

**Identificação de áreas para disposição de biosólidos com potencial para recuperação de áreas degradadas: estudo de caso de Juiz de Fora-MG**

*Identification of areas for disposal of biosolids with potential for recovery of degraded areas: a case study of Juiz de Fora-MG*

*Identificação de áreas para disposición de biosólidos con potencial de recuperación de áreas degradadas: un estudio de caso de Juiz de Fora-MG*

**Vanessa Romário de Paula**

Mestre em Ambiente Construído, PROAC/UFJF, Brasil  
vanessa.paula@engenharia.ufjf.br

**Larissa Serbeto**

Engenheira Ambiental e Sanitarista/UFJF  
serbeto.larissa@engenharia.ufjf.br

**Fábio Jacob da Silveira**

Mestre em Geografia/UFJF  
fjsilveira14@gmail.com

**Cézar Henrique Barra Rocha**

Professor Doutor, PROAC/UFJF, Brasil  
cezar.rocha@ufjf.edu.br

**Jonathas Batista Gonçalves Silva**

Professor Doutor, PROAC/UFJF, Brasil  
jonathas.silva@ufjf.edu.br

## RESUMO

A expansão da implantação de sistemas de tratamento de esgoto urbano tem resultado no aumento da geração de biossólidos. O tratamento e a disposição do biossólido é uma etapa crítica no processo operacional de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) e sua destinação apresenta desafios para a gestão de resíduos. Entretanto, o seu aproveitamento como condicionante do solo pode ser uma alternativa sustentável, promovendo o aporte de nutrientes para recuperação de áreas degradadas. No Brasil, cerca de 28% de suas terras têm algum grau de degradação e necessitam de intervenção para recuperação. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial uso do biossólido gerado nas ETEs de Juiz Fora-MG, para recuperação de áreas degradadas no município. Foi realizada a identificação das áreas degradadas e a caracterização do biossólido para estimar o aporte de nutrientes a ser aplicado nessas áreas. Concomitante foram utilizados recursos de geoprocessamento para considerar distâncias seguras da aplicação em relação aos recursos hídricos e áreas residenciais, distâncias entre os locais de aplicação e as ETEs e a sustentabilidade econômica. A avaliação da viabilidade econômica baseou-se na distância entre a ETE de origem do biossólido e a área identificada com potencial para recuperação. Os resultados indicaram a viabilidade econômica da aplicação dos biossólidos em pastagens degradadas localizadas num raio de 50 km das ETEs, refletindo na redução dos custos de recuperação dos solos e no impacto da destinação para os aterros sanitários.

**Palavras-Chave:** Aporte de nutrientes. Impacto ambiental. Resíduos sólidos. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

*The expansion of urban sewage treatment has resulted in an increase in the generation of biosolids. The treatment and disposal of biosolids is a critical step in the operational process of a treatment wastewater and its disposal represents a challenge for wastewater management. However, its use as a soil conditioner able to be a sustainable alternative, promoting the supply of nutrients for the recovery of degraded areas. In Brazil, about 28% of soils are degraded and recovery to need intervention. In this context, the aim of this study was to evaluate the potential use of biosolids generated in wastewater systems, in the municipality of Juiz Fora-MG, for the recovery of degraded areas. The identification of degraded areas and the characterization of the biosolids were to estimate the input of nutrients to apply in these areas. Concomitantly, georeferencing resources were used to consider safe application distances of the water resources and urban areas and economic sustainability. The economic assessment feasibility was based on the distance between the ETE that generates the biosolids and the area identified as potentially benefiting. The results indicated the economic viability of the application of biosolids for the recovery of degraded pastures located within a lighthouse around of 50 km of the wastewater systems. Alternatives for the use of biosolids are promising for achieving sustainable sewage treatment management.*

**Keywords:** Environmental impact. Nutrient input. Solid waste. Sustainability.

## RESUMEN

*La expansión del tratamiento de aguas residuales urbanas ha resultado en un aumento en la generación de biosólidos. El tratamiento y disposición de biosólidos es un paso crítico en el proceso operativo de una Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETE) y su destino presenta desafíos para la gestión de residuos. Sin embargo, su uso como acondicionador de suelos puede ser una alternativa sustentable, favoreciendo el aporte de nutrientes para la recuperación de áreas degradadas. En Brasil, cerca del 28% de sus tierras tienen algún grado de degradación y necesitan intervención para su recuperación. En ese contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el uso potencial del biosólido generado en las ETE, en el municipio de Juiz Fora-MG, para la recuperación de áreas degradadas. Se realizó la identificación de áreas degradadas y la caracterización del biosólido para estimar el aporte de nutrientes a aplicar en estas áreas. Al mismo tiempo, se utilizaron recursos de geoprocésamiento para considerar las distancias seguras de la aplicación en relación con los recursos hídricos y las áreas residenciales, las distancias entre los sitios de aplicación y las ETE y la sostenibilidad económica. La evaluación de la viabilidad económica se basó en la distancia entre la ETE generadora del biosólido y el área identificada como potencial beneficiaria. Los resultados indicaron la viabilidad económica de la aplicación de biosólidos para la recuperación de pastos degradados ubicados en un radio de 50 km de las ETE, reflejándose en la reducción de costos de recuperación de suelos y en el impacto del destino a rellenos sanitarios.*

**Palabras clave:** Aporte de nutrientes. Impacto Medioambiental. Residuo sólido. Sustentabilidad.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a expansão dos centros urbanos têm resultado na geração de grandes quantidades de resíduos, como o lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) (SHAHEEN *et al.*, 2014). Estudos apontam que nas ETEs, a geração média per capita é de 52 kg ano<sup>-1</sup> de lodo (LEBLANC, MATTHEWS, RICHARD, 2008). No Brasil, cerca de 39,7% dos municípios brasileiros não têm serviço de esgotamento sanitário, todavia em Minas Gerais (MG) o cenário é mais positivo, sendo feita a coleta de 93,7% do volume de esgoto gerado e desse total, 60,1% recebem tratamento em ETE (IBGE, 2020). No entanto, no município de Juiz de Fora, em MG, o índice de atendimento urbano em coleta é de 94% e somente cerca de 10% é tratado nas ETEs (CESAMA, 2020).

