

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA RECICLAGEM AGRÍCOLA  
DO LODO DE ESGOTO NA REGIÃO DA GRANDE  
FLORIANÓPOLIS**

**LUCAS EMANUEL MARTINS**

**Orientadora: Maria Elisa Nagel Hassemer**

**2015.1**



Lucas Emanuel Martins

**TÍTULO:  
ANÁLISE DE VIABILIDADE DA RECICLAGEM AGRÍCOLA  
DO LODO DE ESGOTO NA REGIÃO DA GRANDE  
FLORIANÓPOLIS**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II  
Orientadora: Prof. Dra. Maria Eliza Nagel Hassemer

Florianópolis  
2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA RECICLAGEM AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO  
NA REGIÃO DA GRANDE FLORIANÓPOLIS (SC)

LUCAS EMANUEL MARTINS

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte  
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação  
em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria Eliza Nagel Hassemer  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fernando Soares Pinto Sant'Anna  
(Membro da Banca)

  
\_\_\_\_\_  
Engº Lucas Barros Arruda  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
JULHO/2015



## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Vilmar e Neide, pelo exemplo de caráter e por todas as privações que eles, sem hesitar, passaram para criar de forma bem sucedida seus filhos, oferecendo-nos todo o suporte, amor e educação.

À professora Maria Elisa, que aceitou orientar este trabalho e sempre se mostrou disposta a ajudar.

À Jéssica, pela compreensão em meus momentos de ausência e pelo apoio incondicional em todas as circunstâncias da minha vida.

Ao amigo Luis Felipe Menegassi, por ter revisado este trabalho. Obrigado também pelos questionamentos sempre pertinentes e construtivos.

À CASAN e à FATMA pelo fornecimento de dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> Sanitarista Jaime Cezar Bahr, por ter aguçado a minha curiosidade sobre o tema desenvolvido neste estudo.

À turma 2009.1, obrigado pelos momentos memoráveis que construímos juntos nestes anos de faculdade.

“Nesta perspectiva, as estações de tratamento de esgoto transformam-se em indústrias de fertilizantes, e os seus lodos, quando tratados adequadamente, em produtos, que ao serem aplicados aos solos a eles devolvem os minerais e a matéria orgânica que um dia foram retirados.”  
(TSUTIYA, 2001)



## RESUMO

O trabalho desenvolvido avaliou a viabilidade da reciclagem agrícola do lodo de esgoto na Região da Grande Florianópolis. Foi diagnosticada a produção de lodo nas quatro principais Estações de Tratamento de Esgoto geradoras de lodo do município, permitindo dimensionar uma Unidade Gerenciadora de Lodos (UGL) centralizada e identificar a necessidade de área agrícola para disposição deste subproduto. Em seguida, foi realizado um trabalho de geoprocessamento para detectar as áreas ambientalmente viáveis para disposição do biossólido, obtendo um mapa de aptidão do solo. Este mapa foi cruzado com o mapa de uso e ocupação identificando as áreas agrícolas aptas a incorporação do lodo. Em seguida, foi realizado um estudo locacional para UGL, determinando o baricentro logístico da produção (ETEs) *versus* demanda (áreas agrícolas) do biossólido. Assim, obteve-se o ponto geométrico ideal para a instalação da Unidade Gerenciadora de Lodos, visando a redução dos custos com transporte. A partir do ponto geométrico ideal para instalação da UGL, foram avaliados critérios locacionais para a minimização de impactos de vizinhança, isso permitiu realizar a escolha do local de instalação da Unidade. Diagnosticadas a produção de lodo e as áreas de destinação, bem como definido o local de implantação da UGL, foram calculados os custos de implantação e operação da reciclagem agrícola. Deste estudo, foi obtido um custo de R\$ 153,25 por tonelada de lodo desaguado destinado a agricultura, considerando uma depreciação total do valor investido em um horizonte de 20 anos. Estes valores foram comparados com os custos da atual solução (Aterro Industrial), a qual representa um dispêndio de R\$193,93 por tonelada de lodo desaguado enviado ao aterro. Como resultado do estudo econômico obteve-se, para um horizonte de projeto de 20 anos, uma economia de R\$ 8.662.825,83 em valor presente, caso seja adotado a reciclagem agrícola. O investimento inicial com a implantação da UGL seria pago em 6,92 anos, e o empreendimento traria uma taxa de retorno interno (TIR) de 22,84% ao ano, referente ao valor que deixaria de ser gasto em comparação com a disposição em aterro. O estudo concluiu que para a Região da Grande Florianópolis a reciclagem agrícola de lodo é viável sobre os critérios ambientais, agrícolas e econômicos, sendo além de viável, uma opção vantajosa por promover o uso benéfico deste subproduto.

