são apresentados na Tabela 2.7. Destes elementos, houve diferença estatística entre os tratamentos apenas para os teores de Cd, Cr e Pb aos 54 meses após o plantio e para Cd aos 76 meses após o plantio.

Tabela 2.7. Teor de elementos potencialmente tóxicos (mg kg⁻¹) em folha de diagnose de *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B após 22, 44, 54 e 76 meses após plantio (n=4)

Trat.	22 meses						44 meses					
	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb
C	198 a	0,021 a	10,2 a	0,0027 a	0,16 a	0,11 a	335 a	0,028 a	21,6 a	0,0047 a	0,19 a	0,15 a
FM1	121 a	0,012 a	12,3 a	0,0028 a	0,14 a	0,08 a	360 a	0,027 a	15,8 a	0,0042 a	0,21 a	0,15 a
FM2	171 a	0,009 a	11,6 a	0,0027 a	0,15 a	0,10 a	340 a	0,023 a	22,8 a	0,0045 a	0,20 a	0,15 a
L1P1	158 a	0,010 a	11,3 a	0,0034 a	0,15 a	0,10 a	363 a	0,025 a	16,7 a	0,0050 a	0,21 a	0,16 a
L1P1B	148 a	0,008 a	10,9 a	0,0028 a	0,12 a	0,08 a	364 a	0,025 a	16,9 a	0,0054 a	0,21 a	0,15 a
L2B	189 a	0,014 a	10,8 a	0,0040 a	0,20 a	0,11 a	331 a	0,020 a	12,6 a	0,0055 a	0,20 a	0,14 a
L2P2	161 a	0,011 a	9,4 a	0,0033 a	0,17 a	0,10 a	354 a	0,022 a	16,1 a	0,0061 a	0,20 a	0,16 a
L2P2B	170 a	0,009 a	10,2 a	0,0035 a	0,12 a	0,09 a	309 a	0,020 a	13,1 a	0,0063 a	0,20 a	0,15 a
L3	173 a	0,011 a	10,3 a	0,0043 a	0,16 a	0,11 a	291 a	0,018 a	9,3 a	0,0053 a	0,19 a	0,14 a
L3B	152 a	0,011 a	10,2 a	0,0040 a	0,14 a	0,10 a	358 a	0,022 a	17,5 a	0,0056 a	0,23 a	0,15 a
Média	164	0,012	10,7	0,0034	0,15	0,10	341	0,023	16,2	0,0053	0,20	0,15
CV (%)	45,46	60,78	26,71	29,78	43,2	29,9	19,56	29,23	39,6	33,99	14,7	17,4
Trat.	54 meses						76 meses					
	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb
C	177 a	0,034 a	9,2 a	0,0022 c	0,19 bc	0,07 c	134 a	0,027 a	15,1 a	0,0046 bc	0,21 a	0,08 a
FM1	183 a	0,035 a	8,3 a	0,0029 abc	0,20 abc	0,07 c	177 a	0,034 a	14,0 a	0,0048 abc	0,24 a	0,12 a
FM2	186 a	0,034 a	7,8 a	0,0022 c	0,23 ab	0,08 bc	139 a	0,031 a	13,9 a	0,0038 c	0,21 a	0,08 a
L1P1	206 a	0,037 a	8,0 a	0,0024 c	0,22 ab	0,08 abc	143 a	0,028 a	10,4 a	0,0045 bc	0,20 a	0,11 a
L1P1B	206 a	0,036 a	8,2 a	0,0021 c	0,21 abc	0,08 abc	137 a	0,027 a	9,2 a	0,0039 c	0,20 a	0,08 a
L2B	209 a	0,036 a	8,3 a	0,0041 a	0,23 a	0,09 ab	173 a	0,032 a	14,1 a	0,0055 ab	0,23 a	0,10 a
L2P2	202 a	0,036 a	7,3 a	0,0038 a	0,21 abc	0,09 ab	157 a	0,030 a	12,2 a	0,0044 bc	0,22 a	0,09 a
L2P2B	188 a	0,035 a	7,4 a	0,0022 c	0,20 bc	0,09 a	154 a	0,029 a	12,3 a	0,0040 c	0,25 a	0,09 a
L3	194 a	0,032 a	9,4 a	0,0027 bc	0,18 c	0,08 abc	180 a	0,037 a	12,3 a	0,0057 a	0,26 a	0,10 a
L3B	177 a	0,034 a	5,9 a	0,0024 c	0,21 abc	0,08 abc	168 a	0,034 a	13,4 a	0,0058 a	0,22 a	0,10 a
Média	193	0,035	8,0	0,0027	0,21	0,08	156	0,031	12,7	0,0047	0,22	0,10
CV (%)	10,50	8,8	20,03	30,87	10,1	12,3	18,19	18,39	25,09	15,54	12,8	20,1

Trat. – Tratamentos; C – Controle; FM1 – Fertilização mineral 1; FM2 – Fertilização mineral 2; L1P1 – Lodo (50%) + P(83%) - B + K; L1P1B – Lodo (50%) + P(83%) + B + K; L2P2 – Lodo (100%) + P (66%) - B + K; L2P2B – Lodo (100%) + P (66%) + B + K; L2B – Lodo (100%) - P + B + K; L3 – Lodo (150%) - P - B + K; L3B – Lodo (150%) - P + B + K. Médias seguidas de letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa pelo teste de Duncan (p<0,05).

O maior teor de Cd aos 54 meses após o plantio foi observado para os tratamentos L2B e L2P2, sendo cerca de duas vezes superiores aos tratamentos C, FM2, L1P1, L1P1B, L2P2B, L3 e L3B (Tabela 2.7). Aos 76 meses após o plantio, as maiores doses de lodo de esgoto (L3B e L3) proporcionaram maiores teores de Cd. No entanto, não foi observado correlação entre o teor desse elemento e o IMA do plantio ($r = 0,173$; $p = 0,287$). O teor de Cr aos 54 meses no tratamento L2B foi 33% maior em relação ao tratamento L3, porém estatisticamente iguais aos demais tratamentos. O teor de Pb aos 54 meses foi superior no tratamento L2P2B, com teor igual a $0,094 \text{ mg kg}^{-1}$, sendo 32% maior que os tratamentos C, FM1 e FM2, com correlação positiva com o IMA ($r = 0,34$; $p < 0,05$). Ainda, o teor de Ba foi correlacionado negativamente com o IMA aos 54 meses após o plantio ($r = -0,34$; $p < 0,05$).

Os teores dos elementos potencialmente tóxicos avaliados estão consideravelmente abaixo dos teores toleráveis para plantas apresentadas por Kabata-Pendias (2011), a saber: $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ para As, $0,05\text{-}0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ para Cd, $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$ para Cr e de $0,5\text{-}10 \text{ mg kg}^{-1}$ para Pb. Dessa forma, nossos resultados evidenciam o baixo teor desses elementos no *Eucalyptus*, demonstrando o baixo potencial contaminador do lodo de esgoto. Assim, devido seu grande porte e rápido crescimento, o *Eucalyptus* pode ser considerado uma cultura com potencial fitorremediador (Rasafi et al., 2021), além de seus produtos não serem destinados para alimentação humana e animal. Portanto, a aplicação de lodo de esgoto em plantios *Eucalyptus* pode ser considerado um destino sustentável para esse subproduto.

2.4 Conclusão

A aplicação de lodo de esgoto a fornecer 100% da recomendação de N, complementado com 66% da recomendação de P, com ou sem aplicação de B, proporcionou resultados semelhantes aos tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais quanto a produtividade de madeira e nutrição de *Eucalyptus* nas diferentes idades de avaliação. No entanto, havendo necessidade de estudo de doses de B, complementando a aplicação de lodo de esgoto, para melhor manejo da adubação e nutrição da planta e, conseqüentemente, desenvolvimento e produtividade da cultura. No geral, a aplicação de lodo de esgoto não aumentou os teores de elementos potencialmente tóxicos nas folhas de *Eucalyptus*, evidenciando baixo risco de contaminação por estes elementos na cultura.

Referências

- ABREU-JUNIOR, C.H.; BROSSI, M.J.L.; MONTEIRO, R.T.; CARDOSO, P.H.S.; MANDU, T.S.; NOGUEIRA, T.A.R.; GANGA, A.; FILZMOSE, P.; OLIVEIRA, F.C.; FIRME, L.P.; HE, Z.; CAPRA, G.F. Effects of sewage sludge application on unfertile tropical soils evaluated by multiple approaches: A field experiment in a commercial *Eucalyptus* plantation. **Science of the Total Environment**, v.655, p.1457-1467, 2019.
- ABREU-JUNIOR, C.H.; FIRMA, L.P.; MALDONADO, C.A.B.; MORAES NETO, S.P.; ALVES, M.C.; Muraoka, T.; Boaretto, A.E.; Gava, J.L.; He, Z.; Nogueira, T.A.R.; Capra, G.F. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in *Eucalyptus* plantations. **Journal of Environmental Management**, v.203, p.51-58, 2017.
- ALBUQUERQUE, H.C.; ZUBA JUNIO, G.R.; SAMPAIO, R.A.; FERNANDES, L.A.; ZONTA, E.; BARBOSA, C.F. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.553-559, 2015.
- ARAÚJO, G.C.L.; GONZALEZ, M.H.; FERREIRA, A.G.; NOGUEIRA, A.R.; NÓBREGA, J.A. Effect of acid concentration on closed-vessel microwave-assisted digestion of plant materials. **Spectrochimica Acta Part B**, v.57, p.2121-2132, 2002.
- BONINI, C.S.B.; ALVES, M.C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.388-393, 2015.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução 375**. Brasília, DF, 2006. 31 p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>>. Acesso em: 22 jul. 2017.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução 498**. Brasília, 8p. 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106)
- CARDOSO, P.H.S.; DEBONI NETO, A.; OLIVEIRA, F.C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; GUEDES, F.T.P.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; NOGUEIRA, T.A.R.; CAPRA, G.F.; JANI, A.D.; HE, Z.; ABREU JUNIOR, C.H. Fertilization management with sewage sludge sustains *Eucalyptus* productivity in Cerrado infertile soil. **Forest Ecology and Management**, v.519, 120338, 2022.
- CAVALCANTI, T.F.M.; ZUBA JUNIO, G.R.; SAMPAIO, R.A.; CARNEIRO, J.P.; OLIVEIRA, E.S.A.; RODRIGUES, M.N. Yield of castor bean fertilized with sewage sludge and potassium and magnesium sulphate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.773-779, 2015.
- CUNHA, K.P.V.; NASCIMENTO, C.W.A.; PIMENTEL, R.M.M.; ACCIOLY, A.M.A.; SILVA, A.J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1319-1328, 2008.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Produção e Informação. 412p. 1999.

FERNANDEZ, J.Q.P.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; MORAES, E.J. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rat and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. **Forest Ecology and Management**, 127:93-102, 2000.

FERRAZ, A.V.; MOMENTEL, L.T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth, and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v.47, p.861-876, 2016.

GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JUNIOR, J.C.; ROCHA, J.H.T.; FERRAZ, A.V., GUERRINI, I.A. Plantações florestais e seringueira. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R.M.; RAIJ, B.V. **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 500p, 2022.

GONÇALVES, J.L.M.; RAIJ, B.V.; GONÇALVES, J.C. Florestais in: RAIJ, B.V., CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas e Fundação IAC, (Boletim Técnico, 100), 285p, 1997.

IBA. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBA 2021**. IBA: São Paulo – SP, 2021. 93p. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: Julho de 2022.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**, Fourth Edition CRC Press. 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 319p, 1997.

NASCIMENTO, A.L.; SOUZA, A.J.; OLIVEIRA, F.C.; COSCIONE, A.R.; VIANA, D.G.; REGITANO, J.B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v.258, 120746, 2020.

QUINTANA, N.R.G.; CARMO, M.S.; MELO, W.J. Viabilidade econômica do uso de lodo de esgoto na agricultura, estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v.39, p.31-36, 2009.

RAIJ, B. CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1997. 285p.

RASAFI, T.; PEREIRA, R.; PINTO, G.; GONÇALVES, F.J.M.; HADDIOUI, A.; KSIBI, M.; RÖMBKE, J.; SOUSA, J.P.; MARQUES, C.R. Potential of *Eucalyptus globulus* for the phytoremediation of metals in a Moroccan iron mine soil—a case study. **Environmental Science Pollution Research**, v.28, p.15782–15793, 2021.

RODIGHERI, H.R.; SILVA, H.D.; TUSSOLINI, E.L. **Indicadores de custos, produtividade e renda de plantios de eucaliptos para energia na região de Guarapuava, PR**. Comunicado Técnico, Embrapa Florestas, v.179, p.1-7, 2007.

R Studio Team. **RStudio**: Integrated Development for R. Boston, MA: RStudio, 2016.

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; BACKES, C.; HELIODORO, J.C.A.; RONCHI, H.S.; TANGANELLI, K.M.; CARVALHO, N.C.; OLIVEIRA, F.C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: Efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1637-1645, 2012.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber volume. **Journal of Agriculture Research**, v.47, p.719-734, 1933.

SGARBI, F. **Produtividade do *Eucalyptus* sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do estado de São Paulo**. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, P.; POGGIANI, H.M.; LACLAU, J.P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, 2011. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/710614>.

SILVEIRA, R.L.V.A.; MUNIZ, M.R.A.; SGARBI, F.; HIGACHI, E.N. **Seja doutor do seu eucalipto**. Piracicaba, SP. 2001. p.1-32. (Arquivo do Agrônomo, 12).

STAPE, J.L. et al. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v.259, p.1684-1694, 2010.

TEZOTTO, T.; FAVARIN, J.R.; AZEVEDO, R.A.; ALLEONI, L.R.F.; MAZZAFERA, P. Coffee is highly tolerant to cadmium, nickel and zinc: Plant and soil nutritional status, metal distribution and bean yield. **Field Crop Research**, v.125, p.25-34, 2012.

USEPA. **Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils**. Revision 1. Washington, DC, 2007. 30p.

3 INCLUSÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS FUNÇÕES DRIS PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DE *Eucalyptus* ADUBADO COM LODO DE ESGOTO CLASSE B

Resumo

O uso de ferramentas como o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) pode auxiliar na avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto. Por isso, objetivou-se com este estudo determinar normas e método DRIS para *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B e avaliar o estado nutricional de *Eucalyptus*, com e sem a inclusão de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), verificando a potencial influência desses elementos na nutrição e desenvolvimento da cultura. Para tanto, dados de incremento médio anual e teores de nutrientes e EPTs foram obtidos em experimento aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio de *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto. Com a modelagem das funções DRIS com os EPTs foi possível subestimar a “deficiência” e superestimar o excesso dos EPTs, gerando índices de balanço nutricional, o qual foi possível verificar que o Ba foi o elemento mais limitante por excesso, nas subpopulações de baixa e alta produtividade, com 10-40% das populações com excesso de Ba. A concordância de diagnóstico nutricional com ou sem a inclusão dos EPTs nas funções DRIS variou de 60 a 98% das populações. Assim, a inclusão dos EPTs nas funções DRIS pode trazer informações referente a interferência dos elementos na diagnose nutricional e produção de *Eucalyptus*. A modelagem das funções DRIS com a inclusão dos EPTs contribuiu para avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*, gerando índices capazes de ordenar os elementos limitantes na produtividade do *Eucalyptus*. O uso da técnica mostrou-se uma ferramenta eficaz para interpretação dos índices DRIS, apresentando resultados semelhantes quando houve ou não a inclusão dos EPTs. Salienta-se a necessidade de normas específicas para cada região, idade, condições edafoclimáticas, entre outros de cada plantio.

Palavras-chave: diagnose nutricional, metais pesados, nutrição de florestas, nutrição mineral.

Abstract

The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) can help assess the nutritional status of *Eucalyptus* amended with sewage sludge (SS). Our objective was to establish DRIS norm and method for *Eucalyptus* under SS application; in particular, the *Eucalyptus* nutritional status, with and without the inclusion of potentially toxic elements (PTEs), verifying their potential influence from nutritional and developmental viewpoints. Data on mean annual increment, nutrient, and PTEs concentration were obtained in an experiment at 22, 44, 54, and 76 months after planting *Eucalyptus* amended with SS. It was possible to underestimate the “deficiency” and overestimate the excess of PTEs, generating nutritional balance indices, in which it was possible to verify that Ba was the most limiting element due to excess, in the low and high productivity subpopulations, with 10–40% of the populations with Ba excess. The nutritional diagnosis agreement with or without the inclusion of PTEs in the DRIS functions ranged from 60 to 98% of the populations. Thus, the inclusion of EPTs in the DRIS functions

can bring information regarding the interference of the elements in the nutritional diagnosis and production of *Eucalyptus*. The modeling of the DRIS functions with the inclusion of PTEs contributed to the evaluation of the *Eucalyptus* nutritional status, generating indices able to rank the limiting elements in *Eucalyptus* productivity. The technique proved to be an effective tool for interpreting DRIS indices, presenting reliable results if PTEs are or not included. Thus, the inclusion of PTEs in DRIS functions can provide valuable information as which element causes more damage to plants. The need for specific norms for each region, age, and planting analysis is highlighted.

Keywords: forest nutrition, heavy metals, mineral nutrition, nutritional diagnosis.

3.1 Introdução

A destinação de lodo de esgoto em áreas cultivadas apresenta diversas vantagens. Isso ocorre porque esse resíduo é rico em matéria orgânica e nutrientes (Nascimento et al., 2020), sendo capaz de incrementar a fertilidade do solo (Prates et al., 2022), aumentar a produtividade de diversas culturas (Nogueira et al., 2013; Bouriou et al., 2014; Athamenth et al., 2015; Marron, 2015; Xue et al., 2015; Prates et al., 2022) e promover a economia circular pela ciclagem de nutrientes (Aleisa et al., 2021). No entanto, seu uso em áreas agrícolas e florestais pode ser limitado devido a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs).

Devido a isso, existe elevado potencial do uso do lodo de esgoto em plantações florestais de *Eucalyptus* (Abreu-Junior et al., 2017, 2020; Cardoso et al., 2022), uma vez que os produtos dessas culturas não são voltados para alimentação humana ou animal. Ainda, de modo geral, verifica-se que o lodo de esgoto se apresenta de forma desbalanceada em relação ao teor de seus nutrientes e a necessidade das culturas. Desse modo, a aplicação de lodo pode ser prejudicial, seja pelo excesso ou escassez de nutrientes, ambos fatores limitantes à produtividade. Assim, os desequilíbrios entre os teores dos nutrientes podem influenciar na disponibilidade, absorção e translocação na planta (Marschner, 2012).

Em um plantio comercial onde se aplica lodo de esgoto, devemos considerar até mesmo os possíveis desequilíbrios fisiológicos na função da planta, causados pelos EPTs. Deste modo, precisamos de um método de avaliação nutricional que considere as possíveis interferências entre esses elementos. Para tanto, o método “Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação” (DRIS) com a inclusão dos EPTs em suas funções e cálculos pode auxiliar na interpretação do estado nutricional de *Eucalyptus*.

Originalmente desenvolvido por Beaufils (1973), o DRIS é um método que permite o cálculo de índices para cada nutriente, utilizando as relações binárias dele com os demais (método bivariado) e comparando-as com uma população de referência, objetivando classificar os nutrientes quanto à ordem de limitação ao crescimento das plantas (Ribeiro et al., 2020). Partindo-se da premissa de que as relações duais entre nutrientes apresentam maior constância comparativamente aos seus teores na planta.

No Brasil, o uso do DRIS é altamente difundido e utilizado em diversas culturas, como laranja 'Pêra' (Dias et al., 2017), miniestacas de eucalipto (Morais et al., 2019), cana-de-açúcar (Calheiros et al., 2018; Silva et al., 2020), soja e algodão (Kurihara et al., 2015), dendê (Matos et al., 2018), açazeiro (Ribeiro et al., 2020), atemoia 'Thompson' (Santos; Rozane, 2017), manga (Pinto et al., 2010), café (Wadt, 2005) e *Eucalyptus* ssp. (Silva et al., 2005; Wadt, 2004). Esses estudos mostram a relevância do uso dessa ferramenta na avaliação do estado nutricional de plantas com obtenção de normas, estabelecimento de faixas de suficiência e ordenação de nutrientes limitantes de produtividade. No entanto, não abordam a interferência de EPTs de adubações não convencionais, a exemplo do lodo de esgoto, nas normas DRIS de nutrientes. Dadas as quantidades potencialmente altas de EPTs no lodo de esgoto, sua inclusão nesse trabalho é fundamental.

Na avaliação do estado nutricional em cultivos agrícolas e, ou, florestais tratados com lodo de esgoto, ainda não há uma ferramenta que permita avaliar de maneira confiável a influência dos EPTs sobre o estado nutricional das culturas. Desta forma, a hipótese deste trabalho é que a inclusão destes elementos na avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*, pelo método DRIS auxilia na verificação da interferência destes elementos quanto aos aspectos nutricionais da planta. Assim, objetivou-se determinar normas DRIS para *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B e avaliar o estado nutricional de *Eucalyptus* pelo método DRIS, a partir de seus índices, com e sem a inclusão dos EPTs, verificando a potencial influência desses elementos na nutrição e desenvolvimento da cultura.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área experimental

O experimento foi instalado em fevereiro de 2015, ocupando área total de 2,7 ha em plantio comercial de *Eucalyptus* no município de Boa Esperança do Sul, SP (21°59'33" S e

48°23'27" O), à uma altitude de 516 metros. A área experimental foi cultivada comercialmente com *Eucalyptus* pelos últimos 40 anos e nunca houve aplicação de lodo de esgoto.

O clima da região é classificado como Cwa – zona subtropical úmida com verão quente e inverno seco, de acordo com Köppen, com precipitação média anual de 1074 mm e temperatura média fria de 17,5 °C e quente de 30,1 °C (Figura 3.1). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd) (Embrapa, 1999). A análise química foi realizada de acordo com método descrito em Raij et al. (2001) e análise granulométrica pelo método da pipeta (Camargo et al. 1986) (Tabela 3.1).

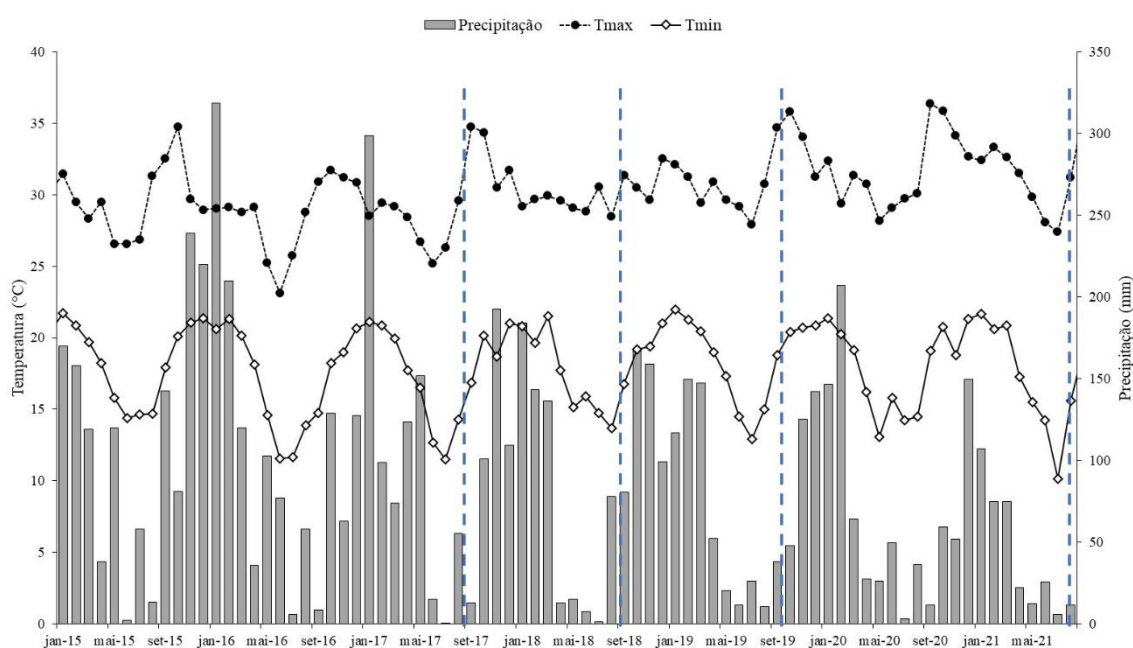


Figura 3.1. Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) no município de Boa Esperança do Sul-SP. Linhas verticais e tracejadas representam as épocas de amostragem e inventário aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio.

3.2.2 Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado foi gerado na ETE de Jundiáí, SP, onde o esgoto passa por um sistema de lagoas aeradas de mistura completa e lagoas de decantação, sendo o desaguamento feito com floculação à base de polímero catiônico, seguido de centrifugação. Na Tabela 3.2 são apresentadas a composição química desse material, utilizando-se a metodologia proposta pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007).

Tabela 3.1. Caracterização química¹ e física² do solo antes da instalação do experimento.

Atributos	Unit	Camada (cm)			
		0-5	5-10	10-20	20-40
pH _(CaCl2)	-	5,3	5,4	5,7	4,9
Matéria Orgânica	g dm ⁻³	14	10	7	3
P _{resina}	mg dm ⁻³	7	6	3	2
K	mmol dm ⁻³	0,3	0,3	0,5	0,4
Ca ⁺²	mmol dm ⁻³	23	18	16	9
Mg ⁺²	mmol dm ⁻³	2	2	2	1
Al ⁺³	mmol dm ⁻³	0,0	0,0	0,0	0,5
H+Al	mmol dm ⁻³	20	19	15	18
S-SO ₄	mg dm ⁻³	5	5	2	5
Capacidade de troca de cátions	mmol dm ⁻³	46	40	34	29
Saturação por bases	%	56	51	54	38
B	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,2
Cu	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,3
Fe	mg dm ⁻³	32	28	35	28
Mn	mg dm ⁻³	2,0	1,0	2,0	0,7
Zn	mg dm ⁻³	0,6	0,2	0,6	0,8
Areia (> 0,05 mm)	g kg ⁻¹	900	900	900	900
Silte (> 0,002 and < 0,05 mm)	g kg ⁻¹	10	10	20	20
Argila (< 0,002 mm)	g kg ⁻¹	90	90	80	80

¹Raij et al. (2001) e ²Camargo et al. (1986).

Tabela 3.2. Caracterização física e química do lodo de esgoto proveniente da ETE Jundiá

Atributos	Lodo de esgoto	Atributos	Lodo de esgoto
pH-H ₂ O	6,8		----- mg kg ⁻¹ -----
	----- % -----	B	1,0
Umidade	62	As	3,3 (41) ¹
Sólidos voláteis	49	Ba	629 (1.300)
Cinzas	51	Cd	2,4 (39)
	----- g kg ⁻¹ -----	Cu	308 (1.500)
Carbono orgânico	166	Cr	61 (1.000)
N _(total)	22	Hg	< 0,05 ² (17)
P _(total)	30	Mo	8,0 (50)
K	1,7	Ni	31 (420)
Na	1,8	Pb	45 (300)
S	24	Se	< 0,05 ² (100)
Ca	21	Zn	667 (2.800)
Mg	5,0		

Determinação de EPT no lodo de esgoto, segundo método 3051A (USEPA, 2007). ¹Limites estabelecidos para o uso agrônomo do lodo de esgoto, pela Resolução 498 do CONAMA (Brasil, 2020). ²Não detectado.

3.2.3 Experimento de campo

O preparo do solo ocorreu em janeiro de 2015, com subsolagem na profundidade de 0,4 m entre as linhas do plantio anterior, onde as mudas de *Eucalyptus* foram plantadas. Antes do plantio, aplicou-se 1,8 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 80%) visando aporte de Ca e Mg ao solo. O material genético utilizado no experimento foi um híbrido oriundo do cruzamento entre

Eucalyptus grandis e *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*). As mudas foram produzidas via propagação vegetativa para clonagem. O plantio foi realizado de forma manual em fevereiro de 2015, com espaçamento de 3 x 2,25 m, totalizando 1.481 árvores por hectare.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso com dez tratamentos e quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. Cada parcela foi constituída por 100 plantas (10 x 10 plantas), sendo as 36 plantas centrais correspondentes a área útil e as demais 64 plantas da área de bordadura. Os tratamentos consistiram em um controle (sem adubação); dois tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais em dosagens diferentes; e sete tratamentos com aplicação de lodo de esgoto. A fertilização mineral 1 (FM1) é uma recomendação técnica utilizada internamente pela Suzano S.A. A fertilização mineral 2 (FM2) é a recomendação oficial do Estado de São Paulo (Gonçalves et al., 1997). O detalhamento da quantidade de nutrientes aplicado por tratamento encontra-se na Tabela 3.3.

Os fertilizantes minerais foram aplicados no sulco de plantio e as adubações de cobertura foram aplicados em meia coroa ao redor da muda, em dosagens apresentadas na Tabela 3.3. A dosagem de lodo de esgoto a ser aplicada foi calculada para que tivesse o equivalente à 50, 100 e 150% da recomendação técnica 1 de N (FM1), ou seja, 192 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a 14,5; 29 e 43,5 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente, em base seca. A taxa de aplicação do lodo de esgoto foi com base no critério do N, conforme descrito na Resolução no 375 (Brasil, 2006). O lodo de esgoto foi distribuído superficialmente no solo em uma faixa de 0,60 m de largura à 0,20 m de distância do sulco de plantio, sete meses após o plantio das mudas (setembro de 2015). Todos os demais tratamentos silviculturais (controle de plantas espontâneas) seguiram o padrão adotado pela empresa em seus plantios comerciais.

3.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal

Em setembro de 2017 (22 meses após plantio), setembro de 2018 (44 meses após plantio), setembro de 2019 (54 meses após plantio) e em julho de 2021 (76 meses após plantio) foi medido a circunferência a altura do peito (CAP – 1,3 m) e altura (H) de todas as árvores das parcelas úteis do experimento. Isso foi realizado para se estimar a produtividade de volume de madeira, utilizando o modelo logarítmico de Schumacher e Hall (1933), ajustada com inventário de biomassa realizado aos 22 meses após o plantio, e posterior cálculo do incremento médio anual (IMA).

Tabela 3.3. Quantidade de nutrientes aplicado por tratamento pelos fertilizantes minerais e lodo de esgoto (LE). Valores entre parênteses representam os nutrientes aplicados pelo LE.

Tratamentos	N	P	K	B	Zn	Cu
----- kg ha ⁻¹ -----						
Controle (C)	0	0	0	0	0	0
Fertilização Mineral 1 (FM1)	192	26	137	6,5	2,8	2,8
Plantio	30	26	25	1,5	1,5	1,5
Fertilização 1 ^{3/}	45	0	112	1,8	1,3	1,3
Fertilização 2 ^{4/}	54	0	0	1,5	0	0
Fertilização 3 ^{5/}	63	0	0	1,7	0	0
Fertilização Mineral 2 (FM2)	60	17,5	84	4,2	1,8	1,8
Plantio	20	17,5	17	1,0	1,0	1,0
Fertilização 1 ^{3/}	27	0	67	1,1	0,8	0,8
Fertilization 2 ^{4/}	16	0	0	2,1	0	0
Lodo (50%)^{2/} + P (83%) - B + K (L1P1)	96^{6/} (319)	22 (435)	137 (290)	0 (0,015)	0 (9,7)	0 (4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (50%)^{2/} + P (83%) + B + K (L1P1B)	96^{6/} (319)	22 (435)	137 (290)	6,5 (0,015)	0 (9,7)	0 (4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%)^{2/} + P (66%) - B + K (L2P2)	192^{6/} (638)	17,5 (870)	137 (855)	0 (0,030)	0 (19,3)	0 (9,0)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (100%)^{2/} + P (66%) + B + K (L2P2B)	192^{6/} (638)	17,5 (870)	137 (855)	6,5 (0,030)	0 (19,3)	0 (9)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%)^{2/} - P + B + K (L2B)	192^{6/} (638)	0 (870)	137 (855)	6,5 (0,030)	0 (19,3)	0 (9)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	19,3	9
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (150%)^{2/} - P - B + K (L3)	288^{6/} (957)	0 (1.305)	137 (870)	0 (0,045)	0 (29)	0 (13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (150%)^{2/} - P + B + K (L3B)	288^{6/} (957)	0 (1.305)	137 (870)	6,5 (0,045)	0 (29)	0 (13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0

^{1/} Fertilização de plantio (superfosfato triplo, KCl e ulexita) em 12/02/2015. ^{2/} Aplicação de lodo de esgoto em 12/09/2015, 207 dias após transplantio, nas doses de 14,5; 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca) correspondendo a 50, 100 e 150% da recomendação de N (192 kg ha⁻¹). ^{3/} Primeira adubação de cobertura realizada em 05/11/2015, 261 dias após transplantio. ^{4/} Segunda adubação de cobertura realizada em 21/12/2015, 307 dias após transplantio. ^{5/} Terceira adubação de cobertura realizada em 02/02/2016, 350 dias após transplantio. ^{6/} Dose de N disponível aplicado pelo lodo de esgoto, considerando taxa de mineralização de N de 30% para lodo de esgoto aeróbio (Brasil, 2006).

Os fertilizantes minerais foram aplicados no sulco de plantio e as adubações de cobertura foram aplicados em meia coroa ao redor da muda, em dosagens apresentadas na Tabela 3.3. A dosagem de lodo de esgoto a ser aplicada foi calculada para que tivesse o

equivalente à 50, 100 e 150% da recomendação técnica 1 de N (FM1), ou seja, 192 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a 14,5; 29 e 43,5 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente, em base seca. A taxa de aplicação do lodo de esgoto foi com base no critério do N, conforme descrito na Resolução no 375 (Brasil, 2006). O lodo de esgoto foi distribuído superficialmente no solo em uma faixa de 0,60 m de largura à 0,20 m de distância do sulco de plantio, sete meses após o plantio das mudas (setembro de 2015). Todos os demais tratos silviculturais (controle de plantas espontâneas) seguiram o padrão adotado pela empresa em seus plantios comerciais.