No processo de tratamento de esgoto realizado nas ETEs é gerado um resíduo rico em nutrientes, denominado lodo (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013). A disposição final adequada para o lodo é uma etapa crítica no sistema operacional de uma ETE. Uma alternativa ambientalmente sustentável para a destinação do lodo é a aplicação no solo, promovendo a reciclagem dos nutrientes (SHARMA *et al.*, 2017). O aproveitamento de resíduos é uma das premissas estabelecidas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Para viabilizar a disposição ou aproveitamento do lodo de ETE, são utilizadas técnicas de tratamento e estabilização que reduzem a umidade, resultando em um biossólido (COIMBRA; ACHON, 2016). Atualmente no Brasil, a destinação mais comum para o biossólido é o aterro sanitário (URBAN; ISAAC; MORITA, 2019). No entanto, as características físicas e químicas do biossólido podem causar problemas estruturais nos aterros sanitários (URBAN; ISAAC; MORITA, 2019), além de reduzir a vida útil devido aos grandes volumes depositados. Os órgãos reguladores mundiais fomentam o aproveitamento dos resíduos e a disposição de forma que cause o mínimo de impacto ao meio ambiente (KOOP; VAN LEEUWEN, 2017).

Os biossólidos que são ricos em matéria orgânica e nutrientes como N e P, podem ser usados como agente condicionante do solo, auxiliando na reestruturação do solo em áreas degradadas (GODOY, 2013; RIELING *et al.*, 2014). O processo de reconstrução das propriedades físicas do solo com o emprego do biossólido é capaz de alterar a densidade, porosidade, aeração do solo e favorecer a retenção e infiltração da água (SAMPAIO *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2020). A destinação para recomposição florestal e recuperação de áreas degradadas podem ser as alternativas mais viáveis, visto que para estes casos necessita menos aplicações em uma mesma área e não apresenta os riscos inerentes da aplicação na agricultura (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015; ABREU *et al.*, 2019).

Estudos da Food and Agriculture Organization (FAO, 2015) indicam que cerca de 28% das terras do Brasil encontram-se em algum grau de degradação, em decorrência, principalmente, do uso intensivo do solo praticado pela agricultura, expansão urbana desordenada e exploração intensiva dos recursos naturais. Segundo o Ministério do Meio Ambiente existem em torno de 140 milhões de hectares de terras degradadas em Brasil. Sendo que cerca de 30 milhões de hectares são áreas de pastagem em algum estágio de degradação, com baixíssima produtividade para alimentação animal (DIAS FILHO, 2014).

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar um método de determinação de áreas potenciais para disposição de biossólidos. A área deste estudo está focada na cidade de Juiz de Fora (Minas Gerais, Brasil), relacionando a localização das ETEs e a viabilidade do uso de biossólidos gerados como condicionante do solo dessas áreas degradadas no município. Serão

utilizados recursos de georreferenciamento para considerar distâncias seguras da aplicação em relação aos recursos hídricos e áreas residenciais, distâncias dos locais de aplicação e das ETES e a sustentabilidade econômica.

## 2 METODOLOGIA

Este estudo foi realizado no município de Juiz de Fora, localizado na região da Zona da Mata no estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 21° 45' 44" S e 43° 20' 37" W, na porção média da bacia do Rio Paraibuna, pertencente à bacia do Rio Paraíba do Sul (ANA, 2017). O município possui uma população estimada em 573.285 habitantes, sendo que 90% vivem em área urbana (IBGE, 2020).

### 2.1 Caracterização da área do estudo

A cidade de Juiz de Fora teve seu processo de urbanização intensificada em meados do século XIX em que o desmatamento ocorrido na região, sobretudo devido à expansão das fronteiras agrícolas e urbanas, causou modificações na paisagem e levou a degradação de áreas de pastagens abandonadas (ROCHA, 2008). A conversão de florestas em pastagens é um fator determinante para a degradação do solo, devido a perda de matéria orgânica e a compactação das áreas o que dificulta a regeneração natural (BOCCHESI *et al.*, 2008). A ausência de adubações periódicas, o pastejo intensivo e o manejo inadequado são causas da degradação das áreas de pastagens (DIAS FILHO, 2011; DIAS FILHO, 2014).

Na área do estudo existe uma predominância de latossolos de coloração alaranjada, avermelhada e vermelho-amarelado (AMARAL *et al.*, 2004). De modo geral, estes solos são pobres em nutrientes, especialmente fósforo, nitrogênio, cálcio, magnésio e material orgânico (DIAS FILHO, 2014).

### 2.2 Caracterização dos sistemas de tratamento de esgoto

Atualmente, cerca de 10% do esgoto do município é tratado, ou seja, do total do volume de esgoto coletado atualmente no município (1.939.600 m<sup>3</sup>), somente cerca de 194.000 m<sup>3</sup> recebem tratamento, conforme dados informados pela Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (Cesama). Os sistemas de tratamento estão em processo de implantação e expansão, e estão divididos em três estações de tratamento: ETE Barreira do triunfo, ETE Barbosa e ETE União-Indústria (CESAMA, 2020).