**Palavras-chave:** Biossólido; Análise de viabilidade; Reciclagem agrícola; Lodo de esgoto; Logística.



## ABSTRACT

This study evaluated the viability of the agricultural recycling of sewage sludge in the Greater Florianópolis area. The sludge production was diagnosed in four of the city's main Sewage Treatment Plants (STP) - the ones that are the main producers of sludge – what allowed the sizing of a Sludge Management Center (SMC) and identifying the amount of agricultural area needed to dispose the treated sludge. A geoprocessing work was carried out to detect the areas that would suit the environmental requirements for the biosolids disposal, leading to a soil suitability map. This map was crossed with a land's use and occupation map, allowing the identification of the agricultural areas suitable for the addition of sludge. A locational analysis for the SMC was then made: the determination of the logistical center of gravity of production (STPs) versus demand (agriculture) of biosolids enabled the obtention of the ideal geometric point for the installation of the SMC in order to reduce transportation costs. From this point, a further analysis of the surrounding areas, aiming to minimize negative impacts on the neighborhood, was then made, making it possible to determine the location of the unit. With the diagnosis of the sludge production and the disposal areas, and the location of the SMC, deployment and operating costs of agricultural recycling were calculated: R\$153,25 per ton of dewatered sludge directed to the agriculture, considering the total depreciation of the amount invested within 20 years. That value was compared with the costs of the current solution (industrial landfill) – R\$193,93 per ton of dewatered sludge disposed. The economic study resulted in savings of R\$8.662.825,83 (in present value) for a 20 years period, if adopted the agricultural recycling over landfill disposal. The initial investment with the implementation of the SMC would be paid in 6.92 years, and the project would bring an internal rate of return (IRR) of 22.84% per year. The study concluded that for the Florianópolis region, the sludge agricultural recycling is feasible on the environmental, agricultural and economic criteria, as well as being an advantageous option to promote the beneficial use of this byproduct.

**Keywords:** Biosolids; Feasibility analysis; Agricultural recycling; Sewage sludge; Logistics.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Uso e ocupação do solo (Grande Florianópolis).....	31
Figura 2 – Principais estações geradoras de lodo e local de disposição final. ....	37
Figura 3 – Fluxograma de tratamento ETE Insular.....	38
Figura 4 – Centrífugas desaguadoras ETE Insular.....	38
Figura 5 – Fluxograma de tratamento ETE Lagoa da Conceição. ....	40
Figura 6 – Decanter (centrífuga desaguadora) ETE Lagoa da Conceição. ....	41
Figura 7 – Fluxograma de tratamento ETE Canasvieiras. ....	42
Figura 8 – Centrífuga desaguadora ETE Canasvieiras. ....	43
Figura 9 – Fluxograma de tratamento ETE Saco Grande. ....	44
Figura 10 – Mapa de solos dominantes da região da Grande Florianópolis. ....	48
Figura 11 – Mapa de restrições ao uso de lodo de esgoto no solo. ....	49
Figura 12 – Mapa de classificação de aptidão do solo da Grande Florianópolis à disposição do lodo de esgoto. ....	50
Figura 13 – Mapa de aptidão das áreas agrícolas à incorporação do lodo de esgoto. ....	51
Figura 14 – Áreas agrícolas selecionadas para disposição do lodo.....	53
Figura 15 – Mapa de produção/capacidade de recepção de lodo em base seca. ....	55
Figura 16 – Área escolhida para implantação da UGL. ....	57
Figura 17 – Rotas de transporte do lodo. ....	58
Figura 18 – Fluxograma de gerenciamento do lodo de esgoto. ....	63
Figura 19 – Fluxo de caixa comparativo (Aterro x Reciclagem Agrícola). ....	74