3.2.5 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal

Em setembro de 2017 (22 meses após plantio), setembro de 2018 (44 meses após plantio), setembro de 2019 (54 meses após plantio) e em julho de 2021 (76 meses após plantio) foi medido a circunferência a altura do peito (CAP – 1,3 m) e altura (H) de todas as árvores das parcelas úteis do experimento. Isso foi realizado para se estimar a produtividade de volume de madeira, utilizando o modelo logarítmico de Schumacher e Hall (1933), ajustada com inventário de biomassa realizado aos 22 meses após o plantio, e posterior cálculo do incremento médio anual (IMA).

O CAP medido também foi utilizado para selecionar as árvores para desbaste e coleta das folhas para diagnose nutricional e EPTs. As árvores foram selecionadas aleatoriamente dentro do intervalo de $\pm 5\%$ do CAP mediano, sendo uma árvore por parcela, exceto aos 76 meses após o plantio, quando foi desbastada duas árvores por parcela. Após o desbaste, foram coletadas amostras de folhas dos quatro pontos cardiais no terço superior da copa das árvores, conforme recomendação de Malavolta et al. (1997) e Raij et al. (1997).

3.2.6 Análise química do material vegetal

No laboratório, as folhas coletadas foram lavadas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante, moídas em moinho de facas tipo Willey e acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificados, até momento da análise. As amostras foram digeridas conforme procedimento descrito por Araújo et al. (2002). Pesou-se 250 mg de material vegetal, que foi digerido em solução com 7,5 mL de HNO₃ 3,11 mol L⁻¹ e 2,5 mL de H₂O₂ 30% (v/v), em sistema fechado de micro-ondas. Os teores dos elementos essenciais, exceto o nitrogênio, e potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado, utilizando um ICP-MS Agilent modelo 7500ce. O teor de N foi determinado pelo método Kjeldahl (Malavolta et al., 1997).

3.2.7 Análise dos dados

Primeiramente, foi calculado a média e desvio padrão dos dados de incremento médio anual (IMA) do volume do tronco ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e do teor dos elementos determinados separando-os pela idade do plantio (cenário A) e de forma global (cenário B), ou seja, com todos os dados. Em seguida, para o cenário A, realizou-se a subdivisão das populações em baixa e alta produtividade (população de referência), definida como sendo as populações com produtividade maior que a média geral mais 50% do desvio padrão. No cenário B, a subpopulação de referência foi estabelecida pelas populações classificadas como de alta produtividade nas diferentes idades juntamente com aquelas populações que apresentaram IMA superior à média geral mais 50% do desvio padrão (Silva et al., 2005). Também se calculou a média e desvio padrão do IMA e do teor dos elementos determinados das subpopulações (alta e baixa produtividade).

Para o DRIS, cada relação entre a concentração de dois nutrientes nas folhas, com e sem os EPTs, foram determinados a média e variância das relações nos tratamentos. Por se tratar de um resíduo com concentração de nutrientes desbalanceados em relação à necessidade da cultura, optou-se por adotar o método proposto por Baldock e Schulte (1996) adaptado, no qual prevê a divisão dos nutrientes em quatro grupos: 1) grupo de macronutrientes de resposta frequente (MAF): N, P e K; 2) grupo de macronutrientes de resposta rara (MAR): Ca, Mg e S; 3) grupo de micronutrientes de resposta frequente (MIF): B, Cu e Zn; e 4) grupo de micronutrientes de resposta rara (MIR): Fe, Mo e Mn. Devido a avaliação dos elementos potencialmente tóxicos, será adicionado mais um grupo denominado elementos com possível resposta (EPR), contendo os elementos Al, As, Ba, Cd, Cr e Pb.

Optou-se ainda por utilizar as fórmulas adaptadas por Wadt et al. (2007) no intuito de superestimar e, ou, subestimar deficiências e excessos nutricionais, de acordo com o grupo de nutrientes de maneira que as fórmulas foram predispostas da seguinte forma. No grupo MAF, a função objetiva superestimar a deficiência quando $A/B > a/b$ e subestimar o excesso quando $A/B < a/b$:

$$f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{a/b}{A/B} \right) \quad (1)$$

No grupo MAR, a função objetiva subestimar deficiências ($A/B < a/b$) e excessos ($A/B > a/b$):

$$\text{Se } A/B < a/b: f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{A/B}{a/b} \right) \quad (2)$$

$$\text{Se } A/B > a/b: f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{a/b}{A/B} \right) \quad (3)$$

No grupo MIF, a função abaixo objetiva superestimar deficiências e excessos:

$$\text{Se } A/B < a/b: f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{a/b}{A/B} \right) \quad (4)$$

No entanto, se $A/B > a/b$ e para nutriente com potencial de efeito tóxico quando em excesso (Equação 5):

$$f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{A/B}{a/b} \right) \quad (5)$$

Já para o grupo MIR, a adaptação da fórmula objetiva superestimar apenas o excesso:

$$\text{Se } A/B < a/b: f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * 1 \quad (6)$$

$$\text{Se } A/B > a/b: f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{A/B}{a/b} \right) \quad (7)$$

Devido a inclusão dos EPTs no cálculo DRIS foi criado um grupo EPR, onde a fórmula visa subestimar a “deficiência” quando $A/B < a/b$ e superestimar o excesso quando $A/B > a/b$ desses elementos na planta:

$$f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) * k * \left(\frac{A/B}{a/b} \right) \quad (8)$$

Para fins de comparação, as normas DRIS também foram calculadas sem a separação dos nutrientes em grupos e, com ou sem a adição dos EPTs, utilizando, portanto, a fórmula de Jones (1981):

$$f(A/B) = \left(\frac{A/B - a/b}{S_{(a/b)}} \right) \quad (9)$$

Sendo que, a relação dos nutrientes em maiúsculo (A/B) representa a amostra em estudo e em minúsculo (a/b) representa a população de referência e seu desvio padrão (na/b). Os nutrientes “A” são aqueles que, tanto na relação direta quanto na inversa, representam seu respectivo grupo. O valor k é um fator de ajuste de cada função, sendo que foi utilizado $k=1,5$ para o grupo MAF; $k=1,5$ para o grupo MIF; $k=0,5$ para o grupo MAR; e $k=1,0$ para o grupo MIR; e o valor de k para o grupo EPR foi determinado pelo ajuste que apresentou melhor superestimativa do excesso e subestimativa da “deficiência” dos EPTs, podendo variar entre 0,5 e 2,0.

A partir dos valores de todas as funções DRIS foram calculados os índices DRIS (IA), de acordo com a equação abaixo, em que \bar{f} é a média das funções DRIS nas formas diretas ($f(A/B)$) e inversas ($f(B/A)$); e n é o número de funções DRIS consideradas.

$$IA = \bar{f} = [f(A/B) - f(B/A) + f(A/C) - f(C/A) + \dots + f(A/N) - f(N/A)]/n \quad (10)$$

Com os índices de cada elemento foi calculado o índice de balanço nutricional médio (IBNm). O IBNm foi obtido dividindo-se o valor absoluto do índice de equilíbrio nutricional (IBN) pelo número de nutrientes avaliados (n) (Wadt, 1996):

$$NBIm = (|IA| + |IB| + |IC| + \dots + |IN|)/n \quad (11)$$

Adicionalmente, para interpretação dos valores dos índices gerados, adotou-se o critério de potencial de resposta a adubação simplificada, o qual classifica o estado nutricional da planta para cada nutriente em insuficiente, equilibrado e em excesso (Wadt, 2005):

- Equilibrado (Eq.): $|IA| < IBNm$;
- Insuficiente (In.): $|IA| > IBNm$ e $IA < 0$;
- Excesso (Ex.): $|IA| > IBNm$ e $IA > 0$.

Após classificação de cada nutriente em cada população, as classificações com e sem a adição dos elementos potencialmente tóxicos foram comparadas pelo teste Qui-quadrado ($p < 0,05$) com auxílio do software SigmaPlot versão 11.0 (Systat Software, 2020). Esta análise visa verificar a concordância de classificação do estado nutricional quando houve ou não a adição dos EPTs nas funções DRIS.

Os índices DRIS foram utilizados para determinação da faixa de suficiência dos teores de cada elemento nas folhas de eucalipto (Souza et al., 2015), a partir da sua correlação com seu respectivo índice nutricional (In). Para cada nutriente, igualou-se In a zero e obteve-se o teor do nutriente denominado ponto de equilíbrio nutricional (PEN). O valor de PEN mais e menos 2/3 do desvio-padrão dos teores do nutriente de toda a população representam os limites inferior e superior da faixa de suficiência, respectivamente (Kurihara et al., 2013; Souza et al., 2015). O teor dos nutrientes no nível crítico corresponde ao limite inferior da faixa de suficiência e o teor dos EPTs críticos corresponde ao limite superior da faixa de suficiência.

3.3 Resultados e Discussão

As populações de referência apresentaram IMA médio de 34, 58, 57 e 59 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ no cenário A (Tabela 3.4), correspondendo a 27, 32, 35 e 24% das populações aos 22, 44, 54 e 76 meses após plantio, respectivamente. Já no cenário B, a população de referência apresentou IMA médio de 54 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, correspondendo a 47% das populações. Ainda, o IMA das populações de alta e baixa produtividade foram diferentes entre si, correspondendo a incrementos de 8, 9, 10 e 41% aos 22, 44, 54 e 76 meses após plantio, respectivamente, e de 33% no cenário B.

Tabela 3.4. Incremento médio anual (m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de *Eucalyptus urograndis*, tratado com lodo de esgoto, nas subpopulações de baixa e alta produtividade após 22, 44, 54 e 76 meses após plantio (cenário A) e global (cenário B)

Especificidade	População			Subpopulação						Sig.
				Alta produtividade			Baixa produtividade			
	Média	D.P.	n	Média	D.P.	n	Média	D.P.	n	
22 meses	32,3	1,7	40	34,3	0,8	11	31,6	1,3	29	*
44 meses	54,9	2,7	40	58,1	1,1	13	53,4	3,0	27	*
54 meses	53,6	3,3	40	57,0	1,4	14	51,7	2,4	26	*
76 meses	46,0	9,2	79	58,9	7,9	19	41,9	4,6	60	*
Global	46,6	10,1	199	53,6	8,2	94	40,3	7,0	105	*

D.P. – Desvio Padrão; n – Número de populações; Sig. – Significância; * – Significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste t-pareado.

As populações de referência apresentaram 64, 92, 86 e 84% das populações com aplicação de lodo de esgoto, no cenário A, sendo 45, 54, 50 e 53% com aplicação de lodo de esgoto a fornecer 100% da recomendação de N para o *Eucalyptus* aos 22, 44, 54 e 76 meses do plantio, respectivamente. A população de referência no cenário B apresentou 75% das populações com aplicação de lodo de esgoto, sendo 39% com aplicação de lodo de esgoto a fornecer 100% da recomendação de N para o *Eucalyptus*. Esses resultados apresentam a representatividade que a aplicação de lodo de esgoto na população de referência, principalmente quando da aplicação pelo critério agrônomo.

Os teores médios e desvio padrão dos nutrientes e elementos potencialmente tóxicos das subpopulações de alta e baixa produtividade de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto nos cenários A e B são apresentados na Tabela 3.5. No geral, não houve diferença dos teores entre as subpopulações no cenário A, apenas para K aos 44 meses, Pb aos 54 meses e N, P, K e Ca aos 76 meses após o plantio. No entanto, no cenário B, houve diferença para os teores de N, P, S, Cu, Fe, Mo, Zn e Al entre as subpopulações.

A partir da subpopulação de alta produtividade nas diferentes idades de avaliação do plantio foi determinada as normas DRIS (média e desvio padrão) de forma direta e inversa das relações duais dos nutrientes e elementos potencialmente tóxicos (Tabela A1). A fim de se verificar a possibilidade de uso de uma norma geral para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto, foi realizado a comparação das normas entre as idades avaliadas e de uma norma geral (Tabela A1). No entanto, houve predominância de diferenças significativas das normas entre as idades e da norma em geral, variando de 59 a 85% das relações bivariadas dos elementos avaliados (Tabela 3.6). Isso indica que deve ser dada preferência ao uso de normas específicas para avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*. Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2005), avaliando a universalidade das normas DRIS e CND para *Eucalyptus* em diferentes regiões no estado de Minas Gerais.

Tabela 3.5. Teor médio de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos na subpopulação de alta e baixa produtividade de *Eucalyptus urograndis* em diferentes idades após aplicação de lodo de esgoto

Atributos			g kg ⁻¹							mg kg ⁻¹											
			N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb	
22 meses	Alta	Média	19,9	1,46	7,8	10,8	2,10	1,05	63,1	2,9	115	245	0,073	15,3	144	0,009	10,8	0,003	0,151	0,087	
		D.P.	2,63	0,10	0,94	1,31	0,25	0,15	21,0	0,50	42,5	61,2	0,04	1,95	68,4	0,01	2,57	0,00	0,07	0,03	
	Baixa	Média	19,7	1,42	7,8	10,8	2,12	1,06	68,6	3,0	131	250	0,074	15,7	172	0,013	10,7	0,004	0,153	0,102	
		D.P.	2,67	0,13	0,81	1,44	0,18	0,14	16,9	0,38	35,5	52,6	0,03	1,57	59,2	0,01	2,56	0,00	0,05	0,02	
	Sig.			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	44 meses	Alta	Média	20,1	1,30	10,0	13,8	1,97	1,05	57,7	2,8	249	287	0,065	13,4	342	0,022	16,4	0,006	0,205	0,155
D.P.			2,57	0,12	0,77	2,53	0,27	0,15	14,3	0,40	36,1	57,8	0,03	2,07	54,5	0,00	5,01	0,00	0,03	0,01	
Baixa		Média	21,0	1,33	9,0	14,0	1,99	1,08	54,2	2,7	249	279	0,055	13,3	340	0,023	16,1	0,005	0,204	0,149	
		D.P.	3,27	0,13	1,20	3,33	0,25	0,17	14,6	0,34	41,5	79,8	0,02	1,84	65,6	0,01	7,39	0,00	0,03	0,03	
Sig.			ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
54 meses		Alta	Média	21,8	1,41	9,0	9,4	2,03	1,57	37,1	4,4	144	225	0,019	16,2	197	0,036	7,7	0,003	0,215	0,088
	D.P.		1,83	0,11	0,75	0,96	0,21	0,14	10,4	0,46	11,8	30,6	0,01	0,75	25,4	0,00	1,02	0,00	0,02	0,01	
	Baixa	Média	21,1	1,37	8,9	9,5	1,96	1,51	32,6	4,2	141	220	0,018	16,1	190	0,034	8,1	0,003	0,207	0,078	
		D.P.	1,20	0,08	1,20	1,14	0,18	0,11	9,0	0,58	19,2	54,7	0,01	1,32	22,5	0,00	1,89	0,00	0,03	0,01	
	Sig.			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
	76 meses	Alta	Média	13,8	0,92	8,6	10,1	2,33	1,05	53	4,7	127	308	0,071	15,1	156	0,031	12,6	0,005	0,219	0,091
D.P.			1,18	0,11	0,91	1,94	0,34	0,09	13,1	0,72	30,1	140	0,04	2,14	35,0	0,01	3,33	0,00	0,03	0,02	
Baixa		Média	14,7	1,07	9,3	11,2	2,19	1,09	52	4,5	122	297	0,066	15,5	156	0,031	12,8	0,005	0,226	0,100	
		D.P.	1,39	0,13	0,86	2,16	0,42	0,10	13,4	0,75	24,5	92	0,02	2,43	38,3	0,01	3,94	0,00	0,05	0,03	
Sig.			*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
Global		Alta	Média	19,5	1,27	9,0	11,3	2,08	1,21	50	3,6	178	265	0,051	14,9	240	0,027	12,2	0,004	0,204	0,113
	D.P.		3,73	0,22	1,13	2,76	0,29	0,25	16,6	0,98	67	86	0,03	2,01	98,5	0,01	5,50	0,00	0,04	0,04	
	Baixa	Média	17,0	1,22	8,8	11,1	2,14	1,12	54	4,0	130	274	0,062	15,5	170	0,026	12,0	0,004	0,202	0,099	
		D.P.	3,21	0,20	1,15	2,30	0,36	0,19	19,3	0,97	37	86	0,03	2,32	55,8	0,01	4,13	0,00	0,06	0,03	
	Sig.			*	*	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns

D.P. – Desvio Padrão; Sig. – Significância; ns – Não significativo pelo teste t-pareado ($p > 0,05$); * – Significativo pelo teste t-pareado ($p < 0,05$).

Tabela 3.6. Frequência de significância das normas DRIS (relações duais) para *Eucalyptus urograndis* tratado com lodo de esgoto classe B para as diferentes idades de plantio avaliadas

Significância	22vs44	22vs54	22vs76	22vsG	44vs54	44vs76	44vsG	54vs76	54vsG	76vsG
ns	25,8	22,2	34,6	34,6	15,0	23,9	40,8	17,3	34,3	34,6
*	74,2	77,8	65,4	65,4	85,0	76,1	59,2	82,7	65,7	65,4

G – Norma geral; ns – Não significativo pelo teste t-pareado ($p > 0,05$); * – Significativo pelo teste t-pareado ($p < 0,05$).

O uso de diferentes equações para as funções DRIS visando superestimar ou subestimar a deficiência ou excesso de classe de nutrientes pode auxiliar na interpretação e tomada de decisão sobre o manejo de nutrientes (Wadt et al., 2007). Na Figura 3.2 é apresentado a influência dos fatores de correção sobre a equação de Jones (1981). Percebe-se que pela equação de Jones (1981), os valores das funções DRIS apresentam comportamento linear com as relações dos nutrientes, ou seja, o desequilíbrio nutricional é considerado constante e dado pela inclinação da reta (Wadt et al., 2007). Para o grupo MAF, a equação utilizada superestima a deficiência e subestima o excesso nutricional, isso porque os nutrientes desse grupo (N, P e K) em deficiência pode provocar grandes prejuízos as plantas enquanto que em excesso muitas vezes não comprometem o desenvolvimento das plantas. Com base nisso, nos dados deste estudo, o uso do valor de sensibilidade (k) igual a 1,5 foi utilizado para que fosse atingido esse objetivo (Figura 3.2A).

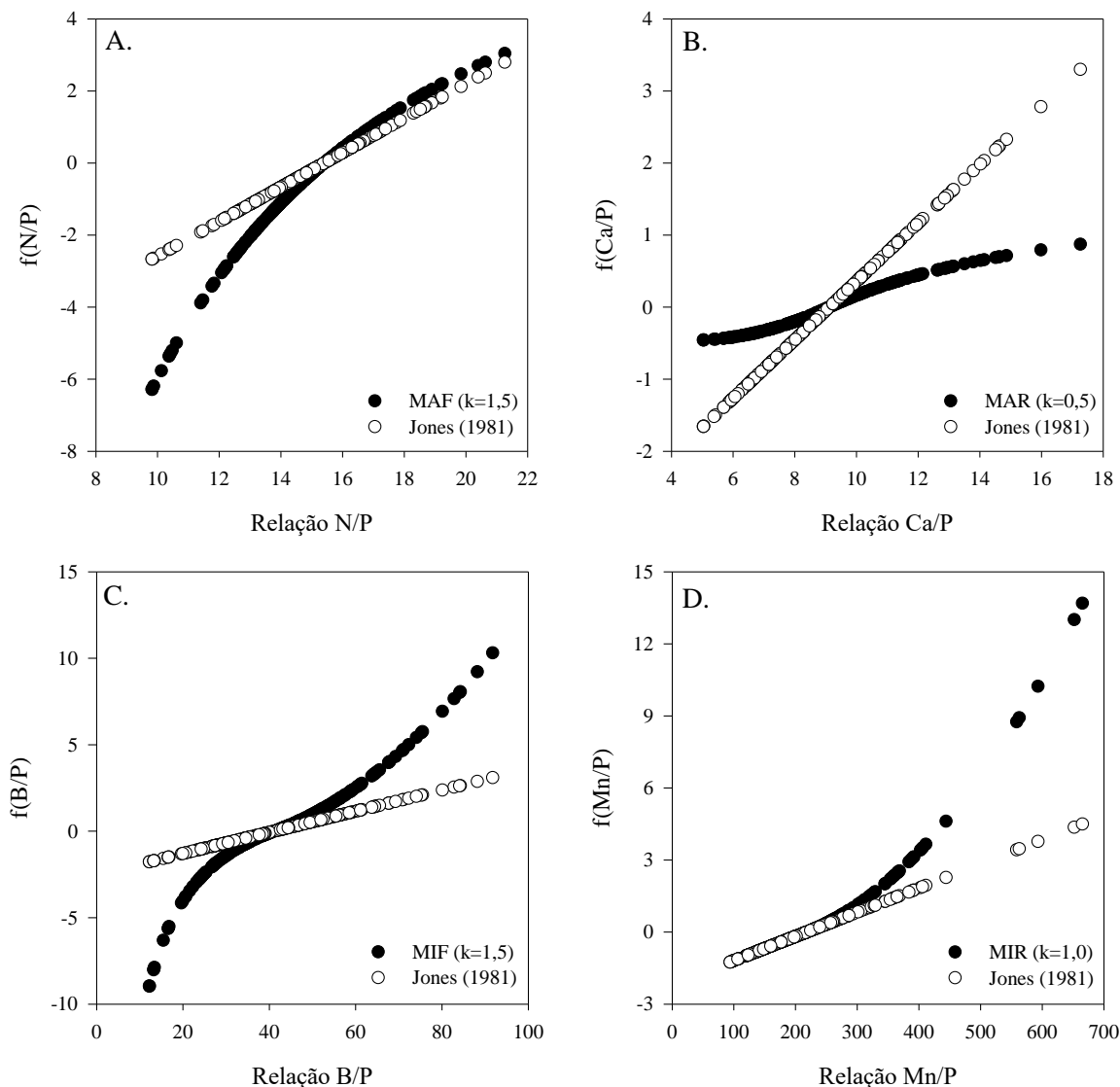


Figura 3.2. Valores das funções DRIS em *Eucalyptus*, calculadas pela fórmula de Jones (1981) e pela fórmula para os macronutrientes de resposta frequente (A – N/P) e rara (B – Ca/P) e micronutrientes de resposta frequente (C – B/P) e rara (D – Mn/P), quanto à relação direta dos nutrientes (n = 199)

Para o grupo MAR (Ca, Mg e S), subestimar a deficiência e o excesso dos nutrientes pode provocar diminuição da percepção da necessidade de aplicação desses nutrientes em situação de extrema deficiência, devido a aproximação da situação de equilíbrio com a aplicação do fator de correção (Figura 3.2B). No grupo MIF (B, Cu e Zn), todos os nutrientes foram considerados com potencial efeito tóxico quando em excesso para o *Eucalyptus*, dessa forma tanto a deficiência quanto o excesso foram superestimados (Figura 3.1C). Para o grupo MIR (Fe, Mn e Mo), apenas o excesso é superestimado, devido a possibilidade de toxidez por estes elementos em *Eucalyptus* (Figura 3.2D).

Utilizando-se a equação de Jones (1981), os valores das funções DRIS para os elementos do grupo de elementos de possível resposta (EPR) também apresentam comportamento linear (Figura 3.3A). A equação proposta para o grupo EPR visa subestimar “deficiência” quando $A/B < a/b$ e superestimar o excesso quando $A/B > a/b$ (Figura 3.3). Essa metodologia foi utilizada devido a não essencialidade e possível efeito tóxico desses elementos. Em situação em que os elementos desse grupo se encontram com relação menor que a subpopulação de referência ($A/B < a/b$), indica menores teores e menor desequilíbrio nutricional, reduzindo-se os riscos de toxidez e comprometimento da produtividade. Já em situação oposta, onde a relação é maior que o da subpopulação de referência ($A/B > a/b$), a superestimativa do excesso pode auxiliar na avaliação do desequilíbrio nutricional provocada por esses elementos na planta.

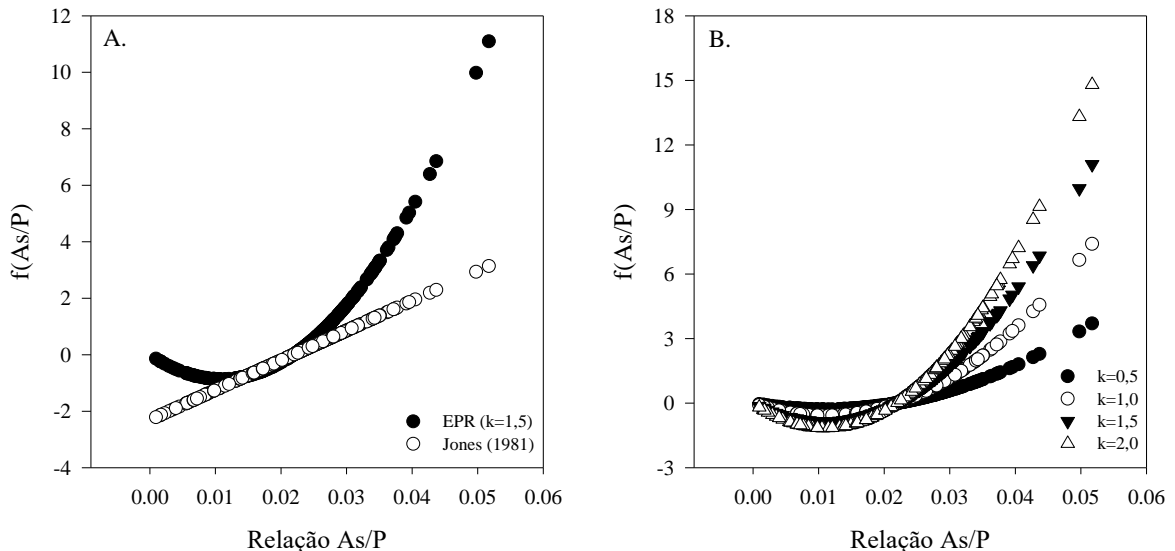


Figura 3.3. Valores de As/P em *Eucalyptus*, calculadas pela fórmula de Jones (1981) e pela fórmula para os elementos de possível resposta (A) e com valores de k entre 0,5 e 2,0 (B), quanto à relação As/P de forma direta (n = 199)

O ajuste do valor de sensibilidade (k) pode melhorar a interpretação da interferência dos EPTs sobre o estado nutricional das plantas (Wadt et al., 2007). Por isso, quanto maior o valor de k melhor é o ajuste do modelo para se verificar a influência desses elementos sobre estado nutricional das plantas, sobretudo em situação de efeito tóxico (Figura 3.3). Portanto, o valor k escolhido para cálculo da função DRIS foi igual a 1,5 (Figura 3.3).

Com as normas e funções definidas, foi possível calcular os valores do índice de balanço nutricional médio (IBNm), com e sem a inclusão dos EPTs nas funções DRIS (Tabela 3.7). Menor valor de IBNm corresponde a um maior estado de equilíbrio nutricional das plantas,

enquanto que maior valor de IBNm corresponde a um menor estado de equilíbrio nutricional das plantas (Suszek et al., 2017). Foi observado menores valores de IBNm para subpopulação de alta produtividade, por ambos os métodos utilizados e independentemente da idade do plantio, como esperado devido ao uso dessa população como norma para avaliação da nutrição.

Tabela 3.7. Índice de balanço nutricional médio (IBNm) de *Eucalyptus urograndis* tratado com lodo de esgoto classe B, com e sem a inclusão de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) às funções DRIS pelo método proposto e de Jones (1981)

Idade	Subp.	Proposto		Jones (1981)	
		Sem EPTs	Com EPTs	Sem EPTs	Com EPTs
22	BP	0,99±0,43	1,08±0,56	0,63±0,19	0,63±0,21
	AP	0,71±0,23	0,83±0,24	0,51±0,13	0,53±0,12
	t.test	0,024	0,082	0,035	0,088
44	BP	0,90±0,36	0,97±0,42	0,67±0,22	0,65±0,22
	AP	0,73±0,27	0,76±0,37	0,54±0,22	0,52±0,21
	t.test	0,068	0,064	0,045	0,042
54	BP	0,95±0,38	0,98±0,30	0,68±0,19	0,66±0,14
	AP	0,71±0,22	0,75±0,16	0,54±0,12	0,53±0,10
	t.test	0,019	0,006	0,009	0,003
76	BP	0,81±0,27	1,00±0,43	0,59±0,18	0,63±0,19
	AP	0,74±0,25	0,76±0,22	0,54±0,13	0,52±0,11
	t.test	0,150	0,013	0,101	0,009
Global	BP	0,89±0,34	0,96±0,41	0,52±0,12	0,54±0,13
	AP	0,88±0,37	0,98±0,62	0,51±0,13	0,52±0,13
	t.test	0,413	0,429	0,306	0,098

Subp. – Subpopulação; BP – Subpopulação de baixa produtividade; AP – Subpopulação de alta produtividade; t.test – Teste t-pareado ($p < 0,05$).

A frequência de populações em equilíbrio, insuficiência e excesso nutricional de cada nutriente, com ou sem inclusão dos EPTs na subpopulação de baixa produtividade são apresentados na Tabela 3.8. No geral, a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nos cálculos DRIS não provocou alterações significativas na frequência de populações em equilíbrio ou desequilíbrio (deficiência ou excesso) nutricional para N, P e K.

Como proposto pela equação do grupo MAR (Wadt et al., 2007), 96 a 100% das populações apresentaram situação de equilíbrio nutricional para Ca, Mg e S, com ou sem a inclusão dos EPTs (Tabela 3.8), devido o cálculo subestimar a deficiência e excesso desses nutrientes. A adição dos EPTs não alterou a interpretação do estado nutricional de *Eucalyptus* para Ca, Mg e S pelo método DRIS através das equações propostas por Wadt et al. (2007).

Tabela 3.8. Frequência (%) em que as populações apresentaram estado de equilíbrio (Eq.), insuficiência (In.) e excesso (Ex.) nutricional, com e sem a inclusão de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nas funções DRIS pelo método proposto da população de baixa produtividade ($< \text{média} + 0,5 \text{ desvio padrão}$) de *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B

EPTs	Interpretação	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb
22 meses																			
Com	Eq.	66	62	55	100	100	100	31	24	69	48	41	69	48	59	52	52	48	52
	In.	21	38	31	0	0	0	34	45	7	24	31	17	17	0	38	10	41	7
	Ex.	14	0	14	0	0	0	34	31	24	28	28	14	34	41	10	38	10	41
Sem	Eq.	72	69	52	100	100	100	28	34	55	41	45	41						
	In.	17	24	24	0	0	0	31	34	10	28	31	21						
	Ex.	10	7	24	0	0	0	41	31	34	31	24	38						
44 meses																			
Com	Eq.	44	70	33	100	100	100	30	56	74	37	70	48	63	52	41	52	74	74
	In.	15	15	56	0	0	0	41	30	7	37	22	19	4	11	37	41	7	11
	Ex.	41	15	11	0	0	0	30	15	19	26	7	33	33	37	22	7	19	15
Sem	Eq.	44	56	37	96	100	100	26	52	70	33	67	52						
	In.	15	11	56	0	0	0	41	30	7	41	22	19						
	Ex.	41	33	7	4	0	0	33	19	22	26	11	30						
54 meses																			
Com	Eq.	54	81	46	100	100	100	42	38	65	42	69	58	58	73	42	62	46	42
	In.	12	12	19	0	0	0	35	27	12	35	15	15	23	19	15	31	35	50
	Ex.	35	8	35	0	0	0	23	35	23	23	15	27	19	8	42	8	19	8
Sem	Eq.	54	77	46	100	100	100	38	46	50	38	65	42						
	In.	12	12	19	0	0	0	38	27	19	38	15	23						
	Ex.	35	12	35	0	0	0	23	27	31	23	19	35						
76 meses																			
Com	Eq.	53	43	62	100	98	100	33	50	77	62	77	52	52	50	37	53	62	57
	In.	18	2	7	0	2	0	38	37	20	23	13	22	28	30	33	33	25	18
	Ex.	28	55	32	0	0	0	28	13	3	15	10	27	20	20	30	13	13	25
Sem	Eq.	52	35	58	100	100	100	35	38	63	55	67	47						
	In.	15	0	8	0	0	0	40	43	32	27	22	32						
	Ex.	33	65	33	0	0	0	25	18	5	18	12	22						

Isso ocorreu mesmo que alguns elementos avaliados apresentem algum tipo de interação com os macronutrientes. Por exemplo, o As pode comprometer a absorção e o transporte de P nas plantas (Singh et al., 2016), assim como o Se (não avaliado neste trabalho), apresenta interação com o S (Zhou et al., 2020). Em ambas as situações, há competição entre esses elementos em termos de absorção e translocação de nutrientes na planta. Isso ocorre devido à baixa concentração desses elementos na planta, fator importante nas interações de antagonismo e sinergismo entre os elementos (Safarzadeh et al., 2013).

O uso da fórmula do grupo MIF visa superestimar tanto a deficiência quanto o excesso (Wadt et al., 2007) de B, Cu e Zn, sendo observado aumento de populações com *Eucalyptus*

em desequilíbrio nutricional (deficiência ou excesso) e diminuição das populações em equilíbrio nutricional (Tabela 3.8). No geral, a inclusão dos EPTs aumentou o número de populações em equilíbrio nutricional, e diminuiu as em desequilíbrio.

Para Fe, Mn e Mo, nutrientes do grupo MIR, o número de populações em equilíbrio foi aumentado com aplicação da fórmula visando superestimar apenas o excesso, no entanto, houve diminuição das populações em situação de excesso desses nutrientes (Tabela 3.8). A inclusão dos EPTs nos cálculos DRIS aumentou a frequência de populações em situação de equilíbrio nutricional, com diminuição da frequência de populações, principalmente, em situação de excesso.