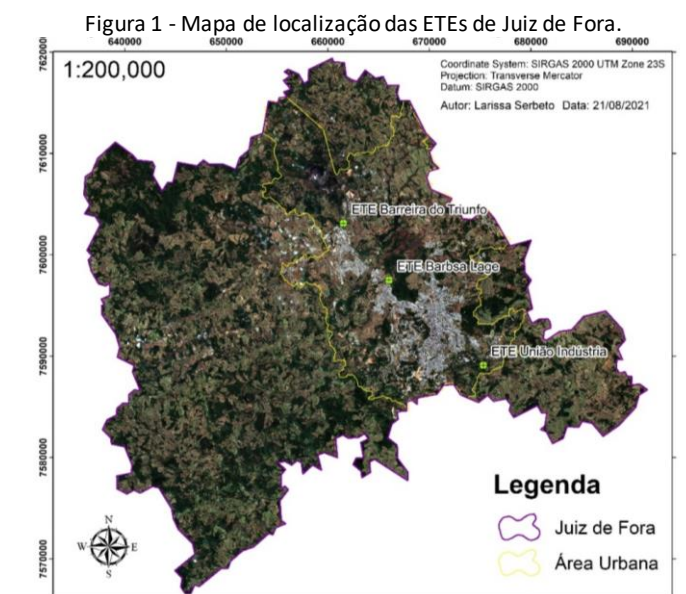
ETE Barreira do Triunfo: está situada na região norte da Cidade, próxima ao Distrito Industrial. A capacidade instalada da ETE Barreira do Triunfo é de 20 l s<sup>-1</sup> (PJF, 2014). O tratamento da fase líquida da estação é composto por sistema preliminar seguido de lodos ativados e decantador secundário. A fase sólida passa por etapas de digestão e desaguamento que contemplam unidades como digestor aeróbio e filtro prensa, respectivamente. O efluente da estação é lançado no Rio Paraibuna e o biossólido gerado é encaminhado para o aterro sanitário (PJF, 2014).

ETE Barbosa Lage: está situada na região norte, e foi projetada com capacidade nominal de 290 l s<sup>-1</sup>. O sistema é composto por: tratamento preliminar seguido de lodos ativados e decantador secundário. O sistema de aeração ocorre por ar difuso com bolhas finas, sopradores e difusores

de membrana. O tratamento da fase sólida é composto pelas etapas de digestão e desaguamento, constituídas por digestor aeróbio e centrífuga, respectivamente. (PJF, 2014).

ETE União Indústria: localiza-se na região sul de Juiz de Fora, e está dividido em três subsistemas: Vila Ideal, Ipiranga e Retiro (PJF, 2014). A estação tem capacidade de operação de 850 l s<sup>-1</sup>, segundo informações da Cesama.

Na Figura 1, é possível observar que as ETEs do município estão situadas nos limites das áreas urbanas e áreas rurais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

### 2.3 Caracterização dos biossólidos

O biossólido é um material orgânico resultante do sistema de tratamento de esgotos, rico em matéria orgânica e nutrientes, em especial o N e o P, com potencial para aproveitamento agrícola e para recuperação de áreas degradadas (LEMAINSKI; SILVA, 2006; MOREIRA *et al.*, 2019).

As tecnologias de tratamento utilizadas nas ETEs de Juiz de Fora, apesar de serem distintas, geram um biossólido com características semelhantes, pois atualmente passam apenas pela etapa de desaguamento antes da sua disposição final (PJF, 2014). A geração de biossólidos de ETEs em Juiz de Fora foi estimada com base no volume gerado em 2018 (PJF, 2021) e o volume em operação máxima das ETEs (Tabela 1).

Tabela 01 - Produção de biossólido das ETEs de Juiz de Fora (2017).

ETE	Biossólido gerado	Biossólido capacidade total
	T mês <sup>-1</sup>	T mês <sup>-1</sup>
Barreira do Triunfo	1,5	3,5
Barbosa Lage	4,5	6,0
União-Indústria	12	72

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

As características do biossólido podem variar ao longo do tempo, e de acordo com a origem do esgoto e as tecnologias utilizadas para o tratamento de esgoto e do lodo (BRIX, 2017; COLLIVIGNARELLI; ABBÀ; BENIGNA, 2020). Na tabela 2 é mostrada a caracterização de biossólidos de ETE resultantes de pesquisas realizadas em outras cidades do Brasil, e que foram

considerados neste trabalho, devido à falta de dados publicados ou divulgados dos biossólidos gerados nas ETEs de Juiz de Fora.

Tabela 2 – Teores de macronutrientes de biossólidos de ETE no Brasil (kg T<sup>-1</sup>).

Macronutrientes	Barueri	Jundiaí	Mangueira	Paranavaí	Franca	Campo Grande
Nitrogênio (N)	42,1	27,0	22,5	22,2	68,2	31,6
Fósforo (P)	26,9	7,2	45,0	0,95	12,9	14,5
Potássio (K)	1,0	1,0	2,1	0,34	1,0	1,85
Cálcio (Ca)	47,8	9,8	9,4	8,3	24,8	13,0
Magnésio(M)	4,5	1,7	1,2	3,0	2,2	6,0
Enxofre (S)	17,1	26,8	0,0	0,0	15,7	11,6

Fonte: Adaptado de: BETTIOL e CAMARGO, 2006; GALDOS *et al.*, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2008; AMORIM JUNIOR, *et al.*, 2021.

O principal benefício da aplicação do biossólido para recuperação de áreas degradadas, está relacionada à estruturação do solo, proporcionada pelo aporte de matéria orgânica que incrementam as quantidades de nutrientes no solo (SAMPAIO *et al.*, 2012). A taxa de aplicação de biossólido é calculada de acordo com a quantidade de macronutrientes necessária para a recuperação do solo degradado. Na tabela 3 é apresentada a estimativa de macronutrientes presentes no biossólido de Juiz de Fora.

Tabela 3 - Caracterização estimada dos biossólidos resultantes das ETEs de Juiz de Fora (kg T<sup>-1</sup>).

