

FELIPE AQUINO LIMA

**DETERMINAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS À APLICAÇÃO
DE LODO DE ESGOTO COMO INSUMO AGRÍCOLA
UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Produção Vegetal, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Produção Vegetal.

Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Regynaldo Arruda Sampaio

Coorientador(a): Profa. Cristina Rodrigues Nascimento

Montes Claros
2014

L732d
2015

Lima, Felipe Aquino.
Determinação de áreas potenciais à aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola utilizando geoprocessamento / Felipe Aquino Lima. Montes Claros, MG: Instituto de Ciências Agrárias/UFMG, 2015. 57 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, área de concentração em Produção Vegetal) Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

Orientador: Prof. Reginaldo Arruda Sampaio.

Banca examinadora: Reginaldo Arruda Sampaio, Igo Fernando Lepsch, Walbert Júnior Reis dos Santos.

Inclui bibliografia: f: 53-57.

1. Lodo de Esgoto. 2. Sistema de Informações Geográficas. I. Sampaio, Reginaldo Arruda. II. Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais. III. Título.

CDU: 628.3

Elaborada pela Biblioteca Comunitária em Ciências Agrárias do ICA/UFMG

FELIPE AQUINO LIMA

**DETERMINAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS À APLICAÇÃO
DE LODO DE ESGOTO COMO INSUMO AGRÍCOLA
UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO**

Prof. Dr. Reginaldo Arruda Sampaio
(Orientador – ICA/UFMG)

Aprovada em 12 de dezembro de 2014.

Montes Claros
2014

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família e
aos amigos, que sempre
me apoiaram!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, agradeço o dom da vida.

À Carla, que sempre foi minha maior incentivadora, sempre acreditando no meu potencial, nunca me deixando abaixar a cabeça.

À professora Cristina Nascimento, os conselhos e as ótimas conversas.

Ao professor Regynaldo Arruda e ao professor Igo Lepsch, a orientação prestada e, sobretudo, a confiança.

Ao professor Walbert Santos, sempre muito solícito, agradeço os conselhos e as palavras de incentivo.

Aos colegas de mestrado, as conversas e o apoio.

À Universidade Federal de Minas Gerais.

À CAPES o apoio financeiro.

Muito Obrigado !

*Faça as coisas o mais
simples que puder, porém
não as mais simples.*
Albert Einstein

RESUMO

O lodo de esgoto é um resíduo rico em matéria orgânica e em nutrientes, gerado em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). As ETEs são imprescindíveis para reduzir a intensa degradação dos recursos hídricos. A necessidade do tratamento de esgoto é um fator que aumenta a pressão sobre os agentes públicos, no sentido de ampliar o número de ETEs nos centros urbanos. Concomitante a essa questão, é crescente também a utilização do lodo de esgoto gerado no processo em áreas agrícolas ou a sua disposição segura no meio ambiente. Todavia, para aplicação do lodo no solo, deve-se respeitar os parâmetros definidos pela Seção V da Resolução CONAMA nº 375, de 2006, que apresenta as restrições Locacionais e da Aptidão do Solo das Áreas de Aplicação, descritas no artigo 15º, sobre quais áreas não será permitida a aplicação de lodo de esgoto. As análises das diversas variáveis expressas nesta Seção da Resolução podem ser realizadas com o uso de ferramentas computacionais, mais especificamente com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando técnicas de Geoprocessamento. Essa ferramenta permite não somente mais rigor e precisão nas análises, mas também a integração, que possibilita o armazenamento e gerenciamento desses dados como parte do conjunto total das geoinformações disponíveis e registradas. O Projeto Jaíba, localizado ao norte do Estado de Minas Gerais, apresenta mais de 65 mil ha irrigáveis, representando uma região com alto potencial agrícola, na qual se tem o Setor C2 ocupando área de 9.557 ha. Após processar os dados em ambiente SIG e observadas as classes de aptidão dos solos passíveis de receber lodo de esgoto, observou-se que o Setor C2 do Projeto Jaíba apresenta um cenário propício para uso agrícola do lodo de esgoto, com aptidão boa e regular em 78% da área de estudo. Esse resultado advém principalmente da presença de Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolos, que apresentam atributos físico-químicos que favorecem a disposição desse resíduo de maneira segura.

Palavras-chave: Biossólidos. SIG. CONAMA nº 375, de 2006.

ABSTRACT

Sewage sludge is a waste rich in organic matter and nutrients generated in Wastewater Treatment Plants (WWTPs). WWTPs are essential to reduce the severe degradation of water resources. The need of wastewater treatment is a factor that increases the pressure on government officials to expand the number of WWTPs in urban centers. Besides this question, the use of sewage sludge generated in this process is also increasing on agricultural fields and also the need of safe disposal in the environment. However, in order to apply sludge in the soil parameters defined by Section V of CONAMA Resolution No. 375, 2006, should be respected. They provide locational restrictions and Soil Suitability of Application Areas, described in the Article 15, on which areas the application of sewage sludge will not be allowed. The analyses of several variables expressed in this section of the resolution can be performed with the use of computer tools, specifically with Geographic Information Systems (GIS) applying GIS techniques. This tool permits not only more accuracy and precision in the analyses but also the integration that enables storage and management of such data as part of the total set of available or registered geoinformation. The Jaíba project located in the north of the state of Minas Gerais has more than 65,000 ha area which can be irrigated being a region with high agricultural potential, among where the Sector C2 occupies an area of 9,557 ha. After processing the data in a GIS environment and after observing the soil fitness classes eligible to receive sewage sludge, it was observed that the Jaíba Project C2 Sector presents a favorable scenario for agricultural use of sewage sludge, with good and regular conditions in 78% of the study area. This result arises mainly from the presence of Alfisol and Oxisols which have physical and chemical characteristics that contribute to the disposal of this waste safely.

Keywords: Biosolid. GIS. CONAMA nº 375 of 2006.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Municípios que apresentam tratamento de esgoto em Minas Gerais	16
FIGURA 2 - Composição média do esgoto doméstico	17
FIGURA 3 - Componentes de um Sistema de Informação Geográfica	29
FIGURA 4 - Situação geográfica do Setor C2 do Projeto Jaíba, no estado de Minas Gerais. Imagem LandSat 8, composição RGB sob as bandas 432, adquiridas em 21/03/2014.....	35
FIGURA 5 - Restrições locacionais e da aptidão do solo das áreas de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado	37
FIGURA 6 - Principais etapas do processo metodológico.....	39
FIGURA 7 - Classe de Solos do Setor C2 do Projeto Jaíba.....	47
FIGURA 8 - Distribuição das classes de declividade no Setor C2 do Projeto Jaíba.....	49
FIGURA 9 - Geocampos inaptos à aplicação de lodo de esgoto no Setor C2 do Projeto Jaíba	50
FIGURA 10 - Mapa de aptidão dos solos à aplicação de lodo de e como insumo agrícola no Setor C2 do Projeto Jaíba	51
GRÁFICO 1 - Quantidade de esgoto coletado e tratado no Brasil em 2008 ..	13
GRÁFICO 2 - Evolução da capacidade instalada do esgoto tratado em Minas Gerais, 2000-2012.....	15
QUADRO 1 - Principais formas de destinação do lodo de uma ETE	22
QUADRO 2 - Vantagens e desvantagens das principais formas de destinação do lodo de uma ETE.....	23
QUADRO 3 - Classes de aptidão para aplicação de lodo de esgoto com insumo agrícola	38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Produção de lodo de esgoto em sistemas aeróbios e anaeróbios	17
TABELA 2 - Composição média de tipos de lodo do Paraná e outros materiais orgânicos	24
TABELA 3 - Principais atributos físico-químicos dos Latossolos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba	41
TABELA 4 - Principais atributos físico-químicos do Argissolos Acinzentados presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba	43
TABELA 5 - Principais atributos físico-químicos dos Argissolos Vermelho-Amarelos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba	44
TABELA 6- Principais atributos físico-químicos dos Neossolos Quartzarênicos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba	46

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Minas trata esgoto.....	15
2.2 Lodo de esgoto.....	17
2.3 Destino final do lodo de ETE.....	20
2.4 Lodo de esgoto para fins agrícolas.....	24
2.4.1 Resolução n° 375, de 29 de Agosto de 2006	26
2.5 Sistema de Informações Geográficas	28
CAPÍTULO 2 - DETERMINAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DE ÁREAS APTAS À APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTO COMO INSUMO AGRÍCOLA: ESTUDO DE CASO DO SETOR C2 NO PERÍMETRO DE IRRIGAÇÃO JAÍBA	31
1. INTRODUÇÃO	33
2. MATERIAL E MÉTODOS	35
2.1 Situação, limites e características gerais	35
2.2 Metodologia	36
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS.....	53

CAPÍTULO 1 - REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso natural finito, essencial à sobrevivência de todos os seres vivos. Denominada solvente universal, ela é utilizada pelo homem para os mais diversos fins. Na legislação brasileira as águas doces, salobras e salinas do Território Nacional são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes, conforme define a Resolução CONAMA nº 357, de 2005.

Observando a ocorrência da qualidade e da quantidade, as águas são utilizadas desde o abastecimento público até a harmonia paisagística e, diante de tamanha importância, a Resolução CONAMA nº 430, de 2011 estabelece as condições e os padrões de lançamento de efluentes em corpos de água, face ao crescente consumo de água, relacionado ao aumento progressivo da população nas cidades, ao aumento da intensidade das atividades agrícolas e da pecuária e ao desenvolvimento industrial, que, por sua vez, geram efluentes após utilizarem a água.

Os efluentes não podem conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com a legislação, devendo ser lançados diretamente no corpo receptor somente quando obedecerem às condições e aos padrões previstos na Resolução CONAMA nº 430, de 2011, que, dentre outras coisas, avalia a capacidade máxima de determinado poluente que o corpo hídrico pode receber, sem comprometer a qualidade da água e os seus usos determinados pela classe de enquadramento.

A necessidade do tratamento de esgoto é um fato que aumenta a pressão sobre os agentes públicos no sentido de ampliar o número de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) nos centros urbanos. Concomitante a essa questão, é crescente também a utilização do lodo de esgoto gerado no processo em áreas agrícolas ou a sua disposição segura no meio ambiente. Para a aplicação do lodo no solo, deve-se respeitar os parâmetros definidos pela Seção V da Resolução CONAMA nº 375, de 2006, que apresenta as restrições Locacionais e da Aptidão do Solo das Áreas de

Aplicação, descritas no artigo 15, sobre quais áreas não será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado.

Implantado no início da década de 1950, o Projeto Jaíba, situado na margem direita do rio São Francisco, compreende os municípios de Jaíba, de Matias Cardoso e de Verdelândia, no estado de Minas Gerais. Esse projeto tem como objetivo promover o desenvolvimento regional, por meio da produção agrícola utilizando irrigação. Contempla uma área de mais de 100 mil ha, destes com aproximadamente 65 mil ha irrigáveis (CODEVASF, 2014), sendo, portanto, uma das áreas mais importantes da agricultura no cenário nacional. Dessa forma, a utilização de lodo de esgoto como insumo agrícola é uma opção a ser considerada, como forma de promover a reciclagem dos nutrientes presentes no lodo de esgoto em áreas irrigadas e dar uma destinação mais adequada a esse resíduo.

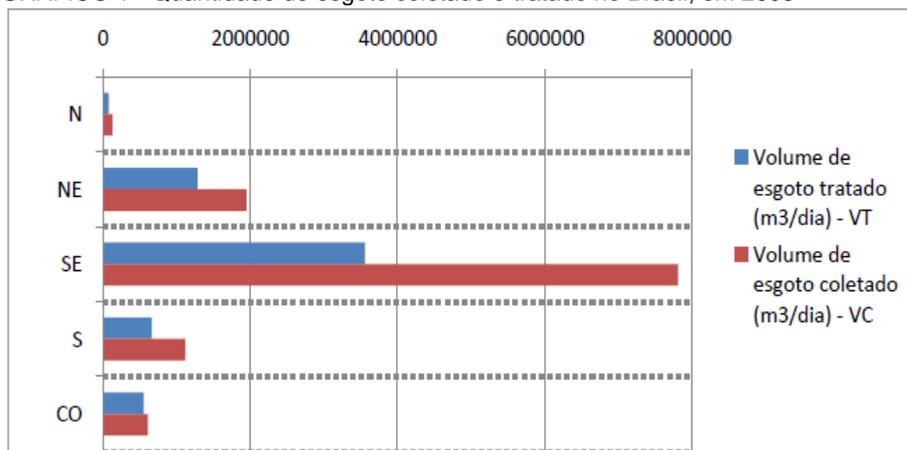
Diante disso, observa-se a ausência de dados que fomentem e indiquem, no Setor C2 do Projeto Jaíba, assim como na maior parte dos municípios brasileiros, as áreas para destinação do lodo de esgoto para uso agrícola. Propõe-se, portanto, avaliar o uso do SIG enquanto ferramenta para a determinação dessas áreas potenciais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A preocupação com os efluentes iniciou-se com os gregos, que por meio de drenos e de canais, transportavam os efluentes gerados para fora das cidades até as áreas agrícolas, aplicando-os nas lavouras. No começo do século XIX, algumas cidades da Europa também apresentavam redes de coleta de efluentes, porém a instalação dos sistemas de tratamento de esgotos só teve início no século XX. Nos Estados Unidos, desde 1972, cerca de 96% da população já eram atendidas com tratamento de esgoto doméstico (LEME, 2010).