Considerando que a situação de deficiência e equilíbrio nutricional para os EPTs é desejada por apresentar valores inferiores ou similares à subpopulação de alta produtividade, a avaliação de situações desses elementos em excesso se faz necessária. Percebe-se que para os EPTs avaliados (Al, As, Ba, Cd, Cr e Pb), a frequência de populações em excesso variou de 7 a 41% com os cálculos DRIS (Tabela 3.8). Assim, foi observado que As e Pb (41%) apresentaram maior frequência de populações em excesso nutricional aos 22 meses após o plantio, As (37%) aos 44 meses após o plantio e Ba aos 54 (42%) e 76 (30%) meses após o plantio.

A concordância de diagnóstico nutricional (insuficiência, equilíbrio e excesso) quando houve ou não a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nas funções DRIS são apresentadas na Tabela 3.9. Quando significativa pelo teste Qui-quadrado ($p < 0,05$), a inclusão dos EPTs nas funções apresentou-se semelhantes àquelas sem a adição destes elementos, com concordâncias variando de 57 a 100% das populações, independentemente do método avaliado e experimentos.

Tabela 3.9. Frequência (%) de populações com diagnósticos concordantes do potencial de resposta a adubação por nutriente, com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nos cálculos das funções DRIS, pelos métodos propostos e de Jones (1981), em *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B

Idade	Método	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Média
22	Proposto	83*	66*	82*	100 ^{ns}	100 ^{ns}	100 ^{ns}	85*	81*	57*	78*	97*	60*	82
	Jones (1981)	87*	70*	84*	60*	73*	89*	76*	87*	75*	87*	92*	79*	80
44	Proposto	90*	85*	86*	100 ^{ns}	100 ^{ns}	100 ^{ns}	98*	85*	97*	96*	96*	89*	93
	Jones (1981)	82*	72*	80*	82*	76*	81*	98*	81*	88*	85*	92*	74*	83
54	Proposto	71*	85*	89*	100*	100 ^{ns}	100 ^{ns}	95*	82*	94*	98*	85*	93*	91
	Jones (1981)	60*	82*	86*	94*	90*	91*	84*	94*	80*	95*	96*	95*	87
76	Proposto	88*	73*	85*	100 ^{ns}	100 ^{ns}	100 ^{ns}	80*	82*	86*	92*	96*	77*	88
	Jones (1981)	79*	68*	87*	85*	77*	87*	91*	93*	75*	93*	89*	85*	84

^{ns} – Não significativo até 0,05 de probabilidade pelo teste qui-quadrado; * - Significativo até 0,05 de probabilidade pelo teste Qui-quadrado.

Comparando as respostas concordantes entre os métodos utilizados, apenas para o DRIS pelo método Wadt et al. (2007) os nutrientes do grupo MAR, não foram associados ao método proposto por Jones (1981), indicando baixa frequência (49-78%) de diagnóstico concordante (Tabela 3.10). Para os demais nutrientes, a frequência de diagnósticos concordantes entre os métodos foram associados e variaram entre 70 e 100% das populações, indicando que o método proposto neste trabalho, com a inclusão dos EPTs aos cálculos DRIS, não altera a interpretação dos resultados para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B.

Tabela 3.10. Frequência (%) de populações com diagnósticos concordantes do potencial de resposta a adubação entre as funções DRIS, pelo método proposto e de Jones (1981), em *Eucalyptus* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B

Idade	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Média
22	86*	93*	90*	75 ^{ns}	68 ^{ns}	63 ^{ns}	84*	86*	94*	86*	95*	75*	94*	95*	89*	98*	98*	100*	87
44	86*	80*	93*	49 ^{ns}	61 ^{ns}	68 ^{ns}	89*	70*	98*	96*	94*	73*	95*	96*	97*	98*	89*	92*	85
54	88*	92*	90*	51*	57 ^{ns}	71 ^{ns}	78*	84*	93*	93*	95*	84*	100*	96*	93*	93*	97*	90*	86
76	88*	80*	90*	57 ^{ns}	52 ^{ns}	78 ^{ns}	81*	86*	96*	94*	95*	81*	97*	90*	95*	93*	94*	89*	85

^{ns} – Não significativo até 0,05 de probabilidade pelo teste qui-quadrado; * - Significativo até 0,05 de probabilidade pelo teste Qui-quadrado.

Colocando-se os índices dos nutrientes em ordem crescente por população, é possível verificar o nutriente mais limitante por deficiência (menor índice) e por excesso (maior índice) (Pinto et al., 2010). Na Tabela 3.11 é apresentado a ordem dos nutrientes mais limitante por deficiência, com e sem a adição dos EPTs nas diferentes idades de avaliação. Em ambas as subpopulações, o elemento mais limitante por deficiência foi o B, com ou sem a inclusão dos EPTs, ocorrendo entre 21 e 32% das populações, exceto aos 22 meses após o plantio, em que

houve maior limitação por deficiência pelo Cu (24-27%) na subpopulação de baixa produtividade e N, P, B e Cu (18%) e Fe (27%) na subpopulação de alta produtividade, sem e com a inclusão dos EPTs, respectivamente.

Tabela 3.11. Ordem de limitação da produtividade por nutrientes em deficiência e respectivas porcentagens de ocorrência em populações de *Eucalyptus urograndis* tratadas com lodo de esgoto classe B subdivididas em populações de baixa e alta produtividade

Subp. EPTs		Ordem de limitação por deficiência											
22 meses													
Baixa	Sem	Cu > 27,6	Mo > 24,1	Mn > 17,2	K > 13,8	B > 10,3	P > 6,9	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Fe = 0,0	Zn = 0,0
	Com	Cu > 24,1	Mo > 20,7	Mn > 17,2	K = 13,8	B > 13,8	P > 6,9	Zn > 3,4	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Fe = 0,0
Alta	Sem	N = 18,2	P = 18,2	B = 18,2	Cu > 18,2	K = 9,1	Fe = 9,1	Mo > 9,1	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Mn = 0,0	Zn = 0,0
	Com	Fe > 27,3	B = 18,2	Cu > 18,2	N = 9,1	P = 9,1	K = 9,1	Mo > 9,1	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Mn = 0,0	Zn = 0,0
44 meses													
Baixa	Sem	B > 25,9	Mo > 22,2	K = 14,8	Mn > 14,8	Cu = 7,4	Fe = 7,4	Zn > 7,4	N = 0,0	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
	Com	B > 25,9	Mo > 22,2	K = 14,8	Mn > 14,8	Cu = 7,4	Fe = 7,4	Zn > 7,4	N = 0,0	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
Alta	Sem	B > 30,8	P = 15,4	Fe = 15,4	Mo > 15,4	K = 7,7	Cu = 7,7	Zn > 7,7	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Mn = 0,0
	Com	B > 30,8	P = 15,4	Fe = 15,4	Zn > 15,4	K = 7,7	Cu = 7,7	Mo > 7,7	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Mn = 0,0
54 meses													
Baixa	Sem	B > 30,8	Mn > 19,2	Fe > 15,4	Cu > 11,5	K = 7,7	Zn > 7,7	N = 3,8	Mo > 3,8	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
	Com	B > 30,8	Mn > 19,2	Fe > 15,4	Cu > 11,5	K = 7,7	Zn > 7,7	N = 3,8	Mo > 3,8	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
Alta	Sem	B = 21,4	Cu > 21,4	Zn > 14,3	N = 7,1	P = 7,1	K = 7,1	Ca = 7,1	Mn = 7,1	Mo > 7,1	Mg = 0,0	S = 0,0	Fe = 0,0
	Com	B = 21,4	Cu > 21,4	K = 14,3	Zn > 14,3	N = 7,1	P = 7,1	Mn = 7,1	Mo > 7,1	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Fe = 0,0
76 meses													
Baixa	Sem	B > 30,0	Cu > 28,3	Fe = 10,0	Mn = 8,3	Mo = 8,3	Zn > 8,3	N > 6,7	P = 0,0	K = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
	Com	B > 31,7	Cu > 28,3	Zn > 10,0	N = 8,3	Fe = 8,3	Mn > 8,3	Mo > 5,0	P = 0,0	K = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
Alta	Sem	Cu = 21,1	Mo > 21,1	B > 15,8	N = 10,5	K = 10,5	Mn > 10,5	Fe = 5,3	Zn > 5,3	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0
	Com	B = 21,1	Cu > 21,1	Mo > 15,8	N = 10,5	Fe = 10,5	Mn > 10,5	K = 5,3	Zn > 5,3	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0

Subp. – Subpopulação.

Da mesma forma que para deficiência, é possível verificar os elementos mais limitantes por excesso (Tabela 3.12). Houve variação dos nutrientes e EPTs mais limitantes por

excesso nas diferentes idades de avaliação. No geral, B (21-27%) foi o nutriente mais limitante por excesso na subpopulação de alta produtividade, exceto aos 76 meses, onde o Mo foi o mais limitante (21%). Na subpopulação de baixa produtividade, o B (43%), N (26-30%), Zn (15-19%) e P (28-33%) foram os nutrientes mais limitantes por excesso aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio, respectivamente. Para os EPTs, As (24%) e Cd (36%) foram os mais limitantes aos 22 meses, As (33%) e Ba (31%) aos 44 meses, Ba (35%) e Cd (29%) aos 54 meses e Ba (22-32%) aos 76 meses após o plantio, nas subpopulações de baixa e alta produtividade, respectivamente. Sendo assim, de forma geral, o Ba foi o elemento potencialmente tóxico mais limitante por excesso no plantio de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto.

Tabela 3.12. Ordem de limitação da produtividade por nutrientes e elementos potencialmente tóxicos em excesso e respectivas porcentagens de ocorrência em populações de *Eucalyptus urograndis* tratadas com lodo de esgoto classe B subdivididas em populações de baixa e alta produtividade

Subpop.		EPTs		Ordem de limitação por excesso									
22 meses													
Baixa	Sem	B >	Cu >	Fe >	Mo =	Zn >	Mn >	N =	K >	P =	Ca =	Mg =	S
		34,5	17,2	13,8	10,3	10,3	6,9	3,4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0
	Com	B >	Cu >	Fe =	Mo >	Mn =	Zn >	N =	K >	P =	Ca =	Mg =	S
34,5		17,2	13,8	13,8	6,9	6,9	3,4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	
		As =	Cd >	Al >	Pb >	Ba >	Cr						
		24,1	24,1	20,7	17,2	10,3	3,4						
Alta	Sem	P =	B >	N =	K =	Cu =	Fe =	Mn =	Mo =	Zn >	Ca =	Mg =	S
		18,2	18,2	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	0,0	0,0	0,0
	Com	B >	P =	Mn >	K =	Cu =	Fe =	Mo >	N =	Ca =	Mg =	S =	Zn
27,3		18,2	18,2	9,1	9,1	9,1	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Cd >	As =	Cr >	Al =	Ba =	Pb						
		36,4	18,2	18,2	9,1	9,1	9,1						
44 meses													
Baixa	Sem	N >	B =	Mn =	Zn >	Fe >	Cu =	Mo >	P =	K =	Ca =	Mg =	S
		29,6	18,5	18,5	18,5	7,4	3,7	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Com	N >	B =	Mn =	Zn >	Fe >	Cu =	Mo >	P =	K =	Ca =	Mg =	S
25,9		18,5	18,5	18,5	11,1	3,7	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		As >	Al >	Ba >	Cd =	Pb >	Cr						
		33,3	29,6	18,5	7,4	7,4	3,7						
Alta	Sem	B =	Zn >	K =	Mn >	Cu =	Fe =	Mo >	N =	P =	Ca =	Mg =	S
		23,1	23,1	15,4	15,4	7,7	7,7	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Com	B =	Zn >	K =	Mn >	Cu =	Fe =	Mo >	N =	P =	Ca =	Mg =	S
23,1		23,1	15,4	15,4	7,7	7,7	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Ba >	Al =	Cr >	Cd >	As >	Pb						
		30,8	23,1	23,1	15,4	7,7	0,0						

		54 meses											
Baixa	Sem	N = 15,4	K = 15,4	Mn = 15,4	Zn > 15,4	Cu = 11,5	Fe = 11,5	Mo > 11,5	B > 3,8	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
	Com	Zn > 19,2	K = 15,4	Mn > 15,4	N = 11,5	Cu = 11,5	Fe = 11,5	Mo > 11,5	B > 3,8	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
		Ba > 34,6	Al = 19,2	As = 19,2	Cr > 19,2	Cd = 3,8	Pb 3,8						
Alta	Sem	B > 21,4	K = 14,3	Cu = 14,3	Mn = 14,3	Mo > 14,3	P = 7,1	Fe = 7,1	Zn > 7,1	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
	Com	B = 21,4	Cu > 21,4	Mn = 14,3	Mo > 14,3	P = 7,1	K = 7,1	Fe = 7,1	Zn > 7,1	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
		Cd > 28,6	As = 21,4	Pb > 21,4	Cr > 14,3	Al = 7,1	Ba 7,1						
		76 meses											
Baixa	Sem	P > 33,3	K = 13,3	Zn > 13,3	B > 11,7	N > 10,0	Cu = 5,0	Mn = 5,0	Mo > 5,0	Fe > 3,3	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
	Com	P > 28,3	Zn > 16,7	K > 13,3	B > 11,7	N = 10,0	Mn > 10,0	Mo > 5,0	Cu > 3,3	Fe > 1,7	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
		Ba = 21,7	Pb > 21,7	As = 16,7	Cr > 16,7	Al = 11,7	Cd 11,7						
Alta	Sem	Mo > 21,1	P = 15,8	Mn > 15,8	K = 10,5	Fe = 10,5	Zn > 10,5	N = 5,3	B = 5,3	Cu > 5,3	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
	Com	Mo > 21,1	P = 15,8	Mn > 15,8	K = 10,5	Fe = 10,5	Zn > 10,5	N = 5,3	B = 5,3	Cu > 5,3	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S 0,0
		Ba > 31,6	Pb > 26,3	Cd > 15,8	Al = 10,5	Cr > 10,5	As 5,3						

Subp. – Subpopulação.

Nascimento et al. (2020), estudando lodo de esgoto de diferentes estações de tratamento de esgoto no estado de São Paulo, observaram que lodo de esgoto misto (origem industrial e doméstica) são menos propensos ao uso agrícola devido à alta concentração de EPTs, incluindo Ba, com média de 668 mg kg⁻¹, concentração semelhante à observada no lodo de esgoto utilizado neste trabalho (629 mg kg⁻¹; Tabela 3.2), porém inferior ao limite máximo permitido pela legislação brasileira (1.300 mg kg⁻¹; Brasil, 2020).

Com os índices DRIS, é possível calcular a faixa de suficiência para cada elemento avaliado e o seu teor crítico (Tabela 3.13). Os coeficientes de determinação (R²) das equações geradas apresentaram valores entre 0,28 e 0,94, sendo normalmente inferiores para o N, P, S e Zn (Tabelas 3.A2 e 3.A3). Esses resultados também foram observados por outros autores em diferentes culturas (Serra et al., 2010; Camacho et al., 2012; Santos et al., 2013; Partelli et al., 2014; Santos; Rozane, 2017).

Tabela 3.13. Ponto de equilíbrio nutricional (PEN) e faixas de suficiência encontrados no experimento pelo método DRIS, com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos, para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B

Elemento	22 meses				44 meses			
	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa
N (g kg ⁻¹)	20,3	18,5-22,0	20,1	18,3-21,8	19,9	17,8-21,9	19,8	17,8-21,8
P (g kg ⁻¹)	1,46	1,39-1,53	1,45	1,38-1,51	1,29	1,21-1,37	1,29	1,20-1,37
K (g kg ⁻¹)	7,91	7,28-8,54	7,81	7,18-8,43	9,8	9,0-10,6	9,88	9,11-10,65
Ca (g kg ⁻¹)	11,0	10,1-11,8	10,8	10,0-11,7	13,7	11,6-15,7	13,6	11,6-15,7
Mg (g kg ⁻¹)	2,13	1,97-2,30	2,11	1,95-2,28	1,96	1,79-2,13	1,95	1,78-2,12
S (g kg ⁻¹)	1,06	0,96-1,16	1,05	0,95-1,15	1,05	0,94-1,16	1,04	0,94-1,15
B (mg kg ⁻¹)	66	52-80	64	50-78	57	48-67	57	48-67
Cu (mg kg ⁻¹)	3,04	2,70-3,37	2,99	2,65-3,32	2,79	2,55-3,02	2,79	2,56-3,03
Fe (mg kg ⁻¹)	119	91-147	116	87-144	249	223-275	248	222-274
Mn (mg kg ⁻¹)	255	215-296	250	209-291	289	241-338	288	240-337
Mo (mg kg ⁻¹)	0,08	0,00-0,25	0,08	0,00-0,25	0,06	0,05-0,08	0,06	0,05-0,08
Zn (mg kg ⁻¹)	15,7	14,4-17,0	15,4	14,1-16,7	13,2	12,0-14,5	13,2	12,0-14,5
Al (mg kg ⁻¹)	147	102-193			336	301-371		
As (mg kg ⁻¹)	0,01	0,005-0,014			0,06	0,05-0,06		
Ba (mg kg ⁻¹)	11,2	9,5-12,9			16,4	12,2-20,7		
Cd (mg kg ⁻¹)	0,003	0,002-0,004			0,01	0,00-0,01		
Cr (mg kg ⁻¹)	0,16	0,11-0,20			0,20	0,18-0,22		
Pb (mg kg ⁻¹)	0,09	0,07-0,11			0,15	0,14-0,17		

Elemento	54 meses				76 meses			
	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa
N (g kg ⁻¹)	20,9	19,9-21,9	21,0	20,0-21,9	14,3	13,4-15,2	14,3	13,3-15,2
P (g kg ⁻¹)	1,38	1,32-1,44	1,38	1,32-1,44	0,95	0,86-1,04	0,94	0,84-1,03
K (g kg ⁻¹)	8,84	8,13-9,54	8,88	8,17-9,58	8,95	8,33-9,56	8,93	8,31-9,55
Ca (g kg ⁻¹)	9,25	8,54-9,96	9,28	8,57-9,99	10,2	8,8-11,6	10,2	8,8-11,7
Mg (g kg ⁻¹)	1,99	1,86-2,12	2,01	1,88-2,13	2,37	2,11-2,64	2,42	2,15-2,69
S (g kg ⁻¹)	1,54	1,46-1,62	1,55	1,47-1,63	1,08	1,01-1,15	1,08	1,01-1,15
B (mg kg ⁻¹)	37	30-43	37	30-43	55	46-63	55	46-64
Cu (mg kg ⁻¹)	4,33	3,97-4,69	4,33	3,98-4,69	4,71	4,21-5,20	4,73	4,23-5,22
Fe (mg kg ⁻¹)	142	131-153	142	131-153	130	113-147	129	112-146
Mn (mg kg ⁻¹)	223	191-254	224	192-255	306	236-375	305	236-375
Mo (mg kg ⁻¹)	0,02	0,01-0,02	0,02	0,01-0,02	0,07	0,05-0,09	0,07	0,05-0,09
Zn (mg kg ⁻¹)	15,9	15,2-16,7	16,0	15,2-16,7	15,5	13,9-17,0	15,5	13,9-17,1
Al (mg kg ⁻¹)	193	177-209			159	134-184		
As (mg kg ⁻¹)	0,04	0,03-0,04			0,03	0,03-0,04		
Ba (mg kg ⁻¹)	7,63	6,54-8,72			12,9	10,4-15,5		
Cd (mg kg ⁻¹)	0,003	0,002-0,004			0,005	0,003-0,006		
Cr (mg kg ⁻¹)	0,21	0,20-0,23			0,23	0,19-0,26		
Pb (mg kg ⁻¹)	0,09	0,08-0,09			0,09	0,07-0,11		

As faixas de suficiência de nutrientes e EPTs de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto, determinadas pelas funções DRIS, variaram de acordo com a idade de plantio, demonstrando mais uma vez a necessidade de regras específicas para cada situação de plantio, como idade e local (Silva et al., 2005). Também pode-se observar alteração dos teores e redução

da amplitude da faixa de suficiência em relação a recomendação oficial do estado de São Paulo (Gonçalves et al., 2022). Isto ocorre devido a especificidade da análise utilizada neste trabalho e utilização das funções DRIS (Santos; Rozane, 2017).

Para os EPTs, o uso deste método pode obter e produzir informações sobre o limite máximo de concentração destes elementos nas plantas sem prejuízo na produtividade e crescimento do *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto. Assim, recomendam-se novos estudos com o objetivo de obter normas, faixa de suficiência e concentração máxima de EPTs para distintas culturas e manejo da adubação com resíduos e adubos orgânicos, como o lodo de esgoto.

3.4 Conclusões

A modelagem das funções DRIS com a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos foi capaz de subestimar ou superestimar estes elementos em situação de “deficiência” e de excesso, respectivamente, contribuindo para avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*.

A partir dos índices gerados pelo método DRIS foi possível determinar quais foram os nutrientes mais limitantes por deficiência e por excesso, além de ordenar os elementos potencialmente tóxicos que limitaram a produtividade do *Eucalyptus*. Sendo que o Ba foi o elemento mais limitante nas subpopulações de baixa e alta produtividade.

A identificação das populações em situação de deficiência, equilíbrio e excesso nutricional para cada nutriente pelo conceito de potencial resposta a adubação mostrou-se uma ferramenta eficaz para interpretação dos índices DRIS, apresentando resultados semelhantes quando houve ou não a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos. No entanto, salienta-se a necessidade de normas específicas para cada região ou situação de análise.

Referências

ABREU-JUNIOR; C.H.; FIRME, L.P.; MALDONADO, C.A.B.; MORAES NETO, S.P.; ALVES, M.C.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; GAVA, J.L.; HE, Z.; NOGUEIRA, T.A.R.; CAPRA, G.F. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increases wood production in *Eucalyptus* plantations. **Journal of Environment Management**, v. 203, p.51-58, 2017.

ABREU-JUNIOR, C.H.; OLIVEIRA, M.G.; CARDOSO, P.H.S.; MANDU, T.S.; FLORENTINO, A.L.; OLIVEIRA, F.C.; REIS, J.V.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; NOGUEIRA, T.A.R.; CAPRA, G.F.; HE, Z. Sewage sludge application in *Eucalyptus urograndis* plantation: availability of phosphorus in soil and wood production. **Frontiers in Environmental Science**, v.8, 116, 2020.

- ALEISA, E.; ALSULAILI, A.; ALMUZAINI, Y. Recirculating treated sewage sludge for agricultural use: Life cycle assessment for a circular economy. **Waste Management**, v.135, p.79-89, 2021.
- ARAÚJO, G.C.L.; GONZALEZ, M.H.; FERREIRA, A.G.; NOGUEIRA, A.R.; NÓBREGA, J.A. Effect of acid concentration on closed-vessel microwave-assisted digestion of plant materials. **Spectrochimica Acta Part B**, v.57, p.2121-2132, 2002.
- ATHAMENH, B.; SALEM, N.; ET-ZURAIQI, S.; SULEIMAN, W.; RUSAN, M. Combined land application of treated wastewater and biosolids enhances crop production and soil fertility. **Desalination and Water Treatment**, v.53, p.3283–3294, 2015.
- BALDOCK, J.O.; SCHULTE, E.E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal**, v.88, p.448-456, 1996.
- BEAUFILS, E.R. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS): a general scheme of experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. Pietermaritzburg: University of Natal, 132p, 1973.
- BOURIOUG, M.; ALAOUI-SOSSÉ, L.; LAFFRAY, X.; RAOUF, N.; BENBRAHIM, M.; BADOT, P.M.; ALAOUI-SOSSÉ, B. Evaluation of sewage sludge effects on soil properties, plant growth, mineral nutrition state, and heavy metal distribution in European Larch Seedlings (*Larix decidua*). **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.39, p.5325-5335, 2014.
- BRASIL. Conselho Nacional Do Meio Ambient– - CONAMA. **Resolução 375**. Brasília, DF, 2006. 31 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port71utriema/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>. Acesso em: 22 jul. 2017.
- BRASIL. Conselho Nacional Do Meio Ambient– - CONAMA. **Resolução 498**. Brasília, 8p., 2020. Available in: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- CALHEIROS, L.C.S.; FREIRE, F.J.; MOURA FILHO, G.; OLIVEIRA, E.C.A.; MOURA, A.B., COSTA, J.V.T.; CRUZ, F.J.R.; SANTOS, A.S. Different criteria for determining DRIS standards influencing the nutritional diagnosis and potential fertilization response of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, p.995-1007, 2018.
- CAMACHO, M.A.; SILVEIRA, M.V.; CAMARGO, R.A.; NATALE, W. Faixas normais de nutrientes pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranjeira-pera. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 46, p. 193-200, 2012.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106)

CARDOSO, P.H.S.; DEBONI NETO, A.; OLIVEIRA, F.C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; GUEDES, F.T.P.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; NOGUEIRA, T.A.R.; CAPRA, G.F.; JANI, A.D.; HE, Z.; ABREU-JUNIOR, C.H. Fertilization management with sewage sludge sustains *Eucalyptus* productivity in Cerrado infertile soil. **Forest Ecology and Management**, v.519, 120338, 2022.

DIAS, J.R.M.; WADT, P.G.S.; PARTELLI, F.L. ESPINDULA, M.C.; PEREZ, D.V.; SOUZA, F.R.; BERGAMIN, A.C.; DELARMEIDA, E.A. Nutrient ranges and nutritional monitoring of 'Pê' trees based on the CND method in fruiting stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.776-785, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Produção e Informação. 412p. 1999.

GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JUNIOR, J.C.; ROCHA, J.H.T.; FERRAZ, A.V., GUERRINI, I.A. Plantações florestais e seringueira. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R.M.; RAIJ, B.V. **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 500p, 2022.

GONÇALVES, J.L.M.; RAIJ, B.V.; GONÇALVES, J.C. Florestais in: RAIJ, B.V., CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas e Fundação IAC, (Boletim Técnico, 100), 285p, 1997.

KURIHARA, C.H.; VENEGAS, V.H.A.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; STAUT, L.A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Revista Ceres**, v.60, p.412-419, 2013.

JONES, W.W. Proposed modifications of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for interpreting plant analyses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.12, p.785-794, 1981.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 319p, 1997.

MARRON, N. Agronomic and environmental effects of land application of residues in short-rotation tree plantations: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v.81, p.378-400, 2015.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants** (Third Edition), Academic Press, 651p., 2012.

MATOS, G.S.B.; FERNANDES, A.R.; WADT, P.G.S. FRANZINI, V.I.; SOUZA, E.M.C.; RAMOS, H.M.N. DRIS calculation methods for evaluating the nutritional status of oil palm in the Eastern Amazon. **Journal of Plant Nutrition**, v.10, p.1240-1251, 2018.

MORAIS, T.C.B.; PRADO, R.M.; TRASPADINI, E.I.F.; WADT, P.G.S.; PAULA, R.C.; ROCHA, A.M.S. Efficiency of CI, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. Rooted cuttings. **Forests**, v.10, 786, 2019.

- NASCIMENTO, A.L.; SOUZA, A.J.; OLIVEIRA, F.C.; COSCIONE, A.R.; VIANA, D.G.; REGITANO, J.B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v.258, 120746, 2020.
- NOGUEIRA, T.A.R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU-JUNIOR, C.H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.168-177, 2013.
- PARTELLI, F.L.; DIAS, J.R.M.; VIEIRA, H.D.; WADT, P.G.S.; PAIVA JÚNIOR, E. Avaliação nutricional de feijoeiro irrigado pelos métodos CND, DRIS e faixas de suficiência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.858-866, 2014.
- PINTO, P.A.C.; DIAS, L.E.; ALVAREZ V., V.H.; CHOUDHURY, M.M.; VIEIRA, G. Avaliação do estado nutricional da magueira Tommy Atkins no submédio do vale do rio São Francisco: cálculo dos índices DRIS. **Recursos Rurais**, v.6, p.5-13, 2010.
- PRATES, A.R.; KAWAKAMI, K.C.; COSCIONE, A.R.; FILHO, M.C.M.T.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C.H.; OLIVEIRA, F.C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F.S.; HE, Z.; JANI, A.D.; CAPRA, G.F.; GANGA, A., NOGUEIRA, T.A.R. Composted sewage sludge sustains high maize productivity on an infertile oxisol in the Brazilian cerrado. **Land**, v. 11, 1246, 2022.
- RAIJ, B. CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p.
- RIBEIRO, F.O.; FERNANDES, A.R.; GALVÃO, J.R.; MATOS, G.S.B.; LINDOLFO, M.M.; SANTOS, C.R.C.; PACHECO, M.J.B. DRIS and geostatistical nutrient indices for nutritional diagnosis of nutrient yield of fertirrigated acai palm. **Journal of Plant Nutrition**, v.43, p.1875-1886, 2020.
- SAFARZADEH, S.; RONAGHI, A.; KARIMIAN, N. Effect of cadmium toxicity on micronutrient concentration, uptake and partitioning in seven rice cultivars. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.59, p.231-245, 2013.
- SANTOS, E.F.; DONHA, R.M.A.; MAGNO, C.M. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos CHM, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1651-1658, 2013.
- SANTOS, E.M.H.; ROZANE, D. E. DRIS standard and normal ranges of foliar nutrient contents for the culture of 'Thompson' atemoya. **Ciência Rural**, v.47, e20160613, 2017.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber volume. **Journal of Agriculture Research**, v.47, p.719-734, 1933.
- SERRA, A.P.; MARCHETTI, M.E.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O.; CAMACHO, M.A. Determinação de faixas normais de nutrientes no algodoeiro pelos métodos ChM, CND e DRIS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 97-104, 2010.
- SILVA, G.G.C.; NEVES, J.C.L.; ALVAREZ V.; V.H.; LEITE, F.P. Avaliação da universalidade das normas DRIS, M-DRIS E CND. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.755-761, 2005.

SILVA, G.P.; PRADO, R.M.; WADT, P.G.S. SILVA, F.C.; VAZ, G.J.; MODA, L.R.; CAIONE, G. Accuracy measures for phosphorus in assessing the nutritional status of sugarcane using the comprehensive integrated diagnosis and recommendation system (DRIS). **Journal of Plant Nutrition**, v.44, p.1287-1299, 2020.

SINGH, S.; PARIHAR, P.; SINGH, R.; SINGH, V.P.; PRASAD, S.M. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomic. **Frontiers in Plant Science**, v.6, 1143, 2016.

SOUZA, H.A.; ROZANE, D.E.; AMORIM, D.A.; DIAS, M.J.; MODESTO, V.C.; NATALE, W. Assessment of nutritional status of guava seedlings using preliminary DRIS norms and sufficiency ranges. **Journal of Plant Nutrition**, v. 38, p. 1611-1618, 2015.

SUSZEK, G.; SOUZA, E.G.; NÓBREGA, L.H.P.; PACHECO, F.; SILVA, C.T.A.C. Use of yield and total soluble solids/total titratable acidity ratio in orange on group definition for standard DRIS. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.39, 2017.

Systat Software. SigmaPlot. San Jose, California USA, 2020.

USEPA. **Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils**. Revision 1. Washington, DC, 2007. 30p.

WADT, P.G.S. Nutritional status of *Eucalyptus grandis* clones evaluated by critical level and DRIS methods. **Revista Arvore**, v28, p.15-20, 2004.

WADT, P.G.S. **Os métodos da chance matemática e do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto**. 1996. 123 F. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plant-s) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

WADT, P.G.S. Relationship between soil class and nutrition status of coffee plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.227-234, 2005.

WADT, P.G.S.; SILVA, D.J.; MAIA, C.E.; TOMÉ JUNIOR, J.B.; PINTO, P.A.C.; MACHADO, P.L.O.A. Modelagem de funções no cálculo do índice DRIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.57-64, 2007.

XUE, J.; KIMBERLEY, M.O.; ROSS, C.; GIELEN, G.; TREMBLAY, L.A.; CHAMPEAU, O.; HORSWELL, J.; WANG, H. Ecological impacts of long-term application of biosolids to a radiata pine plantation. **Science of the Total Environment**, v.530, p.233-240, 2015.

ZHOU, X.; YANG, J.; KRONZUCKER, H.J.; SHI, W. Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: A review. **Frontiers in Plant Science**, v.11, 586421, 2020.

4 INCLUSÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS FUNÇÕES CND-*clr* PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DE *Eucalyptus* ADUBADO COM LODO DE ESGOTO CLASSE B

Resumo

A Diagnose da Composição Nutricional (CND) baseia-se na obtenção de variáveis multinutriente a partir das relações entre o teor de um nutriente e a média geométrica dos teores dos demais componentes da matéria seca, de maneira a verificar a influência destes sob o estado nutricional das culturas. Assim, a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs) na avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* poderá auxiliar na verificação da interferência destes elementos quanto aos aspectos nutricionais da planta. Com isso, objetivou-se estabelecer normas CND-*clr*, as faixas de suficiência dos nutrientes e dos EPTs e classificar os elementos quanto à limitação por excesso e deficiência, pelo método CND-*clr* para *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B. Para tanto, dados de incremento médio anual e teores de nutrientes e EPTs foram obtidos em experimento aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio de *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto classe B. A adição dos EPTs no cálculo do CND-*clr* reduziu consideravelmente a média geométrica dos elementos, no entanto, a concordância de diagnóstico nutricional (insuficiência, equilíbrio e excesso) quando houve ou não a inclusão dos EPTs variou de 67 a 99% das populações. A inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nas normas e funções CND-*clr* para *Eucalyptus* não alteram a interpretação do estado nutricional da cultura. Assim que, os índices CND-*clr*, obtidos para os nutrientes e elementos potencialmente tóxicos em *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B, permitem de forma eficiente determinar a deficiência, o excesso e o equilíbrio dos elementos avaliados, assim, como sua ordem de limitação por deficiência e excesso nutricional. No entanto, é proposto o estabelecimento de normas CND-*clr* para cada situação em estudo, como diferentes tipos de manejo, idade e região do cultivo, características do clone utilizado entre outros.