Macronutrientes	Estimativa (kg T <sup>-1</sup> )	Total de nutrientes-capacidade atual (kg T <sup>-1</sup> )	Total de nutrientes-capacidade total (kg T <sup>-1</sup> )
Nitrogênio (N)	27	550,8	2200,5
Fósforo (P)	7,2	146,88	586,8
Potássio (K)	1	20,4	81,5
Cálcio (Ca)	9,8	199,92	798,7
Magnésio(M)	1,7	34,68	138,55
Enxofre (S)	26,8	546,72	2184,2

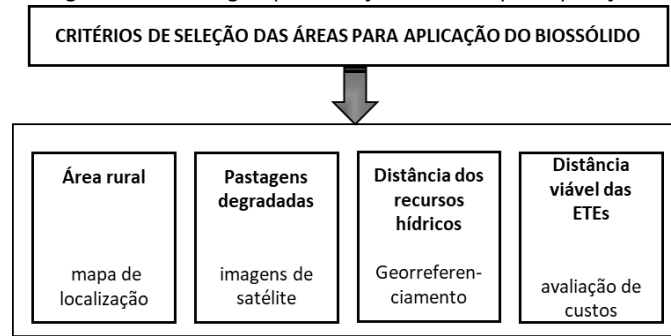
Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

A caracterização foi baseada no quantitativo de macronutrientes do biossólido gerado no município de Jundiaí, que possui tipo de sistema de tratamento de esgoto e tamanho da população similares aos de Juiz de Fora.

#### 2.4 Critérios de definição das áreas de aplicação potencial do biossólido e taxa de aplicação

Na determinação das áreas potenciais para disposição de biossólidos foram considerados os seguintes critérios: 1. Áreas rurais; 2. Áreas que não constem como Áreas de Preservação Permanente (APP) de curso d'água, nascente; 3. Áreas com presença de sítios degradados (pastagens degradadas e solo exposto); 4. Viabilidade econômica (Figura 2).

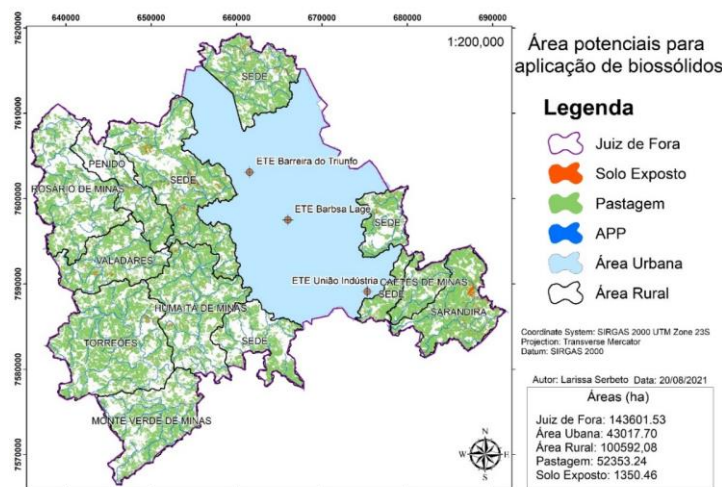
Figura 2 - Fluxograma metodológico para seleção das áreas para aplicação do biofósforo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para identificar as áreas com potencial para aplicação do biofósforo, foram utilizadas imagens do satélite *Sentinel 2*, lançado pela Agência Espacial Europeia. Elas foram obtidas através da plataforma *Google Earth Engine*, que fez uma composição das imagens feitas pelo sensor *MSI* do satélite, desde maio de 2021 até 18 de agosto de 2021. Para essa composição foi permitido que existissem até 20% de nuvens e a resolução final foi 10 metros por pixel. A imagem foi gerada a partir do *software ArcGIS 10.8*®, assim como a classificação da imagem para distinguir pastagem e solo exposto, das edificações e da vegetação. Além disso, foram identificadas as APP de curso d’água e nascente, com o auxílio de dados de hidrografia e a área do município (Figura 3).

Figura 3 - Mapa de caracterização de áreas.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

#### 2.4.1 Identificação das áreas rurais

Na distribuição do espaço de uso do solo, a pastagem ocupa 17.502 ha e os fragmentos florestais ocupam uma área de 1.876,41 ha, as atividades agrosilvopastoris ocupam área de 22.454,41 ha, a agricultura ocupa área de 1.538 ha, as lavouras permanentes 401 ha e as temporárias 1137 ha (PJF, 2014). Essas estão concentradas nas porções oeste, norte e sudeste do município, conforme pode se verificar na Figura 3.

#### 2.4.2 Áreas de preservação permanente

As APP possuem função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade e proteger o solo (BRASIL, 2012), não sendo permitida

a aplicação de biossólidos (CONAMA, 2006). A identificação das áreas de APP foi relacionada aos cursos hídricos da região.

#### 2.4.3 Áreas degradadas

As áreas degradadas apresentam alterações nas propriedades físicas, químicas ou biológicas do solo, que podem comprometer, temporária ou definitivamente, a estrutura desse solo. Quando a degradação ocorre além da capacidade natural de regeneração, é desencadeada uma relação de desequilíbrio no ecossistema (DUARTE *et al.*, 2017). As áreas identificadas como solo exposto (Figura 3) representam 2,6% do total da área de pastagem do município. HOTT *et al.* (2019) identificaram apenas 3,71% das áreas de pastagens com indicativos de elevado índice de degradação na Zona da Mata mineira, região ao qual o município pertence. Entretanto, é possível verificar evidências de expansão das áreas de pastagens degradadas verificado por TAVARES e ANDRADE (2018) ao avaliarem o uso e ocupação do solo em Juiz de Fora através de imagens de satélite de 2004 e 2015.

#### 2.4.4 Análise de viabilidade econômica

A avaliação da viabilidade econômica para o aproveitamento do biossólido foi baseado na distância percorrida entre a ETE geradora do biossólido e a área identificada como potencial beneficiada. ANDREOLI *et al.* (1998) indicaram que a distância máxima viável para o transporte de biossólido está diretamente relacionada com o teor de sólidos, ou seja, para um biossólido com 80% de sólidos, o raio máximo de transporte não deve ultrapassar 160 km. Estudo similar foi realizado por LESSA (2010), ao avaliar a aplicação de lodo de esgoto em áreas no entorno da ETE Goiânia a distâncias de 20 e 46 km. LUNDIN *et al.* (2004) indicaram a distância média de transporte do lodo por cerca de 80 km para a disposição final em áreas agrícolas.