Os dados consolidados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008 (IBGE 2010) mostram que, no Brasil, há ainda muito que se avançar no tratamento de esgoto. Isso porque grande parte do volume dos esgotos que é coletado não é tratada, como ilustra, a seguir, GRAF. 1:

GRÁFICO 1 - Quantidade de esgoto coletado e tratado no Brasil, em 2008



Fonte: IBGE, 2010.

A maioria das cidades brasileiras não apresenta rede de coleta de esgotos e/ou estações de tratamento dos mesmos. As condições sanitárias adequadas incluem o tratamento do esgoto gerado, caso contrário, se lançados nos recursos hídricos, promoverão a poluição desses, além da proliferação de doenças, como a diarreia, devido à contaminação da água por coliformes fecais, causando prejuízo à saúde da população. Essa

problemática se deve ao fato do atendimento em coleta de esgoto contemplar apenas 46,2% da população brasileira, sendo que, desse esgoto gerado, apenas 37,9% recebem algum tipo de tratamento (REZENDE, 2011).

Os esgotos estão relacionados diretamente à poluição dos cursos hídricos, uma vez que, em sua maioria, são lançados diretamente nos corpos d'água. Nesse contexto, Andrade e Mattiazzo (2000) afirmam que, frente à degradação intensa dos recursos hídricos, os esgotos de diversas cidades brasileiras vêm sendo tratados em ETEs, que operam com diferentes sistemas tecnológicos, a fim de reduzir a carga orgânica e potencial poluente.

Para tentar reverter ou ao menos amenizar o problema da disposição inadequada dos efluentes nos corpos hídricos, Pires (2006) relata que foram criadas políticas de incentivo ao saneamento básico e à instalação de ETEs nas cidades. Pretende-se, portanto, coletar e tratar os efluentes antes de devolvê-los aos mananciais.

O governo estadual de Minas Gerais, com o objetivo de reduzir a poluição dos corpos d'água e melhorar a qualidade de vida da população, estabeleceu diretrizes políticas na área de esgotamento sanitário. Nesse sentido, o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) deliberou a implantação de sistema de tratamento de esgotos domésticos em todos os municípios, de acordo com a convocação realizada por meio da Deliberação Normativa (DN) nº 96, de 2006. Em 2008, a DN do COPAM nº 128, de 2008, prorrogou alguns prazos da DN nº 96 de 2006, os quais permanecem válidos. Nesse sentido, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) desenvolve, desde 2006, o Programa Minas Trata Esgoto, que tem como objetivo:

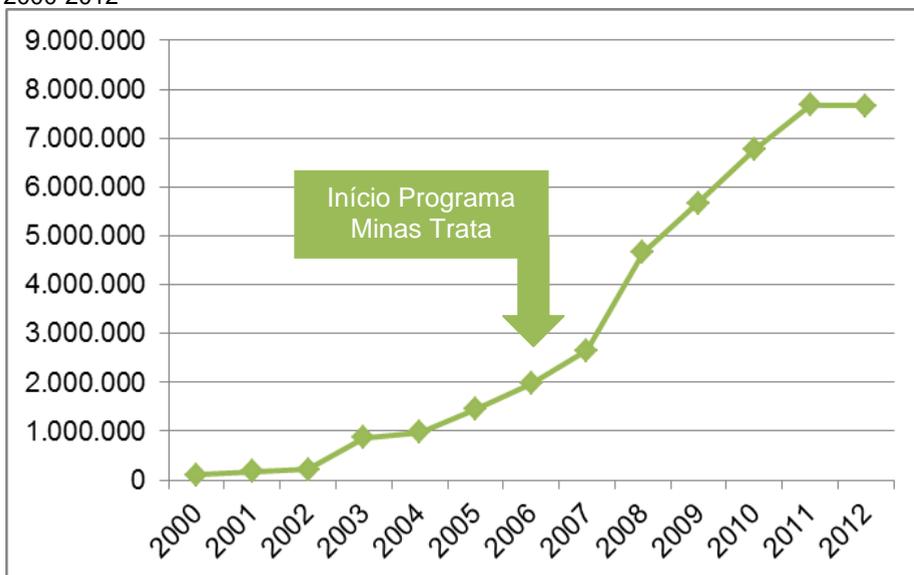
Realizar a gestão estratégica da implantação de sistemas de tratamento de esgotos, permitindo desta forma a universalização do serviço e melhorias na qualidade de vida da população,[...] apoiar os municípios na regularização ambiental dos empreendimentos e no atendimento à legislação ambiental; retomar o conceito do saneamento no âmbito da prevenção; e fornecer suporte ao ICMS Ecológico, subcritério saneamento – tratamento de esgotos sanitários (FEAM, 2013, p. 5).

2.1 Minas trata esgoto

A implantação do programa Minas Trata Esgoto proporcionou grande mobilização para implementação de estações de tratamento de esgoto em Minas Gerais. Isso significa que cada vez mais, a população urbana de Minas Gerais é atendida por esses processos.

Avaliando a capacidade instalada das estações de tratamento de esgoto, que apresenta conformidade com os órgãos ambientais, entre 2000 e 2012, houve um acréscimo de 7.567%, ou seja, foram 101.235 e 7.660.485 habitantes beneficiados, respectivamente, nos anos citados, como pode ser observado na GRAF. 2:

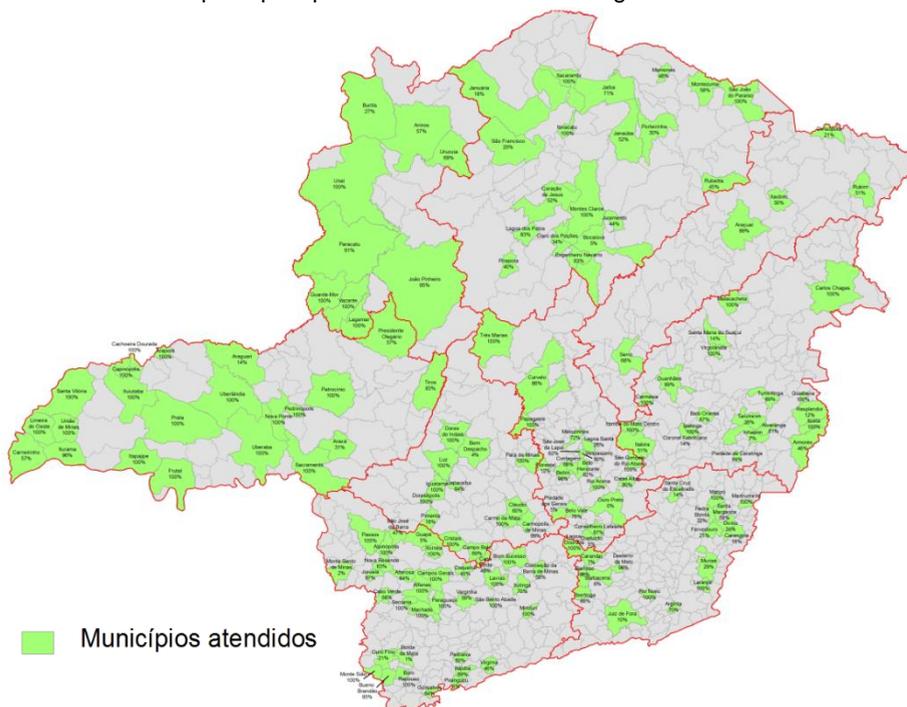
GRÁFICO 2 - Evolução da capacidade instalada do esgoto tratado em Minas Gerais, 2000-2012



Fonte: Adaptado de FEAM, 2013.

Com o intuito de facilitar a gestão dessa política pública, a DN nº 96 de 2006 dividiu os 853 municípios mineiros em sete grupos com diferentes faixas populacionais e prazos para adequação. Desses municípios, apenas 167 apresentam ETE, conforme FIG. 1:

FIGURA 1 - Municípios que apresentam tratamento de esgoto em Minas Gerais



Fonte: Adaptada de FEAM, 2013.

Avaliando a implantação das Estações de Tratamento de Esgoto, Kelm (2014) descreve que, ao final do processo dos sistemas de tratamento, a água isenta da maioria dos resíduos sólidos e orgânicos retorna aos mananciais com bom grau de pureza. Entretanto, ocorre a geração de um resíduo semissólido, pastoso e de natureza predominantemente orgânica, denominado de lodo de esgoto.

Observa-se, portanto, que a geração do lodo de esgoto é proporcional ao número de estações de tratamento de esgoto, ressaltando que a quantidade gerada está relacionada ao processo tecnológico aplicado no tratamento (TAB. 1). Presume-se que a quantidade de lodo de esgoto tende a crescer, haja vista que o número de estações de tratamento de esgoto e a evolução da capacidade instalada para atender a população é crescente, isso porque a população brasileira está aumentando e concentrada cada vez mais nas cidades.

TABELA 1

Produção de lodo de esgoto em sistemas aeróbios e anaeróbios

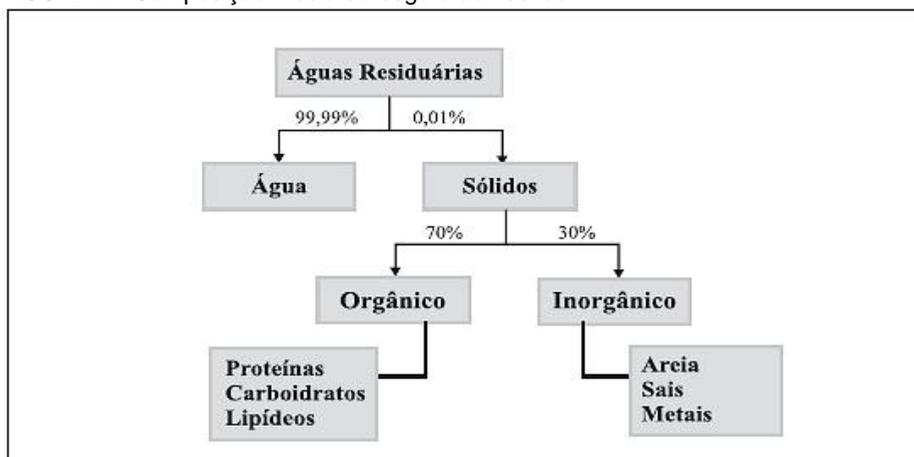
Tipos de sistemas	Volume de Lodo Produzido (L hab ⁻¹ d ⁻¹)
Lagoas facultativas	0,01 - 0,25
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	0,15 - 0,25
Lagoa aerada facultativa	0,8 - 0,22
Lodos ativados convencional	3,1 - 8,2
Lodos ativados – aeração prolongada	3,3 - 5,6
Filtro biológico de alta carga	1,4 - 5,2
Biofiltro aerado submerso	3,1 - 8,2
Reatores UASB	0,2 - 0,6

Fonte: Adaptada de SPERLING e GONÇALVES, 2001.

2.2 Lodo de esgoto

Após a utilização da água potável e a sua conseqüente transformação em esgoto, as estações de tratamento concentram a poluição remanescente no lodo, antes de devolver à natureza os efluentes tratados (FERNANDES; SILVA, 1999). Nesse processo, separa-se a parte líquida da parte sólida, FIG. 2, com intuito de devolver água tratada aos corpos hídricos.

FIGURA 2 - Composição média do esgoto doméstico



Fonte: MELO e MARQUES, 2000.

O lodo é o último resíduo do ciclo urbano da água. Definido por Brasil (2006) como resíduo gerado nos processos de tratamento de esgoto sanitário, o lodo é considerado subproduto do tratamento de efluentes. Ele provém das águas servidas, produzidas em grandes volumes em áreas de alta densidade demográfica, e constitui um dos principais agentes poluidores

do ambiente. O tratamento dessas águas torna-se, portanto, medida essencial à diminuição da poluição ambiental (DE MARIA, 2007).