Palavras-chave: diagnose foliar, metais pesados, nutrientes, relação log centralizada.

Abstract

The Compositional Nutrient Diagnosis (CND) is based on obtaining multinutrient variables from the relationship between the content of a nutrient and the geometric mean of the content of the other components of dry matter, in order to verify their influence on the nutritional status of cultures. Thus, the inclusion of potentially toxic elements (PTEs) in the evaluation of the nutritional status of *Eucalyptus* may help in verifying the interference of these elements with regard to the nutritional aspects of the plant. With this, our aim was to establish CND-*clr* norms, the sufficiency ranges of nutrients and EPTs, and to classify the elements regarding the limitation by excess and deficiency, by the CND-*clr* method for *Eucalyptus* treated with class B sewage sludge. For this purpose, average annual increment data and nutrient and EPTs contents were obtained in an experiment at 22, 44, 54, and 76 months after planting *Eucalyptus*

fertilized with class B sewage sludge. The addition of EPTs in the calculation of CND-*clr* reduced considerably the geometric mean of the elements, however, the nutritional diagnosis agreement (insufficiency, balance, and excess) when EPTs were included or not varied from 67 to 99% of the populations. The inclusion of potentially toxic elements in the CND-*clr* norms and functions for *Eucalyptus* does not change the interpretation of the nutritional status of the crop. Thus, the CND-*clr* indices, obtained for nutrients and potentially toxic elements in *Eucalyptus* treated with class B sewage sludge, efficiently determine the deficiency, excess, and balance of the evaluated elements, as well as their order of limitation nutritional deficiency and excess. However, the establishment of CND-*clr* norms is proposed for each situation under study, such as different types of management, age and region of cultivation, characteristics of the clone used, among others.

Keywords: centered log ratio, heavy metals, leaf diagnosis, nutrients.

4.1 Introdução

A crescente produção de lodo de esgoto devido ao aumento populacional e do número de estações de tratamento de esgoto (ETEs) é uma problemática para os órgãos de gerenciamento deste resíduo, por conta da necessidade de sua adequada destinação final, de forma a gerar ganhos ecológicos, sociais e econômicos. No Brasil, 37% da destinação do lodo é realizada em aterros sanitários, 13% em rios e apenas 14% é reaproveitado (IBGE, 2008). Entretanto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305, restringe a destinação de resíduos para aterros sanitários que ainda sejam passíveis de reutilização (Brasil, 2012), como o lodo de esgoto (Moretti et al., 2015).

Por conter elevado teor de matéria orgânica, de 40 a 80% da base seca (Saito, 2007), e elementos essenciais às plantas, o lodo pode ser destinado a áreas agrícolas e florestais e em substituição parcial ou total ao uso de fertilizantes minerais (Nascimento et al., 2015). Isso ocorre porque o lodo de esgoto pode proporcionar inúmeros benefícios à fertilidade do solo, tais como a elevação do teor de C orgânico, da CTC (Ferraz et al., 2016), além de melhorias nas propriedades físicas (Sampaio et al., 2012) e microbiológicas do solo (Melo et al., 2018). Além disso, a aplicação do lodo tem-se tornado uma alternativa atraente do ponto de vista socioeconômico e ambiental devido aos altos custos e impactos ambientais advindos do uso dos demais fertilizantes (Galdos et al., 2004).

Entretanto, o lodo contém elementos potencialmente tóxicos (EPTs), como As, Ba, Cd, Co, Cr, Hg, Pb e Se, que podem causar danos ao ambiente e distúrbios nutricionais nas plantas. Assim, há a necessidade de se conhecer os efeitos dos EPTs sobre o desenvolvimento e produtividade das plantas, sendo esse um fator imprescindível a ser levado em consideração no

uso deste resíduo na agricultura (Bettiol; Camargo, 2007). Deste modo, a avaliação do estado nutricional de plantas, por meio da aplicação dos métodos de diagnose foliar, relacionando os teores de nutrientes entre si, tem-se destacado dos métodos tradicionais de diagnose que consideram os teores dos nutrientes individualmente, havendo possibilidade de se incluir os EPTs para realização da diagnose da nutrição e influência desses elementos no desenvolvimento da planta.

Em vista disso, o desenvolvimento de normas para a Diagnose da Composição Nutricional (CND), desenvolvido por Parent e Dafir (1992), pode representar uma importante alternativa para modelar a resposta biológica das culturas às variações no teor de nutrientes e EPTs na planta. O CND-*clr* (*centered log ratio*) baseia-se na obtenção de variáveis multinutrientes, ponderada pela média geométrica da composição nutricional, ou seja, as relações entre o teor de um nutriente e a média geométrica dos teores dos demais componentes (inclusive aqueles não avaliados analiticamente) da matéria seca, de maneira a verificar a influência destes sob o estado nutricional das culturas (Parent; Dafir, 1992).

Desta forma, a hipótese deste trabalho é que a inclusão dos EPTs na avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* no método CND-*clr* auxilia na verificação da interferência destes elementos quanto aos aspectos nutricionais da planta. Assim, objetivou-se estabelecer normas CND-*clr*, as faixas de suficiência dos nutrientes e dos EPTs e classificar os elementos quanto à limitação por excesso e deficiência, pelo método CND-*clr* para *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área experimental

O experimento foi instalado em fevereiro de 2015, ocupando área total de 2,7 ha em plantio comercial de *Eucalyptus* no município de Boa Esperança do Sul, SP (21°59'33" S e 48°23'27" O), à uma altitude de 516 metros. A área experimental foi cultivada comercialmente com *Eucalyptus* pelos últimos 40 anos e nunca houve aplicação de lodo de esgoto.

O clima da região é classificado como Cwa – zona subtropical úmida com verão quente e inverno seco, de acordo com Köppen, com precipitação média anual de 1074 mm e temperatura média fria de 17,5 °C e quente de 30,1 °C (Figura 4.1). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd) (Embrapa, 1999). A análise química foi realizada de acordo com método descrito em Rajj et al. (2001) e análise granulométrica pelo método da pipeta (Camargo et al. 1986) (Tabela 4.1).

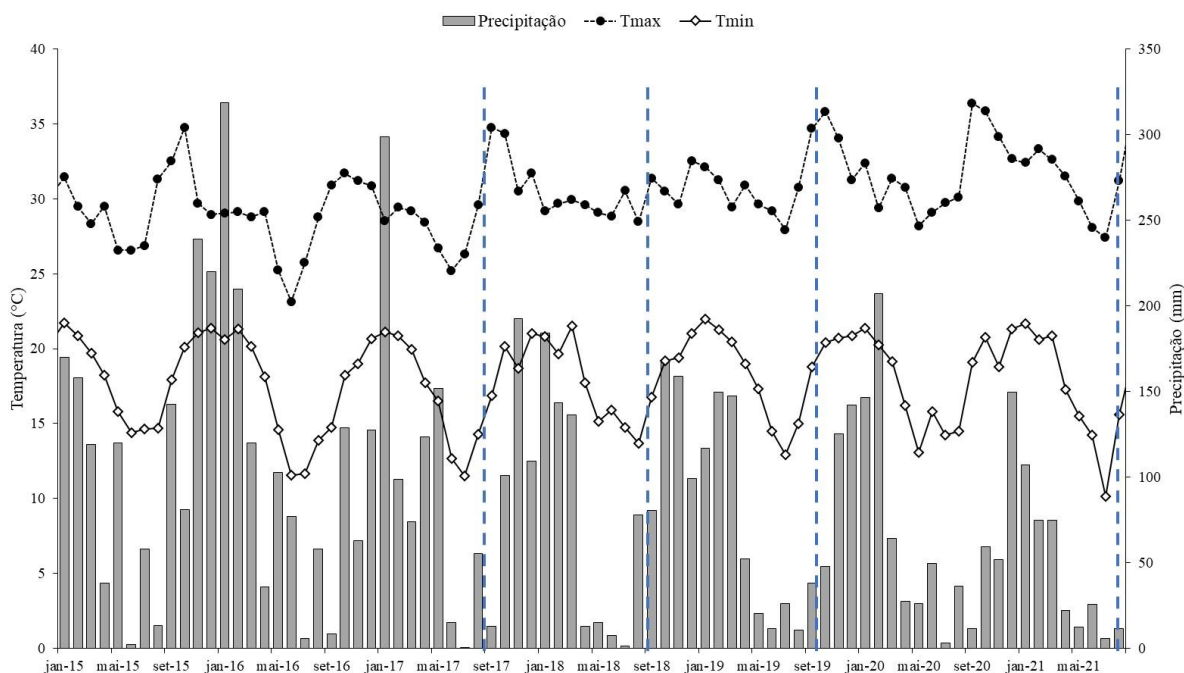


Figura 4.1. Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) no município de Boa Esperança do Sul-SP. Linhas verticais e tracejadas representam as épocas de amostragem e inventário aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio.

Tabela 4.1. Caracterização química¹ e física² do solo antes da instalação do experimento.

Atributos	Unidade	Camada (cm)			
		0-5	5-10	10-20	20-40
pH _(CaCl₂)	-	5,3	5,4	5,7	4,9
Matéria Orgânica	g dm ⁻³	14	10	7	3
P _{resina}	mg dm ⁻³	7	6	3	2
K	mmol dm ⁻³	0,3	0,3	0,5	0,4
Ca ⁺²	mmol dm ⁻³	23	18	16	9
Mg ⁺²	mmol dm ⁻³	2	2	2	1
Al ⁺³	mmol dm ⁻³	0,0	0,0	0,0	0,5
H+Al	mmol dm ⁻³	20	19	15	18
S-SO ₄	mg dm ⁻³	5	5	2	5
Capacidade de troca de cátions	mmol dm ⁻³	46	40	34	29
Saturação por bases	%	56	51	54	38
B	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,2
Cu	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,3
Fe	mg dm ⁻³	32	28	35	28
Mn	mg dm ⁻³	2,0	1,0	2,0	0,7
Zn	mg dm ⁻³	0,6	0,2	0,6	0,8
Areia (> 0,05 mm)	g kg ⁻¹	900	900	900	900
Silte (> 0,002 and < 0,05 mm)	g kg ⁻¹	10	10	20	20
Argila (< 0,002 mm)	g kg ⁻¹	90	90	80	80

¹Rajj et al. (2001) e ²Camargo et al. (1986).

4.2.2 Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado foi gerado na ETE de Jundiaí, SP, onde o esgoto passa por um sistema de lagoas aeradas de mistura completa e lagoas de decantação, sendo o desaguamento feito com floculação à base de polímero catiônico, seguido de centrifugação. Na Tabela 4.2 são apresentadas a composição química desse material, utilizando-se a metodologia proposta pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007).

Tabela 4.2. Caracterização física e química do lodo de esgoto proveniente da ETE Jundiaí

Atributos	Lodo de esgoto	Atributos	Lodo de esgoto
pH-H ₂ O	6,8		----- mg kg ⁻¹ -----
	----- % -----	B	1,0
Umidade	62	As	3,3 (41) ¹
Sólidos voláteis	49	Ba	629 (1.300)
Cinzas	51	Cd	2,4 (39)
	----- g kg ⁻¹ -----	Cu	308 (1.500)
Carbono orgânico	166	Cr	61 (1.000)
N _(total)	22	Hg	< 0,05 ² (17)
P _(total)	30	Mo	8,0 (50)
K	1,7	Ni	31 (420)
Na	1,8	Pb	45 (300)
S	24	Se	< 0,05 ² (100)
Ca	21	Zn	667 (2.800)
Mg	5,0		

Determinação de EPT no lodo de esgoto, segundo método 3051A (USEPA, 2007). ¹Limites estabelecidos para o uso agrônomico do lodo de esgoto, pela Resolução 375 do CONAMA (Brasil, 2006). ²Não detectado.

4.2.3 Experimento de campo

O preparo do solo ocorreu em janeiro de 2015, com subsolagem na profundidade de 0,4 m entre as linhas do plantio anterior, onde as mudas de *Eucalyptus* foram plantadas. Antes do plantio, aplicou-se 1,8 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 80%) visando aporte de Ca e Mg ao solo. O material genético utilizado no experimento foi um híbrido oriundo do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*). As mudas foram produzidas via propagação vegetativa para clonagem. O plantio foi realizado de forma manual em fevereiro de 2015, com espaçamento de 3 x 2,25 m, totalizando 1.481 árvores por hectare.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso com dez tratamentos e quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. Cada parcela foi constituída por 100 plantas (10 x 10 plantas), sendo as 36 plantas centrais correspondentes a área útil e as demais 64 plantas da área de bordadura. Os tratamentos consistiram em um controle (sem adubação); dois tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais em dosagens diferentes; e sete

tratamentos com aplicação de lodo de esgoto. A fertilização mineral 1 (FM1) é uma recomendação técnica utilizada internamente pela Suzano S.A. A fertilização mineral 2 (FM2) é a recomendação oficial do Estado de São Paulo (Gonçalves et al., 1997). O detalhamento da quantidade de nutrientes aplicado por tratamento encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Quantidade de nutrientes aplicado por tratamento pelos fertilizantes minerais e lodo de esgoto (LE). Valores entre parênteses representam os nutrientes aplicados pelo LE.

Tratamentos	N	P	K	B	Zn	Cu
----- kg ha ⁻¹ -----						
Controle (C)	0	0	0	0	0	0
Fertilização Mineral 1 (FM1)	192	26	137	6,5	2,8	2,8
Plantio	30	26	25	1,5	1,5	1,5
Fertilização 1 ^{3/}	45	0	112	1,8	1,3	1,3
Fertilização 2 ^{4/}	54	0	0	1,5	0	0
Fertilização 3 ^{5/}	63	0	0	1,7	0	0
Fertilização Mineral 2 (FM2)	60	17,5	84	4,2	1,8	1,8
Plantio	20	17,5	17	1,0	1,0	1,0
Fertilização 1 ^{3/}	27	0	67	1,1	0,8	0,8
Fertilização 2 ^{4/}	16	0	0	2,1	0	0
Lodo (50%) ^{2/} + P (83%) - B + K (L1P1)	96 ^{6/}	22	137	0	0	0
	(319)	(435)	(290)	(0,015)	(9,7)	(4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (50%) ^{2/} + P (83%) + B + K (L1P1B)	96 ^{6/}	22	137	6,5	0	0
	(319)	(435)	(290)	(0,015)	(9,7)	(4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%) ^{2/} + P (66%) - B + K (L2P2)	192 ^{6/}	17,5	137	0	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9,0)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (100%) ^{2/} + P (66%) + B + K (L2P2B)	192 ^{6/}	17,5	137	6,5	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%) ^{2/} - P + B + K (L2B)	192 ^{6/}	0	137	6,5	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	19,3	9
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (150%) ^{2/} - P - B + K (L3)	288 ^{6/}	0	137	0	0	0
	(957)	(1.305)	(870)	(0,045)	(29)	(13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (150%) ^{2/} - P + B + K (L3B)	288 ^{6/}	0	137	6,5	0	0
	(957)	(1.305)	(870)	(0,045)	(29)	(13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0

^{1/} Fertilização de plantio (superfosfato triplo, KCl e ulexita) em 12/02/2015. ^{2/} Aplicação de lodo de esgoto em 12/09/2015, 207 dias após transplantio, nas doses de 14,5; 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca) correspondendo a 50, 100 e 150% da recomendação de N (192 kg ha⁻¹). ^{3/} Primeira adubação de cobertura realizada em 05/11/2015, 261 dias após transplantio. ^{4/} Segunda adubação de cobertura realizada em 21/12/2015, 307 dias após transplantio. ^{5/} Terceira adubação de cobertura realizada em 02/02/2016, 350 dias após transplantio. ^{6/} Dose de N disponível aplicado pelo lodo de esgoto, considerando taxa de mineralização de N de 30% para lodo de esgoto aeróbio (Brasil, 2006).

Os fertilizantes minerais foram aplicados no sulco de plantio e as adubações de cobertura foram aplicados em meia coroa ao redor da muda, em dosagens apresentadas na Tabela 4.3. A dosagem de lodo de esgoto a ser aplicada foi calculada para que tivesse o equivalente à 50, 100 e 150% da recomendação técnica 1 de N (FM1), ou seja, 192 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a 14,5; 29 e 43,5 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente, em base seca. A taxa de aplicação do lodo de esgoto foi com base no critério do N, conforme descrito na Resolução no 375 (Brasil, 2006). O lodo de esgoto foi distribuído superficialmente no solo em uma faixa de 0,60 m de largura à 0,20 m de distância do sulco de plantio, sete meses após o plantio das mudas (setembro de 2015). Todos os demais tratamentos silviculturais (controle de plantas espontâneas) seguiram o padrão adotado pela empresa em seus plantios comerciais.

4.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal

Em setembro de 2017 (22 meses após plantio), setembro de 2018 (44 meses após plantio), setembro de 2019 (54 meses após plantio) e em julho de 2021 (76 meses após plantio) foi medido a circunferência a altura do peito (CAP – 1,3 m) e altura (H) de todas as árvores das parcelas úteis do experimento. Isso foi realizado para se estimar a produtividade de volume de madeira, utilizando o modelo logarítmico de Schumacher e Hall (1933), ajustada com inventário de biomassa realizado aos 22 meses após o plantio, e posterior cálculo do incremento médio anual (IMA).

O CAP medido também foi utilizado para selecionar as árvores para desbaste e coleta das folhas para diagnose nutricional e EPTs. As árvores foram selecionadas aleatoriamente dentro do intervalo de $\pm 5\%$ do CAP mediano, sendo uma árvore por parcela, exceto aos 76 meses após o plantio, quando foi desbastada duas árvores por parcela. Após o desbaste, foram coletadas amostras de folhas dos quatro pontos cardiais no terço superior da copa das árvores, conforme recomendação de Malavolta et al. (1997) e Raij et al. (1997).

4.2.5 Análise química do material vegetal

No laboratório, as folhas coletadas foram lavadas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante, moídas em moinho de facas tipo Willey e acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificados, até momento da análise. As amostras foram digeridas conforme procedimento descrito por Araújo et al. (2002). Pesou-se 250 mg de material vegetal, que foi digerido em solução com 7,5 mL de HNO₃ 3,11 mol L⁻¹ e 2,5 mL de H₂O₂ 30% (v/v), em sistema fechado de micro-ondas. Os teores dos elementos

essenciais, exceto o nitrogênio, e potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado, utilizando um ICP-MS Agilent modelo 7500ce. O teor de N foi determinado pelo método Kjeldahl (Malavolta et al., 1997).

4.2.6 Análise dos dados

Primeiramente, foi calculado a média e desvio padrão dos dados de incremento médio anual (IMA) do volume do tronco ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) separando-os pela idade do plantio (cenário A) e de forma global (cenário B), ou seja, com todos os dados. Em seguida, para o cenário A, realizou-se a subdivisão das populações em baixa e alta produtividade (população de referência), definida como sendo as populações com produtividade maior que a média geral mais 50% do desvio padrão. No cenário B, a subpopulação de referência foi estabelecida pelas populações classificadas como de alta produtividade nas diferentes idades juntamente com aquelas populações que apresentaram IMA superior à média geral mais 50% do desvio padrão (Silva et al., 2005). Também se calculou a média e desvio padrão do IMA das subpopulações.

As normas CND foram constituídas da média aritmética e do desvio-padrão das variáveis multinutrientes na população de alta produtividade, de acordo com Khiari et al. (2001). As variáveis multinutrientes (*clr* – transformação da relação log centralizada) consistiram do logaritmo neperiano do quociente entre a concentração de cada nutriente (A) (sendo todos os valores convertidos para g kg^{-1}) e a média geométrica das concentrações dos constituintes da matéria seca (G), adaptado de Khiari et al. (2001), onde R é o enésimo constituinte da matéria seca, obtida a partir da diferença de 1000 g kg^{-1} e $\Sigma(\text{N, P, ..., Pb})$:

$$clr = \ln\left(\frac{A}{G}\right) \quad (1)$$

$$G = (N \times P \times \dots \times Pb \times R)^{1/(n+1)} \quad (2)$$

Os índices CND-*clr* de cada nutriente (IA) foram calculados pela diferença entre as variáveis multinutrientes, nos tratamentos (*clr*) e na média da população de referência (*clr**), dividido pelo desvio padrão desta variável, na população de referência (SA*):

$$IA = \frac{clr - clr^*}{SA^*} \quad (3)$$

O CND- r^2 é uma medida do desequilíbrio nutricional nas culturas e é calculado através da soma de quadrados dos índices CND-*clr*, conforme equação:

$$CND - r^2 = IN^2 + IP^2 + IK^2 + \dots + IR^2 \quad (4)$$

Com os índices de cada elemento, foi calculado o índice de balanço nutricional médio (IBNm), outro índice que possibilita a avaliação do equilíbrio nutricional das plantas. O IBNm foi obtido dividindo-se o valor absoluto do índice de equilíbrio nutricional (IBN) pelo número de nutrientes avaliados (n) (Wadt, 1996):

$$IBNm = (|IN| + |IP| + |IK| + \dots + |IPb|)/n \quad (5)$$

Adicionalmente, para interpretação dos valores dos índices gerados, adotou-se o critério de potencial de resposta a adubação simplificada, o qual classifica o estado nutricional da planta para cada nutriente em insuficiente, equilibrado e em excesso (Wadt, 2005):

- Equilibrado (Eq.): $|IA| < IBNm$;
- Insuficiente (In.): $|IA| > IBNm$ e $IA < 0$;
- Excesso (Ex.): $|IA| > IBNm$ e $IA > 0$.

Após classificação de cada nutriente em cada população, as classificações com e sem a adição dos elementos potencialmente tóxicos foram comparadas pelo teste Qui-quadrado ($p < 0,05$) com auxílio do software SigmaPlot versão 11.0 (Systat Software, 2020). Esta análise visa verificar a concordância de classificação do estado nutricional quando houve ou não a adição dos EPTs nas funções CND.

Os índices CND-*clr* foram utilizados para determinação da faixa de suficiência de cada elemento nas folhas de *Eucalyptus* (Souza et al., 2015), a partir da sua correlação com seu respectivo índice nutricional (IA). Para cada nutriente, igualou-se IA a zero e obteve-se o teor do nutriente denominado ponto de equilíbrio nutricional (PEN). O valor de PEN mais e menos 2/3 do desvio-padrão dos teores do nutriente de toda a população representam os limites inferior e superior da faixa de suficiência, respectivamente (Kurihara et al., 2013; Souza et al., 2015). O teor dos nutrientes no nível crítico corresponde ao limite inferior da faixa de suficiência e o teor dos EPTs críticos corresponde ao limite superior da faixa de suficiência.

4.3 Resultados e Discussão

As populações de referência corresponderam a 27, 32, 35 e 24% das populações, com IMA médio de 34, 58, 57 e 59 $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ aos 22, 44, 54 e 76 meses após plantio, respectivamente, no cenário A (Tabela 4.4). Já no cenário B, a população de referência correspondeu a 47% das populações com IMA médio de 54 $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Ainda, o IMA das populações de alta e baixa produtividade foram diferentes entre si, correspondendo a

incrementos de 8, 9, 10 e 41% aos 22, 44, 54 e 76 meses após plantio, respectivamente, e de 33% no cenário B.

Tabela 4.4. Incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) de *Eucalyptus urograndis*, tratado com lodo de esgoto, nas subpopulações de baixa e alta produtividade após 22, 44, 54 e 76 meses após plantio (cenário A) e global (cenário B)

Especificidade	População			Subpopulação						Sig.
				Alta produtividade			Baixa produtividade			
	Média	D.P.	n	Média	D.P.	n	Média	D.P.	n	
22 meses	32,3	1,7	40	34,3	0,8	11	31,6	1,3	29	*
44 meses	54,9	2,7	40	58,1	1,1	13	53,4	3,0	27	*
54 meses	53,6	3,3	40	57,0	1,4	14	51,7	2,4	26	*
76 meses	46,0	9,2	79	58,9	7,9	19	41,9	4,6	60	*
Global	46,6	10,1	199	53,6	8,2	94	40,3	7,0	105	*

D.P. – Desvio Padrão; n – Número de populações; Sig. – Significância; * – Significativo pelo teste t-pareado ($p < 0,05$).

No cenário A, as populações de referência apresentaram 64, 92, 86 e 84% das populações com aplicação de lodo de esgoto, sendo 45, 54, 50 e 53% com aplicação de lodo a fornecer 100% da recomendação de N para o *Eucalyptus* aos 22, 44, 54 e 76 meses do plantio, respectivamente. No cenário B, a população de referência apresentou 75% das populações com aplicação de lodo de esgoto, sendo 39% com aplicação de lodo de esgoto a fornecer 100% da recomendação de N para o *Eucalyptus*. Esses resultados apresentam a representatividade que a aplicação de lodo de esgoto na população de referência, principalmente quando da aplicação pelo critério agrônomo.

A adição dos EPTs no cálculo do CND-*clr* reduziu consideravelmente a média geométrica dos elementos [g(x)] (Tabela 4.5). Isso ocorreu porque houve adição de seis novos constituintes da matéria seca da planta com baixos teores desses elementos na planta, na ordem de 0,0001 a 0,04 g kg⁻¹. A alteração da média geométrica também provocou aumento dos valores multinutriente dos elementos, o que provoca alterações nos índices de CND-*clr* de cada nutriente e, conseqüentemente, interpretação do estado nutricional das plantas.

A fim de se verificar a possibilidade de uso de uma norma geral para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto, foi realizado a comparação das normas entre as idades avaliadas e de uma norma geral (Tabela 4.6). No entanto, houve predominância de diferenças significativas das normas entre as idades e da norma em geral, variando de 53 a 94% das variáveis multinutriente dos elementos (Tabela 4.6). Isso indica que

deve ser dada preferência ao uso de normas específicas para avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*. Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2005), avaliando a universalidade das normas DRIS e CND para *Eucalyptus* em diferentes regiões no estado de Minas Gerais.

Tabela 4.5. Normas CND-*clr* (média e desvio padrão) das variáveis multinutriente dos elementos, com e sem a inclusão de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), da população de referência ($>$ média + 0,5 desvio padrão) de *Eucalyptus* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B

CND- <i>clr</i>	22 meses				44 meses				54 meses				76 meses				Global			
	Com EPTs		Sem EPTs		Com EPTs		Sem EPTs		Com EPTs		Sem EPTs		Com EPTs		Sem EPTs		Com EPTs		Sem EPTs	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
g(x)	0,042	0,004	0,442	0,027	0,055	0,004	0,473	0,032	0,045	0,002	0,413	0,026	0,049	0,005	0,437	0,040	0,049	0,006	0,441	0,039
N	6,148	0,202	3,801	0,118	5,893	0,142	3,744	0,118	6,149	0,064	3,937	0,069	5,650	0,125	3,453	0,112	5,977	0,240	3,774	0,212
P	3,538	0,150	1,192	0,110	3,161	0,068	1,012	0,077	3,436	0,091	1,224	0,093	2,937	0,125	0,740	0,107	3,251	0,229	1,048	0,198
K	5,208	0,171	2,862	0,093	5,195	0,099	3,046	0,107	5,289	0,100	3,078	0,105	5,172	0,184	2,975	0,165	5,212	0,155	3,009	0,142
Ca	5,537	0,135	3,191	0,109	5,508	0,161	3,360	0,182	5,333	0,125	3,122	0,129	5,320	0,168	3,124	0,192	5,426	0,174	3,223	0,194
Mg	3,904	0,136	1,557	0,091	3,571	0,123	1,422	0,120	3,801	0,080	1,590	0,074	3,866	0,131	1,669	0,109	3,747	0,171	1,544	0,132
S	3,205	0,197	0,859	0,120	2,942	0,151	0,793	0,128	3,547	0,077	1,335	0,070	3,078	0,111	0,881	0,093	3,194	0,274	0,991	0,244
B	0,368	0,261	-1,979	0,242	0,018	0,235	-2,131	0,229	-0,239	0,295	-2,450	0,277	0,069	0,200	-2,128	0,199	-0,021	0,322	-2,224	0,306
Cu	-2,670	0,164	-5,016	0,103	-2,979	0,154	-5,128	0,141	-2,336	0,111	-4,547	0,123	-2,351	0,185	-4,548	0,177	-2,626	0,335	-4,829	0,314
Fe	0,955	0,244	-1,392	0,325	1,498	0,128	-0,651	0,156	1,156	0,096	-1,056	0,096	0,941	0,172	-1,256	0,197	1,228	0,287	-0,975	0,343
Mn	1,735	0,199	-0,611	0,210	1,634	0,177	-0,515	0,189	1,597	0,135	-0,615	0,130	1,774	0,299	-0,422	0,317	1,656	0,238	-0,547	0,247
Mo	-6,432	0,406	-8,778	0,368	-6,839	0,434	-8,988	0,419	-7,913	0,481	-10,125	0,475	-6,625	0,429	-8,822	0,399	-7,098	0,704	-9,301	0,690
Zn	-1,020	0,138	-3,367	0,076	-1,425	0,173	-3,574	0,148	-1,029	0,067	-3,240	0,077	-1,173	0,100	-3,369	0,110	-1,194	0,210	-3,397	0,170
Al	1,147	0,357	-	-	1,814	0,146	-	-	1,467	0,112	-	-	1,145	0,149	-	-	1,511	0,339	-	-
As	-8,759	0,903	-	-	-7,838	0,233	-	-	-7,142	0,100	-	-	-7,374	0,115	-	-	-7,628	0,595	-	-
Ba	-1,384	0,181	-	-	-1,253	0,271	-	-	-1,778	0,155	-	-	-1,376	0,213	-	-	-1,463	0,326	-	-
Cd	-9,603	0,252	-	-	-9,182	0,319	-	-	-9,689	0,356	-	-	-9,246	0,287	-	-	-9,451	0,351	-	-
Cr	-5,689	0,311	-	-	-5,600	0,112	-	-	-5,349	0,079	-	-	-5,404	0,108	-	-	-5,491	0,194	-	-
Pb	-6,214	0,191	-	-	-5,878	0,067	-	-	-6,259	0,125	-	-	-6,300	0,154	-	-	-6,117	0,235	-	-

D.P. – Desvio Padrão; g (x) – Média geométrica dos elementos.

Tabela 4.6. Frequência de significância das normas CND-*clr* para *Eucalyptus urograndis* tratado com lodo de esgoto classe B para as diferentes idades de plantio avaliadas

Variável	22vs44		22vs54		22vs76		22vsG		44vs54		44vs76		44vsG		54vs76		54vsG		76vsG	
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
g(x)	*	*	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns
N	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*
P	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*
K	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns
Ca	ns	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	*	*	ns	*	ns	ns	*	*	*	*
Mg	*	*	*	ns	ns	*	*	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns	*	*
S	*	ns	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
B	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns
Cu	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*
Fe	*	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*
Mn	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	*
Mo	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*	*	*	*	*
Zn	*	*	ns	*	*	ns	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns
Al	*	-	*	-	ns	-	*	-	*	-	*	-	*	-	*	-	ns	-	*	-
As	*	-	*	-	*	-	*	-	*	-	*	-	ns	-	*	-	*	-	*	-
Ba	ns	-	*	-	ns	-	ns	-	*	-	ns	-	*	-	*	-	*	-	ns	-
Cd	*	-	ns	-	*	-	ns	-	*	-	ns	-	*	-	*	-	*	-	*	-
Cr	ns	-	*	-	*	-	*	-	*	-	*	-	*	-	ns	-	*	-	*	-
Pb	*	-	ns	-	ns	-	ns	-	*	-	*	-	*	-	ns	-	*	-	*	-
ns	26,3	38,5	26,3	30,8	42,1	46,2	36,8	46,2	5,3	15,4	31,6	30,8	42,1	46,2	26,3	15,4	21,1	23,1	26,3	30,8
*	73,7	61,5	73,7	69,2	57,9	53,8	63,2	53,8	94,7	84,6	68,4	69,2	57,9	53,8	73,7	84,6	78,9	76,9	73,7	69,2

Com as normas definidas, foi possível calcular os valores do índice de balanço nutricional médio (IBNm) e o índice de equilíbrio nutricional (CND-r²), com e sem a inclusão dos EPTs nas funções CND-*clr* (Tabela 4.7). Menores valores desses índices correspondem a um maior estado de equilíbrio nutricional das plantas, enquanto que maiores valores correspondem a um menor estado de equilíbrio nutricional das plantas (Suszek et al., 2017). Foi observado menores valores desses índices para a subpopulação de alta produtividade e independentemente da idade do plantio, como esperado devido ao uso dessa população como norma para avaliação da nutrição, no entanto, não houve diferença estatística entre as subpopulações de baixa e alta produtividade.

Tabela 4.7. Índice de balanço nutricional médio (IBNm) e índice de equilíbrio nutricional (CND-r²) de *Eucalyptus urograndis* tratado com lodo de esgoto classe B, pelo método do CND-*clr*, aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio

Idade	Subp.	IBNm		CND-r ²	
		Sem	Com	Sem	Com
22	BP	0,93±0,30	0,89±0,32	17,46±9,86	23,37±15,43
	AP	0,78±0,26	0,83±0,17	11,82±6,16	17,27±6,36
	t.test	0,077	0,283	0,043	0,107
44	BP	0,88±0,33	0,91±0,31	16,61±11,72	26,35±16,19
	AP	0,77±0,34	0,76±0,35	12,00±9,18	17,54±16,75
	t.test	0,166	0,087	0,111	0,060
54	BP	0,88±0,26	0,89±0,19	16,63±9,65	16,63±9,65
	AP	0,79±0,23	0,79±0,17	12,07±6,49	12,07±6,49
	t.test	0,148	0,051	0,061	0,009
76	BP	0,83±0,24	0,90±0,25	14,76±8,82	25,25±13,75
	AP	0,77±0,19	0,76±0,17	12,32±6,00	18,00±8,64
	t.test	0,157	0,017	0,132	0,017

Quanto a relação entre os índices IBNm e o CND-r², houve alta correlação positiva, com r variando de 0,930 a 0,978 (p < 0,001), com e sem a inclusão dos EPTs nas funções CND-*clr* (Figura 4.2). Observa-se, assim, que quanto maior o IBNm, maior o CND-r² e maior o desequilíbrio nutricional da população em estudo. Com isso, pode-se aceitar ambos os métodos de determinação de desequilíbrio nutricional no diagnóstico nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto.