As distâncias estimadas das áreas com aptidão para receber os biossólidos conforme os critérios anteriores variam de 10 a 30 km considerados a partir de uma linha reta das áreas georreferenciadas e até as ETES. A distância pode variar em função das vias de acesso, no entanto, é possível observar, na Figura 3, que as ETES do município estão situadas nos limites das áreas urbanas e áreas rurais, o que facilita a logística de transporte.

Além da distância, o custo de disposição do biossólido no aterro sanitário também foi considerado. O valor da tonelada aterrada de resíduos sólidos urbanos cobrada em 2020 foi de R\$ 60,28. Para efeito de cálculos de custos comparativos, somente foi considerada a taxa cobrada por tonelada aterrada. Custos fixos de manutenção do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) e valor percentual de valores recebidos de outros municípios que utilizam o CTR não foram considerados. Entretanto, devido a uma parceria entre o Demlurb e a Cesama, o custo para disposição final do biossólido no aterro sanitário atualmente é de R\$ 31,35 a tonelada. (Diagnóstico PGRS).

A quantidade de biossólido aplicada por área (ha) foi outro parâmetro utilizado para a estimativa de custo para o aproveitamento em recuperação de áreas degradadas. A taxa de aplicação de biossólido proposta foi baseada em estudos semelhantes. HOFFMANN (2012) encontrou resultados satisfatórios à taxa de 100 T ha<sup>-1</sup>, com biossólido as taxas de N 12,2 kg T<sup>-1</sup>, P 4,7 kg T<sup>-1</sup> para recuperação de área em avançado grau de degradação em Latossolo vermelho. Corroborando com o estudo de (GARCÍA-GIL *et al.* (2000) que encontrou resultados

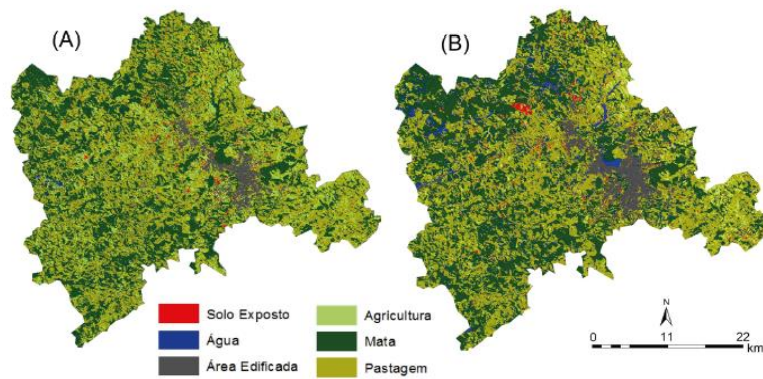


interessantes para fins de recuperação de áreas degradadas à taxa de 80 t ha<sup>-1</sup>, e biossólido com taxa de N 14 kg T<sup>-1</sup> e K 2 kg T<sup>-1</sup>. Já em áreas de reflorestamento e menor intensidade de degradação, autores indicam taxas de 10 a 40 T ha<sup>-1</sup> para aplicação de biossólido, para a mesma média de teores de N, P e K (SILVA et al., 2008; BACKES et al., 2010; ARNOLD, 2017). Visto que as áreas de pastagens da região não apresentam estágio de degradação avançado, baseou-se na aplicação de 10 T ha<sup>-1</sup> considerando o aporte de nutrientes de 5508 kg de N, 1468,8 kg de P e 204 kg de K.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O município de Juiz de Fora ocupa uma área de 143.387 ha, sendo que desse total 69% correspondem à área rural, cerca de 98.300 ha (PJF, 2021). De acordo as imagens de satélite, a aplicação de biossólido pode ser preferencialmente, destinada às áreas que apresentam maior índice de degradação e solo exposto (Figura 4).

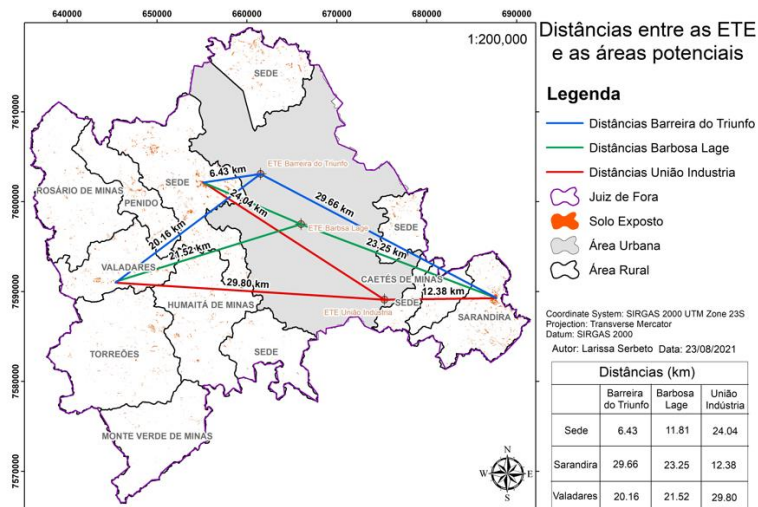
Figura 4 - Mapa de uso e cobertura da terra do município de Juiz de Fora, MG, para os anos 2004 (A) e 2015 (B).



Fonte: TAVARES e ANDRADE (2018).

Na Figura 5 está indicada a localização das áreas de solo exposto, que apresentam alto nível de degradação e que se encontram a uma distância média de 20 km das ETES do município.