Os sistemas de tratamento de esgotos normalmente utilizam, de forma otimizada, os fenômenos de biodegradação que já ocorrem na natureza, a exemplo da diluição e da autodepuração, em face da emissão de efluentes nos corpos d'água. Dessa maneira, os métodos mais comuns de tratamento são os biológicos, que utilizam os microrganismos presentes no esgoto para degradar a matéria orgânica e purificar a água (FERREIRA; ANDREOLI, 1999).

Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente por poluentes, nutrientes e contaminantes (ANDREOLI *et al.*, 2006). Quanto maior a eficiência do sistema de tratamento, maior a produção de lodo e a concentração de contaminantes; além disso, a sua composição e a quantidade dependem da constituição do esgoto (ANDREOLI *et al.*, 2003). Para Wanke *et al.* (2002), na medida em que se amplia a cobertura dos sistemas de esgotamento sanitário no Brasil, amplia-se proporcionalmente a demanda por sistemas que assegurem o adequado gerenciamento dos lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos. Segundo Pires (2006), a disposição final do lodo gerado produzido durante o processo de tratamento das águas residuárias é um problema inerente às estações de tratamento de esgoto, estando também associado a um novo problema ambiental.

Pegorine *et al.* (2003) ressaltam que a disposição final do lodo de esgoto vem se caracterizando como um dos problemas ambientais urbanos mais relevantes da atualidade, como reflexo da ampliação das redes de coleta de efluentes urbanos e incremento dos níveis de tratamento. Andreoli e Pinto (2001, pg. XXI) enfatizam: "O destino final dos resíduos produzidos nos sistemas de tratamento de água e esgotos é uma preocupação mundial".

Rezende (2011) menciona que a Política Nacional de Saneamento Básico avalia a presença de tratamento do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgotos no ano 2008, e afirma:

Dentre as 2.304 entidades que declaram tratar os esgotos coletados, apenas 1.294 apontam um volume de lodo gerado, das quais, aproximadamente a metade afirma tratar o lodo, sendo que, em 534 dessas entidades, o lodo é encaminhado a aterros sanitários e, em 136, o lodo é reaproveitado. Verifica-se, pois, a necessidade da prática de ações que promovam a redução do lodo, intrinsecamente ao processo de ampliação da cobertura do tratamento dos esgotos e dos resíduos gerados (REZENDE, 2011, p. 71).

Para Pedroza *et al.* (2010), o gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade de grande complexidade e de alto custo, que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados desses sistemas. Estima-se que a produção de lodo no Brasil esteja entre 150 e 220 mil toneladas por ano.

Além do alto custo, que pode chegar a 50% do custo operacional de uma ETE, a disposição de um resíduo com elevada carga orgânica em aterro agrava ainda mais o problema com o manejo do lixo urbano (PIRES, 2006). No mesmo sentido, Lara *et al.* (1999) admitem que o volume de lodo produzido em uma ETE representa cerca de 1 a 2% do volume de esgoto tratado; além disso o, seu tratamento e a disposição final chegam a atingir entre 30 e 50% do custo operacional da ETE. Andreoli *et al.* (2003) acreditam em que, dos custos operacionais de uma ETE, entre 20 e 60% estão voltados para o manejo do lodo, e ressaltam que o planejamento e a execução do destino final têm sido frequentemente negligenciados nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil.

O manejo do lodo compreende operações como adensamento, desaguamento, estabilização, higienização e secagem, e a sua aplicação está diretamente relacionada ao destino final escolhido para o mesmo (LARA *et al.*, 1999).

2.3 Destino final do lodo de ETE

A destinação final do lodo gerado nas estações de tratamento é a etapa do processo de tratamento que apresenta maiores problemas no processo operacional de uma ETE. Ferreira e Andreoli (1999, pg. 18) destacam os aspectos que devem ser considerados nessa etapa:

- Produção e caracterização do lodo gerado na estação de tratamento.
- Presença de esgotos industriais no sistema, capaz de atribuir características especiais ao lodo, especialmente no que se refere ao conteúdo de metais pesados.
- Quantidade de lodo gerado na estação de tratamento.
- Características especiais que possam interferir com o sistema de disposição final.

Diante desses aspectos, o lodo, em sua destinação final, pode ser disposto no solo, no ar ou na água. Quando disposto na água, usualmente no mar, tem sido alvo de fortes pressões e banimento nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, tendo sido largamente utilizado no passado. A disposição no ar, por meio da incineração e da pirólise, envolve alto investimento e equipamentos sofisticados e onerosos para controle da poluição dos gases resultantes. A disposição no solo é usualmente feita em aterros, todavia pode ser lançado diretamente no solo, o que envolve o tratamento conhecido com "landfarming" ou pode ser aplicado como insumo agrícola. A incorporação no solo é conhecida como reciclagem agrícola, sendo esse destino amplamente difundido atualmente, em função do potencial como insumo agrícola e por representar uma solução definitiva para o problema (ANDREOLI, 2003).

Além das alternativas supracitadas para a disposição final do lodo, Bettiol e Camargo (2006) citam o reuso industrial, principalmente na produção de agregado leve, na fabricação de tijolos e cerâmica, e na produção de cimento, além da conversão em óleo combustível e na recuperação de áreas degradadas.

Concomitantemente, é preciso reduzir a quantidade de lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgotos. De acordo com o processo de tratamento do esgoto, na fase líquida, pode-se recircular o lodo, objetivando-

se alcançar maiores eficiências no tratamento. Na fase sólida, pode-se adensar, promover a digestão e a desidratação do lodo, antes de encaminhá-lo ao seu destino final (REZENDE, 2011).

Avaliadas as opções para destinação final do lodo, mediante as características do mesmo, a reciclagem agrícola é particularmente promissora para países como o Brasil. Primeiramente, pela necessidade da reposição do estoque de matéria orgânica dos solos, devido à alta decomposição ocorrida em condições tropicais (FERREIRA; ANDREOLI,1999). Posteriormente, é ressaltado por Bettiol e Camargo (2006), que o lodo para fins agrícolas é também rico em nutrientes para as plantas, atribuindo a sua utilização ao condicionamento e à fertilização do solo. Por fim, de maneira geral, para Rezende (2011), essa alternativa promove a redução nas despesas de disposição final, além de promover o aumento da vida útil de aterros sanitários.

Em suma, estão apresentadas, no QUADRO 1, as principais formas de destinação do lodo de uma ETE.

QUADRO 1

Principais formas de destinação do lodo de uma ETE

Alternativa	Comentário
Descarga oceânica	Destinação de lodo de esgoto no mar, após pré-condicionamento, através de emissários oceânicos ou de navios lameiros.
Incineração	Processo de decomposição térmica via oxidação, onde os sólidos voláteis do lodo são queimados na presença de oxigênio, convertendo-os em dióxido de carbono e água, sendo que uma parcela dos sólidos fixos é transformada em cinzas.
Aterro sanitário	Disposição de resíduos em valas ou trincheiras, compactadas e recobertas com solo até seu total preenchimento, quando então são seladas. O lodo de esgoto pode ser disposto em aterro sanitário exclusivo ou co-disposto com resíduos sólidos urbanos.
"Landfarming" - disposição superficial no solo	Áreas de disposição de resíduos onde o substrato orgânico do resíduo é degradado biologicamente na camada superior do solo e a parte inorgânica é transformada ou fixada nessa mesma camada de solo.
Recuperação de área degradada	Disposição de altas doses de lodo em locais drasticamente alterados, como áreas de mineração, onde o solo não oferece condições ao desenvolvimento e fixação de vegetação, em função da falta de matéria orgânica e de nutrientes no solo.
Reciclagem agrícola	Disposição do lodo em solos agrícolas em associação ao plantio de culturas.

Fonte: LARA *et al.*, 2001, pg. 466.

Essa autora descreve os aspectos positivos e negativos das formas de destinação do lodo de esgoto descritas anteriormente, conforme QUADRO 2.

QUADRO 2

Vantagens e desvantagens das principais formas de destinação do lodo de uma ETE

Alternativa de disposição	Vantagens	Desvantagens
Descarga oceânica	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Poluição das águas, flora e fauna oceânica
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> • Redução drástica de volume • Esterilização 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos elevados • Disposição das cinzas • Poluição atmosférica
Aterro sanitário	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de grandes áreas • Localização próxima a centros urbanos • Características especiais de solo • Isolamento ambiental • Produção de gases e percolado • Dificuldade de reintegração da área após desativação
"Landfarming"	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação microbiana de baixo custo • Disposição de grandes volumes por unidade de área 	<ul style="list-style-type: none"> • Acúmulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo • Possibilidade de contaminação do lençol freático • Liberação de odores e atração de vetores • Dificuldade de reintegração da área após desativação
Recuperação de áreas degradadas	<ul style="list-style-type: none"> • Taxas elevadas de aplicação • Resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora 	<ul style="list-style-type: none"> • Odores • Limitações de composição e uso • Contaminação do lençol freático, fauna e flora
Reciclagem agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Grande disponibilidade de áreas • Efeitos positivos sobre o solo • Solução a longo prazo • Potencial como fertilizante • Resposta positiva das culturas a fertilização 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitações referentes a composição e taxas de aplicação • Contaminação do solo com metais • Contaminação de alimentos com elementos e substâncias tóxicas e organismos patogênicos • Odores

Fonte: LARA *et al.*, 2001, pg. 467.

2.4 Lodo de esgoto para fins agrícolas

Quando destinado para fins agrícolas, o lodo de esgoto também pode ser denominado como biossólido. Segundo Fernandes (1999), esse termo nomeia o resíduo produzido por estações de tratamento de esgotos sanitários domésticos, quando ele é utilizado de forma útil. O termo biossólido é reservado para um produto estabilizado; caso contrário, são empregados os termos: torta, lodo ou sólidos (ANDREOLI; PINTO, 2001). Dentre as possibilidades de reaproveitamento, destaca-se a reciclagem agrícola, uma vez que essa implica no fornecimento de insumo à agricultura, isso porque o biossólido, de maneira geral, é composto de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio e 2% de fósforo, além de outros nutrientes. O uso agrícola do lodo de esgoto é uma alternativa que apresenta vantagens ambientais, quando comparado a outras práticas de destinação final, considerando que a aplicação do lodo de esgoto na agricultura se enquadra nos princípios de reutilização de resíduos de forma ambientalmente adequada (BRASIL, 2006).

Os principais fatores intrínsecos ao lodo que devem ser observados quando intencionados para reciclagem agrícola são: o valor agrônômico, o conteúdo de metais pesados, o perfil sanitário, a umidade, a consistência e a estabilidade do resíduo (ILHENFELD *et al.*, 1999).

O valor agrônômico do lodo de esgoto está associado principalmente ao teor de nutrientes e ao conteúdo de matéria orgânica, demonstrado na TAB. 2:

TABELA 2

Composição média de tipos de lodo do Paraná e outros materiais orgânicos

Insumo	Água (%)	Matéria orgânica (%)	N (%)	P (%)	K (%)
Lodo Aeróbio Caleado	85,0	69,4	2,50	0,90	0,20
Lodo Anaeróbio	65,0	36,2	1,60	0,20	0,05
Esterco de Poedeiras	-	-	2,00	2,00	2,00
Esterco de Bovinos	83,5	14,6	0,30	1,17	0,10
Esterco de Equinos	75,8	21,0	0,44	0,32	0,35
Esterco de Ovinos	65,0	31,4	0,60	0,30	0,15
Esterco de Suínos	81,0	12,0	0,60	0,60	0,30

Fonte: ILHENFELD *et al.*, 1999, pg. 47.

Segundo Ilhenfeld *et al.* (1999), quando aplicado em taxas suficientes para suprir as necessidades de nitrogênio das culturas, o lodo também oferece as quantidades de micronutrientes suficientes para suprir as demandas das plantas. Em menores quantidades, tem-se boro, molibdênio, cloro, magnésio e enxofre, e, em quantidades maiores, tem-se cobre, zinco e manganês. Além disso, o lodo apresenta matéria orgânica que, no solo, em longo prazo, melhora a resistência dos mesmos a erosão e a compactação, além de promover aumento da vida microbiana e da resistência das plantas a pragas e a doenças.

Os lodos digeridos aerobiamente tendem a concentrar mais os nutrientes e patógenos; enquanto os lodos anaeróbios são naturalmente menos concentrados. Porém, mesmo após a calagem, onde há expressiva perda de nitrogênio (em torno de 50%), tanto os lodos aeróbios quanto os lodos anaeróbios ainda apresentam teores altos de nitrogênio (N), médios de fósforo (P) e baixos de potássio (K). No processo de compostagem as perdas são menores, uma vez que os nutrientes são incorporados aos tecidos dos microrganismos durante o processo de decomposição e estabilização do resíduo. Por outro lado, a calagem enriquece o lodo com cálcio (Ca) e confere, ao resíduo, características de corretivo da acidez do solo (ILHENFELD *et al.*, 1999, p. 47).