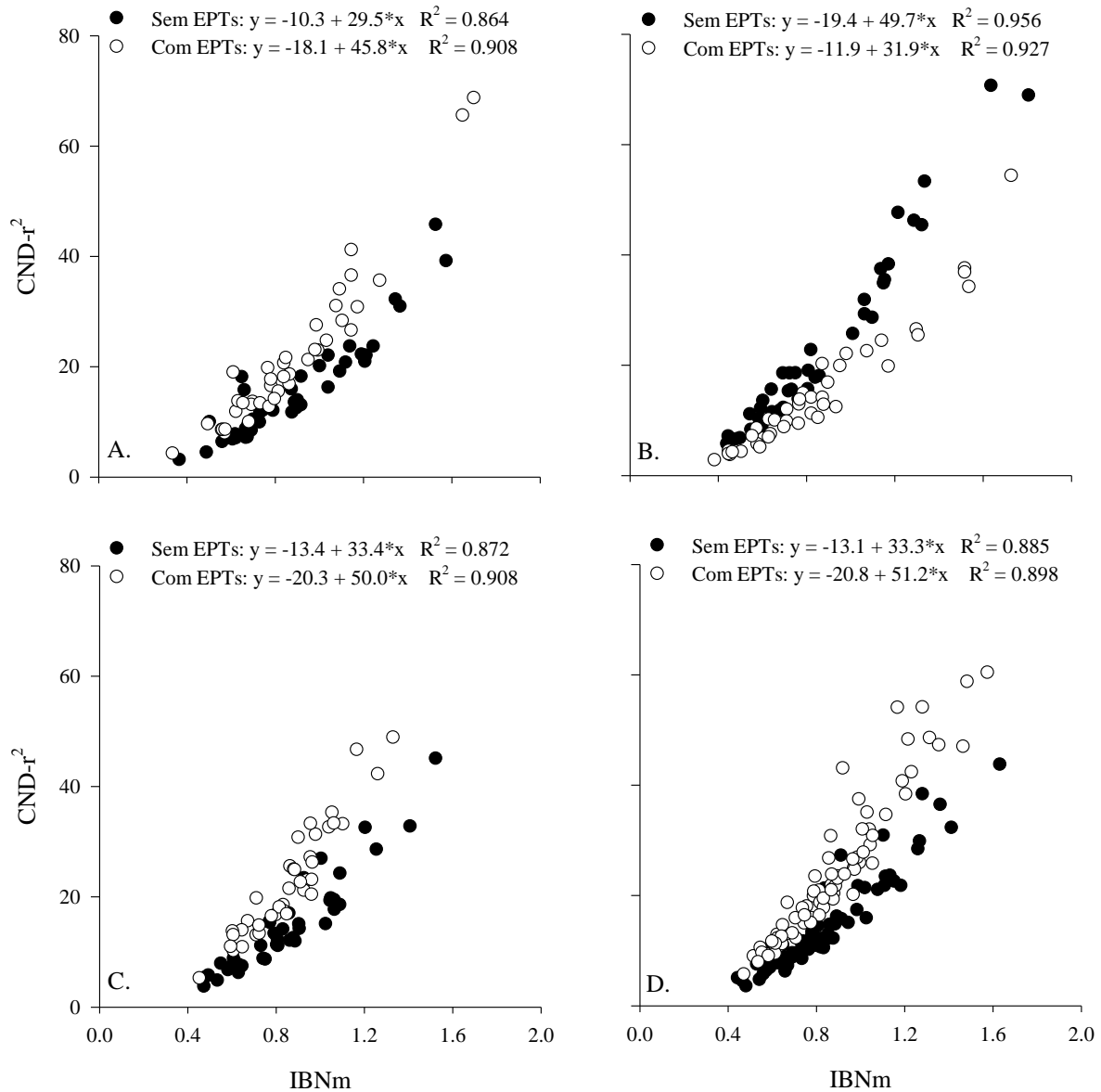


Figura 4.2. Relação entre Índice de Balanço Nutricional médio (IBNm) e Índice de Desequilíbrio Nutricional (CND-r²) com e sem a inclusão de elementos potencialmente tóxicos nas funções CND-clr para *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto aos 22 (A), 44 (B), 54 (C) e 76 (D) meses após o plantio (n = 40)

A frequência de populações em equilíbrio, insuficiência e excesso nutricional de cada nutriente, com ou sem inclusão dos EPTs na subpopulação de baixa produtividade são apresentados na Tabela 4.8. No geral, a inclusão dos EPTs nos cálculos CND-clr não provocou alterações significativas na frequência de populações em equilíbrio ou desequilíbrio (deficiência ou excesso) nutricional para os macro e micronutrientes. Sendo que a frequência de populações em equilíbrio nutricional variou de 42 a 66, 22 a 85, 22 a 75, 44 a 69, 44 a 65 e 41 a 70% para N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, com ou sem a inclusão dos EPTs nas diferentes idades avaliadas do plantio de *Eucalyptus*.

Tabela 4.8. Frequência (%) em que as populações apresentaram estado de equilíbrio (Eq.), insuficiência (In.) e excesso (Ex.) nutricional, com e sem a inclusão de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) na função CND-*clr* da subpopulação de baixa produtividade (< média + 0,5 desvio padrão) de *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B

EPTs	Interpretação	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb
22 meses																			
Com	Eq.	66	55	45	69	48	41	62	34	48	41	52	69	59	86	48	52	48	52
	In.	21	41	41	28	31	34	21	41	21	34	28	24	17	3	38	10	41	10
	Ex.	14	3	14	3	21	24	17	24	31	24	21	7	24	10	14	38	10	38
Sem	Eq.	62	66	45	72	59	59	48	41	59	45	48	55						
	In.	24	31	31	24	21	14	14	31	7	28	31	17						
	Ex.	14	3	24	3	21	28	38	28	34	28	21	28						
44 meses																			
Com	Eq.	48	22	22	44	44	59	52	81	70	52	70	78	70	59	48	74	67	44
	In.	11	22	63	19	26	15	30	11	7	26	22	4	4	11	30	22	15	26
	Ex.	41	56	15	37	30	26	19	7	22	22	7	19	26	30	22	4	19	30
Sem	Eq.	48	37	44	48	59	59	48	67	70	44	67	78						
	In.	11	15	44	22	19	11	30	19	7	33	22	7						
	Ex.	41	48	11	30	22	30	22	15	22	22	11	15						
54 meses																			
Com	Eq.	42	85	54	54	65	62	62	58	50	35	77	58	62	77	58	77	50	54
	In.	19	8	15	12	19	15	27	19	15	35	12	12	23	15	15	19	27	42
	Ex.	38	8	31	35	15	23	12	23	35	31	12	31	15	8	27	4	23	4
Sem	Eq.	46	73	54	65	58	62	65	58	38	38	69	46						
	In.	23	12	15	12	27	19	31	19	23	38	12	19						
	Ex.	31	15	31	23	15	19	4	23	38	23	19	35						
76 meses																			
Com	Eq.	55	33	75	60	57	68	55	67	70	60	80	58	53	43	43	65	60	58
	In.	12	2	3	7	35	13	32	25	23	23	10	18	23	35	32	25	22	15
	Ex.	33	65	22	33	8	18	13	8	7	17	10	23	23	22	25	10	18	27
Sem	Eq.	57	28	72	60	45	70	48	62	65	60	77	60						
	In.	8	2	5	8	47	12	35	27	27	22	13	20						
	Ex.	35	70	23	32	8	18	17	12	8	18	10	20						

Considerando que a situação de insuficiência e equilíbrio nutricional para os EPTs é desejada por apresentar valores inferiores ou similares à subpopulação de alta produtividade, a avaliação de situações desses elementos em excesso se faz necessária. Percebe-se que para os EPTs avaliados, a frequência de populações em excesso variou de 4 a 38% com os cálculos CND-*clr* (Tabela 4.8). Assim, foi observado que Cd e Pb (38%) apresentaram maior frequência de populações em excesso nutricional aos 22 meses após o plantio, As e Pb (30%) aos 44 meses após o plantio, Ba (27%) aos 54 meses após o plantio e Pb (27%) aos 76 meses após o plantio. Pode-se inferir, portanto, que o Pb foi o elemento que mais provocou situações de estresse

nutricional para o *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto pelo método CND-*clr* de diagnose nutricional.

A concordância de diagnóstico nutricional (insuficiência, equilíbrio e excesso) quando houve ou não a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nas funções CND-*clr* variaram de 67 a 99% das populações (Tabela 4.9). Quando significativa pelo teste Qui-quadrado ($p < 0,05$), o diagnóstico nutricional quando houve a inclusão dos EPTs nas funções apresentou-se semelhantes àsquelas sem a adição destes elementos, evidenciando que a inclusão dos EPTs nas funções CND-*clr* não provoca grandes alterações nas interpretações dos diagnósticos.

Tabela 4.9. Frequência (%) de populações com diagnósticos concordantes do potencial de resposta a adubação por nutriente, com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nos cálculos na função CND-*clr* em *Eucalyptus urograndis* tratado em diferentes manejos de adubação com lodo de esgoto classe B

Idade	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Média
22 meses	94*	67*	73*	77*	78*	82*	74*	79*	77*	87*	89*	70*	79
44 meses	90*	78*	82*	77*	76*	81*	94*	94*	99*	88*	97*	88*	87
54 meses	75*	90*	96*	89*	84*	84*	77*	93*	89*	87*	85*	84*	86
76 meses	85*	92*	88*	85*	85*	76*	94*	95*	81*	87*	91*	82*	87

^{ns} – Não significativo até 0,05 de probabilidade pelo teste qui-quadrado; * - Significativo até 0,05 de probabilidade pelo teste Qui-quadrado.

Colocando-se os índices dos nutrientes em ordem crescente por população, é possível verificar o nutriente mais limitante por deficiência (menor índice) e por excesso (maior índice) (Pinto et al., 2010). Na subpopulação de baixa produtividade, no geral, o elemento mais limitante por deficiência foi o Mn, com ou sem a inclusão dos EPTs, ocorrendo entre 19 e 23% das populações, exceto aos 76 meses após o plantio, em que houve maior limitação por deficiência por Mg (25-32%), com e sem a inclusão dos EPTs (Tabela 4.10). Já na subpopulação de alta produtividade houve variações para as diferentes idades. Aos 22 meses após o plantio, o S e Fe (18%) e Fe (36%) foram os mais limitantes por deficiência sem e com a inclusão dos EPTs, respectivamente; B (31%) foi o mais limitante aos 44 meses após o plantio, sem ou com a inclusão dos EPTs; Ca, Mg, B e Cu (14%) e Cu (23%) foram os mais limitantes aos 54 meses após o plantio sem e com a inclusão dos EPTs, respectivamente; e Mg (21%) foi o mais limitante aos 76 meses após o plantio sem ou com a inclusão dos EPTs.

Tabela 4.10. Ordem de limitação da produtividade por nutrientes em deficiência e respectivas porcentagens de ocorrência em populações de *Eucalyptus urograndis* tratadas com lodo de esgoto classe B subdivididas em populações de baixa e alta produtividade

Subpop. EPTs		Ordem de limitação por deficiência											
		22 meses											
Baixa	Sem	Mn > 20,7	Mo > 17,2	K = 13,8	Cu > 13,8	P > 10,3	N = 6,9	Zn > 6,9	Ca = 3,4	Mg = 3,4	B > 3,4	S = 0,0	Fe
	Com	Mn > 20,7	Cu = 17,2	Mo > 17,2	K > 10,3	Ca = 6,9	B = 6,9	Fe = 6,9	Zn > 6,9	P = 3,4	Mg > 3,4	N = 0,0	S
Alta	Sem	S = 18,2	Fe > 18,2	N = 9,1	P = 9,1	K = 9,1	Ca = 9,1	Mg = 9,1	B = 9,1	Mo > 9,1	Cu = 0,0	Mn = 0,0	Zn
	Com	Fe > 36,4	K > 18,2	P = 9,1	B = 9,1	Cu = 9,1	Mn = 9,1	Mo > 9,1	N = 0,0	Ca = 0,0	Mg = 0,0	S = 0,0	Zn
		44 meses											
Baixa	Sem	Mo > 22,2	K = 18,5	Mn > 18,5	B > 11,1	P = 7,4	Mg = 7,4	Fe > 7,4	S = 3,7	Zn > 3,7	N = 0,0	Ca = 0,0	Cu
	Com	Mn > 22,2	K = 18,5	Mo > 18,5	P > 11,1	Mg = 7,4	B = 7,4	Fe > 7,4	S = 3,7	Zn > 3,7	N = 0,0	Ca = 0,0	Cu
Alta	Sem	B > 30,8	P = 15,4	Fe > 15,4	K = 7,7	Mg = 7,7	Cu = 7,7	Mo = 7,7	Zn > 7,7	N = 0,0	Ca = 0,0	S = 0,0	Mn
	Com	B > 30,8	P = 15,4	Fe > 15,4	K = 7,7	Mg = 7,7	Cu = 7,7	Mo = 7,7	Zn > 7,7	N = 0,0	Ca = 0,0	S = 0,0	Mn
		54 meses											
Baixa	Sem	B = 19,2	Mn > 19,2	Fe > 15,4	S > 11,5	K = 7,7	Cu = 7,7	Mo > 7,7	N = 3,8	Mg = 3,8	Zn > 3,8	P = 0,0	Ca
	Com	Mn > 23,1	B > 19,2	Fe > 15,4	S > 11,5	K = 7,7	Cu = 7,7	Mo > 7,7	Zn = 3,8	N > 3,8	P = 0,0	Ca = 0,0	Mg
Alta	Sem	Ca = 14,3	Mg = 14,3	B = 14,3	Cu > 14,3	P = 7,1	K = 7,1	S = 7,1	Fe = 7,1	Mn = 7,1	Mo > 7,1	N = 0,0	Zn
	Com	Cu > 21,4	Ca = 14,3	Mg = 14,3	B > 14,3	K = 7,1	Fe = 7,1	Mn = 7,1	Mo = 7,1	Zn > 7,1	N = 0,0	P = 0,0	S
		76 meses											
Baixa	Sem	Mg > 31,7	Cu = 15,0	Fe > 15,0	B > 13,3	Ca = 6,7	Zn > 6,7	N > 5,0	Mn > 3,3	K = 1,7	S > 1,7	P = 0,0	Mo
	Com	Mg > 25,0	Fe > 18,3	B = 13,3	Cu > 13,3	Zn > 10,0	Ca = 6,7	Mn > 6,7	N > 3,3	K = 1,7	Mo > 1,7	P = 0,0	S
Alta	Sem	Mg > 21,1	N = 10,5	S = 10,5	B = 10,5	Cu = 10,5	Fe = 10,5	Mn > 10,5	K = 5,3	Ca = 5,3	Mo > 5,3	P = 0,0	Zn
	Com	Mg > 21,1	Fe > 15,8	S = 10,5	Ca = 10,5	B = 10,5	Zn > 10,5	N = 5,3	Cu = 5,3	Mn = 5,3	Mo > 5,3	P = 0,0	K

Subp. – Subpopulação.

Da mesma forma que para deficiência, é possível verificar os elementos mais limitantes por excesso (Tabela 4.11). Houve variação dos nutrientes e EPTs mais limitantes por excesso nas diferentes idades de avaliação e subpopulação, com destaque para o Fe (17-31%) aos 22 meses, P e B (22-23%) aos 44 meses, Mo e Zn (14-21%) aos 54 meses e Mo e P (21-40%) aos 76 meses após o plantio, com e sem a inclusão dos EPTs. Para os EPTs, o Cd (27-

28%) foi o elemento mais limitante por excesso aos 22 meses, Pb (26%) e Al (23%) aos 44 meses, Ba (31%) e Cd (29%) aos 54 meses e As (22%) e Ba (32%) aos 76 meses após o plantio nas subpopulações de baixa e alta produtividade, respectivamente.

Tabela 4.11. Ordem de limitação da produtividade por nutrientes e elementos potencialmente tóxicos (EPTs) em excesso e respectivas porcentagens de ocorrência em populações de *Eucalyptus urograndis* tratadas com lodo de esgoto classe B nas subpopulações de baixa e alta produtividade

Subp.		EPTs											
		Ordem de limitação por excesso											
		22 meses											
Baixa	Sem	Fe = 17,2	Mn > 17,2	K = 13,8	Mo > 13,8	B = 10,3	Zn > 10,3	Cu > 6,9	Ca = 3,4	Mg = 3,4	S > 3,4	N = 0,0	P 0,0
	Com	Fe > 31,0	Mn > 17,2	B = 13,8	Mo > 13,8	Cu > 10,3	Mg > 6,9	S = 3,4	Zn > 3,4	N = 0,0	P = 0,0	K = 0,0	Ca 0,0
		Cd > 27,6	Pb > 24,1	Al > 20,7	As > 13,8	Ba > 10,3	Cr 3,4						
Alta	Sem	P = 18,2	Mn > 18,2	N = 9,1	K = 9,1	Ca = 9,1	B = 9,1	Fe = 9,1	Mo = 9,1	Zn > 9,1	Mg = 0,0	S = 0,0	Cu 0,0
	Com	Fe > 27,3	N = 9,1	P = 9,1	Ca = 9,1	Mg = 9,1	B = 9,1	Mn = 9,1	Mo = 9,1	Zn > 9,1	K = 0,0	S = 0,0	Cu 0,0
		Cd > 27,3	Al = 18,2	As = 18,2	Cr > 18,2	Ba = 9,1	Pb 9,1						
		44 meses											
Baixa	Sem	N > 18,5	P = 14,8	Fe = 14,8	Mn > 14,8	Ca = 11,1	Zn > 11,1	Mg > 7,4	S = 3,7	B > 3,7	K = 0,0	Cu = 0,0	Mo 0,0
	Com	P > 22,2	Fe > 18,5	N = 14,8	Mn > 14,8	Ca = 11,1	Mg > 11,1	B = 3,7	Zn > 3,7	K = 0,0	S = 0,0	Cu = 0,0	Mo 0,0
		Pb > 25,9	Al > 22,2	Ba > 18,5	As > 14,8	Cd > 11,1	Cr 7,4						
Alta	Sem	B > 23,1	K = 15,4	Mg = 15,4	Mn > 15,4	S = 7,7	Cu = 7,7	Fe = 7,7	Mo > 7,7	N = 0,0	P = 0,0	Ca = 0,0	Zn 0,0
	Com	B > 23,1	K = 15,4	Mg > 15,4	Ca = 7,7	S = 7,7	Cu = 7,7	Fe = 7,7	Mn = 7,7	Mo > 7,7	N = 0,0	P = 0,0	Zn 0,0
		Al = 23,1	Ba > 23,1	Cd = 15,4	Cr = 15,4	Pb > 15,4	As 7,7						
		54 meses											
Baixa	Sem	Mn = 15,4	Mo = 15,4	Zn > 15,4	N = 11,5	Ca > 11,5	K = 7,7	Cu = 7,7	Fe > 7,7	S = 3,8	B > 3,8	P = 0,0	Mg 0,0
	Com	Zn > 19,2	N = 15,4	Mn > 15,4	Mo > 11,5	K = 7,7	Ca = 7,7	Cu = 7,7	Fe > 7,7	Mg = 3,8	B > 3,8	P = 0,0	S 0,0
		Ba > 30,8	Cr > 23,1	As > 19,2	Al > 15,4	Pb > 7,7	Cd 3,8						
Alta	Sem	Mo > 21,4	Mg = 14,3	Cu = 14,3	Mn > 14,3	Ca = 7,1	S = 7,1	B = 7,1	Fe = 7,1	Zn > 7,1	N = 0,0	P = 0,0	K 0,0
	Com	Ca = 14,3	Mg = 14,3	Cu = 14,3	Mn = 14,3	Mo > 14,3	S = 7,1	B = 7,1	Fe = 7,1	Zn > 7,1	N = 0,0	P = 0,0	K 0,0
		Cd > 28,6	As = 21,4	Pb > 21,4	Cr > 14,3	Al = 7,1	Ba 7,1						

		76 meses											
Baixa	Sem	P >	N >	Zn >	Ca =	B =	Mo >	K >	Mg =	S >	Fe =	Mn >	Cu
		40,0	15,0	10,0	6,7	6,7	6,7	5,0	3,3	3,3	1,7	1,7	0,0
	Com	P >	Ca >	N =	Zn >	B >	S =	Mo >	Fe =	Mn >	K >	Mg =	Cu
		31,7	16,7	13,3	13,3	6,7	5,0	5,0	3,3	3,3	1,7	0,0	0,0
		As =	Ba =	Pb >	Cr >	Al =	Cd						
		21,7	21,7	21,7	15,0	10,0	10,0						
Alta	Sem	Mo >	Mn >	N =	P =	Fe =	Zn >	Mg =	S =	B =	Cu >	K =	Ca
		21,1	15,8	10,5	10,5	10,5	10,5	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	0,0
	Com	Mo >	Ca =	Mn >	P =	Fe >	N =	Mg =	B =	Cu =	Zn >	K =	S
		21,1	15,8	15,8	10,5	10,5	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	0,0
		Ba >	Cd =	Pb >	Cr =	Al >	As						
		31,6	21,1	21,1	15,8	5,3	5,3						

Subp. – Subpopulação.

Com os índices CND-*clr*, é possível calcular a faixa de suficiência para cada elemento avaliado e o seu teor crítico (Tabela 4.12). Os coeficientes de determinação (R^2) das equações geradas apresentaram valores entre 0,25 e 0,94, sendo normalmente inferiores para macronutrientes, especialmente S, P e N (Tabelas A4 e A5). Esses resultados também foram observados por outros autores em diferentes culturas (Serra et al., 2010; Camacho et al., 2012; Santos et al., 2013; Partelli et al., 2014; Santos; Rozane, 2017).

Também pode-se observar alteração dos teores e redução da amplitude da faixa de suficiência em relação a recomendação oficial do estado de São Paulo (Gonçalves et al., 2022). Isto ocorre devido a especificidade da análise utilizada neste trabalho e utilização das funções CND-*clr*, com enfoque multivariado, abrangendo toda a composição nutricional (Partelli et al., 2014; Cunha et al., 2016), podendo proporcionar diagnósticos mais precisos, evitando-se, assim, a problemática de se inferir uma área de baixa produtividade como equilibrada nutricionalmente.

Para os EPTs, o uso deste método pode obter e produzir informações sobre o limite máximo de concentração destes elementos nas plantas sem prejuízo na produtividade e crescimento do *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto. As faixas de suficiência de nutrientes e EPTs de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto variaram de acordo com a idade de plantio, demonstrando mais uma vez a necessidade de regras específicas para cada situação de plantio, como idade e local (Silva et al., 2005). Dessa forma, recomenda-se o uso das normas e faixas obtidas neste trabalho para cultivos com características semelhantes, como as condições edafoclimáticas e da cultura, a fim de se garantir melhores diagnósticos nutricionais. Ainda, recomenda-se novos estudos com o objetivo de obter normas, faixa de suficiência e

concentração máxima de EPTs para distintas culturas e manejo da adubação com resíduos e adubos orgânicos, como o lodo de esgoto.

Tabela 4.12. Ponto de equilíbrio nutricional (PEN) e faixas de suficiência encontrados no experimento pelo método CND-*clr*, com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos, para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto

Elem.	22 meses				44 meses			
	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa
N (g kg ⁻¹)	20,4	18,6-22,1	20,1	18,3-21,8	20,0	17,9-22,0	19,8	17,8-21,9
P (g kg ⁻¹)	1,46	1,39-1,53	1,45	1,38-1,52	1,29	1,21-1,37	1,29	1,20-1,37
K (g kg ⁻¹)	7,96	7,33-8,58	7,84	7,22-8,47	9,75	8,98-10,5	9,81	9,04-10,6
Ca (g kg ⁻¹)	11,1	10,2-12,0	10,9	10,0-11,8	13,6	11,6-15,7	13,6	11,6-15,7
Mg (g kg ⁻¹)	2,16	2,00-2,33	2,13	1,96-2,29	1,95	1,78-2,12	1,94	1,77-2,11
S (g kg ⁻¹)	1,08	0,98-1,18	1,06	0,96-1,16	1,04	0,94-1,15	1,04	0,93-1,14
B (mg kg ⁻¹)	67	53-81	64	50-78	57	47-67	57	47-67
Cu (mg kg ⁻¹)	3,06	2,72-3,39	3,00	2,66-3,33	2,77	2,53-3,01	2,77	2,54-3,01
Fe (mg kg ⁻¹)	120	91-148	117	88-145	245	219-272	246	220-272
Mn (mg kg ⁻¹)	257	217-298	249	209-290	287	238-335	287	238-335
Mo (mg kg ⁻¹)	0,08	0,00-0,25	0,08	0,00-0,25	0,06	0,05-0,08	0,06	0,05-0,08
Zn (mg kg ⁻¹)	15,8	14,5-17,1	15,5	14,2-16,8	13,2	11,9-14,4	13,1	11,9-14,4
Al (mg kg ⁻¹)	149	104-195			335	300-370		
As (mg kg ⁻¹)	0,01	0,00-0,01			0,02	0,02-0,03		
Ba (mg kg ⁻¹)	11,4	9,7-13,1			16,5	12,3-20,8		
Cd (mg kg ⁻¹)	0,00	0,00-0,00			0,01	0,00-0,01		
Cr (mg kg ⁻¹)	0,16	0,12-0,21			0,20	0,18-0,22		
Pb (mg kg ⁻¹)	0,09	0,07-0,11			0,15	0,14-0,17		

Elem.	54 meses				76 meses			
	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa	PEN	Faixa
N (g kg ⁻¹)	20,9	19,9-21,9	20,0	20,0-22,0	14,3	13,3-15,2	14,2	13,3-15,1
P (g kg ⁻¹)	1,38	1,32-1,44	1,38	1,32-1,44	0,95	0,86-1,05	0,94	0,85-1,03
K (g kg ⁻¹)	8,83	8,12-9,53	8,87	8,17-9,58	8,91	8,30-9,53	8,88	8,26-9,50
Ca (g kg ⁻¹)	9,23	8,52-9,95	9,27	8,56-9,99	10,2	8,79-11,6	10,3	8,86-11,7
Mg (g kg ⁻¹)	1,99	1,86-2,11	2,00	1,87-2,13	2,35	2,09-2,62	2,40	2,13-2,66
S (g kg ⁻¹)	1,54	1,45-1,62	1,54	1,46-1,62	1,07	1,01-1,14	1,07	1,00-1,14
B (mg kg ⁻¹)	36	30-43	36	30-43	54	45-63	55	46-63
Cu (mg kg ⁻¹)	4,30	3,95-4,66	4,32	3,97-4,68	4,68	4,18-5,17	4,69	4,20-5,19
Fe (mg kg ⁻¹)	141	130-153	142	131-153	129	112-146	129	111-146
Mn (mg kg ⁻¹)	223	191-254	224	193-256	305	235-374	305	236-375
Mo (mg kg ⁻¹)	0,02	0,01-0,02	0,02	0,01-0,02	0,07	0,05-0,09	0,07	0,05-0,09
Zn (mg kg ⁻¹)	15,9	15,2-16,7	16,0	15,2-16,8	15,3	13,8-16,9	15,4	13,8-16,9
Al (mg kg ⁻¹)	193	177-208			159	134-183	159	
As (mg kg ⁻¹)	0,04	0,03-0,04			0,03	0,03-0,04	0,03	
Ba (mg kg ⁻¹)	7,62	6,53-8,71			12,9	10,4-15,4	12,9	
Cd (mg kg ⁻¹)	0,003	0,002-0,004			0,005	0,004-0,007	0,005	
Cr (mg kg ⁻¹)	0,21	0,20-0,23			0,22	0,19-0,25	0,22	
Pb (mg kg ⁻¹)	0,09	0,08-0,09			0,09	0,07-0,11	0,09	

4.4 Conclusão

A inclusão dos elementos potencialmente tóxicos nas normas e funções CND-*clr* para *Eucalyptus* não alteram a interpretação do estado nutricional da cultura. Assim que, os índices CND-*clr* obtidos para os nutrientes e elementos potencialmente tóxicos em *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B permitem de forma eficiente determinar a deficiência, o excesso e o equilíbrio dos elementos avaliados, assim, como sua ordem de limitação por deficiência e excesso nutricional. No entanto, é proposto o estabelecimento de normas CND-*clr* para cada situação em estudo, como diferentes tipos de manejo, idade e região do cultivo, características do clone utilizado entre outros.

Referências

ARAÚJO, G.C.L.; GONZALEZ, M.H.; FERREIRA, A.G.; NOGUEIRA, A.R.; NÓBREGA, J.A. Effect of acid concentration on closed-vessel microwave-assisted digestion of plant materials. **Spectrochimica Acta Part B**, v.57, p.2121-2132, 2002.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Lodo de esgoto na agricultura: Potencial de uso e problemas**. Disponível em: www.cnpma.embrapa.br. Acesso em: 22 jul. 2017.

BRASIL. Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução 375**. Brasília, DF, 2006. 31 p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

BRASIL. Ministério da Casa Civil. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2.ed. Brasília, DF, 2012. Disponível em: fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf. Acesso em: 27 set. 2016.

CAMACHO, M.A.; SILVEIRA, M.V.; CAMARGO, R.A.; NATALE, W. Faixas normais de nutrientes pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranja-pera. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.46, p.193-200, 2012.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106)

CUNHA, M.L.P.; AQUINO, L.A.; NOVAIS, R.F.; CLEMENTE, J.M.; AQUINO, P.M.; OLIVEIRA, T.F. Diagnosis of the nutritional status of garlic crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-14, 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Produção e Informação. 412p. 1999.

FERRAZ, A.D.V.; MOMENTEL, L.T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v.47, p.861-876, 2016.

GALDOS, M.V.; MARIA, I.C.; CAMARGO, O.A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutrófico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.569-577, 2004.

GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JUNIOR, J.C.; ROCHA, J.H.T.; FERRAZ, A.V., GUERRINI, I.A. Plantações florestais e seringueira. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R.M.; RAIJ, B.V. **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 500p, 2022.

GONÇALVES, J.L.M.; RAIJ, B.V.; GONÇALVES, J.C. Florestais in: RAIJ, B.V., CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas e Fundação IAC, (Boletim Técnico, 100), 285p, 1997.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro, RJ, 2008. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoadevida/pnsb2008/defaulttabzip_esgot_san.shtm. Acesso em: 10 set. 2016.

KURIHARA, C.H.; VENEGAS, V.H.A.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; STAUT, L.A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Revista Ceres**, v.60, p.412-419, 2013.

KHIARI, L.; PARENT, L.; TREMBLAY, N. Critical Compositional Nutrient Indexes for Sweet Corn at Early Growth Stage. **Agronomy Journal**, v.93, p.809-814, 2001.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 319p, 1997.

MELO, W.J.; DELARICA, D.; GUEDES, A.; LAVEZZO, L.; DONHA, R.; ARAÚJO, A.; MELO, G.; MACEDO, F. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science of the Total Environment**, v.643, 1943, 2018.

MORETTI, S.M.L.; BERTONCINI, E.I.; ABREU JUNIOR, C.H. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em Nitossolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1796-1805, 2015.

NASCIMENTO, A.L.; SAMPAIO, R.A.; FERNANDES, L.A.; ZUBA JUNIO, G.R.; CARNEIRO, J.P.; RODRIGUES, M.N.; ALBUQUERQUE, H.C. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge stabilized by different processes. **Revista Ceres**, v.60, p.683-689, 2015.

PARENT, L.E.; DAFIR, M. A theoretical concept of Compositional Nutrient Diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, p.239-242, 1992.

PARTELLI, F.L.; DIAS, J.R.M.; VIEIRA, H.D.; WADT, P.G.S.; PAIVA JÚNIOR, E. Avaliação nutricional de feijoeiro irrigado pelos métodos CND, DRIS e faixas de suficiência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.858-866, 2014.

PINTO, P.A.C.; DIAS, L.E.; ALVAREZ V., V.H.; CHOUDHURY, M.M.; VIEIRA, G. Avaliação do estado nutricional da magueira Tommy Atkins no submédio do vale do rio São Francisco: cálculo dos índices DRIS. **Recursos Rurais**, v.6, p.5-13, 2010.

RAIJ, B. CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p.

SAITO, M.L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura**: precauções com os contaminantes orgânicos. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2007. 35 p. (Documentos, 64).

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; BACKES, C.; HELIODORO, J.C.A.; RONCHI, H.S.; TANGANELLI, K.M.; CARVALHO, N.C.; OLIVEIRA, F.C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: Efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1637-1645, 2012.

SANTOS, E.F.; DONHA, R.M.A.; MAGNO, C.M. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos CHM, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1651-1658, 2013.

SANTOS, E.M.H.; ROZANE, D. E. DRIS standard and normal ranges of foliar nutrients for the culture of 'Thompson' atemoya. **Ciência Rural**, v.47, e20160613, 2017.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber volume. **Journal of Agriculture Research**, v.47, p.719-734, 1933.

SERRA, A.P.; MARCHETTI, M.E.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O.; CAMACHO, M.A. Determinação de faixas normais de nutrientes no algodoeiro pelos métodos ChM, CND e DRIS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 97-104, 2010.

SILVA, G.G.C.; NEVES, J.C.L; ALVAREZ V.; V.H.; LEITE, F.P. Avaliação da universalidade das normas DRIS, M-DRIS E CND. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.755-761, 2005.

SOUZA, H.A.; ROZANE, D.E.; AMORIM, D.A.; DIAS, M.J.; MODESTO, V.C.; NATALE, W. Assessment of nutritional status of guava seedlings using preliminary DRIS norms and sufficiency ranges. **Journal of Plant Nutrition**, v. 38, p. 1611-1618, 2015.