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Volumes de lodo de acordo com o tipo de tratamento empregado....	6
Quadro 2 – Características físicas do lodo de esgoto.....	8
Quadro 3 – Composição média por tipo de resíduo orgânico (SANEPAR). ....	9
Quadro 4 – Concentração de bactérias no lodo bruto, observadas nos Estados Unidos, em número/g de peso seco.....	11
Quadro 5 – Teores típicos de sólidos totais em lodos desaguados, oriundos de diversos processos de tratamento.....	13
Quadro 6 – Temperatura e tempo de manutenção para a destruição de alguns organismos.....	17
Quadro 7 – Número, percentuais de viabilidade e de redução de ovos de helmintos, em lodo aeróbio digerido calado a 50%, proveniente da ETE Belém (PR). ....	18
Quadro 8 – Aspectos ambientais considerados na avaliação de aptidão das terras para disposição final do lodo de esgoto. ....	25
Quadro 9 – Identificação dos aspectos ambientais e do grau de limitação das unidades de aptidão.....	27
Quadro 10 – Sistemas de esgotamento sanitário do município de Florianópolis. ....	29
Quadro 11 – Dados espaciais utilizados. ....	33
Quadro 12 – Classes de aptidão das terras para a aplicação de lodo de esgoto..	33
Quadro 13 – Parâmetros adotados para quantificação do lodo de esgoto. ....	45
Quadro 14 – Quantificação do lodo a ser gerenciado. ....	46
Quadro 15 – Área agrícola necessária para aplicação de lodo. ....	47
Quadro 16 – Classificação de aptidão do solo da Grande Florianópolis à disposição do lodo de esgoto. ....	50
Quadro 17 – Classificação das áreas agrícolas quanto ao uso de lodo.....	52
Quadro 18 – Descrição das áreas agrícolas selecionadas.....	54
Quadro 19 – Cálculo do centro de massa das unidades de manejo do lodo. ....	56
Quadro 20 – Momentos de transporte (T lodo desaguado x distância) entre as ETEs e a UGL.....	59
Quadro 21 – Distâncias entre UGL e áreas agrícolas.....	59
Quadro 22 – Índices de custo - Aterro Industrial.....	60
Quadro 23 – Custos de transporte (ETE – Aterro).....	60
Quadro 24 – Custos de disposição do lodo no Aterro.....	61
Quadro 25 – Custos totais de disposição do lodo no Aterro. ....	62
Quadro 26 – Parâmetros adotados para caleação.....	64
Quadro 27 – Quantificação do processo de caleação.....	64
Quadro 28 – Equipes e equipamentos de higienização do lodo. ....	65
Quadro 29 – Parâmetros de dimensionamento da UGL.....	65
Quadro 30 – Dimensionamento da UGL. ....	66
Quadro 31 – Parâmetros referentes aos custos de instalação. ....	67
Quadro 32 – Custos de instalação da UGL.....	68
Quadro 33 – Custos de mão de obra da UGL. ....	69

Quadro 34 – Custos de referência para análise do lodo.....	70
Quadro 35 – Custos com análises do lodo e do solo.....	70
Quadro 36 – Custos com transporte ETEs – UGL.....	71
Quadro 37 – Custos com transporte UGL – Agricultura. ....	71
Quadro 38 – Custos operacionais da UGL. ....	72
Quadro 39 – Custos totais da UGL.....	73



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	XII
LISTA DE QUADROS.....	XIII
SUMÁRIO.....	XVI
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
3.1. LODO DE ESGOTO .....	4
3.2. CARACTERÍSTICAS DO LODO BIOLÓGICO .....	6
3.2.1. <i>Características Físicas</i> .....	8
3.2.2. <i>Características Químicas</i> .....	9
3.2.3. <i>Características Microbiológicas</i> .....	10
3.3. TRATAMENTO DO LODO .....	11
3.3.1. <i>Remoção de umidade</i> .....	11
3.3.2. <i>Estabilização</i> .....	13
3.3.3. <i>Higienização</i> .....	16
3.4. DESTINO FINAL.....	19
3.4.1. <i>Aterro Sanitário</i> .....	21
3.4.2. <i>Incineração</i> .....	21
3.4.3. <i>Landfarming</i> .....	22
3.4.4. <i>Reciclagem Agrícola</i> .....	22
3.4.5. <i>Classificação da aptidão dos solos para reciclagem agrícola</i> ....	25
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	29
4.2. DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO DE LODO DE ESGOTO .....	32
4.3. SELEÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS APTAS À INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NO SOLO .....	32
4.4. ESCOLHA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA UGL .....	34
4.5. ANÁLISE ECONÔMICA .....	35
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>36</b>
5.1. DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO DO LODO DE ESGOTO EM FLORIANÓPOLIS .....	36