A calagem reflete sobre o potencial do lodo como corretivo da acidez dos solos, que, por outro lado, pode se caracterizar como fator limitante da quantidade a ser aplicada.

Contudo o lodo de esgoto também pode conter elementos de características indesejáveis sob o ponto de vista agrônômico, tais como: desbalanço entre nutrientes, presença de organismos patogênicos, poluentes orgânicos recalcitrantes, elevada concentração de sais solúveis e metais pesados (ANDRADE; MATTIAZZO, 2000). Esses poluentes podem ser transferidos ao solo, às plantas e às águas subterrâneas e superficiais, por meio de processos de escoamento superficial, lixiviação e absorção, bem como ingeridos pelos animais por meio do solo, água e plantas (ANDREOLI; PEGORINI, 2003).

A concentração das impurezas e do material potencialmente poluidor no lodo é fator inerente ao processo de tratamento, que pretende justamente

obter esse subproduto, o lodo. Dessa maneira, o lodo é o concentrador dos nutrientes, da matéria orgânica, dos metais pesados, microrganismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos e de outros elementos derivados do esgoto que, pelo risco sanitário e ambiental, torna-se indesejado (GALDOS *et al.*, 2004). Toda essa composição depende da origem do esgoto, do processo de tratamento e do seu caráter sazonal, podendo oferecer riscos ao meio ambiente, caso não sejam controlados e monitorados adequadamente.

Nesse contexto, o lodo de esgoto é uma importante forma de garantir o interesse contínuo dos agricultores, decorrente dos benefícios provindos do mesmo, no entanto a presença de elementos indesejáveis pode inviabilizar todo o processo. Essa alternativa alia baixo custo a impacto ambiental positivo, quando é realizado dentro de critérios seguros. Ambientalmente, é a solução mais correta, pois promove o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento no ciclo dos elementos (FERREIRA; ANDREOLI, 1999). O CONAMA estabelece os limites legais para utilização do lodo de esgoto na agricultura, mediante a Resolução n° 375, de 29 de agosto de 2006.

2.4.1 Resolução n° 375, de 29 de agosto de 2006

A Resolução n° 375, de 29 de agosto de 2006, tem por objetivo definir critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Nela, também são definidos os aspectos do lodo de esgoto que devem ser caracterizados, sendo eles: potencial agronômico; substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas; indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos, e estabilidade. Diante desses aspectos, são estabelecidos nessa resolução, os parâmetros e limites toleráveis para a aplicação do lodo de esgoto na agricultura, bem como as culturas aptas e os locais permitidos para aplicação a do lodo de esgoto.

No que diz respeito aos locais aptos a aplicação do lodo de esgoto, a Resolução citada acima, no Artigo 15, define que não será permitida a aplicação desse material ou produto derivado nas seguintes áreas:

- Em unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental - APA;
- Em Áreas de Preservação Permanente - APP;
- Em Áreas de Proteção aos Mananciais - APMs definidas por legislações estaduais e municipais e em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;
- No interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidos na Portaria DNPM nº 231, de 1998;
- Num raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;
- Numa distância mínima de 15 m de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;
- Em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse: 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação; 15% no caso de aplicação superficial com incorporação; 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal; 25% no caso de aplicação em covas;
- Em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;
- Em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno; e
- Em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes (BRASIL, 2006, pg. 8).

Além dessas condicionantes, nesse mesmo Artigo, é ressaltado que o lodo de esgoto ou produto derivado poderá ser utilizado na zona de amortecimento de unidades de conservação, desde que sejam respeitados as restrições e os cuidados de aplicação previstos na Resolução nº 375, de 29 de Agosto de 2006, bem como as restrições previstas no Plano de Manejo, mediante prévia autorização do órgão responsável pela administração da unidade de conservação. No caso da identificação de qualquer efeito adverso decorrente da aplicação de lodos de esgoto ou

produto derivada realizada em conformidade com essa Resolução, e com vistas a proteger a saúde humana e o ambiente, as autoridades competentes deverão estabelecer, imediatamente após a mencionada identificação, requisitos complementares aos padrões e critérios insertos nessa Resolução.

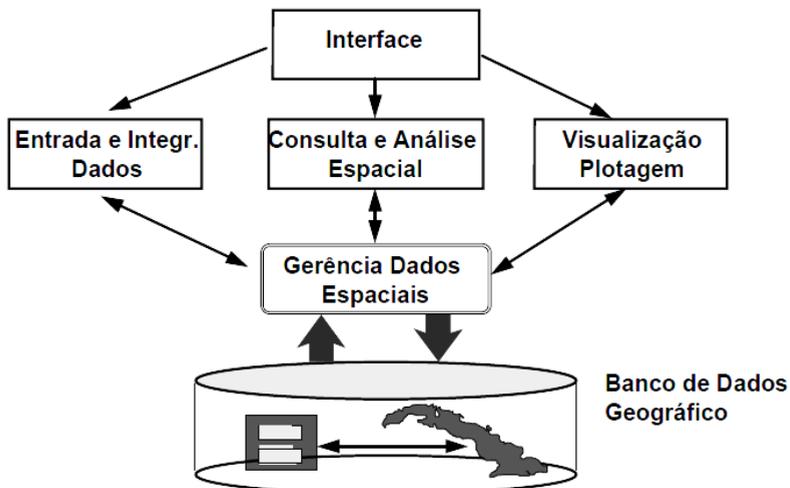
Avaliados todas as condicionantes supracitadas, o Sistema de Informações Geográficas é uma ferramenta apta para a identificação das áreas passíveis da utilização de biossólidos provenientes de Estações de Tratamento de Esgotos. Isso porque, segundo Taques (2011), para análise de diversas variáveis, é necessário o uso de ferramentas computacionais, mais especificamente o SIG, que dentre outras funcionalidades auxilia os estudos e a avaliação da potencialidade e aptidão de determinada região para a aplicação do lodo de esgoto com finalidade agrícola. Como variáveis esse autor cita os parâmetros pedológicos, hidrológicos, geológicos, florísticos e urbanísticos, que, uma vez armazenados em um SIG, deverão ser processados, a fim de obter respostas quanto à potencialidade e à aptidão para aplicação do lodo tratado de ETE.

2.5 Sistema de Informações Geográficas

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um modelo matemático dinâmico, construído com um banco de dados digitais gerenciados, para facilitar a atualização e a aplicação dos dados georreferenciados de infinitas camadas de informações no planejamento e na otimização de uma determinada tarefa. A sua principal função é armazenar, recuperar, analisar e gerar mapas e outros produtos desejados em um sistema de *software* implantado no computador para aprimorar o plano de manejo dinâmico (LIU, 2007).

De forma abrangente, o SIG é dividido em 5 (cinco) componentes, sendo eles: interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de consulta e análise espacial; visualização e plotagem; armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos) (DAVIS; CÂMARA, 2001), conforme FIG. 3.

FIGURA 3 - Componentes de um Sistema de Informação Geográfica



Fonte: DAVIS e CÂMARA, 2001.

Segundo Liu (2007) cinco tipos de dados podem ser gerados em um banco de dados de um SIG, quais sejam: Mapas Temáticos, Mapas Cadastrais, Redes, Imagens e Modelos Numéricos de Terreno (MNT), sendo que:

- Dados temáticos: representação matricial ou vetorial.
- Dados cadastrais: pontos georreferenciados com coordenadas vetoriais e seus atributos no banco de dados.
- Redes: forma em linhas vetoriais georreferenciadas com a topologia em arco-nó e seus atributos no banco de dados.
- Imagens de sensoriamento remoto: imagens digitais georreferenciadas.
- Modelos numéricos de terreno: MNT em grades retangulares com representação matricial ou grades triangulares com representação vetorial e topologia arco-nó ou isolinhas ou representação vetorial sem topologia (LIU, 2007, pg. 812).

Nesse contexto, a aplicação do SIG tornou-se uma ferramenta poderosa e eficiente que permite não somente mais rigor e precisão nas análises, mas também a integração que possibilita o armazenamento e o gerenciamento desses dados como parte do conjunto total das geoinformações disponíveis e registradas (EHLERS, 2007). Taques (2011)

destaca que, para análise de diversas variáveis, é necessário o uso de ferramentas computacionais, mais especificamente de Sistemas de Informações Geográficas.

Contudo, a acurácia e a precisão dos dados processados e gerados em ambiente SIG estão vinculadas à escala dos dados inseridos no banco de dados. A observância do nível de detalhamento das variáveis de interesse é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis, devendo-se sempre respeitar a escala das variáveis. No Brasil, a falta de informações espacializadas principalmente com um nível maior de detalhamento é fator que induz à generalização dos dados inseridos no SIG.

CAPÍTULO 2 – DETERMINAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DE ÁREAS APTAS À APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTO COMO INSUMO AGRÍCOLA: ESTUDO DE CASO DO SETOR C2 NO PERÍMETRO DE IRRIGAÇÃO JAÍBA

RESUMO

Os locais potencialmente aptos para aplicação do lodo de esgoto como insumo agrícola são regulamentados pela Resolução CONAMA nº 375, de agosto de 2006. Nesse instrumento legal, são descritos quais atributos tornam um solo inapto a receber lodo de esgoto. Diante dos aspectos locacionais determinados pelo art. 15º desse instrumento legal, o Sistema de Informações Geográficas é uma ferramenta fundamental que deve ser considerada, quando se pretende espacializar uma variável ou um conjunto de variáveis. Nesta pesquisa, objetivou-se identificar as áreas potencialmente aptas para a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas no Setor C2, que compõe 10.473 ha do Perímetro de Irrigação do Jaíba. As classes de aptidão dos solos para aplicação de lodo de esgoto seguiram proposta metodológica adaptada de Giasson e Tedesco. Os dados foram processados no programa ArcGis. Verificou-se que apenas 9% (882 ha) da área de estudo apresentam boa aptidão à aplicação de lodo de esgoto, seguida de 69% (7.253 ha) em condição regular, 4% (410 ha) em situação restrita e 18% (1.928 ha) apresentaram-se como inaptas. O Argissolo Vermelho-Amarelo é o que apresenta melhor aptidão dentre os solos estudados. As limitações para aplicação do lodo de esgoto no solo foram determinadas principalmente pela textura leve dos solos presentes na região.

Palavras-chave: Biossólido. Sensoriamento remoto. CONAMA nº 375, de 2006. Poluição do solo.

**CHAPTER 2 - DETERMINATION AND SPATIALIZATION OF AREAS
SUITABLE FOR THE APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE AS
AGRICULTURAL INPUT: A CASE STUDY OF C2 SECTOR IN THE JAÍBA
PROJECT PERIMETER IRRIGATION**

ABSTRACT

The potentially suitable locations for the application of sewage sludge as agricultural input are regulated by the CONAMA Resolution No. 375 of August 2006. In this legal instrument there is a description of characteristics which classifies a soil unsuitable to receive sewage sludge. Before locational aspects determined by the article 15 of this legal instrument, the Geographic Information System is an essential tool that should be considered when it is intended to spatialize a variable or a set of variables. This work aimed to identify the potentially suitable areas for the application of sewage sludge on agricultural soils in the Sector C2, which comprises 10,473 ha of the Jaíba irrigation perimeter. The soil suitability classes for sewage sludge application followed the methodological approach adapted from Giasson and Tedesco. The data were processed in the ArcGIS program. It was found that only 9% (882 ha) of the study area presents suitability for the application of sewage sludge, followed by 69% (7,253 ha) in regular condition, 4% (410 ha) in restricted situation and 18% (1,928 ha) was considered unfit. The Ultisol is the one which fits the best among the studied soils. The limitations for the application of sewage sludge in the soil were determined mainly by the light texture of soils present in the region.

Keywords: Biosolids. Remote sensing. CONAMA nº 375 of 2006. Soil pollution.

1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é um produto inerente às Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), sendo essa necessária devido à degradação intensa dos recursos hídricos. Esse resíduo, em sua destinação final, pode ser disposto no solo, mediante critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375, de 2006. A indicação das restrições locacionais e da aptidão do solo das áreas de aplicação consta do artigo 15 dessa Resolução, e somente poderá ocorrer por meio da existência de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) (BRASIL, 2006).