SUSZEK, G.; SOUZA, E.G.; NÓBREGA, L.H.P.; PACHECO, F.; SILVA, C.T.A.C. Use of yield and total soluble solids/total titratable acidity ratio in orange on group definition for standard DRIS. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.39, 2017.

Systat Software. SigmaPlot. San Jose, California USA, 2020.

USEPA. **Method 3051A**: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. Revision 1. Washington, DC, 2007. 30p.

WADT, P.G.S. **Os métodos da chance matemática e do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto**. 1996. 123 F. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

WADT, P.G.S. Relationship between soil class and nutrition status of coffee plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.227-234, 2005.

5 INCLUSÃO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS FUNÇÕES CND-*ilr* PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DE *Eucalyptus* ADUBADO COM LODO DE ESGOTO CLASSE B

Resumo

A utilização de métodos de avaliação do estado nutricional de cultivos adubados com lodo de esgoto faz-se necessário para estudar a influência dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no desenvolvimento das plantas. Objetivou-se avaliar o estado nutricional de *Eucalyptus* com uso do método CND-*ilr*, com e sem a inclusão dos EPTs, em plantio comercial tratado com lodo de esgoto classe B. Para tanto, dados de incremento médio anual e teores de nutrientes e EPTs foram obtidos em experimento aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio de *Eucalyptus* adubado com lodo de esgoto classe B. O método CND-*ilr* demonstrou potencial para obtenção de padrões nutricionais. A subpopulação de alta produtividade e nutricionalmente balanceada apresentou, em sua maioria, populações de *Eucalyptus* tratado com aplicação de lodo de esgoto para fornecer 100% da recomendação de N (verdadeiro negativo – VN), com acurácia, ou seja, probabilidade de uma observação ser corretamente identificada como equilibrada, de 58 e 61% para as avaliações sem e com a inclusão dos EPTs aos 76 meses após o plantio, respectivamente. A maior diferença entre grupos de nutrientes foi observada entre os macronutrientes e micronutrientes, na qual a subpopulação de alta produtividade apresentou maior concentração de micronutrientes em relação à subpopulação de baixa produtividade aos 76 meses de idade.

Palavras-chave: diagnose foliar, *isometric log ratio*, metais pesados, nutrientes.

Abstract

The use of methods to assess the nutritional status of crops treated with sewage sludge is necessary to study the influence of potentially toxic elements (PTEs) on plant development. The objective was to evaluate the nutritional status of *Eucalyptus* using the CND-*ilr* method, with and without the inclusion of PTEs, in a commercial plantation treated with class B sewage sludge. For this purpose, average annual increment data and nutrient and PTEs contents were obtained in an experiment at 22, 44, 54, and 76 months after planting *Eucalyptus* fertilized with class B sewage sludge. The CND-*ilr* method showed potential for obtaining nutritional standards. The high productivity and nutritionally balanced subpopulation presented, in the majority, populations of *Eucalyptus* treated with sewage sludge application to provide 100% of the N recommendation (true negative – TN), with accuracy, that is, probability of an observation being correctly identified as balanced, of 58 and 61% for evaluations without and with the inclusion of PTEs at 76 months after planting, respectively. The greatest difference between nutrient groups was observed between macronutrients and micronutrients, in which the high-yield subpopulation had a higher concentration of micronutrients compared to the low-yield subpopulation at 76 months of age.

Keywords: heavy metals, *isometric log ratio*, leaf diagnosis, nutrients.

5.1 Introdução

O lodo de esgoto tem se mostrado um potencial insumo orgânico para culturas agrícolas, como milho e cana-de-açúcar (Nogueira et al., 2013; Athamenth et al., 2015); assim como plantios comerciais de *Eucalyptus* e pinus (Bourioug et al., 2014; Marron, 2015; Xue et al., 2015); e reflorestamentos com espécies nativas visando a recuperação de áreas degradadas (Sampaio et al., 2016), devido ao aumento da fertilidade do solo (Ferraz et al., 2016).

No entanto, a ocorrência de contaminantes no lodo de esgoto pode limitar a sua utilização na agricultura e/ou silvicultura. Dentre estes, a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) na composição do lodo de esgoto pode ocasionar contaminação do solo e distúrbios nutricionais na cultura, prejudicando seu desenvolvimento e produtividade.

Para tanto, a utilização de métodos de avaliação do estado nutricional de cultivos tratados com lodo de esgoto faz-se necessário para estudar a influência dos EPTs no desenvolvimento das plantas. Entretanto, métodos de interpretação de análises químicas em folhas que pressupõem a comparação dos teores de nutrientes com valores de referência (níveis críticos ou faixas de suficiências) são questionáveis, uma vez que apenas expressam a proporcionalidade dos elementos em relação à matéria seca, sem que seja levado em consideração as interações entre os nutrientes (Parent, 2011).

Assim que, o desenvolvimento de funções para a diagnose da composição nutricional (CND), desenvolvido por Parent e Dafir (1992), pode representar uma importante alternativa para modelar a resposta biológica das culturas às variações na disponibilidade de nutrientes. O CND-*clr* (centered log ratio) consiste na avaliação multivariada dos elementos, sob a média geométrica de cada um, de maneira a verificar a influência destes sob o estado nutricional das culturas (Parent; Dafir, 1992). No entanto, o CND-*clr* não apresenta um modelo conceitual para interpretação das interações dos nutrientes (Parent, 2011).

Assim que, Parent (2011), propondo nova base de cálculo para o CND, apresentou o conceito de arranjos de balanços ortonormais ou balanço entre dois grupos de componentes (elementos químicos avaliados da matéria seca) não sobrepostos arranjados na ordem de D-1 contrastes, sendo D o número de componentes da matéria seca. Sendo então formulado o conceito do CND-*ilr* (*isometric log ratio*), em que partições sequenciais binárias refletem a interação dos nutrientes. A definição de partições sequenciais binárias pode ser realizada de acordo com as interações já conhecidas dos nutrientes (Parent, 2011; Parent et al., 2013a).

Desta forma, nossa hipótese é que a inclusão dos EPTs na avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus* pelo método CND-*ilr* auxilia na verificação da interferência destes elementos quanto aos aspectos nutricionais da planta e propor normas para utilização desse método em cultivos de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B. Assim, objetivou-se avaliar o estado nutricional de *Eucalyptus* com uso do método CND-*ilr*, com e sem a inclusão dos EPTs, em plantio comercial tratado com lodo de esgoto classe B.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Área experimental

O experimento foi instalado em fevereiro de 2015, ocupando área total de 2,7 ha em plantio comercial de *Eucalyptus* no município de Boa Esperança do Sul, SP (21°59'33" S e 48°23'27" O), à uma altitude de 516 metros. A área experimental foi cultivada comercialmente com *Eucalyptus* pelos últimos 40 anos e nunca houve aplicação de lodo de esgoto.

O clima da região é classificado como Cwa – zona subtropical úmida com verão quente e inverno seco, de acordo com Köppen, com precipitação média anual de 1074 mm e temperatura média fria de 17,5 °C e quente de 30,1 °C (Figura 5.1). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd) (Embrapa, 1999). A análise química foi realizada de acordo com método descrito em Raij et al. (2001) e análise granulométrica pelo método da pipeta (Camargo et al. 1986) (Tabela 5.1).

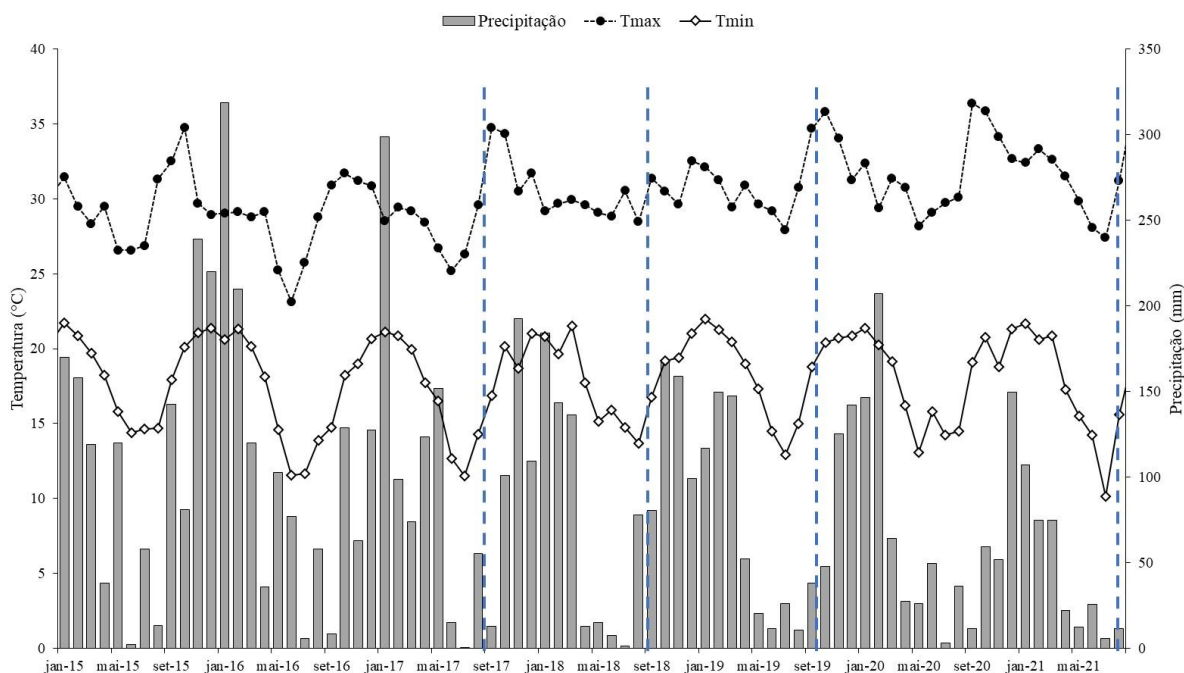


Figura 5.1. Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) no município de Boa Esperança do Sul-SP. Linhas verticais e tracejadas representam as épocas de amostragem e inventário aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio.

Tabela 5.1. Caracterização química¹ e física² do solo antes da instalação do experimento.

Atributos	Unidade	Camada (cm)			
		0-5	5-10	10-20	20-40
pH _(CaCl₂)	-	5,3	5,4	5,7	4,9
Matéria Orgânica	g dm ⁻³	14	10	7	3
P _{resina}	mg dm ⁻³	7	6	3	2
K	mmol dm ⁻³	0,3	0,3	0,5	0,4
Ca ⁺²	mmol dm ⁻³	23	18	16	9
Mg ⁺²	mmol dm ⁻³	2	2	2	1
Al ⁺³	mmol dm ⁻³	0,0	0,0	0,0	0,5
H+Al	mmol dm ⁻³	20	19	15	18
S-SO ₄	mg dm ⁻³	5	5	2	5
Capacidade de troca de cátions	mmol dm ⁻³	46	40	34	29
Saturação por bases	%	56	51	54	38
B	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,2
Cu	mg dm ⁻³	0,3	0,3	0,3	0,3
Fe	mg dm ⁻³	32	28	35	28
Mn	mg dm ⁻³	2,0	1,0	2,0	0,7
Zn	mg dm ⁻³	0,6	0,2	0,6	0,8
Areia (> 0,05 mm)	g kg ⁻¹	900	900	900	900
Silte (> 0,002 and < 0,05 mm)	g kg ⁻¹	10	10	20	20
Argila (< 0,002 mm)	g kg ⁻¹	90	90	80	80

¹Raij et al. (2001) e ²Camargo et al. (1986).

5.2.2 Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado foi gerado na ETE de Jundiaí, SP, onde o esgoto passa por um sistema de lagoas aeradas de mistura completa e lagoas de decantação, sendo o

desaguamento feito com floculação à base de polímero catiônico, seguido de centrifugação. Na Tabela 5.2 são apresentadas a composição química desse material, utilizando-se a metodologia proposta pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007).

Tabela 5.2. Caracterização física e química do lodo de esgoto proveniente da ETE Jundiaí

Atributos	Lodo de esgoto	Atributos	Lodo de esgoto
pH-H ₂ O	6,8		----- mg kg ⁻¹ -----
	----- % -----	B	1,0
Umidade	62	As	3,3 (41) ¹
Sólidos voláteis	49	Ba	629 (1.300)
Cinzas	51	Cd	2,4 (39)
	----- g kg ⁻¹ -----	Pb	45 (300)
Carbono orgânico	166	Cu	308 (1.500)
N _(total)	22	Cr	61 (1.000)
P _(total)	30	Hg	< 0,05 ² (17)
K	1,7	Mo	8,0 (50)
Na	1,8	Ni	31 (420)
S	24	Se	< 0,05 ² (100)
Ca	21	Zn	667 (2.800)
Mg	5,0		

Determinação de EPT no lodo de esgoto, segundo método 3051A (USEPA, 2007). ¹Limites estabelecidos para o uso agrônômico do lodo de esgoto, pela Resolução 375 do CONAMA (Brasil, 2006). ²Não detectado.

5.2.3 Experimento de campo

O preparo do solo ocorreu em janeiro de 2015, com subsolagem na profundidade de 0,4 m entre as linhas do plantio anterior, onde as mudas de *Eucalyptus* foram plantadas. Antes do plantio, aplicou-se 1,8 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 80%) visando aporte de Ca e Mg ao solo. O material genético utilizado no experimento foi um híbrido oriundo do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*). As mudas foram produzidas via propagação vegetativa para clonagem. O plantio foi realizado de forma manual em fevereiro de 2015, com espaçamento de 3 x 2,25 m, totalizando 1.481 árvores por hectare.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso com dez tratamentos e quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. Cada parcela foi constituída por 100 plantas (10 x 10 plantas), sendo as 36 plantas centrais correspondentes a área útil e as demais 64 plantas da área de bordadura. Os tratamentos consistiram em um controle (sem adubação); dois tratamentos com aplicação de fertilizantes minerais em dosagens diferentes; e sete tratamentos com aplicação de lodo de esgoto. A fertilização mineral 1 (FM1) é uma recomendação técnica utilizada internamente pela Suzano S.A. A fertilização mineral 2 (FM2) é a recomendação oficial do Estado de São Paulo (Gonçalves et al., 1997). O detalhamento da quantidade de nutrientes aplicado por tratamento encontra-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Quantidade de nutrientes aplicado por tratamento pelos fertilizantes minerais e lodo de esgoto (LE). Valores entre parênteses representam os nutrientes aplicados pelo LE.

Tratamentos	N	P	K	B	Zn	Cu
----- kg ha ⁻¹ -----						
Controle (C)	0	0	0	0	0	0
Fertilização Mineral 1 (FM1)	192	26	137	6,5	2,8	2,8
Plantio	30	26	25	1,5	1,5	1,5
Fertilização 1 ^{3/}	45	0	112	1,8	1,3	1,3
Fertilização 2 ^{4/}	54	0	0	1,5	0	0
Fertilização 3 ^{5/}	63	0	0	1,7	0	0
Fertilização Mineral 2 (FM2)	60	17,5	84	4,2	1,8	1,8
Plantio	20	17,5	17	1,0	1,0	1,0
Fertilização 1 ^{3/}	27	0	67	1,1	0,8	0,8
Fertilização 2 ^{4/}	16	0	0	2,1	0	0
Lodo (50%) ^{2/} + P (83%) - B + K (L1P1)	96 ^{6/}	22	137	0	0	0
	(319)	(435)	(290)	(0,015)	(9,7)	(4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (50%) ^{2/} + P (83%) + B + K (L1P1B)	96 ^{6/}	22	137	6,5	0	0
	(319)	(435)	(290)	(0,015)	(9,7)	(4,5)
Plantio ^{1/}	0	22	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%) ^{2/} + P (66%) - B + K (L2P2)	192 ^{6/}	17,5	137	0	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9,0)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (100%) ^{2/} + P (66%) + B + K (L2P2B)	192 ^{6/}	17,5	137	6,5	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9)
Plantio ^{1/}	0	17,5	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (100%) ^{2/} - P + B + K (L2B)	192 ^{6/}	0	137	6,5	0	0
	(638)	(870)	(855)	(0,030)	(19,3)	(9)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	19,3	9
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0
Lodo (150%) ^{2/} - P - B + K (L3)	288 ^{6/}	0	137	0	0	0
	(957)	(1.305)	(870)	(0,045)	(29)	(13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	0	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	0	0	0
Lodo (150%) ^{2/} - P + B + K (L3B)	288 ^{6/}	0	137	6,5	0	0
	(957)	(1.305)	(870)	(0,045)	(29)	(13,5)
Plantio ^{1/}	0	0	25	3,2	0	0
Fertilização 1 ^{3/}	0	0	112	3,3	0	0

^{1/} Fertilização de plantio (superfosfato triplo, KCl e ulexita) em 12/02/2015. ^{2/} Aplicação de lodo de esgoto em 12/09/2015, 207 dias após transplantio, nas doses de 14,5; 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca) correspondendo a 50, 100 e 150% da recomendação de N (192 kg ha⁻¹). ^{3/} Primeira adubação de cobertura realizada em 05/11/2015, 261 dias após transplantio. ^{4/} Segunda adubação de cobertura realizada em 21/12/2015, 307 dias após transplantio. ^{5/} Terceira adubação de cobertura realizada em 02/02/2016, 350 dias após transplantio. ^{6/} Dose de N disponível aplicado pelo lodo de esgoto, considerando taxa de mineralização de N de 30% para lodo de esgoto aeróbio (Brasil, 2006).

Os fertilizantes minerais foram aplicados no sulco de plantio e as adubações de cobertura foram aplicados em meia coroa ao redor da muda, em dosagens apresentadas na Tabela 5.3. A dosagem de lodo de esgoto a ser aplicada foi calculada para que tivesse o

equivalente à 50, 100 e 150% da recomendação técnica 1 de N (FM1), ou seja, 192 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a 14,5; 29 e 43,5 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente, em base seca. A taxa de aplicação do lodo de esgoto foi com base no critério do N, conforme descrito na Resolução no 375 (Brasil, 2006). O lodo de esgoto foi distribuído superficialmente no solo em uma faixa de 0,60 m de largura à 0,20 m de distância do sulco de plantio, sete meses após o plantio das mudas (setembro de 2015). Todos os demais tratamentos silviculturais (controle de plantas espontâneas) seguiram o padrão adotado pela empresa em seus plantios comerciais.

5.2.4 Estimativa de produtividade e amostragem de material vegetal

Em setembro de 2017 (22 meses após plantio), setembro de 2018 (44 meses após plantio), setembro de 2019 (54 meses após plantio) e em julho de 2021 (76 meses após plantio) foi medido a circunferência a altura do peito (CAP – 1,3 m) e altura (H) de todas as árvores das parcelas úteis do experimento. Isso foi realizado para se estimar a produtividade de volume de madeira, utilizando o modelo logarítmico de Schumacher e Hall (1933), ajustada com inventário de biomassa realizado aos 22 meses após o plantio, e posterior cálculo do incremento médio anual (IMA).

O CAP medido também foi utilizado para selecionar as árvores para desbaste e coleta das folhas para diagnose nutricional e EPTs. As árvores foram selecionadas aleatoriamente dentro do intervalo de $\pm 5\%$ do CAP mediano, sendo uma árvore por parcela, exceto aos 76 meses após o plantio, quando foi desbastada duas árvores por parcela. Após o desbaste, foram coletadas amostras de folhas dos quatro pontos cardiais no terço superior da copa das árvores, conforme recomendação de Malavolta et al. (1997) e Raij et al. (1997).

5.2.5 Análise química do material vegetal

No laboratório, as folhas coletadas foram lavadas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até peso constante, moídas em moinho de facas tipo Willey e acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificados, até momento da análise. As amostras foram digeridas conforme procedimento descrito por Araújo et al. (2002). Pesou-se 250 mg de material vegetal, que foi digerido em solução com 7,5 mL de HNO₃ 3,11 mol L⁻¹ e 2,5 mL de H₂O₂ 30% (v/v), em sistema fechado de micro-ondas. Os teores dos elementos essenciais, exceto o nitrogênio, e potencialmente tóxicos foram determinados por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado, utilizando um ICP-MS Agilent modelo 7500ce. O teor de N foi determinado pelo método Kjeldahl (Malavolta et al., 1997).

5.2.6 Análise dos dados

A concentração de todos os elementos foi convertida para g kg⁻¹ e o valor do componente *Fv* (*Filling value* ou valor de enchimento) foi obtido a partir da diferença de 1000 g kg⁻¹ e o somatório da concentração dos elementos avaliados (nutrientes e elementos potencialmente tóxicos – em g kg⁻¹).

Para o CND-*ilr*, a coordenada *ilr* (relação log isométrica) foi computada como contrastes entre dois grupos subdivididos em positivo (+) (numerador) e negativo (-) (denominador), conforme equação abaixo, apresentada por Parent et al. (2013a,b).

$$ilr = \sqrt{\frac{r*s}{r+s}} \ln \frac{G_+}{G_-} \quad (1)$$

Onde, “r” e “s” são os números de componentes no grupo positivo (+) e negativo (-), respectivamente, que permite balanços ortogonais normalizados em balanços ortonormais; e G₊ e G₋ é a média geométrica do grupo positivo e negativo, respectivamente. As normas *ilr* da subpopulação de alta produtividade (*ilr**) foi calculado da mesma forma, porém os cálculos são realizados com as medias dos teores dos elementos da população de referência.

O balanço mineral, pela partição binária sequencial (Tabela 5.4), deve refletir as funções dos elementos na planta assim como seus princípios na química do solo (Parent et al., 2013a,b). O primeiro balanço (*ilr* 1) compreende no contraste entre os elementos analisados e o valor de preenchimento (*Fv*). Os elementos potencialmente tóxicos foram contratados com os nutrientes no segundo balanço (*ilr* 2). Os macronutrientes e B foram contrastados com os micronutrientes (*ilr* 3). B foi contrastado com os macronutrientes por interagir com estes elementos (*ilr* 4). N, P e S foram contrastados com K, Ca e Mg (*ilr* 5) por refletir a interação entre os nutrientes da síntese de proteínas e energia e os nutrientes catiônicos. Os nutrientes K, Ca e Mg foram separados de acordo com suas valências (*ilr* 6). N e S foram contrastados com P (*ilr* 8) por separar os nutrientes envolvidos na síntese de proteínas com o de energia. Mo e Ni foram contrastados com os demais micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) (*ilr* 10) por serem requeridos em menor quantidade pelas plantas. Fe e Mn foram contratados com Cu e Zn (*ilr* 12) por normalmente apresentarem maiores reserva no solo, além de serem dependentes das características de oxirredução do solo. Al foi contrastado com os EPTs (As, Ba, Cd, Cr e Pb) (*ilr* 15) devido ao *Eucalyptus* apresentar tolerância ao Al. As, Cr e Se foram contrastados com Ba, Cd e Pb (*ilr* 16) por serem absorvidos em forma oxídica pelas plantas. As e Se foram contrastados com Cr (*ilr* 17). Ba foi contrastado com Cd e Pb (*ilr* 19).

Os demais contrastes (*ilr* 7, 9, 11, 13, 14, 18, 20) foram obtidos pela separação de dois elementos. Os contrastes sem a inclusão dos EPTs seguiram as mesmas comparações (Tabela 5.5).

Tabela 5.4. Partição ortogonal sequencial de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos da ionômica da planta e o valor de preenchimento (Fv) para calcular 18 coordenadas ortonormais ilr de valores de concentração e coeficientes ortogonais.

ilr	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Al	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Fv	r	s	Balances
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	18	1	[Fv N P K Ca Mg S B Cu Fe Mn Mo Zn Al As Ba Cd Cr Pb]
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	12	6	[N P K Ca Mg S B Cu Fe Mn Mo Zn Al As Ba Cd Cr Pb]
3	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	7	5	[N P K Ca Mg S B Cu Fe Mn Mo Zn]
4	1	1	1	1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	[N P K Ca Mg S B]
5	1	1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	[N P S K Ca Mg]
6	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	[K Ca Mg]
7	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	[Ca Mg]
8	1	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	[N P S]
9	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	[N P]
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	4	1	[Cu Fe Mn Zn Mo]
11	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	[Cu Zn Fe Mn]
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	[Fe Mn]
13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	[Cu Zn]
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	5	[Al As Ba Cd Cr Pb]
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	-1	0	2	3	[As Cr Ba Cd Pb]
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	1	1	[As Cr]
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0	1	2	[Ba Cd Pb]
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	1	1	[Cd Pb]

Tabela 5.5. Partição ortogonal sequencial de nutrientes da ionômica da planta e o valor de preenchimento (Fv) para calcular 12 coordenadas ortonormais ilr de valores de concentração e coeficientes ortogonais.

ilr	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Fv	r	s	ilr definitions
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	12	1	[Fv N P K Ca Mg S B Cu Fe Mn Mo Zn]
2	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	7	5	[N P K Ca Mg S B Cu Fe Mn Mo Zn]
3	1	1	1	1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	6	1	[N P K Ca Mg S B]
4	1	1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3	[N P S K Ca Mg]
5	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	[K Ca Mg]
6	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	[Ca Mg]
7	1	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	[N P S]
8	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	[N P]
9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	1	0	4	1	[Cu Fe Mn Zn Mo]
10	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	1	0	2	2	[Cu Zn Fe Mn]
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	1	[Fe Mn]
12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	1	1	[Cu Zn]

A distância de Mahalanobis (D^2) também pode ser utilizada como uma medida de desequilíbrio nutricional, utilizando-se das transformações CND- ilr , após o cálculo multivariado da matriz inversa da covariância (COV^{-1}) (Parent et al., 2009, 2011, 2013b). Esta é uma técnica estatística que explora simultaneamente as relações entre diversas variáveis independentes, utilizada para remover o efeito de quaisquer variáveis independentes não controladas sobre as variáveis dependentes. A distância de Mahalanobis (D^2) é uma medida de distância multivariada, que tem um x^2 distribuição.

$$D^2 = (V_i - V_i^*)^T COV^{-1} (V_i - V_i^*) \quad (2)$$

As populações ainda foram subdivididas pelo procedimento Cate-Nelson (Nelson; Anderson, 1977). Esta análise foi realizada no *software* R (version 4.1.0) com auxílio do pacote *rcompanion*. As subdivisões são:

VN (verdadeiro negativo) – amostras altamente produtivas e corretamente identificadas como equilibradas nutricionalmente (abaixo do valor crítico multivariado);

FN (falso negativo) – amostra de baixa produtividade e incorretamente identificadas como equilibradas nutricionalmente (abaixo do valor crítico multivariado);

FP (falso positivo) – amostras de alta produtividade e incorretamente identificadas como desequilibradas nutricionalmente (acima do valor crítico multivariado) devido consumo de luxo;

VP (verdadeiro positivo) – amostras de baixa produtividade e corretamente identificadas como desequilibradas nutricionalmente (acima do valor crítico multivariado) (Parent et al., 2013b).

O teste de diagnóstico é interpretado como se segue, de acordo com Parent et al. (2013b):

- O Valor Preditivo Negativo (VPN) é a probabilidade de um diagnóstico equilibrado retornar a um alto desempenho, calculado como $VN / (VN + FN)$;
- O Valor Preditivo Positivo (VPP) é a probabilidade de um diagnóstico de desequilíbrio retornar a um baixo desempenho, calculado como $VP / (VP + FP)$;
- A Acurácia (Ac.) é a probabilidade de uma observação ser corretamente identificada como equilibrada ou desequilibrada, calculado como $(VN + VP) / (VN + FN + VP + FP)$;
- A Especificidade (Esp.) é a probabilidade de uma observação de elevada produtividade ser equilibrada, calculado como $VN / (VN + FP)$;
- A Sensibilidade (Sens.) é a probabilidade de uma observação de baixo desempenho estar desequilibrada, calculada como $VP / (VP + FN)$.

O VPN, acurácia e a sensibilidade identificam o potencial de deficiência de nutrientes e indicam que alguns outros fatores podem limitar o crescimento da planta. O VPP e a especificidade detectam potenciais problemas relacionados ao consumo de luxo de nutriente ou contaminação.

Os dados utilizados para realizar os cálculos CND-*ilr* foram os teores de nutrientes e elementos potencialmente tóxicos aos 76 meses após o plantio e global, com os dados das quatro épocas de coletas (22, 44, 54 e 76 meses após o plantio). Isso ocorreu pelo menor número de dados obtidos nas primeiras avaliações realizadas ($n = 40$), sendo maior aos 76 meses após o plantio ($n = 79$). Os dados foram computados com auxílio dos *softwares* Excel e R (R Core Team, 2019), utilizando o pacote *rcompanion*. A comparação entre as coordenadas *ilr* das subpopulações de baixa e alta produtividade foram realizadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$) com auxílio do *software* R (R Core Team, 2019), utilizando o pacote *ExpDes.pt*.

5.3 Resultados e Discussão

Os resultados da classificação binária são apresentados na Figura 5.2, sem e com a inclusão dos EPTs, aos 76 meses após plantio e de forma global. Nota-se que não houve variação da produtividade mínima para a população de referência aos 76 meses após o plantio, com e sem a adição dos EPTs ($42,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ por ano), não havendo alteração no número de

populações enquadradas na subpopulação TN (*true negative*), caracterizada pela alta produtividade e diagnosticada corretamente como balanceada. Já na avaliação global, a adição dos EPTs nos cálculos aumentou o limite de 40,2 para 46,4 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ por ano, incremento de 15,4%. Essa variação ocasionou na diminuição de 47% das populações da subpopulação TN e incremento de 68% da subpopulação TP (*true positive*), caracterizada pela baixa produtividade e corretamente diagnosticada como desbalanceada (abaixo ou acima da norma).

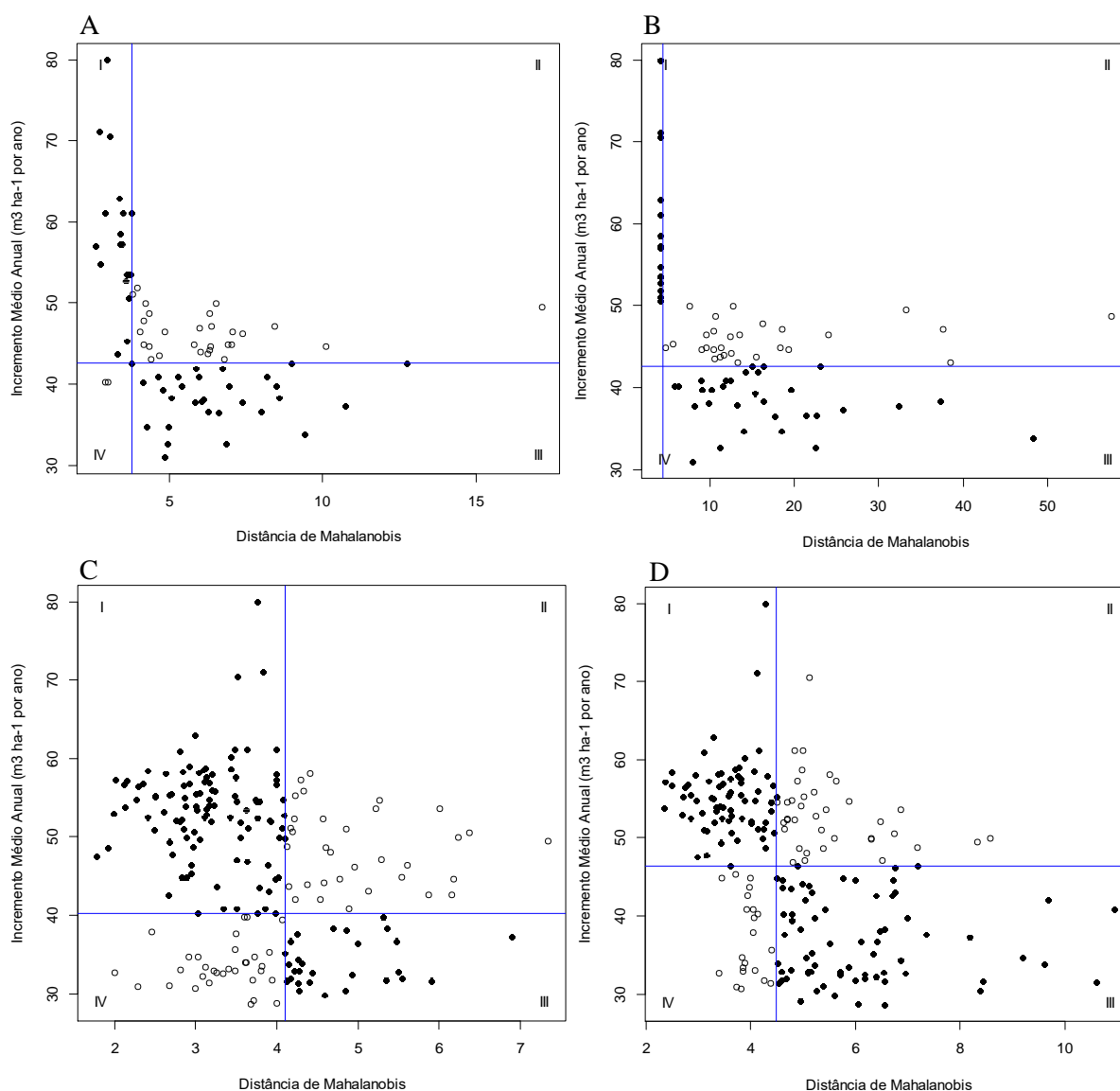


Figura 5.2. Particionamento Cate-Nelson para a relação entre a distância de Mahalanobis e incremento médio anual de *Eucalyptus*, tratado com lodo de esgoto classe B, aos 76 meses após plantio (A, B) e global (com dados aos 22, 44, 54 e 76 meses após o plantio) (C, D), sem (A, C) e com (B, D) a adição de elementos potencialmente tóxicos aos cálculos CND-*ilr*.