Figura 5 - Mapa de localização das ETES e indicação de áreas de aplicação dos biossólidos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

O biossólido gerado nas ETEs de Juiz de Fora tem sido destinado ao aterro sanitário do município. O CTR está localizado no distrito de Dias Tavares, contemplado por uma área de aproximadamente 351 hectares, sendo que deste total, 40 hectares é destinado para área de tratamento dos resíduos e o restante será mantido como área de preservação, compensação ambiental. O contrato de prestação de serviços prevê o recebimento de até 530 T de resíduos dia<sup>-1</sup>, por um período de 25 anos (DEMLURB, 2010).

Na Tabela 4 está demonstrado o estudo estimativo de custo logístico para o aproveitamento do biossólido na recuperação de áreas degradadas em um raio de 10 km e 30 km de distâncias das ETEs, para o volume de biossólidos gerados na capacidade total de operação da ETEs. Importante citar que a 20 km de distância das ETEs é possível encontrar área rural com pastagens com algum grau de degradação. Para esta análise econômica foram utilizadas as informações do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Juiz de Fora (PMGIRS, 2020).

Tabela 04 – Custo para disposição do biossólido nas áreas de recuperação.

Descrição	Total (mês) gerado 2020	Total (mês) capacidade total	Total (mês) capacidade total
Distância (km)	10	10	30
Ida e volta	2	2	2
Viagens por mês (3 ETE)	3	8	8
Valor km (tabela de frete) (R\$)	1,7*	1,7*	1,7*
Total biossólido transportado (T)	20,4	81,5	81,5
Total custo frete (R\$)	102,00	272,00	816,00
Custo unitário (R\$/t <sup>-1</sup> )	5,00	3,34	10,01

\*Valor do frete de carga perigosa.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021

Observa-se que o custo estimado para disposição dos biossólidos gerados nas ETEs é cerca de 72% menor que o custo para disposição no aterro sanitário (R\$ 60,28), avaliando a disposição de biossólidos gerados na capacidade total das ETEs. A economia gerada pela disposição do biossólido seria de R\$ 42.777,48 ao ano, considerando-se apenas os custos diretos e a capacidade instalada das ETEs em funcionamento. Sem considerar os custos indiretos, como de redução da vida útil do aterro sanitário e de recuperação de áreas produtivas. Ao se considerar o valor cobrado devido a parceria que existe entre o Demlurb e a Cesama, o valor cobrado por tonelada de resíduo sólido tratado, teria ainda uma economia de 16% em custos diretos. Do mesmo modo, é possível verificar que mesmo considerando a distância entre as ETEs e as áreas de aplicação para 30 km, a economia seria de cerca de 45% do valor pago para disposição no aterro sanitário.

No Brasil, existem ações para disposição sustentável dos biossólidos, como no estado do Paraná, que desenvolveu um programa para aplicação de biossólido na agricultura, em que os produtores recebem gratuitamente o material para aplicação em culturas como soja, milho, trigo e para reflorestamento (SANEPAR, 2020). Em Brasília, o biossólido das ETEs tem sido empregado na recuperação de áreas degradadas (TERAN *et al.*, 2020). No Brasil, estudos realizados nas regiões Sul e Sudeste e no Distrito Federal demonstraram o uso benéfico do biossólido para diversas culturas (MELFI & MONTES, 2001; SILVA *et al.*, 2002; MELO *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2008). O Reino Unido, Austrália, África do Sul, Índia, Alemanha e Estados Unidos são exemplos de países em que a taxa de utilização de biossólidos supera 50% do total do volume gerado (HALLER; HUTTON; BARTRAM, 2007), nestes países, o reaproveitamento é custeado pela

receita obtida pela comercialização do bio sólido para agricultores como fertilizante orgânico (LEBLANC, MATTHEWS, RICHARD, 2008) com um custo menor para o agricultor comparado com o custo de fertilizantes minerais e possibilita a ciclagem de nutrientes, como o nitrogênio, fósforo e potássio (SEIPLE; COLEMAN; SKAGGS, 2017).

No Brasil, o aproveitamento do bio sólido deve atender as exigências da legislação para aplicação no solo (CONAMA, 2020). No caso o tratamento realizado em cada ETE atualmente não atenda ao disposto na resolução, o investimento necessário para a adequação deverá ser incorporado ao custo de aproveitamento do bio sólido. A utilização do bio sólido deve ser monitorado quanto a segurança ambiental, sanitária, econômica e agrônômica, devido à presença de patógenos, poluentes orgânicos e metais pesados, devendo-se utilizar o manejo da área tratada para manter os parâmetros a valores aceitáveis pela legislação ambiental vigente. Resguardando as áreas de restrições locais como: Unidades de Conservação, Áreas de Preservação Permanente e Áreas de Proteção aos Mananciais.

Uma das maiores dificuldades enfrentadas pelas empresas de saneamento está relacionada à verificação quanto à presença de determinados vírus e micro poluentes orgânicos (CAVANAGH *et al.*, 2018; COLLIVIGNARELLI; ABBÀ; BENIGNA, 2020). Este tipo de análise não é realizado pela maioria dos laboratórios comerciais, visto que são análises muito específicas realizadas em órgãos de pesquisa e universidades.

Outro aspecto importante no processo de aproveitamento do lodo na agricultura é o envolvimento de pessoas e exposição nas etapas de tratamento (geração de lodo, processamento, armazenamento, transporte, aplicação no solo) (AMORIM JUNIOR *et al.*, 2021).

## 4 CONCLUSÃO

A adoção de alternativas para o aproveitamento do bio sólido para o aporte de nutrientes no solo, deve considerar adicionalmente a segurança do uso quanto a questão ambiental e sanitária, assim como sustentabilidade econômica. Os resultados deste estudo demonstraram a viabilidade econômica para o aproveitamento dos bio sólidos gerados para recuperação de áreas de pastagens degradadas no município. A aplicação de bio sólido para recuperação de pastagens degradadas é feita periodicamente e não de forma contínua como para agricultura, o que reduz os possíveis efeitos deletérios no solo e na vegetação recuperada.