A classificação da aptidão dos solos para reciclagem agrícola do lodo de esgoto tem como finalidade não permitir que a disposição final desse produto ponha em risco o meio ambiente, a saúde humana e animal (LARA *et al.*, 1999). De acordo com Pegorini *et al.* (2001), a magnitude desses riscos está diretamente relacionada à qualidade do lodo, à taxa de aplicação e à aptidão das áreas de aplicação. Os dois primeiros fatores são importantes para o controle da quantidade dos elementos, das substâncias contaminantes e dos organismos patogênicos aplicados aos solos. Já a aptidão das áreas, está relacionada à minimização dos riscos de interferência desses elementos no solo e, conseqüentemente, sobre o homem e o seu ambiente.

Segundo Evanylo (2009), as características físicas do solo que influenciam as práticas de aplicação de lodo de esgoto no solo incluem o seu relevo, a permeabilidade, a taxa de infiltração, os padrões de drenagem, a profundidade para as águas subterrâneas, e a proximidade com a superfície de corpos d'água. São considerados como locais potencialmente inadequados as áreas cercadas por lagoas, lagos, rios e córregos, zonas úmidas e pântanos, áreas íngremes com relevo acentuado, geologia indesejável, solos pedregosos e rasos, áreas de importância histórica ou arqueológica, e outras áreas ambientalmente sensíveis, como as várzeas.

Nesse contexto, os levantamentos pedológicos tornam-se atrativos, uma vez que são uma compilação de muitas das informações do solo. No entanto Lepsch (2013), atenta para a necessidade de levantamentos de solos

em escalas maiores que 1:25.000, uma vez que no Brasil geralmente as bases de dados de solos são apresentadas em escalas pouco detalhadas.

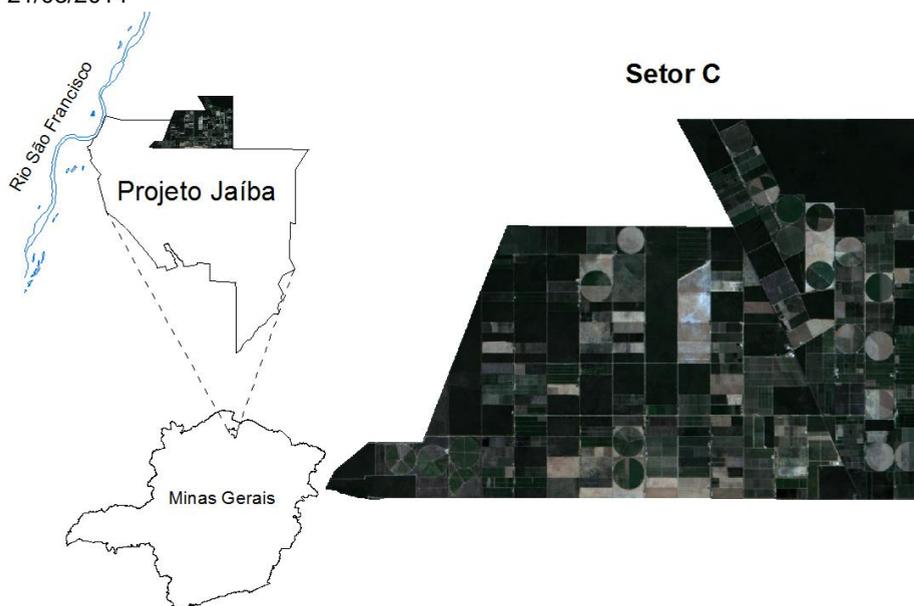
A definição das terras agrícolas adequadas à aplicação do lodo de esgoto é uma questão complexa, que envolve um grande conjunto de critérios, que são baseados em dados da literatura, da legislação e conhecimento de especialistas (PASSUELO *et al.*, 2011). A identificação dessas áreas aptas pode ser realizada com a ajuda de ferramentas para tomada de decisão espaciais, mais especificamente o SIG, uma vez que permitem identificar, por meio técnicas de geoprocessamento, os melhores locais para a aplicação de lodo de esgoto de uma determinada região, provendo informações que subsidiem a tomada de decisão sobre as melhores áreas para aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola. O uso dessa ferramenta computacional permite não somente mais rigor e precisão nas análises, mas também a integração, que possibilita o armazenamento e o gerenciamento desses dados como parte do conjunto total das geoinformações disponíveis e registradas. A presente pesquisa teve como objetivo identificar e mapear as áreas potencialmente mais e menos aptas para aplicação de lodo de esgoto no Setor C2, que apresenta 10.473 ha inseridos no Perímetro de Irrigação do Jaíba, que abrange uma área de 100 mil ha, dos quais 65 mil ha são de áreas irrigadas, que se destacam no cenário nacional na produção agrícola, principalmente no cultivo de fruticulturas. A estimativa da localização dessas áreas potenciais garante que parte do arcabouço legal para utilização desse material na agricultura possa ser respeitado, uma vez que deve-se observar também as condicionantes relacionadas aos parâmetros e aos limites toleráveis, bem como as culturas aptas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Situação, limites e características gerais

A área de estudo está localizada na região norte do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 15°07'00"S e 15°10'00"S de Latitude, e 43°56'00"W e 43°47'00"W de Longitude, FIG. 4:

FIGURA 4 - Situação geográfica do Setor C2 do Projeto Jaíba, no estado de Minas Gerais. Imagem LandSat 8, composição RGB sob as bandas 432, adquiridas em 21/03/2014



Fonte: LIMA, 2015.

O clima predominante na região, segundo a classificação de Köppen, é o Clima Tropical de Savana (Aw), com média pluviométrica anual de aproximadamente 1.000 mm.

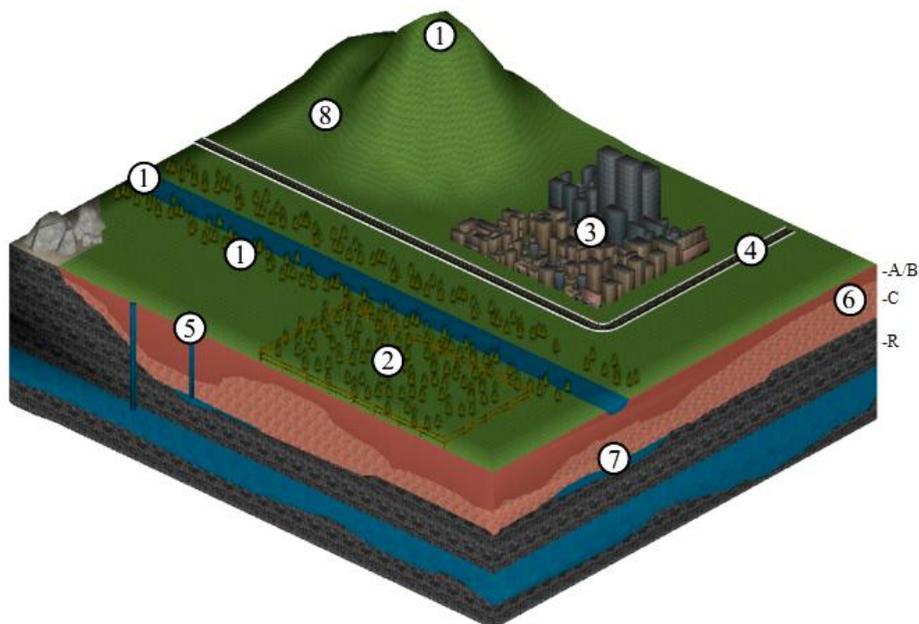
Trata-se de uma região semiárida, com relevo quase todo plano, com parcelas suaves onduladas. A geologia é caracterizada por recobrimentos sedimentares do Terciário e Quaternário sobre rochas do Pré-Cambriano (Grupo Bambuí). A vegetação natural é uma transição dos biomas cerrado e caatinga, com espécies caducifólias e arbustivas hiperxerófilas, estando

essas últimas relacionadas a solos de textura acentuadamente arenosa. A rede hidrográfica está inserida no alto curso do rio São Francisco. A litologia, com característica predominante sedimentar, interfere no escoamento e no padrão de drenagem. O material originário é argilo-arenoso, areno-argiloso e arenoso (CODEVASF, 1987).

2.2 Metodologia

Para a determinação das áreas aptas à aplicação do lodo de esgoto na agricultura, utilizou-se o ambiente SIG, mais especificamente, o programa ArcGis, versão 10.1. Recorreu-se a operações de conjuntos para unir, juntar ou dissolver os geocampos existentes, sendo representados no Arcgis pelas opções *union*, *merge* e *dissolve*, respectivamente. Os critérios de classificação para obtenção das áreas susceptíveis à aplicação do lodo de esgoto foram extraídos de BRASIL (2006), estando as principais variáveis apresentadas no bloco diagrama da FIG. 5. Destaca-se que além dos locais aptos, também é necessário respeitar os parâmetros e os limites toleráveis, assim como as culturas aptas.

FIGURA 5 - Restrições locacionais e da aptidão do solo das áreas de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado



- 1- Áreas de Preservação Permanente.
- 2- Unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental.
- 3- Raio mínimo de 100 m de residências.
- 4- Raio mínimo de 15 m de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais.
- 5- Raio mínimo de 100 m de poços rasos.
- 6- Parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C.
- 7- Áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno.
- 8- Em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:
 - 10% no caso de aplicação sem incorporação;
 - 15% no caso de aplicação com incorporação;
 - 18% no caso de aplicação subsuperficial ou em sulcos e superficial sem incorporação e, áreas de produção florestal;
 - 25% no caso de aplicação em covas.

Fonte: LIMA, 2015.

Com base nesses critérios apresentados por Giasson e Tedesco (2010), determinaram-se as classes de aptidão dos solos para aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola, conforme, QUADRO 3:

QUADRO 3

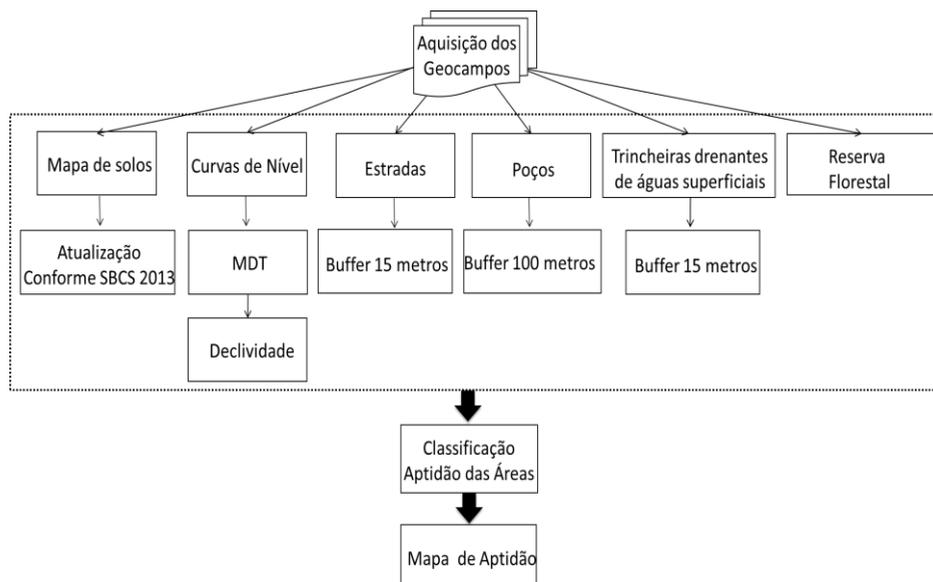
Classes de aptidão para aplicação de lodo de esgoto com insumo agrícola	
Inapto	Solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C, Distância mínima de 15 metros do perímetro urbano, Unidades de Conservação, Área de Preservação Permanente, Distância mínima de 15 metros de vias de domínio público, Raio mínimo de 100 m de poços, Textura arenosa; mal ou muito mal drenados, Área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse 45%.
Restrito	Textura muito argilosa, Imperfeitamente ou excessivamente drenados,; Relevo forte ondulado (20 a 45%), 50 a 100 cm de espessura até o horizonte C.
Regular	Textura média ou siltosa, Solos fortemente ou acentuadamente drenados, Relevo ondulado (8-20%), 100 a 150 cm de espessura até o horizonte C.
Boa	Textura argilosa, Solos bem ou moderadamente drenados, Relevo plano (<3 % declividade), suave ondulado (3-8% declividade), >150 cm de espessura até o horizonte C.

Fonte: Adaptado de GIASSON e TEDESCO, 2010.

Para a determinação dos critérios que compõem as classes de aptidão, utilizaram-se geocampos extraídos da base de dados da CODEVASF, como curvas de nível com equidistância de 1 metro, estradas, poços artesianos, unidades de conservação e áreas de preservação permanente. Os dados do mapa de solos são provenientes da CODEVASF (1987), escala de 1:20.000, que teve o nome referente à classe das unidades de mapeamento atualizada conforme o SiBCS (EMBRAPA, 2014).