A subpopulação TN apresentou 89 e 84% das populações com adubação com lodo de esgoto, sendo que 58 e 53% das populações o lodo de esgoto foi aplicado a fornecer 100% da

recomendação de N aos 76 meses após o plantio, sem e com a adição dos EPTs aos cálculos CND-*ilr*, respectivamente. Para a avaliação global, 75 e 80% das populações com adubação com lodo de esgoto, sendo que 30 e 29% das populações o lodo de esgoto foi aplicado a fornecer 100% da recomendação de N, sem e com a adição dos EPTs aos cálculos CND-*ilr*, respectivamente.

Com a subdivisão da população, é possível determinar as normas *ilr* pelos valores correspondentes a subpopulação *true negative* (TN) e a sua variação (Tabela 5.6). Percebe-se que houve uma pequena variação das normas entre os cenários aos 76 meses após o plantio e global e entre com e sem a inclusão dos EPTs aos cálculos CND-*ilr*. A maior diferença observada foi na coordenada *ilr1*, com e sem a inclusão dos EPTs, onde se contrasta o valor de preenchimento e o teor dos elementos avaliados.

Tabela 5.6. Médias das coordenadas *ilr* da subpopulação *true negative* (TN), com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs), para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B

ilr	76 meses						Global					
	Com EPTs			Sem EPTs			Com EPTs			Sem EPTs		
	LL	Média	UP	LL	Média	UP	LL	Média	UP	LL	Média	UP
1	-10,244	-10,170	-10,095	-7,688	-7,649	-7,610	-10,225	-10,153	-10,080	-7,672	-7,629	-7,587
2	12,449	12,628	12,807	-	-	-	12,399	12,612	12,826	-	-	-
3	8,783	8,905	9,027	8,808	8,926	9,043	8,947	9,148	9,349	9,034	9,240	9,446
4	3,796	3,952	4,107	3,826	3,979	4,132	3,957	4,187	4,417	3,976	4,195	4,415
5	-1,166	-1,100	-1,034	-1,146	-1,097	-1,049	-1,078	-0,915	-0,753	-1,017	-0,843	-0,669
6	0,359	0,473	0,586	0,369	0,482	0,594	0,404	0,508	0,612	0,431	0,518	0,605
7	0,908	1,028	1,149	0,927	1,045	1,162	1,018	1,151	1,285	1,058	1,174	1,290
8	0,950	0,993	1,035	0,952	0,994	1,037	0,989	1,069	1,150	1,016	1,107	1,199
9	1,863	1,918	1,973	1,857	1,915	1,974	1,832	1,893	1,954	1,868	1,925	1,982
10	5,464	5,745	6,026	5,562	5,792	6,022	5,629	6,050	6,471	5,761	6,181	6,600
11	-3,286	-3,120	-2,953	-3,239	-3,085	-2,931	-3,407	-3,181	-2,956	-3,536	-3,296	-3,055
12	-0,748	-0,589	-0,431	-0,725	-0,579	-0,432	-0,623	-0,434	-0,246	-0,516	-0,325	-0,135
13	-0,934	-0,833	-0,733	-0,917	-0,824	-0,730	-1,009	-0,913	-0,816	-1,076	-0,975	-0,873
14	6,398	6,468	6,538	-	-	-	6,482	6,675	6,869	-	-	-
15	-0,925	-0,820	-0,715	-	-	-	-0,960	-0,746	-0,532	-	-	-
16	-1,448	-1,393	-1,337	-	-	-	-1,467	-1,372	-1,277	-	-	-
17	5,059	5,223	5,387	-	-	-	5,004	5,176	5,348	-	-	-
18	-2,223	-2,084	-1,945	-	-	-	-2,446	-2,267	-2,088	-	-	-

A acurácia da diagnose foi ligeiramente aumentada (5%) com a adição dos EPTs nos cálculos CND-*ilr*, em ambas os cenários de análise, atingindo máximo de 61 e 70% aos 76 meses após plantio e de forma global, respectivamente (Tabela 5.7). Esses valores são inferiores aos observados por Parent et al. (2013a,b) e semelhante aos de Meneses (2017). A acurácia

indica a probabilidade que uma observação seja corretamente identificada como balanceada ou desbalanceada. O ideal é que a acurácia seja acima de 50% (Beverly; Hallmark, 1992) ou de 68% (Wadt; Lemos, 2010), onde valores abaixo indicam que os diagnósticos falsos prevalecem aos diagnósticos corretos, caso que deve ser evitado.

Tabela 5.7. Índices de performance obtidos com o particionamento Cate-Nelson com o método CND-*ilr*, com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs), para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B

Índices	76 meses		Global	
	Sem EPTs	Com EPTs	Sem EPTs	Com EPTs
NPV	0,90	1,00	0,77	0,77
PPV	0,47	0,48	0,46	0,63
Acurácia	0,58	0,61	0,67	0,70
Especificidade	0,38	0,38	0,76	0,65
Sensibilidade	0,93	1,00	0,47	0,76

A adição dos EPTs, no geral, aumentou o valor preditivo negativo (NPV), o valor preditivo positivo (PPV), a especificidade e a sensibilidade da diagnose nutricional em ambos os cenários de avaliação (Tabela 5.7). A especificidade, probabilidade de uma observação de alta produtividade ser equilibrada, foi menor aos 76 meses após o plantio (38%) em relação ao cenário global (65-76%). Enquanto que a sensibilidade, definida como a probabilidade de uma observação de baixa produtividade estar desequilibrada, foi maior aos 76 meses após o plantio (93-100%) em relação ao cenário global (47-76%). Meneses (2017) observou sensibilidade de 95% e especificidade de 45% para cultura do milho-verde, enquanto Nowaki et al. (2017) observou sensibilidade de 84% e especificidade de 78% para a cultura do tomate.

Das populações com alta produtividade e balanceadas (NPV), 90 a 100% foram classificadas corretamente aos 76 meses após o plantio e 77% no cenário global (Tabela 5.7). Quanto as populações com baixa produtividade e desbalanceadas (PPV), 46 a 63% foram corretamente identificadas.

Comparando as subpopulações TN e TP é possível avaliar quais os grupos de elementos estão desbalanceados (Parent et al., 2013a,b). Aos 76 meses após o plantio não houve variação das coordenadas que apresentaram diferenças significativas entre as subpopulações quando houve ou não a adição dos EPTs aos cálculos CND-*ilr* (Tabela 5.8). O balanço com maior diferença foi o [N P K Ca Mg S B | Cu Fe Mn Mo Zn], seguido pelos [Ca | Mg], [N P | S], [N | P] e [N P S | K Ca Mg]. Contrastes negativos (TP-TN) indicam que o TN foi maior que o TP, com maior concentração para o grupo positivo (+) do que o grupo negativo (-). Para o

balanço [N | P], houve uma tendência de que a subpopulação TN apresentou maior concentração de N do que P, comparado a subpopulação TP. Comparado a subpopulação TN, houve uma tendência de que a subpopulação TP apresentou maior concentração de macronutrientes e B em relação aos micronutrientes, Ca em relação a Mg, N e P em relação ao S e macronutrientes aniônicos em relação aos catiônicos, devido a positiva diferença para os balanços [N P K Ca Mg S B | Cu Fe Mn Mo Zn], [Ca | Mg], [N P | S] e [N P S | K Ca Mg], respectivamente.

Tabela 5.8. Comparação entre coordenadas *ilr* das subpopulações *true negative* (TN) e *true positive* (TP), com e sem a inclusão dos elementos potencialmente tóxicos (EPTs), para avaliação do estado nutricional de *Eucalyptus* tratado com lodo de esgoto classe B

76 meses									
<i>ilr</i>	Com EPTs				Sem EPTs				
	TP	TN	TP-TN	Tukey	<i>ilr</i>	TP	TN	TP-TN	Tukey
1	-10,145	-10,170	0,024	ns	1	-7,626	-7,649	0,023	ns
2	12,653	12,628	0,025	ns	-	-	-	-	-
3	9,051	8,905	0,146	*	2	9,060	8,926	0,135	*
4	4,062	3,952	0,111	ns	3	4,080	3,979	0,101	ns
5	-1,031	-1,100	0,068	*	4	-1,027	-1,097	0,070	*
6	0,534	0,473	0,061	ns	5	0,536	0,482	0,054	ns
7	1,155	1,028	0,127	*	6	1,155	1,045	0,111	*
8	1,080	0,993	0,087	*	7	1,081	0,994	0,087	*
9	1,839	1,918	-0,080	*	8	1,839	1,915	-0,076	*
10	5,733	5,745	-0,012	ns	9	5,755	5,792	-0,037	ns
11	-3,130	-3,120	-0,010	ns	10	-3,144	-3,085	-0,059	ns
12	-0,605	-0,589	-0,016	ns	11	-0,608	-0,579	-0,029	ns
13	-0,885	-0,833	-0,052	ns	12	-0,894	-0,824	-0,071	ns
14	6,456	6,468	-0,012	ns	-	-	-	-	-
15	-0,855	-0,820	-0,035	ns	-	-	-	-	-
16	-1,409	-1,393	-0,016	ns	-	-	-	-	-
17	5,138	5,223	-0,085	ns	-	-	-	-	-
18	-2,151	-2,084	-0,067	ns	-	-	-	-	-
Global									
<i>ilr</i>	TP	TN	TP-TN	Tukey	<i>ilr</i>	TP	TN	TP-TN	Tukey
1	-10,189	-10,153	-0,036	*	1	-7,627	-7,629	0,003	ns
2	12,915	12,612	0,303	*	-	-	-	-	-
3	9,312	9,148	0,164	*	2	9,205	9,240	-0,035	ns
4	4,027	4,187	-0,160	*	3	3,940	4,195	-0,255	*
5	-0,790	-0,915	0,126	*	4	-0,829	-0,843	0,014	ns
6	0,488	0,508	-0,019	*	5	0,456	0,518	-0,062	*
7	1,223	1,151	0,072	ns	6	1,163	1,174	-0,012	ns
8	1,248	1,069	0,179	*	7	1,246	1,107	0,138	*
9	1,883	1,893	-0,010	*	8	1,820	1,925	-0,105	*
10	5,877	6,050	-0,173	*	9	5,669	6,181	-0,512	*
11	-3,347	-3,181	-0,166	*	10	-3,256	-3,296	0,040	ns
12	-0,385	-0,434	0,049	*	11	-0,543	-0,325	-0,218	*
13	-1,086	-0,913	-0,174	ns	12	-1,109	-0,975	-0,134	*
14	6,852	6,675	0,177	*	-	-	-	-	-
15	-1,232	-0,746	-0,485	*	-	-	-	-	-
16	-1,658	-1,372	-0,286	*	-	-	-	-	-
17	5,179	5,176	0,004	ns	-	-	-	-	-
18	-2,344	-2,267	-0,077	ns	-	-	-	-	-

Para o cenário global houve mais balanços significativamente diferentes entre as subpopulações, inclusive para os EPTs (Tabela 5.8). O balanço com maior diferença foi o [As Cr | Ba Cd Pb], com contraste negativo (TP-TN), onde houve uma tendência de que a subpopulação TN apresentou maior concentração de As e Cr do que Ba, Cd e Pb, comparado a subpopulação TP. Em seguida, com contraste positivo, foi o balanço [N P K Ca Mg S B Cu Fe Mn Mo Zn | Al As Ba Cd Cr Pb], em que a subpopulação TP apresenta maior concentração de nutrientes em relação aos EPTs, comparado a subpopulação TN. Para os demais balanços, houve uma tendência de que a subpopulação TN apresentou maior concentração de valores de preenchimento (*Fv*) do que os elementos avaliados; N, P, K, Ca, Mg e S do que B; K do que Ca e Mg; N do que P; Cu, Fe, Mn e Zn do que Mo; Cu e Zn do que Fe e Mn; e As do que Cr, comparado a subpopulação TP, devido aos valores negativos dos contrastes. Ainda, com contrastes positivos, a subpopulação TP apresenta maior concentração de macronutrientes e B do que os micronutrientes; macronutrientes aniônicos do que os catiônicos; Fe do que Mn; e Al do que As, Ba, Cd, Cr e Pb, comparado a subpopulação TN.

5.4 Conclusão

O método CND-*ilr* demonstrou potencial para obtenção de padrões nutricionais. A subpopulação de alta produtividade e balanço nutricional apresentou, em sua maioria, populações com aplicação de lodo de esgoto a fornecer 100% da recomendação de N (*true negative* - TN), com acurácia de 58 e 61% para as avaliações sem e com a inclusão dos EPTs aos 76 meses após o plantio, respectivamente. A coordenada mais contrastante foi observada no balanço entre macro e micronutrientes, onde a população de referência apresentou maior concentração de micronutrientes em relação a subpopulação de baixa produtividade.

Referências

- ARAÚJO, G.C.L.; GONZALEZ, M.H.; FERREIRA, A.G.; NOGUEIRA, A.R.; NÓBREGA, J.A. Effect of acid concentration on closed-vessel microwave-assisted digestion of plant materials. **Spectrochimica Acta Part B**, v.57, p.2121-2132, 2002.
- ATHAMENH, B.; SALEM, N.; ET-ZURAIQI, S.; SULEIMAN, W.; RUSAN, M. Combined land application of treated wastewater and biosolids enhances crop production and soil fertility. **Desalination and Water Treatment**, v.53, p.3283–3294, 2015.
- BEVERLY, R. B.; HALLMALK, W. B. Prescient diagnostic analysis: a proposed new approach to evaluating plant nutrient diagnostic methods. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, v.23, p.2633-2640, 1992.

BOURIOUG, M.; ALAOUI-SOSSÉ, L.; LAFFRAY, X.; RAOUF, N.; BENBRAHIM, M.; BADOT, P.M.; ALAOUI-SOSSÉ, B. Evaluation of sewage sludge effects on soil properties, plant growth, mineral nutrition state, and heavy metal distribution in European Larch Seedlings (*Larix decidua*). **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.39, p.5325-5335, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução 375**. Brasília, DF, 2006. 31 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>. Acesso em: 22 jul. 2017.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106)

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Produção e Informação. 412p. 1999.

FERRAZ, A.D.V.; MOMENTEL, L.T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forest**, v.47, p.861–876, 2016.

GONÇALVES, J.L.M.; RAIJ, B.V.; GONÇALVES, J.C. Florestais in: RAIJ, B.V., CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas e Fundação IAC, (Boletim Técnico, 100), 285p, 1997.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 319p, 1997.

MENESES, N.B. **Diagnostico do estado nutricional do milho-doce**. 2017. 88 F. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, 2017.

NELSON, L.A.; ANDERSON, R.L. Partitioning of soil test-crop response probability. In: PECK, T.R.; COPE-JUNIOR, J.T.; WHITNEY, D.A. **Soil testing: correlating and interpreting the analytical results**. Madison: ASA; CSSA, 1997.

NOGUEIRA, T.A.R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU-JUNIOR, C.H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.168-177, 2013.

NOWAKI, R.H.D.; PARENT, S.É.; CECÍLIO FILHO, A.B.; ROZANE, D.E.; MENESES, N.B.; SILVA, J.A.S.; NATALE, W.; PARENT, L.E. Phosphorus Over-Fertilization and Nutrient Misbalance of Irrigated Tomato Crops in Brazil. **Frontiers in Plant Science**, v.8, 825, 2017.

PARENT, L.E.; DAFIR, M. A theoretical concept of Compositional Nutrient Diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, p.239-242, 1992.

PARENT, L.E. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, p.321-334, 2011.

PARENT, L.E., NATALE, W., ZIADI, N. Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. **Canadian Journal of Soil Science**, v.89, p. 383-390, 2009.

PARENT, L.E.; PARENT, S.E.; HÉRBET-GENTILE, V.; NAESS, K.; LAPOINTE, L. Mineral balance plasticity of cloudberry (*Rubus chamaemorus*) in Quebec-Labrador Bogs. **American Journal of Plant Sciences**, v.4, p.1508-1520, 2013a.

PARENT, S.E., PARENT, L.E., ROZANE, D. E., NATALE, W. Plant ionome diagnosis using sound balances: case study with mango (*Mangifera indica*). **Frontiers in Plant Science**, v.4, p.449, 2013b.

RAIJ, B. CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1997. 285p.

RStudio Team, 2016. **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, Inc., Boston, MA.

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; OTERO, X.L.; VAZQUEZ, F.M.; BOGIANI, J.C.; OLIVEIRA, F.C.; GAVA, J.L.; CIOL, M.A.; LITTKE, K.M.; HARRISON, R.B. The impact of biosolid application on soil and native plants in a degraded Brazilian Atlantic rainforest soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.227, 2016. DOI: 10.1007/s11270-015-2689-7.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber volume. **Journal of Agriculture Research**, v.47, p.719-734, 1933.

Systat Software. SigmaPlot. San Jose, California USA, 2020.

USEPA. **Method 3051A**: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. Revision 1. Washington, DC, 2007. 30 p.

WADT, P.G.S.; LEMOS, C.O. Medidas de acurácia para diagnósticos nutricionais e seu impacto no manejo das adubações. In: PRADO, R.M.; CECÍLIO FILHO, A.B.; CORREIA, M.A.R.; PUGA, A.P. **Nutrição de Plantas: Diagnose foliar em hortaliças**. Jaboticabal, FCAV/UNESP, p.213-236, 2010.

XUE, J.; KIMBERLEY, M.O.; ROSS, C.; GIELEN, G.; TREMBLAY, L.A.; CHAMPEAU, O.; HORSWELL, J.; WANG, H. Ecological impacts of long-term application of biosolids to a radiata pine plantation. **Science of the Total Environment**, v.530, p.233-240, 2015.

APÊNDICES

P/As	338	331	62	24	40	4,7	31	5,9	81	145	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns
P/Ba	0,141	0,035	0,085	0,023	0,186	0,032	0,077	0,021	0,123	0,057	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*	*
P/Cd	530	153	238	61	539	216	208	84	374	196	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*	*
P/Cr	10,863	4,307	6,466	1,183	6,547	0,455	4,250	0,692	6,593	2,457	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	*
P/Pb	18,037	6,089	8,473	0,978	16,453	2,755	10,539	2,381	12,518	4,788	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*
K/N	0,393	0,040	0,502	0,069	0,425	0,040	0,626	0,083	0,476	0,105	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
K/P	5,351	0,682	7,683	0,804	6,444	0,924	9,419	1,180	7,272	1,575	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
K/Ca	0,726	0,109	0,746	0,152	0,961	0,093	0,897	0,293	0,831	0,209	ns	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	ns
K/Mg	3,707	0,418	5,158	0,958	4,459	0,551	3,766	0,723	4,420	0,909	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
K/S	7,461	0,870	9,610	1,340	5,770	0,847	8,227	1,335	7,736	1,807	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
K/B	0,132	0,042	0,182	0,044	0,265	0,093	0,173	0,060	0,202	0,087	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	ns
K/Cu	2,659	0,348	3,594	0,593	2,069	0,297	1,877	0,325	2,659	0,834	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
K/Fe	0,075	0,028	0,041	0,006	0,063	0,007	0,071	0,019	0,057	0,021	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	*
K/Mn	0,033	0,009	0,036	0,008	0,040	0,006	0,032	0,012	0,037	0,011	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
K/Mo	121	51	188	94	630	392	145	55	304	281	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
K/Zn	0,509	0,052	0,763	0,143	0,556	0,043	0,583	0,129	0,618	0,131	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
K/Al	0,065	0,031	0,030	0,005	0,046	0,006	0,058	0,016	0,044	0,019	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
K/As	1890	1894	474	155	252	31	289	71	525	806	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns
K/Ba	0,747	0,162	0,664	0,217	1,189	0,208	0,726	0,208	0,862	0,368	ns	*	ns	ns	*	ns	*	*	*	ns
K/Cd	2813	807	1819	482	3432	1319	1990	1020	2558	1178	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	*	*
K/Cr	59	24	49	7,7	42	5,7	40	7,1	46	12	ns	*	*	*	*	*	ns	ns	ns	*
K/Pb	96	32	65	7,1	105	17	100	28	88	28	*	ns	ns	ns	*	*	*	ns	*	*
Ca/N	0,551	0,093	0,704	0,185	0,445	0,052	0,734	0,142	0,603	0,188	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*	*
Ca/P	7,450	1,092	10,616	1,831	6,752	1,099	11,082	2,265	9,127	2,467	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*	*
Ca/K	1,401	0,178	1,396	0,295	1,049	0,099	1,198	0,292	1,275	0,320	ns	*	*	ns	*	*	ns	*	*	ns
Ca/Mg	5,154	0,621	7,100	1,619	4,669	0,657	4,403	0,988	5,580	1,675	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Ca/S	10,446	1,777	13,510	3,797	6,042	0,965	9,626	1,983	10,003	3,896	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Ca/B	0,183	0,058	0,251	0,069	0,277	0,101	0,199	0,062	0,246	0,088	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*
Ca/Cu	3,719	0,648	5,048	1,475	2,175	0,393	2,220	0,584	3,479	1,645	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Ca/Fe	0,103	0,032	0,056	0,009	0,066	0,010	0,082	0,017	0,069	0,022	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Ca/Mn	0,046	0,011	0,048	0,003	0,043	0,008	0,037	0,012	0,045	0,012	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	ns	*
Ca/Mo	169	63	260	148	657	400	172	72	357	286	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Ca/Zn	0,711	0,100	1,074	0,337	0,582	0,055	0,671	0,116	0,792	0,290	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*
Ca/Al	0,087	0,035	0,041	0,007	0,049	0,009	0,067	0,014	0,053	0,022	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Ca/As	2567	2564	638	135	265	43	331	58	682	1102	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns

Ca/Ba	1,026	0,169	0,882	0,183	1,250	0,258	0,838	0,226	1,023	0,298	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*	*
Ca/Cd	3920	1307	2573	902	3538	1179	2163	451	3091	1146,224	*	ns	*	*	*	*	ns	*	ns	*
Ca/Cr	79,516	27,175	67,863	13,111	44,117	7,360	46,302	8,846	57,773	18,896	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
Ca/Pb	131	34	89	15	110	20	114	23	106	25	*	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns
Mg/N	0,107	0,014	0,100	0,017	0,096	0,011	0,170	0,026	0,112	0,034	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	*	*
Mg/P	1,447	0,134	1,527	0,261	1,450	0,166	2,565	0,441	1,702	0,508	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	*	*
Mg/K	0,273	0,028	0,200	0,039	0,227	0,027	0,277	0,065	0,236	0,051	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Mg/Ca	0,196	0,022	0,147	0,032	0,218	0,030	0,242	0,075	0,194	0,056	*	*	*	ns	*	*	*	ns	ns	*
Mg/S	2,024	0,250	1,906	0,335	1,296	0,136	2,217	0,289	1,789	0,421	ns	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
Mg/B	0,036	0,012	0,036	0,011	0,060	0,021	0,046	0,012	0,046	0,019	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Mg/Cu	0,719	0,077	0,708	0,106	0,469	0,079	0,518	0,144	0,607	0,162	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
Mg/Fe	0,020	0,007	0,008	0,002	0,014	0,002	0,019	0,005	0,014	0,006	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Mg/Mn	0,009	0,002	0,007	0,002	0,009	0,001	0,008	0,002	0,008	0,002	*	ns	ns	ns	*	*	*	ns	ns	ns
Mg/Mo	33,326	14,569	36,219	15,824	137,473	76,995	38,006	11,155	67,138	58,129	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*
Mg/Zn	0,138	0,011	0,149	0,021	0,126	0,013	0,156	0,026	0,142	0,023	ns	*	*	ns	*	ns	ns	*	*	*
Mg/Al	0,017	0,008	0,006	0,001	0,010	0,001	0,016	0,003	0,011	0,005	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Mg/As	497	492	93	26	57	6,6	78	17	126	212	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns
Mg/Ba	0,201	0,038	0,129	0,034	0,271	0,062	0,197	0,058	0,198	0,078	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Mg/Cd	760	212	367	115	775	312	533	259	592	268	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
Mg/Cr	15,615	5,973	9,687	1,236	9,473	1,033	10,773	1,885	10,599	3,103	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	ns
Mg/Pb	25,841	8,098	12,817	1,812	23,573	2,982	26,549	5,652	20,562	7,390	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns	*
S/N	0,053	0,002	0,052	0,003	0,074	0,006	0,077	0,006	0,063	0,012	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
S/P	0,720	0,076	0,811	0,116	1,119	0,055	1,158	0,128	0,966	0,199	*	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
S/K	0,136	0,017	0,106	0,017	0,177	0,026	0,125	0,021	0,137	0,033	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
S/Ca	0,099	0,019	0,080	0,025	0,170	0,028	0,109	0,027	0,115	0,042	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
S/Mg	0,501	0,060	0,543	0,118	0,779	0,078	0,458	0,059	0,592	0,147	ns	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
S/B	0,018	0,006	0,019	0,006	0,046	0,016	0,021	0,006	0,028	0,016	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*
S/Cu	0,358	0,036	0,375	0,043	0,361	0,047	0,232	0,046	0,347	0,078	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
S/Fe	0,010	0,004	0,004	0,001	0,011	0,001	0,009	0,002	0,008	0,003	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	ns
S/Mn	0,004	0,001	0,004	0,001	0,007	0,001	0,004	0,001	0,005	0,002	ns	*	ns	ns	*	ns	*	*	*	*
S/Mo	16,726	8,793	19,276	7,926	107,165	59,626	17,570	6,180	45,160	48,540	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*
S/Zn	0,069	0,008	0,079	0,008	0,098	0,011	0,071	0,010	0,082	0,014	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
S/Al	0,009	0,005	0,003	0,001	0,008	0,001	0,007	0,001	0,006	0,003	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	ns
S/As	252	247	52	27	44	5,7	35	6,1	69	106	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	ns
S/Ba	0,102	0,026	0,071	0,027	0,209	0,042	0,089	0,024	0,122	0,069	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*

S/Cd	386	136	190	43	601	240	239	96	364	222	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
S/Cr	7,989	3,818	5,269	1,509	7,323	0,584	4,867	0,630	6,165	1,994	*	ns	*	*	*	ns	ns	*	*	*
S/Pb	13,090	4,960	6,893	1,506	18,380	3,022	12,105	2,611	12,249	5,453	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
B/N	3,199	0,872	2,917	0,795	1,758	0,503	3,897	0,998	2,723	1,136	ns	*	*	ns	*	*	ns	*	*	*
B/P	43,892	13,216	44,464	11,433	26,566	7,710	58,772	14,977	41,256	16,348	ns	*	*	ns	*	*	ns	*	*	*
B/K	8,195	2,227	5,792	1,342	4,165	1,315	6,344	1,821	5,708	2,041	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	ns
B/Ca	5,883	1,505	4,280	1,205	3,987	1,220	5,452	1,529	4,545	1,460	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*
B/Mg	30,498	9,862	29,597	7,490	18,301	4,984	23,074	5,492	24,640	8,831	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
B/S	60,986	18,086	55,905	15,701	23,602	6,363	50,955	13,025	44,982	20,257	ns	*	*	*	*	ns	*	*	*	ns
B/Cu	21,646	6,680	20,805	5,739	8,595	2,854	11,634	3,190	15,412	7,722	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*
B/Fe	0,592	0,212	0,236	0,061	0,259	0,073	0,434	0,112	0,320	0,163	*	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*
B/Mn	0,268	0,099	0,205	0,051	0,167	0,052	0,190	0,059	0,198	0,070	*	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
B/Mo	977	430	1082	594	2444	1425	874	329	1453	1048	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*
B/Zn	4,152	1,208	4,421	1,294	2,302	0,669	3,552	0,842	3,508	1,390	ns	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
B/Al	0,502	0,219	0,172	0,045	0,192	0,065	0,351	0,087	0,248	0,149	*	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*
B/As	14287	13469	2721	956	1045	327	1746	351	3319	6034	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns
B/Ba	6,015	1,896	3,786	1,359	4,954	1,829	4,347	1,028	4,545	1,773	*	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
B/Cd	23322	10106	10711	4148	14258	7013	11988	4893	13878	6908	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B/Cr	480	228	285	74	174	51	246	61	263	133	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	ns
B/Pb	755	233	376	98	433	137	601	154	479	192	*	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*
Cu/N	0,149	0,016	0,141	0,015	0,207	0,020	0,341	0,065	0,198	0,085	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Cu/P	2,033	0,296	2,174	0,297	3,132	0,327	5,133	0,955	3,018	1,265	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Cu/K	0,382	0,049	0,285	0,045	0,493	0,070	0,548	0,092	0,413	0,125	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
Cu/Ca	0,277	0,051	0,214	0,065	0,475	0,092	0,482	0,132	0,350	0,150	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Cu/Mg	1,404	0,148	1,447	0,251	2,187	0,352	2,060	0,530	1,772	0,496	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
Cu/S	2,823	0,293	2,699	0,333	2,806	0,324	4,462	0,837	3,066	0,858	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
Cu/B	0,050	0,013	0,052	0,016	0,130	0,047	0,092	0,023	0,085	0,048	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Cu/Fe	0,029	0,011	0,012	0,003	0,031	0,004	0,038	0,009	0,025	0,013	*	ns	*	ns	*	*	*	*	*	*
Cu/Mn	0,012	0,002	0,010	0,003	0,020	0,003	0,017	0,006	0,015	0,006	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	ns
Cu/Mo	47,00	23,68	52,81	25,97	304,81	174,91	79,06	32,37	132,54	139,24	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Cu/Zn	0,192	0,010	0,212	0,020	0,272	0,034	0,314	0,065	0,245	0,058	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Cu/Al	0,025	0,012	0,009	0,003	0,023	0,003	0,031	0,008	0,019	0,011	*	ns	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Cu/As	693	661	137	63	123	17	155	32	198	284	*	*	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
Cu/Ba	0,282	0,058	0,187	0,062	0,575	0,055	0,385	0,077	0,359	0,179	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns
Cu/Cd	1073	344	517	149	1674	676	1063	450	1074	619	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns

Cu/Cr	22,310	10,299	14,039	3,378	20,485	2,444	21,622	4,085	18,411	5,942	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	*
Cu/Pb	36,416	12,727	18,460	3,637	51,384	9,607	53,950	14,851	37,767	19,096	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Fe/N	6,030	2,527	12,620	2,572	6,809	0,589	9,214	2,055	9,277	3,364	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
Fe/P	80,341	29,692	191,622	27,402	102,712	9,223	139,959	37,296	141,938	51,977	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Fe/K	15,266	6,010	25,040	3,592	16,121	1,825	15,113	4,682	19,860	7,248	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	*	*
Fe/Ca	10,759	3,582	18,304	2,577	15,508	2,347	12,849	3,135	15,608	4,134	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Fe/Mg	55,675	20,188	128,235	25,913	71,514	9,345	55,308	14,665	88,087	37,575	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Fe/S	114	49	242	52	92	10	121	29	157	76	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*
Fe/B	1,915	0,696	4,555	1,320	4,260	1,615	2,496	0,810	3,849	1,685	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	*
Fe/Cu	40,200	15,427	90,586	22,212	33,125	4,443	27,971	9,092	55,746	32,706	*	ns	*	ns	*	*	*	*	*	*
Fe/Mn	0,486	0,179	0,885	0,154	0,646	0,061	0,457	0,143	0,705	0,279	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Fe/Mo	1794	820	4641	2092	10114	6530	2182	999	5570	4532	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Fe/Zn	7,681	2,846	19,233	4,992	8,936	0,965	8,480	1,983	12,539	6,001	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	*	*
Fe/Al	0,831	0,105	0,729	0,027	0,737	0,083	0,825	0,136	0,760	0,100	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*
Fe/As	22539	18089	11495	2098	4032	396	4146	779	8984	8545	*	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*
Fe/Ba	10,960	3,905	16,248	4,520	19,048	3,269	10,508	2,985	15,812	5,783	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Fe/Cd	40999	15851	45873	13472	55745	23324	27929	10544	47205	18513	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
Fe/Cr	789	189	1219	150	670	39	575	85	877	302	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
Fe/Pb	1306	150	1605	159	1681	282	1421	289	1576	287	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*
Mn/N	12,502	3,286	14,646	4,016	10,629	1,431	22,526	10,415	14,468	7,068	ns	*	*	ns	*	*	ns	*	*	*
Mn/P	170	42	221	43	161	25	336	145	219	99	*	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*
Mn/K	31,926	7,661	29,087	6,590	25,106	3,214	37,056	19,041	30,139	11,401	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*
Mn/Ca	22,852	4,917	20,813	1,359	24,250	4,613	30,558	10,846	24,050	7,690	ns	ns	*	ns	*	*	ns	*	ns	*
Mn/Mg	116	22	148	35	111	17	130	46	129	39	*	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns
Mn/S	237	62	281	84	144	22	293	135	234	103	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*
Mn/B	4,094	1,168	5,186	1,319	6,609	2,341	5,731	1,640	5,655	1,930	*	*	*	*	*	ns	ns	ns	*	ns
Mn/Cu	83,303	16,860	105,110	32,063	51,605	7,905	68,533	36,115	78,874	33,964	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Mn/Fe	2,314	0,825	1,163	0,211	1,561	0,153	2,435	0,902	1,672	0,761	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Mn/Mo	4027	2239	5410	3156	15867	10794	5048	2348	8486	7893	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
Mn/Zn	15,974	2,921	22,346	7,273	13,937	1,992	20,052	7,434	18,218	6,452	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*	ns
Mn/Al	1,983	0,931	0,848	0,160	1,150	0,161	1,945	0,586	1,287	0,659	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Mn/As	53491	48514	13324	3126	6288	803	9837	3277	14964	21557	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns
Mn/Ba	22,918	3,888	18,373	4,031	29,653	5,312	24,510	8,435	24,019	8,709	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Mn/Cd	88620	32438	53882	19829	87888	41482	65887	26444	72949	32306	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	ns	ns
Mn/Cr	1831	850	1416	303	1046	137	1400	583	1342	503	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	ns