Pesquisas futuras são estimuladas para caracterização do bio sólido, tanto ao atendimento aos critérios estabelecidos pela legislação, quanto à avaliação mais detalhada dos custos de logística. Entretanto, os resultados apresentados neste estudo demonstram que os ganhos com o aproveitamento dos bio sólidos para recuperação de áreas degradadas vão além dos custos diretos, pois há o ganho econômico pela possibilidade de incremento produtivo das áreas e a redução da disposição de resíduos no aterro sanitário. Adicionalmente, os ganhos ambientais devem ser considerados, principalmente o reconhecimento do bio sólido como um novo produto e não como um resíduo.

## REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M. de; ALONSO, J. M.; MELO, L. A. de; LELES, P. S. D. S.; SANTOS, G. R. dos. Characterization of biosolids and potential use in the production of seedlings of schinus terebinthifolia raddi. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 24, no. 3, p. 591-599, 2019.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: Desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 18, no. 2, p. 115–122, 2013.

AMARAL, F. C. S. do; SANTOS, H. G. dos; ÁGLIO, M. L. D.; DUARTE, M. N.; PEREIRA, N. R.; OLIVEIRA, R. P.; CARVALHO JÚNIOR, W. de. Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, no. 63, p. 95 p., 2004.

AMORIM JUNIOR, S. S.; MAZUCATO, V. S. H.; MACHADO, B. S.; GUILHERME, D. O; COSTA, R. B.; FILHO, F. J. C. M. Agronomic potential of biosolids for a sustainable sanitation management in Brazil: Nutrient recycling, pathogens and micropollutants. **Journal of Cleaner Production**, vol. 289, 2021.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; BONNET, B. R. P.; LARA, A. I.; PEGORINI, E. S. Produção real e estimativas teóricas de lodo de esgoto no Estado do Paraná, p. 8, 1998. Disponível em: [http://www.sanepar.com.br/sanepar/gecip/congressos\\_seminarios/lodo\\_de\\_esgoto/producao\\_lodopr.pdf](http://www.sanepar.com.br/sanepar/gecip/congressos_seminarios/lodo_de_esgoto/producao_lodopr.pdf). Acesso em: 25 de jan. 2021.

ARNOLD, M. Fostering sustainability by linking co-creation and relationship management concepts. **Journal of Cleaner Production**, vol. 140, p. 179–188, 2017.

BACKES, C.; LIMA, C. P. de; GODOY, L. J. G. de; SANTOS, A. J. M.; BOAS, R. L. V.; BULL, L. T. Solos e nutrição de plantas. vol. 69, no. 2, p. 413–422, 2010.

BOCCHESI, R. A.; DE OLIVEIRA, A. K. M.; FAVERO, S.; DOS SANTOS GARNÉS, S. J.; LAURA, V. A. Chuva de sementes e estabelecimento de plântulas a partir da utilização de árvores isoladas e poleiros artificiais por aves dispersoras de sementes, em área de cerrado, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Ornitologia**, vol. 16, no. 3, p. 207–213, 2008.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado Sewage sludge and mineral fertilization on recovery of chemical properties of a degraded soil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 19, no. 4, p. 388–393, 2015.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010.

BRIX, H. Sludge dewatering and mineralization in sludge treatment reed beds. **Water (Switzerland)**, vol. 9, no. 3, 2017.

CANO LONDOÑO, N. A.; SUÁREZ, D. G.; VELÁSQUEZ, H. I.; RUIZ-MERCADO, G. J. Emergy analysis for the sustainable utilization of biosolids generated in a municipal wastewater treatment plant. **Journal of Cleaner Production**, vol. 141, p. 182–193, 2017.

CAVANAGH, J. A. E.; TROUGHT, K.; MITCHELL, C.; NORTHCOTT, G.; TREMBLAY, L. A. Assessment of endocrine disruption and oxidative potential of bisphenol-A, triclosan, nonylphenol, diethylhexyl phthalate, galaxolide, and carbamazepine, common contaminants of municipal biosolids. **Toxicology in Vitro**, vol. 48, p. 342–349, 2018.

CESAMA. Companhia de Saneamento Municipal. Despoluição do Rio Paraibuna. 2020. Disponível em: <http://www.cesama.com.br/a-cesama/despoluicao-do-rio-paraibuna>. Acesso em: 26 de jan. 2021.

COIMBRA, P. R. S.; ACHON, C. L. Lodo de reatores UASB: desaguamento através de protótipos de Leito de Drenagem Sludge from UASB reactor : dewatering using prototypes of drainage bed Fangos de reatores anaerobios : desidratación usando prototipos de lecho de drenaje. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, vol. 04, no. 24, p. 28–42, 2016.

COLLIVIGNARELLI, M. C.; ABBÀ, A.; BENIGNA, I. The reuse of biosolids on agricultural land: Critical issues and perspective. **Water Environment Research**, vol. 92, no. 1, p. 11–25, 2020.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para aplicação de bio-sólidos em solos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 21 ago. 2020.

DIAS FILHO, M. B. Degradação de Pastagens: Processos, Causas e Estratégias de Recuperação. **Degradação de Pastagens: Processos, Causas e Estratégias de Recuperação**. [S. l.: s. n.], 2011. p. 2011.

DIAS FILHO, M. B. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental**, p. 36, 2014.

DUARTE, T. E. P.; ANGEOLETTO, F. H. S.; CORREA SANTOS, J. W. M.; LEANDRO, D. D. S.; COPETTI BOHRER, J. F.; VACCHIANO, M. C.; LEITE, L. B. O Papel da Cobertura Vegetal nos Ambientes Urbanos e sua Influência na Qualidade de Vida nas Cidades. **Desenvolvimento em Questão**, vol. 15, no. 40, p. 175, 2017.