O fluxograma a seguir, FIG. 6, apresenta as principais etapas que contemplam todo o processo metodológico:

FIGURA 6 - Principais etapas do processo metodológico



Fonte: LIMA, 2015.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Solos bem desenvolvidos, profundos apresentam menores riscos de translocação e distribuição do lodo de esgoto e seus subprodutos ao longo do perfil de solo, que atua como meio filtrante, retendo e dificultando a lixiviação desses compostos que podem contaminar as águas subterrâneas. Deve-se atentar também aos elementos de alta solubilidade, como sais de nitrogênio e potássio, que apresentam maior mobilidade e podem ser mais facilmente translocados. Solos muito arenosos, por exemplo, são muito permeáveis, permitem a lixiviação do lodo de esgoto com facilidade. Por outro lado, solos muito argilosos dificultam a drenagem interna. Todavia, quanto mais profundo o lençol freático, menor o risco de contaminação. Perfis profundos de solo implicam em mais tempo de contato entre os elementos de lodo e as partículas do solo, minimizando os riscos de contaminação do lençol freático por lixiviação. Solos com má drenagem e hidromorfismo indicam uma forte tendência de acumulação de lodo de esgoto. Estas condições são favoráveis à manutenção de alguns patógenos no solo e prejudiciais à atividade de degradação biológica da matéria orgânica. Esses solos ocorrem à montante e margens dos rios, e apresentam lençol freático muito próximo à superfície, eventualmente aflorando em determinadas épocas do ano, apresentando alto risco de contaminação dos corpos hídricos (Andreoli *et al.*, 2007 e Lara *et al.*, 1999).

Os Latossolos apresentam características favoráveis à aplicação do lodo de esgoto (ANDREOLI *et al.*, 2000). Nesse contexto, dentre os solos encontrados no Setor C2 do Projeto Jaíba, destacam-se solos desta ordem, representados pelas unidades de mapeamento: LAd1, LAd2, LAd3, LVAd, LVAd2, LVAd5, com ocorrência em aproximadamente 80% da área. As principais características físico-químicas desses solos são apresentadas a seguir, TAB. 3.

TABELA 3

Principais atributos físico-químicos dos Latossolos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba

LAd1 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico, A moderado, textura arenosa/média, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano					
Horizonte	A1	A3	B1	B21	B22
Profundidade (cm)	0-14	14-34	34-86	86-163	163-200+
Textura	Ar.Fr.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar
K (cm h ⁻¹)	>50,0	25,4	11,0	5,6	5,3
V (%)	11	10	14	10	17
T (cmol _c dm ⁻³)	3,77	2,78	2,53	3,35	2,29
LAd2 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico, A moderado, textura arenosa/média leve, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano					
Horizonte	A	A3	B1	B2	
Profundidade (cm)	0-15	15-40	40-81	81-200+	
Textura	Ar.Fr.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Ar.	
K (cm h ⁻¹)	>50,0	>50,0	19,5	12,5	
V (%)	35	7	8	7	
T (cmol _c dm ⁻³)	4,84	3,36	3,59	3,39	
LAd3 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico, A moderado, textura média/média, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano					
Horizonte	A1	A3	B1	B21	B22
Profundidade (cm)	0-20	20-42	42-92	92-118	118-200+
Textura	Fr.Ar.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.
K (cm h ⁻¹)	36,3	23,1	9,0	5,8	3,6
V (%)	13	7	5	8	13
T (cmol _c dm ⁻³)	4,26	3,27	2,66	2,21	2,15
LVAd1 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A moderado, textura arenosa/média leve, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano					
Horizonte	A1	A3	B1	B21	B22
Profundidade (cm)	0-16	16-41	41-85	85-146	146-200+
Textura	Ar.	Ar.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Ar.
K (cm h ⁻¹)	>50,0	>50,0	21,2	12,0	11,1
V (%)	24	6	11	12	15
T (cmol _c dm ⁻³)	3,26	2,48	2,63	2,46	1,97
LVAd2 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A moderado, textura arenosa/média, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano					
Horizonte	A1	A3	B1	B21	B22
Profundidade (cm)	0-15	15-53	53-102	102-174	174-200+
Textura	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.
K (cm h ⁻¹)	19,0	13,7	4,3	3,5	3,0
V (%)	19	7	13	13	11
T (cmol _c dm ⁻³)	3,87	4,30	3,04	2,88	3,17
LVAd5 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A moderado, textura arenosa/média, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano					
Horizonte	A1	A3	B1	B2	
Profundidade (cm)	0-18	18-45	45-105	105-200+	
Textura	Ar.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Ar.	
K (cm h ⁻¹)	>50,0	25,8	14,3	7,6	
V (%)	15	10	10	18	
T (cmol _c dm ⁻³)	4,47	3,68	3,51	2,66	

K = Condutividade Hidráulica / V(%) = Saturação de Bases / T = CTC a pH 7 / Ar.: arenosa; Ar.Fr.: areia franca; Fr.Ar.: franco-arenosa; Arg.Ar.: argila-arenosa; Fr.Arg.: franco-argilosa; Fr.Arg.Ar.: franco-argiloarenosa; Arg.: argila; M.Arg.: muito argilosa.

Fonte: Adaptada de CODEVASF, 1987.

Os Latossolos são muito profundos, com horizonte B com mais de 200 cm de espessura, bem drenados, não hidromórficos, com textura arenosa/média e média/média, sob um relevo plano, com ausência de pedregosidade e erosão aparente (CODEVASF, 1987). Entretanto, pelas características texturais, que se aproximam das classes texturais dos Neossolos Quartzarênicos, faz com que esses solos apresentem um regular potencial à aplicação deste resíduo. São solos que apresentam uma capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7 classificada, segundo Alvarez *et al.* (1999), como baixa, com valores médios menores do que $4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o que favorece a lixiviação dos compostos presentes no lodo de esgoto, uma vez que a adsorção desses compostos pelos colóides presentes no solo é muito baixa.

Os Argissolos representam 15% da área de estudo, sendo divididos entre Argissolos Vermelho-Amarelos e Argissolos Acinzentados. Esse último ocupa 5% da área total e compreende solos profundos, com horizonte B superior a 200 cm, ausentes de pedregosidade. No entanto apresentam certo grau de hidromorfismo durante uma parte do ano, em decorrência da restrição de drenagem, imposta pelas condições de relevo ligeiramente deprimido, além de estarem situados em áreas de baixadas, em relevo plano e apresentarem erosão aparente (CODEVASF, 1987). São, portanto, solos restritos à aplicação do lodo de esgoto.

As principais características dos Argissolos Acinzentados estão expostas na TAB. 4.

TABELA 4

Principais atributos físico-químicos do Argissolos Acinzentados presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba

PACd1 - ARGISSELO ACINZENTADO Distrófico plíntico, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A1	A21	A22	B1t	B2t	B3t pl
Profundidade (cm)	0-12	12-40	40-80	80-124	124-200	200-210
Textura	Ar.	Ar.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.
K (cm h ⁻¹)	36,1	21,6	17,4	8,5	5,6	3,0
V (%)	67	26	24	28	40	49
T (cmol _c dm ⁻³)	4,45	2,02	2,19	3,30	3,93	4,06
PACd2 - ARGISSELO ACINZENTADO Distrófico plíntico, A moderado, textura argilosa/muito argilosa, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A1	B1t	B21t	B22t	B23t pl	
Profundidade (cm)	0-10	10-41	41-101	101-158	158-200+	
Textura	Arg.Ar.	Arg.	M.Arg.	M.Arg.	Arg.	
K (cm h ⁻¹)	11,6	5,8	3,8	7,6	8,5	
V (%)	55	58	52	30	31	
T (cmol _c dm ⁻³)	12,61	8,03	7,88	8,64	7,30	
PACe1 - ARGISSELO ACINZENTADO Eutrófico plíntico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A11	A12	B1t	B21t	B22t pl	B3t pl
Profundidade (cm)	0-13	13-35	35-61	61-92	92-157	157-210
Textura	Fr.Arg.Ar.	Arg.Ar.	Arg.	Arg.	Arg.	M.Arg.
K (cm h ⁻¹)	10,3	8,4	7,1	8,4	7,3	6,9
V (%)	82	65	74	77	85	80
T (cmol _c dm ⁻³)	18,43	9,37	9,72	10,19	9,98	10,80
PACe3 - ARGISSELO ACINZENTADO Eutrófico plíntico, A moderado, textura argilosa/muito argilosa, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A11	A12	B1t	B2t pl	B3t pl	
Profundidade (cm)	0-10	10-31	31-68	68-146	146-200+	
Textura	Fr.Arg.	Arg.	M.Arg.	M.Arg.	M.Arg.	
K (cm h ⁻¹)	3,0	3,5	2,4	1,9	1,1	
V (%)	70	79	83	87	89	
T (cmol _c dm ⁻³)	14,70	10,70	10,86	11,17	10,56	

K = Condutividade Hidráulica / V(%) = Saturação de Bases / T = CTC a pH 7 / Ar.: arenosa; Ar.Fr.: areia franca; Fr.Ar.: franco-arenosa; Arg.Ar.: argila-arenosa; Fr.Arg.: franco-argilosa; Fr.Arg.Ar.: franco-argiloarenosa; Arg.: argila; M.Arg.: muito argilosa.

Fonte: Adaptada de CODEVASF, 1987.

Já os locais com Argissolos Vermelho-Amarelos, são caracterizados como bem profundos, relevo plano, moderadamente drenado, textura média sob argilosa, com presença de solos, por exemplo, com horizonte B latossólico abaixo do horizonte B textural dentro de 150 cm da superfície do solo, o que corrobora para que solos dessa classe apresentem comumente uma camada de permeabilidade lenta no *solum*, que, no entanto, não se caracteriza devagar o suficiente para que esse permaneça molhado por período significativo. Os valores médios de CTC a pH 7 desses solos apontam para solos pertencentes, em geral, à classe de CTC média, segundo classificação de Alvarez *et al.* (1999), cujo intervalo varia de 4,31 a

8,60 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. As áreas de ocorrência desses solos são consideradas, dentre todas da área de estudo, como as com melhor potencial para aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola e correspondem a 10% da área total. Os principais atributos físico-químicos desses solos são apresentados a seguir, TAB. 5.

TABELA 5

Principais atributos físico-químicos dos Argissolos Vermelho-Amarelos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba

(continua)

PVAe1 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A1	A3	B1t	B21t	B22t	B23t
Profundidade (cm)	0-14	14-28	28-60	60-91	91-157	157-200
Textura	Fr.Ar.	Fr. Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Arg.Ar.	Arg.Ar.
K (cm h^{-1})	11,3	10,8	14,0	5,1	3,4	2,6
V (%)	76	85	88	100	100	100
T ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	11,06	5,72	4,29	4,20	4,24	4,08
PVAe2 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico latossólico plíntico, A moderado, textura média leve/média, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A1	B1t	B21t	B22t	B3t pl	
Profundidade (cm)	0-19	19-52	52-100	100-150	150-200+	
Textura	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Arg.Ar.	
K (cm h^{-1})	8,5	12,0	7,5	5,0	4,2	
V (%)	67	83	78	77	83	
T ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	8,61	4,17	3,99	4,33	5,27	
PVAe3 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico plíntico, A moderado, textura média leve/média, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A1	A3	B1t	B21	B22t	B23t
Profundidade (cm)	0-16	16-45	45-76	76-123	123-170	170-200+
Textura	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.
K (cm h^{-1})	50,0	19,2	12,8	17,7	7,0	3,6
V (%)	78	79	83	62	54	50
T ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	5,33	5,60	3,06	4,19	4,57	3,53
PVAe5 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abruptico, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta caducifólia, relevo plano e suave ondulado						
Horizonte	A1	A21	A22	A23	B21t	B22t
Profundidade (cm)	0-20	20-57	57-103	103-140	140-180	180-190
Textura	Ar.	Ar.	Ar.	Ar.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.
K (cm h^{-1})	>50,0	23,4	22,8	20,5	9,7	10,4
V (%)	61,0	50	35	50	59	66
T ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	3,00	2,00	1,78	1,00	3,69	4,10
PVAd1 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico, A moderado, textura arenosa/média, fase caatinga hipoxerófia, relevo plano						
Horizonte	A1	A3	B1t	B21t	B22t	
Profundidade (cm)	0-18	18-51	51-86	86-140	140-200	
Textura	Ar.Fr.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	
K (cm h^{-1})	>50,0	16,6	8,5	4,1	3,0	
V (%)	57	19	25	19	23	
T ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	4,27	2,48	3,40	3,38	3,57	