Mn/Pb	2956	969	1862	356	2626	518	3324	939	2527	932	*	ns	ns	ns	*	*	*	*	ns	*
Mo/N	0,0037	0,0013	0,0033	0,0016	0,0009	0,0004	0,0052	0,0027	0,0028	0,0021	ns	*	*	ns	*	*	ns	*	*	*
Mo/P	0,0504	0,0209	0,0494	0,0206	0,0132	0,0058	0,0772	0,0374	0,0427	0,0313	ns	*	*	ns	*	*	ns	*	*	*
Mo/K	0,0093	0,0030	0,0066	0,0033	0,0021	0,0010	0,0084	0,0045	0,0058	0,0039	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
Mo/Ca	0,0068	0,0031	0,0049	0,0024	0,0020	0,0009	0,0075	0,0049	0,0047	0,0035	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Mo/Mg	0,0351	0,0153	0,0329	0,0146	0,0090	0,0035	0,0299	0,0133	0,0241	0,0148	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	ns
Mo/S	0,0699	0,0256	0,0622	0,0298	0,0116	0,0048	0,0666	0,0310	0,0461	0,0317	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*
Mo/B	0,0012	0,0006	0,0012	0,0005	0,0005	0,0002	0,0014	0,0007	0,0010	0,0006	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*
Mo/Cu	0,0250	0,0098	0,0235	0,0115	0,0043	0,0021	0,0157	0,0091	0,0156	0,0111	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Mo/Fe	0,0007	0,0004	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0006	0,0004	0,0003	0,0003	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Mo/Mn	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	ns
Mo/Zn	0,0048	0,0019	0,0049	0,0024	0,0011	0,0005	0,0048	0,0026	0,0035	0,0024	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*
Mo/Al	0,0006	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000	0,0005	0,0003	0,0003	0,0003	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Mo/As	19,652	21,905	3,212	2,177	0,518	0,229	2,397	1,368	4,028	9,321	*	*	*	*	*	ns	ns	*	ns	ns
Mo/Ba	0,0071	0,0034	0,0042	0,0020	0,0025	0,0013	0,0062	0,0044	0,0045	0,0033	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
Mo/Cd	25,916	11,083	11,554	5,490	6,806	4,024	16,516	11,240	12,996	9,266	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	ns
Mo/Cr	0,535	0,294	0,322	0,160	0,086	0,036	0,332	0,184	0,269	0,209	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	ns
Mo/Pb	0,882	0,420	0,420	0,192	0,209	0,088	0,823	0,497	0,482	0,388	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Zn/N	0,775	0,089	0,666	0,068	0,765	0,045	1,103	0,178	0,789	0,195	*	ns	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Zn/P	10,554	1,325	10,341	1,818	11,575	1,252	16,639	2,819	12,053	2,957	ns	*	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Zn/K	1,982	0,204	1,354	0,252	1,809	0,148	1,797	0,397	1,685	0,338	*	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns
Zn/Ca	1,433	0,212	1,021	0,332	1,733	0,166	1,539	0,301	1,395	0,393	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Zn/Mg	7,292	0,572	6,846	1,215	8,028	0,858	6,570	1,109	7,240	1,156	ns	*	*	ns	*	ns	ns	*	*	*
Zn/S	14,703	1,645	12,752	1,419	10,356	1,102	14,416	2,213	12,606	2,171	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Zn/B	0,258	0,069	0,247	0,079	0,477	0,169	0,296	0,068	0,339	0,159	ns	*	ns	*	*	*	*	*	*	ns
Zn/Cu	5,210	0,263	4,749	0,423	3,720	0,429	3,322	0,729	4,283	0,879	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Zn/Fe	0,148	0,053	0,056	0,017	0,113	0,013	0,124	0,027	0,098	0,043	*	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	*
Zn/Mn	0,065	0,012	0,049	0,016	0,073	0,010	0,055	0,014	0,061	0,018	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*	ns
Zn/Mo	243	113	244	101	1125	680	253	90	519	520	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*
Zn/Al	0,127	0,060	0,041	0,014	0,083	0,013	0,100	0,018	0,076	0,039	*	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
Zn/As	3585	3411	656	325	455	58	501	87	900	1499	*	*	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns
Zn/Ba	1,460	0,255	0,900	0,330	2,137	0,321	1,253	0,262	1,446	0,621	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns
Zn/Cd	5530	1577	2441	677	6088	2074	3358	1130	4309	2106	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*
Zn/Cr	115	49	67	18	76	7,9	70	11	76	25	*	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
Zn/Pb	188	61	88	19	189	33	171	28	149	58	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	ns

Al/N	7,645	3,918	17,384	3,758	9,336	1,257	11,343	2,656	12,444	4,815	*	ns	*	*	*	*	*	*	ns
Al/P	102	48	264	42	141	21	171	44	191	74	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Al/K	19,265	9,309	34,413	5,177	22,013	2,504	18,589	5,839	26,724	10,542	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	*
Al/Ca	13,464	5,700	25,144	3,714	21,243	3,769	15,730	3,504	21,001	6,343	*	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Al/Mg	70,296	32,708	176,340	37,880	97,683	13,801	67,415	15,164	119,143	54,782	*	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Al/S	145	76	333	76	126	19	148	33	211	109	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*
Al/B	2,375	0,998	6,243	1,766	5,845	2,192	3,030	0,827	5,208	2,448	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns
Al/Cu	50,844	24,510	124,807	32,369	45,260	6,652	34,393	11,392	75,636	46,411	*	ns	*	*	*	*	*	*	*
Al/Fe	1,220	0,150	1,373	0,050	1,372	0,149	1,240	0,181	1,338	0,186	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns
Al/Mn	0,611	0,286	1,215	0,215	0,887	0,133	0,550	0,131	0,951	0,406	*	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Al/Mo	2236	1165	6386	2880	13422	7496	2645	1095	7478	5918	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Al/Zn	9,694	4,527	26,491	7,202	12,247	1,773	10,307	1,810	16,928	8,601	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
Al/As	27076	20752	15728	2481	5493	424	5052	678	11789	10154	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
Al/Ba	13,680	6,054	22,363	6,498	26,098	5,050	12,804	3,390	21,281	8,339	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	*
Al/Cd	51297	23755	63222	18845	76044	32078	33983	11132	63505	26290	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	ns
Al/Cr	973	310	1673	214	918	106	707	105	1183	456	*	ns	*	ns	*	*	*	*	*
Al/Pb	1602	334	2204	245	2276	238	1727	239	2093	384	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	*
As/N	0,0005	0,0004	0,0011	0,0003	0,0017	0,0002	0,0022	0,0005	0,0014	0,0006	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/P	0,0064	0,0046	0,0172	0,0034	0,0257	0,0032	0,0340	0,0074	0,0219	0,0095	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/K	0,0012	0,0009	0,0022	0,0005	0,0040	0,0004	0,0037	0,0009	0,0030	0,0011	*	*	*	*	*	*	*	ns	*
As/Ca	0,0009	0,0006	0,0016	0,0003	0,0039	0,0006	0,0031	0,0006	0,0025	0,0012	*	*	*	*	*	*	*	*	*
As/Mg	0,0045	0,0030	0,0114	0,0026	0,0178	0,0025	0,0134	0,0030	0,0130	0,0049	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns
As/S	0,0093	0,0069	0,0218	0,0058	0,0230	0,0032	0,0294	0,0059	0,0223	0,0076	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns
As/B	0,0002	0,0001	0,0004	0,0001	0,0011	0,0004	0,0006	0,0002	0,0006	0,0004	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/Cu	0,0032	0,0022	0,0081	0,0020	0,0083	0,0011	0,0068	0,0018	0,0074	0,0024	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns
As/Fe	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0003	0,0000	0,0002	0,0000	0,0002	0,0001	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*
As/Mn	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/Mo	0,169	0,157	0,426	0,236	2,492	1,530	0,521	0,206	1,035	1,160	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
As/Zn	0,0006	0,0004	0,0017	0,0005	0,0022	0,0003	0,0021	0,0004	0,0018	0,0006	*	*	*	*	*	*	ns	ns	*
As/Al	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0002	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001	ns	*	*	*	*	*	*	*	*
As/Ba	0,0009	0,0006	0,0014	0,0004	0,0047	0,0008	0,0026	0,0006	0,0026	0,0016	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/Cd	3,298	2,491	4,196	1,494	13,853	5,714	6,742	1,961	7,791	5,185	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/Cr	0,066	0,057	0,108	0,016	0,167	0,016	0,140	0,017	0,129	0,041	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
As/Pb	0,109	0,084	0,143	0,025	0,417	0,056	0,347	0,060	0,265	0,139	ns	*	*	*	*	*	*	*	*
Ba/N	0,554	0,153	0,839	0,306	0,364	0,049	0,921	0,256	0,663	0,347	*	*	*	ns	*	ns	*	*	*

Ba/P	7,504	1,974	12,505	3,295	5,496	0,739	13,861	3,776	9,934	4,534	*	*	*	*	*	ns	*	*	*	*
Ba/K	1,404	0,332	1,665	0,543	0,864	0,143	1,492	0,441	1,380	0,636	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns
Ba/Ca	0,998	0,158	1,182	0,253	0,831	0,165	1,280	0,350	1,064	0,332	*	*	*	ns	*	ns	ns	*	*	*
Ba/Mg	5,141	1,024	8,364	2,573	3,846	0,727	5,515	1,632	5,980	2,783	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Ba/S	10,488	2,787	16,131	6,174	4,932	0,760	12,072	3,414	11,055	6,438	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Ba/B	0,180	0,053	0,298	0,110	0,228	0,084	0,241	0,052	0,255	0,111	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns
Ba/Cu	3,688	0,772	5,924	2,014	1,754	0,168	2,714	0,631	3,755	2,359	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
Ba/Fe	0,101	0,033	0,066	0,020	0,054	0,009	0,102	0,026	0,073	0,030	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Ba/Mn	0,045	0,007	0,057	0,014	0,035	0,006	0,045	0,014	0,047	0,017	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Ba/Mo	170	72	316	233	551	358	216	98	355	276	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
Ba/Zn	0,706	0,132	1,275	0,508	0,477	0,068	0,836	0,194	0,861	0,482	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	ns
Ba/Al	0,086	0,033	0,049	0,015	0,040	0,008	0,082	0,018	0,056	0,026	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Ba/As	2479	2373	747	192	216	36	413	94	709	1046	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	ns
Ba/Cd	3896	1543	3093	1418	2911	1103	2814	1165	3175	1296	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ba/Cr	79,116	28,882	80,273	23,253	35,951	5,466	58,054	14,888	61,926	29,427	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Ba/Pb	129	32	106	31	90	19	143	39	111	38	*	*	ns	ns	ns	*	ns	*	*	*
Cd/N	0,0002	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0004	0,0001	0,0002	0,0001	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*	*
Cd/P	0,0020	0,0006	0,0045	0,0015	0,0021	0,0008	0,0054	0,0016	0,0035	0,0017	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*	*
Cd/K	0,0004	0,0001	0,0006	0,0002	0,0003	0,0001	0,0006	0,0002	0,0005	0,0002	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	*	*
Cd/Ca	0,0003	0,0001	0,0005	0,0002	0,0003	0,0001	0,0005	0,0001	0,0004	0,0002	*	ns	*	*	*	ns	*	*	ns	*
Cd/Mg	0,0014	0,0004	0,0031	0,0015	0,0015	0,0005	0,0021	0,0007	0,0020	0,0010	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
Cd/S	0,0029	0,0010	0,0056	0,0017	0,0019	0,0007	0,0047	0,0014	0,0037	0,0019	*	*	*	ns	*	*	*	*	*	*
Cd/B	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cd/Cu	0,0010	0,0003	0,0021	0,0008	0,0007	0,0002	0,0011	0,0004	0,0013	0,0007	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Cd/Fe	0,00003	0,00001	0,00002	0,00001	0,00002	0,00001	0,00004	0,00001	0,00003	0,00001	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
Cd/Mn	0,00001	0,00000	0,00002	0,00001	0,00001	0,00001	0,00002	0,00001	0,00002	0,00001	*	ns	*	*	*	ns	*	ns	ns	ns
Cd/Mo	0,046	0,019	0,108	0,058	0,192	0,093	0,084	0,041	0,116	0,075	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	*
Cd/Zn	0,0002	0,0001	0,0005	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
Cd/Al	0,00002	0,00001	0,00002	0,00001	0,00002	0,00001	0,00003	0,00001	0,00002	0,00001	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
Cd/As	0,655	0,636	0,303	0,229	0,085	0,035	0,159	0,040	0,228	0,287	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	ns
Cd/Ba	0,0003	0,0001	0,0004	0,0002	0,0004	0,0001	0,0004	0,0001	0,0004	0,0002	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cd/Cr	0,021	0,007	0,030	0,015	0,014	0,005	0,022	0,006	0,021	0,010	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Cd/Pb	0,035	0,011	0,039	0,016	0,035	0,014	0,055	0,015	0,038	0,015	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
Cr/N	0,008	0,003	0,010	0,002	0,010	0,001	0,016	0,002	0,011	0,003	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	*
Cr/P	0,105	0,038	0,158	0,023	0,153	0,010	0,242	0,046	0,167	0,052	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	*

Cr/K	0,020	0,009	0,021	0,003	0,024	0,003	0,026	0,006	0,023	0,006	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	ns	*
Cr/Ca	0,014	0,005	0,015	0,003	0,023	0,004	0,022	0,005	0,019	0,006	ns	*	*	*	*	*	*	ns	*	*
Cr/Mg	0,073	0,026	0,105	0,013	0,107	0,012	0,096	0,017	0,100	0,021	*	*	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
Cr/S	0,149	0,060	0,199	0,037	0,137	0,011	0,209	0,029	0,176	0,046	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*	*
Cr/B	0,003	0,001	0,004	0,001	0,006	0,002	0,004	0,001	0,005	0,002	*	*	*	*	*	ns	ns	*	*	ns
Cr/Cu	0,053	0,020	0,074	0,013	0,049	0,006	0,048	0,013	0,060	0,019	*	ns	ns	ns	*	*	*	ns	*	*
Cr/Fe	0,0013	0,0003	0,0008	0,0001	0,0015	0,0001	0,0018	0,0002	0,0013	0,0004	*	ns	*	ns	*	*	*	*	*	*
Cr/Mn	0,0006	0,0003	0,0007	0,0002	0,0010	0,0001	0,0008	0,0002	0,0008	0,0002	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	ns
Cr/Mo	2,324	1,022	3,812	1,736	14,923	9,144	3,721	1,454	7,033	6,816	*	*	*	*	*	ns	*	*	*	*
Cr/Zn	0,010	0,004	0,016	0,003	0,013	0,001	0,015	0,003	0,014	0,003	*	*	*	*	*	ns	*	*	ns	ns
Cr/Al	0,0011	0,0003	0,0006	0,0001	0,0011	0,0001	0,0014	0,0002	0,0010	0,0004	*	ns	*	ns	*	*	*	*	ns	*
Cr/As	32,270	32,633	9,486	1,640	6,031	0,580	7,214	0,841	10,596	13,470	*	*	*	*	*	*	ns	*	ns	ns
Cr/Ba	0,015	0,006	0,013	0,004	0,028	0,005	0,018	0,005	0,020	0,008	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
Cr/Cd	53,904	24,719	38,192	11,842	82,353	32,079	48,791	16,938	57,813	27,242	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Cr/Pb	1,741	0,461	1,325	0,114	2,513	0,398	2,488	0,462	1,982	0,669	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Pb/N	0,0045	0,0015	0,0078	0,0013	0,0041	0,0007	0,0066	0,0016	0,0060	0,0021	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
Pb/P	0,061	0,018	0,119	0,012	0,063	0,011	0,100	0,026	0,091	0,031	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns
Pb/K	0,011	0,004	0,016	0,002	0,010	0,001	0,011	0,003	0,013	0,004	*	ns	ns	ns	*	*	*	ns	*	*
Pb/Ca	0,008	0,002	0,011	0,002	0,009	0,002	0,009	0,002	0,010	0,002	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns
Pb/Mg	0,042	0,012	0,080	0,012	0,043	0,006	0,039	0,008	0,056	0,022	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	*	*
Pb/S	0,086	0,029	0,150	0,026	0,056	0,010	0,087	0,021	0,100	0,045	*	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
Pb/B	0,0015	0,0005	0,0028	0,0008	0,0026	0,0010	0,0018	0,0004	0,0024	0,0010	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	*
Pb/Cu	0,030	0,009	0,056	0,011	0,020	0,004	0,020	0,007	0,035	0,019	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Pb/Fe	0,0008	0,0001	0,0006	0,0001	0,0006	0,0001	0,0007	0,0001	0,0007	0,0001	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*
Pb/Mn	0,0004	0,0001	0,0006	0,0001	0,0004	0,0001	0,0003	0,0001	0,0004	0,0002	*	ns	ns	*	*	*	*	*	ns	*
Pb/Mo	1,348	0,534	2,866	1,274	5,776	2,790	1,522	0,567	3,350	2,311	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
Pb/Zn	0,0058	0,0017	0,0119	0,0024	0,0054	0,0009	0,0060	0,0010	0,0079	0,0034	*	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*
Pb/Al	0,0006	0,0001	0,0005	0,0001	0,0004	0,0000	0,0006	0,0001	0,0005	0,0001	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	*
Pb/As	18,451	15,974	7,243	1,687	2,437	0,307	2,972	0,539	6,133	7,251	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
Pb/Ba	0,0082	0,0023	0,0102	0,0027	0,0116	0,0028	0,0076	0,0022	0,0100	0,0032	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	*	*
Pb/Cd	31,351	11,557	28,385	7,345	33,337	14,032	19,898	6,648	29,872	10,553	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
Pb/Cr	0,608	0,143	0,760	0,068	0,407	0,066	0,415	0,077	0,566	0,190	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*

ns – Não significativo pelo teste t-pareado ($p>0,05$); * – Significativo pelo teste t-pareado ($p<0,05$).

Apêndice B. Relação nutriente e índice DRIS de cada nutriente com a adição de elementos potencialmente tóxicos de plantio comercial de *Eucalyptus urograndis* em diferentes idades após aplicação de lodo de esgoto classe B

22 meses		44 meses		54 meses		76 meses	
Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²
$N = 20,269 + 1,952 * N$	0,69	$N = 19,895 + 2,139 * N$	0,81	$N = 20,934 + 0,765 * N$	0,49	$N = 14,301 + 0,832 * N$	0,40
$P = 1,459 + 0,0778 * P$	0,40	$P = 1,290 + 0,115 * P$	0,53	$P = 1,378 + 0,0823 * P$	0,51	$P = 0,949 + 0,105 * P$	0,52
$K = 7,910 + 0,678 * K$	0,62	$K = 9,803 + 0,865 * K$	0,74	$K = 8,838 + 0,735 * K$	0,86	$K = 8,946 + 0,668 * K$	0,58
$Ca = 10,971 + 5,697 * Ca$	0,57	$Ca = 13,661 + 9,171 * Ca$	0,75	$Ca = 9,249 + 3,456 * Ca$	0,83	$Ca = 10,199 + 7,154 * Ca$	0,68
$Mg = 2,133 + 1,047 * Mg$	0,59	$Mg = 1,958 + 0,891 * Mg$	0,74	$Mg = 1,991 + 0,707 * Mg$	0,75	$Mg = 2,374 + 1,256 * Mg$	0,66
$S = 1,062 + 0,560 * S$	0,74	$S = 1,048 + 0,563 * S$	0,77	$S = 1,543 + 0,420 * S$	0,64	$S = 1,079 + 0,277 * S$	0,28
$B = 65,803 + 8,967 * B$	0,86	$B = 57,469 + 5,919 * B$	0,86	$B = 36,515 + 3,835 * B$	0,90	$B = 54,540 + 4,913 * B$	0,77
$Cu = 3,035 + 0,167 * Cu$	0,72	$Cu = 2,786 + 0,248 * Cu$	0,76	$Cu = 4,329 + 0,278 * Cu$	0,79	$Cu = 4,709 + 0,327 * Cu$	0,62
$Fe = 119,164 + 37,433 * Fe$	0,88	$Fe = 249,088 + 24,407 * Fe$	0,60	$Fe = 141,752 + 14,472 * Fe$	0,81	$Fe = 129,926 + 25,766 * Fe$	0,65
$Mn = 255,506 + 44,015 * Mn$	0,81	$Mn = 289,153 + 49,326 * Mn$	0,91	$Mn = 222,635 + 25,205 * Mn$	0,92	$Mn = 305,628 + 89,374 * Mn$	0,82
$Mo = 0,0781 + 0,0142 * Mo$	0,74	$Mo = 0,0625 + 0,0154 * Mo$	0,78	$Mo = 0,0176 + 0,00571 * Mo$	0,91	$Mo = 0,0690 + 0,0234 * Mo$	0,87
$Zn = 15,742 + 0,971 * Zn$	0,48	$Zn = 13,216 + 1,149 * Zn$	0,78	$Zn = 15,924 + 0,762 * Zn$	0,63	$Zn = 15,475 + 1,213 * Zn$	0,50
$Al = 147,503 + 37,203 * Al$	0,92	$Al = 335,753 + 40,833 * Al$	0,63	$Al = 192,932 + 22,202 * Al$	0,86	$Al = 159,238 + 23,604 * Al$	0,72
$As = 0,00930 + 0,00292 * As$	0,85	$As = 0,0220 + 0,00300 * As$	0,85	$As = 0,0352 + 0,00304 * As$	0,70	$As = 0,0318 + 0,00432 * As$	0,71
$Ba = 11,234 + 1,632 * Ba$	0,79	$Ba = 16,441 + 2,553 * Ba$	0,90	$Ba = 7,632 + 0,743 * Ba$	0,92	$Ba = 12,937 + 1,396 * Ba$	0,81
$Cd = 0,00302 + 0,000675 * Cd$	0,86	$Cd = 0,00586 + 0,00106 * Cd$	0,91	$Cd = 0,00287 + 0,000654 * Cd$	0,94	$Cd = 0,00484 + 0,000644 * Cd$	0,91
$Cr = 0,155 + 0,0346 * Cr$	0,93	$Cr = 0,203 + 0,0229 * Cr$	0,74	$Cr = 0,212 + 0,0156 * Cr$	0,84	$Cr = 0,225 + 0,0263 * Cr$	0,70
$Pb = 0,0889 + 0,0176 * Pb$	0,83	$Pb = 0,154 + 0,0179 * Pb$	0,72	$Pb = 0,0861 + 0,00964 * Pb$	0,69	$Pb = 0,0915 + 0,0137 * Pb$	0,82

N – Nutriente; IN – Índice de nutriente; * – Significativo pelo teste t (p<0,05).

Apêndice C. Relação nutriente e índice DRIS de cada nutriente sem a adição de elementos potencialmente tóxicos de plantio comercial de *Eucalyptus urograndis* em diferentes idades após aplicação de lodo de esgoto classe B

22 meses		44 meses		54 meses		76 meses	
Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²
$N = 20,081 + 2,045 * N$	0,62	$N = 19,807 + 2,178 * N$	0,79	$N = 20,956 + 0,766 * N$	0,47	$N = 14,285 + 0,964 * N$	0,46
$P = 1,446 + 0,0569 * P$	0,29	$P = 1,288 + 0,118 * P$	0,66	$P = 1,382 + 0,0810 * P$	0,58	$P = 0,936 + 0,112 * P$	0,67
$K = 7,806 + 0,652 * K$	0,54	$K = 9,877 + 0,935 * K$	0,83	$K = 8,875 + 0,730 * K$	0,88	$K = 8,932 + 0,724 * K$	0,61
$Ca = 10,849 + 4,203 * Ca$	0,57	$Ca = 13,620 + 8,542 * Ca$	0,78	$Ca = 9,282 + 3,365 * Ca$	0,83	$Ca = 10,246 + 7,484 * Ca$	0,80
$Mg = 2,112 + 0,860 * Mg$	0,53	$Mg = 1,952 + 1,019 * Mg$	0,80	$Mg = 2,005 + 0,703 * Mg$	0,80	$Mg = 2,421 + 1,399 * Mg$	0,77
$S = 1,051 + 0,514 * S$	0,72	$S = 1,044 + 0,553 * S$	0,76	$S = 1,551 + 0,416 * S$	0,71	$S = 1,083 + 0,364 * S$	0,38
$B = 63,678 + 8,091 * B$	0,90	$B = 57,353 + 5,739 * B$	0,88	$B = 36,785 + 3,747 * B$	0,89	$B = 54,777 + 5,766 * B$	0,84
$Cu = 2,987 + 0,178 * Cu$	0,73	$Cu = 2,794 + 0,227 * Cu$	0,75	$Cu = 4,334 + 0,242 * Cu$	0,80	$Cu = 4,727 + 0,323 * Cu$	0,71
$Fe = 115,671 + 31,131 * Fe$	0,93	$Fe = 247,730 + 28,711 * Fe$	0,77	$Fe = 142,205 + 12,973 * Fe$	0,83	$Fe = 129,127 + 25,771 * Fe$	0,78
$Mn = 249,789 + 39,525 * Mn$	0,84	$Mn = 288,092 + 44,075 * Mn$	0,92	$Mn = 223,560 + 25,164 * Mn$	0,93	$Mn = 305,049 + 89,398 * Mn$	0,84
$Mo = 0,0763 + 0,0122 * Mo$	0,68	$Mo = 0,0630 + 0,0162 * Mo$	0,81	$Mo = 0,0177 + 0,00550 * Mo$	0,90	$Mo = 0,0690 + 0,0257 * Mo$	0,92
$Zn = 15,386 + 1,235 * Zn$	0,53	$Zn = 13,217 + 1,290 * Zn$	0,81	$Zn = 15,968 + 0,697 * Zn$	0,65	$Zn = 15,490 + 1,560 * Zn$	0,72

N – Nutriente; IN – Índice de nutriente; * – Significativo pelo teste t (p<0,05).

Apêndice D. Relação nutriente e índice CND-*clr* de cada nutriente com a adição de elementos potencialmente tóxicos de plantio comercial de *Eucalyptus urograndis* em diferentes idades após aplicação de lodo de esgoto classe B

22 meses		44 meses		54 meses		76 meses	
Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²
$N = 20,367 + 2,350 * N$	0,70	$N = 19,976 + 2,358 * N$	0,81	$N = 20,931 + 0,595 * N$	0,49	$N = 14,260 + 0,861 * N$	0,39
$P = 1,462 + 0,0702 * P$	0,37	$P = 1,290 + 0,0720 * P$	0,49	$P = 1,378 + 0,0780 * P$	0,49	$P = 0,954 + 0,0975 * P$	0,45
$K = 7,975 + 0,728 * K$	0,60	$K = 9,750 + 0,773 * K$	0,72	$K = 8,825 + 0,802 * K$	0,81	$K = 8,914 + 0,844 * K$	0,58
$Ca = 11,085 + 0,894 * Ca$	0,37	$Ca = 13,616 + 2,428 * Ca$	0,86	$Ca = 9,234 + 1,006 * Ca$	0,78	$Ca = 10,221 + 1,784 * Ca$	0,74
$Mg = 2,163 + 0,155 * Mg$	0,46	$Mg = 1,948 + 0,197 * Mg$	0,73	$Mg = 1,985 + 0,167 * Mg$	0,68	$Mg = 2,354 + 0,258 * Mg$	0,63
$S = 1,082 + 0,126 * S$	0,72	$S = 1,043 + 0,132 * S$	0,82	$S = 1,535 + 0,0943 * S$	0,53	$S = 1,074 + 0,0538 * S$	0,25
$B = 66,564 + 19,007 * B$	0,84	$B = 56,973 + 12,575 * B$	0,91	$B = 36,100 + 9,390 * B$	0,94	$B = 54,186 + 10,213 * B$	0,83
$Cu = 3,057 + 0,332 * Cu$	0,74	$Cu = 2,772 + 0,390 * Cu$	0,72	$Cu = 4,303 + 0,423 * Cu$	0,80	$Cu = 4,678 + 0,642 * Cu$	0,67
$Fe = 119,714 + 37,365 * Fe$	0,90	$Fe = 245,493 + 29,777 * Fe$	0,77	$Fe = 141,293 + 12,715 * Fe$	0,77	$Fe = 129,120 + 25,992 * Fe$	0,74
$Mn = 257,429 + 45,800 * Mn$	0,82	$Mn = 286,838 + 53,231 * Mn$	0,92	$Mn = 222,594 + 29,512 * Mn$	0,92	$Mn = 304,815 + 111,454 * Mn$	0,86
$Mo = 0,0788 + 0,0293 * Mo$	0,88	$Mo = 0,0629 + 0,0252 * Mo$	0,91	$Mo = 0,0178 + 0,00856 * Mo$	0,93	$Mo = 0,0697 + 0,0330 * Mo$	0,89
$Zn = 15,845 + 1,234 * Zn$	0,42	$Zn = 13,176 + 1,914 * Zn$	0,76	$Zn = 15,932 + 0,714 * Zn$	0,59	$Zn = 15,343 + 1,561 * Zn$	0,58
$Al = 149,225 + 65,747 * Al$	0,91	$Al = 335,087 + 54,487 * Al$	0,77	$Al = 192,761 + 23,670 * Al$	0,80	$Al = 158,517 + 30,476 * Al$	0,82
$As = 0,00876 + 0,00844 * As$	0,80	$As = 0,0220 + 0,00551 * As$	0,89	$As = 0,0351 + 0,00318 * As$	0,67	$As = 0,0316 + 0,00462 * As$	0,79
$Ba = 11,370 + 2,074 * Ba$	0,77	$Ba = 16,534 + 4,960 * Ba$	0,93	$Ba = 7,622 + 1,188 * Ba$	0,91	$Ba = 12,929 + 2,539 * Ba$	0,87
$Cd = 0,00307 + 0,000989 * Cd$	0,86	$Cd = 0,00587 + 0,00195 * Cd$	0,95	$Cd = 0,00291 + 0,00108 * Cd$	0,92	$Cd = 0,00509 + 0,00194 * Cd$	0,80
$Cr = 0,163 + 0,0622 * Cr$	0,89	$Cr = 0,202 + 0,0258 * Cr$	0,80	$Cr = 0,211 + 0,0159 * Cr$	0,78	$Cr = 0,224 + 0,0286 * Cr$	0,73
$Pb = 0,0901 + 0,0232 * Pb$	0,86	$Pb = 0,153 + 0,0128 * Pb$	0,76	$Pb = 0,0857 + 0,0112 * Pb$	0,86	$Pb = 0,0915 + 0,0217 * Pb$	0,87

N – Nutriente; IN – Índice de nutriente; * – Significativo pelo teste t (p<0,05).

Apêndice E. Relação nutriente e índice CND-*clr* de cada nutriente sem a adição de elementos potencialmente tóxicos de plantio comercial de *Eucalyptus urograndis* em diferentes idades após aplicação de lodo de esgoto classe B

22 meses		44 meses		54 meses		76 meses	
Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²	Relação N x IN	R ²
$N = 20,086 + 2,200 * N$	0,70	$N = 19,844 + 2,333 * N$	0,81	$N = 20,992 + 0,621 * N$	0,47	$N = 14,214 + 0,967 * N$	0,45
$P = 1,451 + 0,0773 * P$	0,44	$P = 1,289 + 0,0850 * P$	0,62	$P = 1,383 + 0,0754 * P$	0,51	$P = 0,939 + 0,100 * P$	0,61
$K = 7,841 + 0,626 * K$	0,62	$K = 9,809 + 0,947 * K$	0,78	$K = 8,872 + 0,855 * K$	0,79	$K = 8,881 + 0,896 * K$	0,62
$Ca = 10,895 + 1,109 * Ca$	0,61	$Ca = 13,653 + 2,452 * Ca$	0,89	$Ca = 9,274 + 1,089 * Ca$	0,75	$Ca = 10,288 + 1,901 * Ca$	0,80
$Mg = 2,128 + 0,193 * Mg$	0,58	$Mg = 1,943 + 0,226 * Mg$	0,76	$Mg = 1,998 + 0,161 * Mg$	0,65	$Mg = 2,395 + 0,274 * Mg$	0,75
$S = 1,061 + 0,122 * S$	0,74	$S = 1,037 + 0,137 * S$	0,82	$S = 1,543 + 0,0839 * S$	0,50	$S = 1,073 + 0,0663 * S$	0,32
$B = 63,947 + 17,967 * B$	0,89	$B = 57,041 + 12,571 * B$	0,93	$B = 36,376 + 9,188 * B$	0,94	$B = 54,506 + 11,144 * B$	0,89
$Cu = 2,996 + 0,306 * Cu$	0,81	$Cu = 2,774 + 0,381 * Cu$	0,77	$Cu = 4,323 + 0,426 * Cu$	0,81	$Cu = 4,693 + 0,643 * Cu$	0,76
$Fe = 116,748 + 39,915 * Fe$	0,94	$Fe = 245,974 + 32,402 * Fe$	0,83	$Fe = 142,098 + 11,800 * Fe$	0,78	$Fe = 128,673 + 26,331 * Fe$	0,80
$Mn = 249,384 + 49,213 * Mn$	0,90	$Mn = 286,558 + 52,317 * Mn$	0,92	$Mn = 224,016 + 29,847 * Mn$	0,93	$Mn = 305,474 + 114,538 * Mn$	0,88
$Mo = 0,0764 + 0,0279 * Mo$	0,88	$Mo = 0,0633 + 0,0259 * Mo$	0,92	$Mo = 0,0179 + 0,00861 * Mo$	0,93	$Mo = 0,0701 + 0,0336 * Mo$	0,91
$Zn = 15,462 + 1,382 * Zn$	0,61	$Zn = 13,141 + 2,031 * Zn$	0,80	$Zn = 16,005 + 0,775 * Zn$	0,61	$Zn = 15,372 + 1,945 * Zn$	0,73

N – Nutriente; IN – Índice de nutriente; * – Significativo pelo teste t ($p < 0,05$).