DEMLURB. Departamento de Limpeza Urbana Municipal. **Aterro Sanitário**. 2010. Disponível em: <https://demlurb.pjf.mg.gov.br/aterro.php>. Acesso em: 18 de fev. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization. **Status of the World's Soil Resources, 2015**. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

GARCÍA-GIL, J. C.; PLAZA, C.; SOLER-ROVIRA, P.; POLO, A. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, vol. 32, no. 13, p. 1907–1913, 2000.

GODOY, L. C. de. A logística na destinação do lodo de esgoto. **Tecnologia-Gestão-Humanismo**, vol. 2, no. 1, p. 79–90, 2013.

HALLER, L.; HUTTON, G.; BARTRAM, J. Estimating the costs and health benefits of water and sanitation improvements at global level. **Journal of Water and Health**, vol. 5, no. 4, p. 467–480, 2007.

HOFFMANN, R. B. **Potencial de uso de biossólidos para fins de recuperação de áreas degradadas**. 2012. 93 p. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas; Gênese, Morfologia e Classificação, Mineralogia, Química) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.

HOTT, C. M.; ANDRADE, R. G. MAGALHÃES JÚNIOR, W. C. P. Avaliação de degradação e fitossanidade de pastagens usando séries temporais de imagens de satélite. **Sanitária e Ambiental**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, p. 173 – 182, 2019. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/arquivos/ebooks/engenharia-sanitaria-e-ambiental>. Acesso em: 08 de mai. 2021.

KOOP, S. H. A.; VAN LEEUWEN, C. J. The challenges of water, waste and climate change in cities. **Environment, Development and Sustainability**, vol. 19, no. 2, p. 385–418, 2017.

IBGE. (2020). **Estados e Cidades, Estatísticas**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/juiz-de-fora.html>. Acesso em: 25 de jun. 2021.

LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E. da. Utilização do biossólido da Caesb na produção de milho no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 30, no. 4, p. 741–750, 2006. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832003000600017>.

LESSA, A. A. **Seleção de áreas aptas a disposição de lodo de estações de tratamento de esgoto com fins agrícolas**. 2010, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2010.

LUNDIN, M.; OLOFSSON, M.; PETTERSSON, G. J.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 41, no. 4, p. 255–278, 2004.

MELFI, A. J., MONTES, C. R. Impacto dos biossólidos sobre o solo. In: TSUTIYA *et al.* Biossólidos na Agricultura. SABESP. São Paulo, 2001.

MELO, V.P.; BEUTLER, A.N.; SOUZA, Z.M.; CENTURION, J.F. & MELO, W.J. Atributos físicos de Latossolos adubados com biossólido. **Pesq. Agropec. Bras.**, 39:67-72, 2004.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; SARDINHA, S. A.; JUNIOR, A. P. O lodo de ETE como alternativa para a recuperação do solo em áreas degradadas. **Brazilian Applied Science Review**, vol. 3, no. 3, p. 1564–1585, 2019.

PJF. Prefeitura de Juiz de Fora. 2014. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Disponível em: [https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sepur/planos\\_programas/pmgirs/produtos/prod\\_6.php](https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sepur/planos_programas/pmgirs/produtos/prod_6.php). Acesso em: 20 de mar. 2021.

PJF. Prefeitura de Juiz de Fora. 2021. **Plano de Saneamento Básico-PSA**. Disponível em: [https://planodesaneamento.pjf.mg.gov.br/consulta\\_publica.html](https://planodesaneamento.pjf.mg.gov.br/consulta_publica.html). Acesso em: 18 de jan. 2021.

LEBLANC, R. J., MATTHEWS, P., RICHARD, R. P. Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management. **United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT)**, 2008.

RIELING, R. C.; ZAMPAR, R.; PEREIRA NAVARRETE, L.; PAULO, J.; SILVA, D. Efeito residual do lodo de esgoto na produção de mudas de espécies nativas para reflorestamento. **SaBios: Rev. Saúde e Biol**, vol. 9, no. 2, p. 31–39, 2014.

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C.; HELIODORO, J. C. A.; RONCHI, H. S.; TANGANELLI, K. M.; DE 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**, vol. 36, no. 5, 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.; LITKE, 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**, vol. 227, no. 1, 2016.

SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. 2020. Disponível em: <https://site.sanepar.com.br/search/node/bioss%C3%B3lido>. Acesso em: 21 de jul. 2021.

SEIPLE, T. E.; COLEMAN, A. M.; SKAGGS, R. L. Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States. **Journal of Environmental Management**, vol. 197, p. 673–680, 2017.

SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, vol. 64, p. 117–132, 2017.

SHAHEEN, S. M.; SHAMS, M. S.; IBRAHIM, S. M.; ELBEHIRY, F. A.; ANTONIADIS, V.; & HOODA, P. S. Stabilization of sewage sludge by using various by-products: effects on soil properties, biomass production, and bioavailability of copper and zinc. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 225, n. 7, p. 1-13, 2014.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agrônômica para o biossólido produzido no Distrito Federal: I - Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 487-495, 2002.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. D. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. **Revista Arvore**, vol. 32, no. 5, p. 845–854, 2008.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; & ... AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, vol. 12, no. 17, 2020.

TAVARES, C. M. G., ANDRADE, R. G. Análise do uso e da cobertura da terra no município de Juiz de Fora, Minas Gerais. **A Geografia na Contemporaneidade**. 1 ed. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, v. 1, p. 229-238., 2018. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/4875>. Acesso em: 08 de mar. 2021.

TERAN, F. J. C., SANTOS, G. O., JÚNIOR, W. T., FREITAS, E. C. B., & SOARES, J. A. Avaliação da recuperação de áreas degradadas por exploração de cascalho laterítico por meio da incorporação de lodo de esgoto. Estudo de caso no Distrito Federal. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 3243-3255, 2020.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. de L.; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, vol. 67, no. 219, p. 128–158, 2019. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.050>.