TABELA 5

Principais atributos físico-químicos dos Argissolos Vermelho-Amarelos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba

(conclusão)

PVAd2 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico, A moderado, textura média/argilosa, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano						
Horizonte	A1	A3	B1t	B21t	B22t	
Profundidade (cm)	0-17	17-36	36-91	91-144	144-200+	
Textura	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Arg.Ar.	Arg.Ar.	
K (cm h ⁻¹)	7,1	10,0	4,8	1,5	1,8	
V (%)	44	19	9	8	11	
T (cmol _c dm ⁻³)	4,48	4,72	3,85	4,28	3,87	
PVAd3 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico, A moderado, textura arenosa/média, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A11	A12	A21	A22	B1t	B2t pl
Profundidade (cm)	0-11	11-40	40-80	80-110	110-148	148-200+
Textura	Ar.	Ar.	Ar.Fr.	Ar.Fr.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.
K (cm h ⁻¹)	38,3	16,3	13,4	13,6	8,5	8,4
V (%)	67	34	41	32	51	48
T (cmol _c dm ⁻³)	6,04	2,52	1,69	1,97	2,71	3,90
PVAd4 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta caducifólia, relevo plano						
Horizonte	A1	A3	B11t	B12t	B21t	B22t
Profundidade (cm)	0-12	12-34	34-74	74-127	127-160	160-200+
Textura	Fr.Ar.	Fr.Ar.	Fr.Arg.Ar.	Arg.Ar.	Arg.Ar.	Arg.
K (cm h ⁻¹)	6,6	8,0	3,5	2,9	2,4	2,4
V (%)	36	35	41	41	42	48
T (cmol _c dm ⁻³)	8,04	5,63	5,96	6,82	5,73	9,38

K = Condutividade Hidráulica / V(%) = Saturação de Bases / T = CTC a pH 7 / Ar.: arenosa; Ar.Fr.: areia franca; Fr.Ar.: franco-arenosa; Arg.Ar.: argila-arenosa; Fr.Arg.: franco-argilosa; Fr.Arg.Ar.: franco-argiloarenosa; Arg.: argila; M.Arg.: muito argilosa.

Fonte: Adaptada de CODEVASF, 1987.

Os Neossolos Quartzarênicos são solos arenosos com horizonte A sob C, essencialmente arenoquartzoso, sem hidromorfismo. Os Neossolos Quartzarênicos dessa área apresentam do horizonte A ao horizonte C espessura inferior a 50 cm. Portanto, não são recomendados para a aplicação de lodo de esgoto. Entretanto são solos bastante profundos, com profundidade de no mínimo 150 cm a partir da superfície (EMBRAPA, 2014), o que os difere por exemplo de Neossolo Regolítico ou Litólico, que são pouco desenvolvidos. SAMPAIO *et al.* (2012) relatam que, ao aplicar lodo de esgoto em Neossolo Quartzarênico, esse teve suas propriedades físicas melhoradas, observando-se formação de agregados até 12 meses após a aplicação do lodo, além do incremento da microporosidade e do teor de umidade. Dessa forma, o lodo de esgoto, ao melhorar os atributos físicos desse solo, faz com que o Neossolo Quartzarênico seja passível de receber lodo de esgoto, mesmo que de maneira restrita. Esses cuidados são

justificados, por se tratar de um solo excessivamente drenado, com textura arenosa e estrutura em grãos simples, com teores de argila em torno de 8%. Isso significa que são solos muito pobres em reserva de elementos nutritivos às plantas, devido ao domínio de quase totalidade do material de origem em areia quartzosa (CODEVASF, 1987), com CTC muito baixa, com valores médios menores que $4,30 \text{ cmol}_e \text{ dm}^{-3}$, segundo a classificação de Alvarez *et al.* (1999). As principais características físico-químicas do Neossolos Quartzarênicos da região de estudo estão apresentadas na TAB. 6.

TABELA 6

Principais atributos físico-químicos dos Neossolos Quartzarênicos presentes no Setor C2 do Projeto Jaíba

RQd1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, A moderado, fase caatinga hipoxerófila, relevo plano						
Horizonte	A1	C1	C2	C3	C4	
Profundidade (cm)	0-9	9-29	29-67	67-134	134-204+	
Textura	Ar.	Ar.	Ar.Fr.	Ar.Fr.	Ar.Fr.	
K (cm h^{-1})	17,9	20,0	18,3	11,6	10,8	
V (%)	19	8	9	7	8	
T ($\text{cmol}_e \text{ dm}^{-3}$)	3,08	2,88	2,72	2,31	1,98	
RQd2 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, A moderado, fase caatinga hipoxerófila, relevo suave ondulado						
Horizonte	A1	A3	C1	C2	C3	
Profundidade (cm)	0-20	20-44	44-84	84-131	131-210+	
Textura	Ar.	Ar.	Ar.Fr.	Ar.Fr.	Ar.Fr.	
K (cm h^{-1})	>50	21,4	7,8	8,8	9,7	
V (%)	58	30	21	18	17	
T ($\text{cmol}_e \text{ dm}^{-3}$)	5,11	2,60	3,58	2,64	2,21	

K = Condutividade Hidráulica / V(%) = Saturação de Bases / T = CTC a pH 7 / Ar.: arenosa; Ar.Fr.: areia franca; Fr.Ar.: franco-arenosa; Arg.Ar.: argila-arenosa; Fr.Arg.: franco-argilosa; Fr.Arg.Ar.: franco-argiloarenosa; Arg.: argila; M.Arg.: muito argilosa.

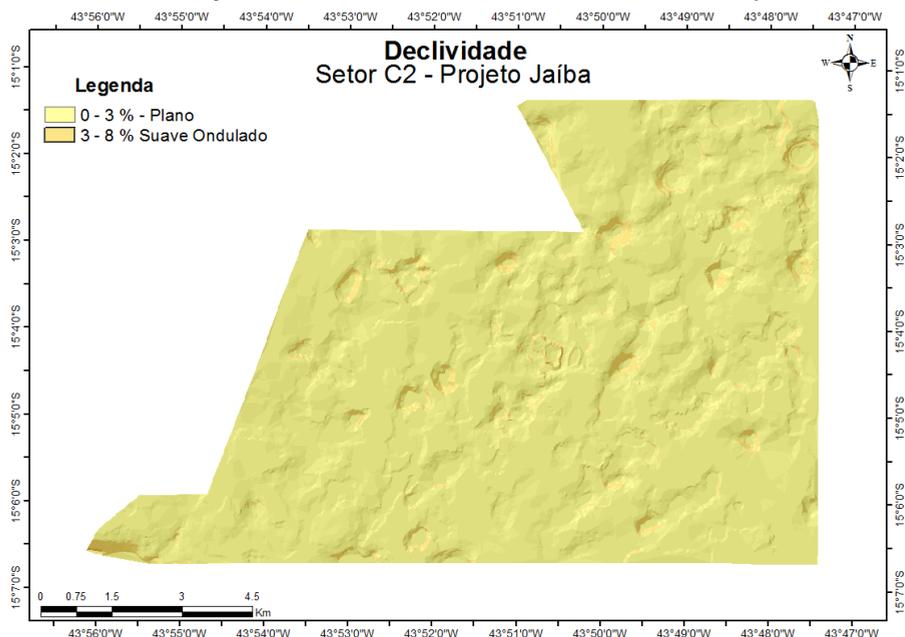
Fonte: Adaptada de CODEVASF, 1987.

As áreas com solos classificadas como Latossolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, que ocorrem na área de estudo, são apresentadas a seguir, FIG. 7.

As classes de aptidão para a aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola são o ponto de partida para a determinação das áreas com maior potencialidade. Entretanto essas classes podem ser influenciadas após a aplicação do lodo de esgoto, uma vez que solos que outrora apresentavam má drenagem ou drenagem excessiva, por exemplo, têm seus atributos físicos melhorados após receberem o resíduo, tais como: porosidade, densidade, estabilidade de agregados, capacidade de retenção de água e CTC (DE MARIA *et al.*, 2010; GUEDES *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2002; SAMPAIO *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2001).

A aplicação do lodo de esgoto na região de estudo pode ser realizada em quase toda a totalidade do perímetro, sem que seja incorporado ao solo, portanto, aplicado a lanço, por exemplo. Essa condição é aceitável porque a maior parte da região é composta por relevo plano, onde, segundo a resolução CONAMA nº 375, de 2006, para declividades inferiores a 10%, não é preciso incorporação ao solo. As distintas fases do relevo informam sobre a praticidade do uso de equipamentos agrícolas, sobretudo os mecanizados, e geram informações sobre a suscetibilidade dos solos à erosão. Para Andreoli *et al.*(2001), impedimentos à motomecanização resultam em dificuldades para a aplicação e a incorporação adequadas do lodo de esgoto. O relevo classificado como plano implica em uma superfície topográfica esbatida ou horizontal, com desníveis muito pequenos, com declividades que variam de 0 a 3% (EMBRAPA, 2014), ocupando 96% da área de estudo. Além disso, 4% do Setor C2 do Projeto Jaíba representam a classe de relevo suave ondulada (FIG. 8), caracterizada como uma superfície topográfica pouco movimentada, com suaves declives, variando de 3 a 8% (EMBRAPA, 2014).

FIGURA 8 - Distribuição das classes de declividade no Setor C2 do Projeto Jaíba

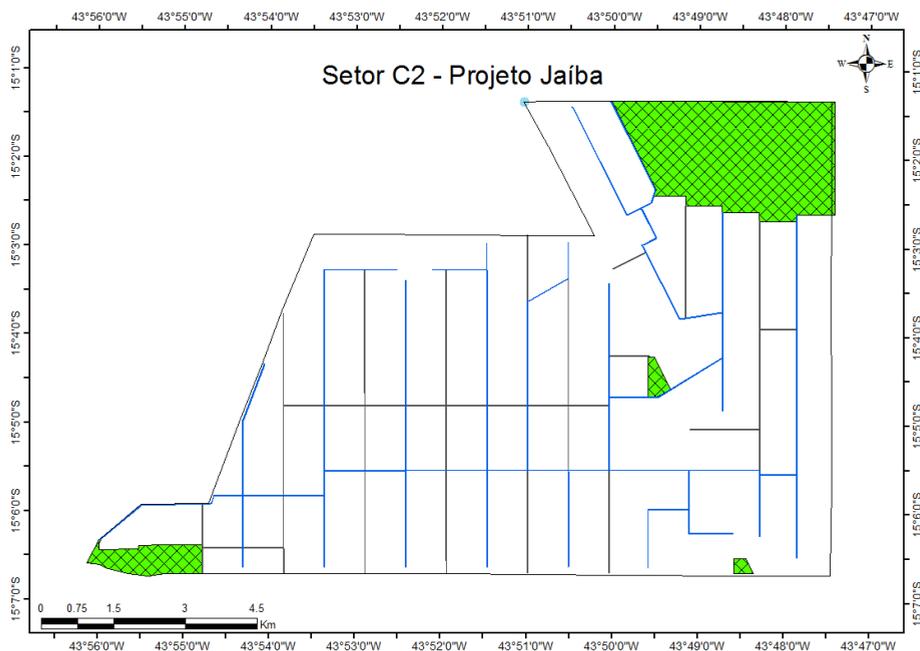


Fonte: LIMA, 2015.

De acordo com Andreoli *et al.* (2007), áreas íngremes são suscetíveis à erosão, devido à alta velocidade de escoamento da água, o que favorece o transporte do lodo de esgoto até áreas mais baixas, poluindo corpos d'água. Esse processo é influenciado principalmente pela topografia, pelo comprimento de rampa, pela textura e pela agregação do solo. Ao avaliar as características físicas sobre arraste de partículas, Andreoli *et al.* (2001) descrevem que solos em relevo plano e textura média não oferecem risco para o uso do lodo, ao contrário dos solos de textura arenosa em declividade superior a 20%, onde, neste caso são altamente suscetíveis à erosão.

Além das classes de declividade e de solos, analisou-se também a distribuição espacial das unidades de proteção integral, das estradas, das redes de drenagem, dos poços freáticos e artesianos da área, FIG. 9.

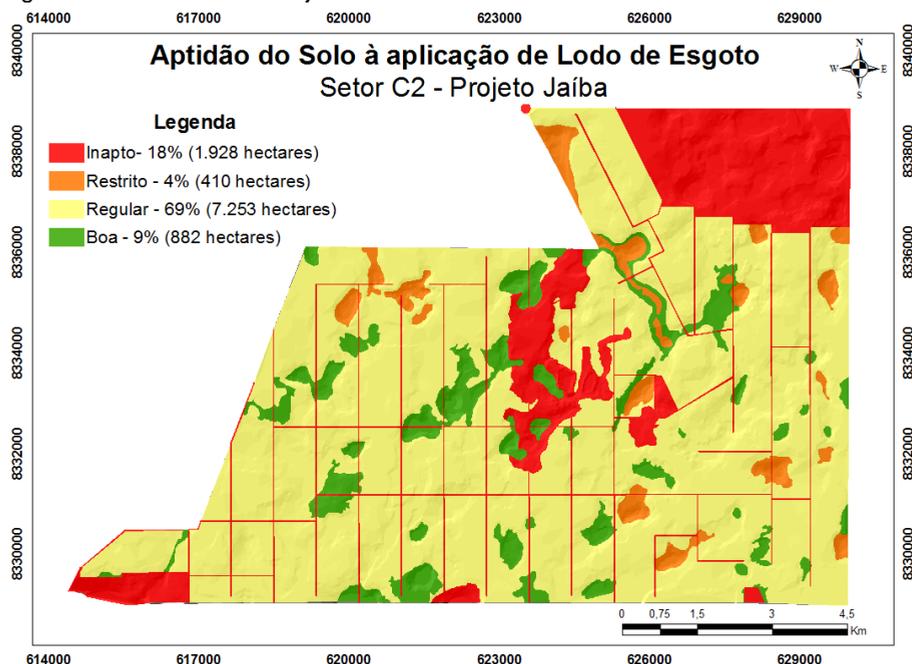
FIGURA 9 - Geocampos inaptos à aplicação de lodo de esgoto no Setor C2 do Projeto Jaíba



Fonte: LIMA, 2015.

Para Gomes (2001) a utilização do SIG permite a avaliação e tomada de decisões dentro de um espaço geográfico, pois acompanha a evolução e os resultados obtidos após aplicação do lodo de esgoto. Esse mesmo autor destaca que, com a utilização de uma metodologia adequada é possível promover o descarte ambientalmente seguro desse resíduo no solo, de modo que possam ser estabelecidos critérios de avaliação relativos aos aspectos legais (legislação), aptidão ambiental (proteção), capacidade ambiental (assimilação) e viabilidade econômica (produção). A avaliação com base em múltiplos critérios permite ponderar as melhores áreas para aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola (Passuelo *et al.*, 2011; Pérez Albert *et al.*, 2010; Vaskan *et al.*, 2013). O mapa com a distribuição das classes de aptidão é apresentado na FIG. 10.

FIGURA 10 - Mapa de aptidão dos solos à aplicação de lodo de e como insumo agrícola no Setor C2 do Projeto Jaíba



Observados os aspectos locacionais determinados na Resolução CONAMA nº 375, de 2006, constata-se que o Setor C2 do Perímetro Jaíba apresenta um cenário favorável à aplicação do lodo de esgoto como insumo agrícola, com 78% da área considerada de boa a regular aptidão. São solos muito profundos, que apresentam menor risco de translocação e distribuição do lodo de esgoto por lixiviação, ao longo do perfil do solo. A área inapta é representada principalmente pela reserva florestal, que ocupa uma área de 619 ha. Além dessa área, tem-se vetado o uso do lodo em Neossolo Quartzarênico, que apresenta textura arenosa e, sobremaneira, muito drenado. Essas são características que oferecem risco de contaminação ao lençol freático.

4 CONCLUSÃO

Verifica-se que o cenário para aplicação de lodo de esgoto no Setor C2 do Projeto Jaíba é favorável, com 78% da área corroborando para essa situação. A predominância de solos mais adequados para esse fim, como os Latossolos e Argissolo Vermelho-Amarelo, foi o fator responsável para tal situação.

A integração das inúmeras variáveis analisadas utilizando o Sistema de Informações Geográficas constitui-se em importante instrumento para o planejamento do uso agrícola do lodo de esgoto, a partir de ETEs de municípios próximos. Todavia é preciso atentar para a escala dos dados armazenados no programa para gerar resultados confiáveis, como é o caso de levantamento de solos detalhados, com escala menor que 1:25.000.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F. DE, BARROS, N. F. DE; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (ed.). COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: MG, Embrapa/UFV/SBCS, 1999. Cap.5, p.25–32.

ANDRADE, C. A.; MATTIAZZO, M. E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.58, p.59-72, 2000.

ANDREOLI, C.V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p. : il Projeto PROSAB.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S., FERNANDES, F.; DOS SANTOS H. F. Land application of sewage sludge In: ANDREOLI, CLEVERSON VITORIO; VON SPERLING, MARCOS; FERNANDO FERNANDES **Sludge Treatment and Disposal**. London: IWA Publishing, 2007.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E.S. Reciclagem agrícola de bioossólidos: Impactos e Regulamentação. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais ...** Ribeirão Preto/SP, 2003.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E.S.; CASTRO, L. A. R. Estudo preliminar da viabilidade de uso do lodo de esgoto para fins agrícolas no município de Foz do Iguaçu. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais ...** Porto Alegre/RS, 2000.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E.S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C.V.; SPERLING M. VON; FERNANDES F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Sanepar, 2001.

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final** / Cleverson Vítório Andreoli (coordenador). -- Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p. : il. Projeto PROSAB.

BETTIOL, W.; CAMARGO, A. DE C. A disposição de Lodo de Esgoto em Solo Agrícola. In: **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura** / editores técnicos, Wagner Bettiol, Otávio Antonio de Camargo. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p. il.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 março de 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 30 agosto de 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução nº. 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 16 maio de 2011.

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] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba. **Jaíba**. 2014. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados/elenco-de-projetos/jaiba-ii-iii-iv>> Acesso em outubro de 2014.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO. **Levantamento detalhado de solos e classificação de terras para irrigação dos setores: A, B, C e F**. 1987. n.p. (Relatório técnico GEONORD/CODEVASF).

DAVIS, C.; CÂMARA, G. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; DAVIS, C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2001.

DE MARIA, I. C.; CHIBA, M. K.; COSTA, A.; BERTON, R. S. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. **Revista Brasileira de Ciências do Solo** [online]. 2010, v.34, n.3, pp. 967-974. ISSN 0100-0683.

DE MARIA, I.C.; KOCSSI, M. A.; DECHEN, S. C. F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. **Bragantia** [online]. 2007, v.66, n.2, pp. 291-298. ISSN 0006-8705.

EHLERS, M. Sensoriamento Remoto para usuários de SIG - Sistemas Sensores e Métodos: entre as Exigências do Usuário e a Realidade. In.: **Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores e métodos inovadores** / versão brasileira atualizada e organizada por Thomas Blaschke e Hermann Kux; tradução Herman Kux. - 2ª ed. - São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 4 ed.– Brasília, DF : Embrapa, 2014.

EVANYLO, G. K. 2009. **Agricultural land application of biosolids in Virginia: Regulations**. VCE Publ. nº. 452-302.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Relatório de progresso do Programa Minas Trata Esgoto** / Fundação Estadual do Meio Ambiente. --- Belo Horizonte: FEAM, 2013. 45 p. ; il.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. P. da **Manual Prático para Compostagem de Biossólidos**. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, 84p,1999.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólidos. In: Lara, A. I. de; Ferreira A. C.; Andreoli, C. V.; Pegorini, E. S.; Ihlenfeld, R.G.K. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba, 1999.

GALDOS, M.V.; DE MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A. Atributos químicos e produção de milho em um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, [online]. 2004, v.28, n.3, pp. 569-577. ISSN 0100-0683.

GIASSON, E.; TEDESCO, M. J. Classificação das terras e quantidades máximas de metais pesados a adicionar por lodo de esgoto. In.: **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA** / Aline R. Coscione, Thiago A. R. Nogueira, Adriana M. M. Pires – Botucatu: FEPAF, 2010. 407 p.

GOMES, L. P.; COELHO, O. W., FLECK, A.; WIEBUSCH, F. Critérios para seleção de áreas para valorização agrícola de solos com aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais ...** João Pessoa – PB, 2001.

GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas dos solos e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, [online]. 2006, v.30, n.2, pp. 267-280. ISSN 0100-0683.

ILHENFELD, R. G. K.; PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. Fatores limitantes. In: LARA, A. I. de; FERREIRA A. C.; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; IHLENFELD, R. G. K. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba, 1999. 98 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico**, PNSB, 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 219 p.

KELM, T. A. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2014. 209 p.

LARA, A. I.; ANDREOLI, C. V.; PERGORINI, E. S. Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgoto: tratamento e**

disposição final. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, Belo Horizonte, v.6, 484 p. 2001.

LARA, A. I.; FERREIRA A. C.; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; IHLENFELD, R. G. K (org.) **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999. 98 p.

LEME, E. J. DE A. **Manual prático de tratamento de águas residuárias /** Edson José de Arruda Leme. São Carlos EduUFSCar, 2010. 595 p.

LEPSCH, I. F. As necessidades de efetuarmos levantamentos pedológicos detalhados no Brasil e de estabelecermos as séries de solos. **Revista Tamoios**, São Gonçalo (RJ), ano 09, n. 1, p.03-15, jan/jun. 2013.

LIU, W. T. H., 2007. **Aplicações de Sensoriamento Remoto.** Campo Grande: Editora UNIDERP, 2007. 908 p.: il. color.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In.: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: EMBRAPA, 2000.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: Carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciências do Solo** [online]. 2002, v.26, n.2, pp. 505-519. ISSN 0100-0683.

PASSUELLO, A.; CADIACH, O.; PEREZ, Y.; SCHUHMACHER, M. A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. **Environment International**. 2011, vol. 38, p. 1-9.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEM, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-188, jul./dez. 2010.

PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA, M. L. DE P. Desenvolvimento de um sistema de avaliação da aptidão de solos e de impactos ambientais para a disposição agrícola do lodo de esgoto. XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Londrina/PR, 2001.

PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA, M. L. DE P.; FERREIRA, A. Qualidade do Lodo de esgoto utilizado na Reciclagem Agrícola na Região Metropolitana de Curitiba-Pr. I Simpósio Latino Americano de Biossólidos. **Anais...** São Paulo/SP, 2003.

PÉREZ ALBERT, Y.; CADIACH RICOMA, O.; PASSUELLO, A.; SCHUHMACHER, M. Propuesta de un modelo de evaluación multicriterio para la incorporación de lodos de depuradora en suelos agrícolas. **GeoFocus**. 2010, nº 10, p.208-231.

PIRES, A.M.M. **Uso Agrícola do lodo de esgoto: aspectos legais**. Embrapa Maio Ambiente. Jaguariúna, 2006.

REZENDE, S. C. **Investimentos em saneamento básico: análise histórica e estimativa de necessidades**./ Rezende, S.C. (coord.); Baptista, M. B.; Cabral, J. R.; Gabriel, J.; Marques, D. H. F.; Martins, A. H.; Moura, P. M.; Nascimento, N. de O.; Peixoto, J. B. Brasília: Ministério das Cidades/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2011. 277 p. (Panorama do Saneamento Básico no Brasil, v.5).

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C. HELIODORO, J. C. A. H.; 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 Ciências Solo** [online]. 2012, v.36, n.5, p. 1637-1645. ISSN 0100-0683.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELII, H. B.; PEXE, C. A.; BERNARDES, E. M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2001. v.36, n. 5, p. 831-840.

TAQUES, R. C.. Áreas potenciais do Estado do Espírito Santo para Aplicação de Lodo de Esgoto na Agricultura. In: **Manual de uso agrícola e disposição do lodo de esgoto para o Estado do espírito Santo** / Aureliano Nogueira da Costa, Adelaide de Fátima Santana da Costa (org.). – Vitória: Incaper, 2011. 126p.

VASKAN P.; PASSUELLO, A.; GUILLEN-GOSALBEZ, G.; SCHUHMACHER M.; JIMENEZ, L. Combined use of GIS and mixed-integer linear programming for identifying optimal agricultural areas for sewage sludge amendment: A case study of Catalonia **Environmental Modelling & Software**. 2013, v. 46, p. 163-169.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção In: ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgoto: tratamento e disposição final**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, Belo Horizonte, 2001. v.6, 484 p.

WANKE, R.; SILVA, G. M. DA; SANT'ANA, T. D.; GONÇALVES, R.F. Soluções integradas para gerenciamento de lodos de pequenas estações de tratamento de esgoto sanitário na Região Sudeste do Brasil. In.: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud. **Anais...** México, D.F, FEMISCA, 2002. p.1-8.