5.1.1. ETE Insular .....	37
5.1.2. ETE Lagoa da Conceição .....	39
5.1.3. ETE Canasvieiras .....	41
5.1.4. ETE Saco Grande .....	44
5.1.5. Parâmetros adotados e quantificação do lodo a ser gerenciado .....	45
5.1.6. Área agrícola necessária para disposição do lodo .....	46
5.2. SELEÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS APTAS À INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NO SOLO .....	47
5.2.1. Tipos de solo da Grande Florianópolis .....	47
5.2.2. Classificação dos solos para disposição de lodo .....	48
5.2.3. Áreas agrícolas aptas à incorporação do lodo de esgoto .....	51
5.2.4. Áreas agrícolas selecionadas para a reciclagem agrícola .....	52
5.3. ESCOLHA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA UGL .....	55
5.4. ANÁLISE ECONÔMICA .....	60
5.4.1. Custos da atual alternativa: Aterro Industrial .....	60
5.4.2. Custos da solução proposta: Reciclagem Agrícola .....	62
5.4.3. Comparação econômica das alternativas .....	73
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>79</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE A – MUNICÍPIOS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE B – CLASSIFICAÇÃO DA APTIDÃO DOS SOLOS PARA DISPOSIÇÃO DO LODO DE ESGOTO .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE C – FLUXO DE CAIXA COMPARATIVO DAS ALTERNATIVAS .....</b>	<b>96</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A água, por ser um elemento essencial à vida, fez com que a sociedade se estruturasse de acordo com a sua disponibilidade. A facilidade de acesso a este bem, juntamente com insipiência da população, levou o homem a poluir os rios, desmatar suas nascentes e lançar o que não lhe tinha mais utilidade sobre os recursos hídricos.

Como consequência, graves problemas de saúde pública causados pelo uso de água contaminada tornaram-se uma constante e levaram o homem a se dar conta da importância de gerenciar os efluentes gerados em sua vida cotidiana. Desta forma, o saneamento foi introduzido nas zonas urbanas como uma necessidade básica de proteção contra agravos e doenças de veiculação hídrica.

Neste contexto, a sociedade começou a desenvolver sistemas de coleta e tratamento de esgotos, os quais possuem como objetivo a retirada de componentes indesejáveis da água, tornando-a com características aceitáveis para a disposição nos corpos hídricos, sem representar um risco para o ambiente e para a população.

Porém, atualmente chegou-se a um novo paradigma. Como subproduto do processo de tratamento de esgoto tem-se o lodo, material que concentra diversos dos componentes indesejáveis que estavam inicialmente atrelados ao efluente líquido. Por concentrar diversos poluentes e agentes patogênicos, o lodo de esgoto possui uma gestão complexa e cara, constantemente negligenciada pelos operadores (ANDREOLI et al., 1999).

O gerenciamento inadequado do lodo devolve ao ambiente natural toda a carga poluidora retirada do efluente, carga esta que é o pretexto para o investimento nos sistemas de esgotamento sanitário. Por esta razão, inúmeros autores apontam que a destinação incorreta do lodo invalida os investimentos realizados nos sistemas de saneamento.

Existem diversas formas de destinação do lodo de esgoto, sendo que as mais adotadas são a disposição em aterros, a incineração e a reciclagem agrícola. No Brasil, a forma de destinação mais utilizada ainda é a disposição em aterros (BARBOSA; TAVARES FILHO, 2006), porém esta alternativa mostra-se ineficiente ambientalmente por gerar líquidos com alto potencial poluidor, não reciclar os nutrientes contidos no lodo e tornar a área ocupada improdutiva.

Por esta razão há uma forte tendência de que o Brasil siga o exemplo de países desenvolvidos, e volte seus esforços para a ampliação do uso do lodo na agricultura.

O que torna a reciclagem agrícola tão interessante são as diversas vantagens agronômicas da aplicação do lodo de esgoto no solo. Dentre elas, podemos citar que o lodo: melhora as condições físico-químicas e biológicas

dos solos; torna o solo mais resistente à erosão; fornece nutrientes para as plantas; aumenta a produtividade agrícola; reduz os custos de produção dos agricultores; e reduz os impactos ambientais decorrentes da inadequada disposição final de lodo de esgoto (BITTENCOURT et al, 2009).

A região alvo de estudo deste trabalho, Grande Florianópolis, não está em situação diferente do atual panorama brasileiro. Os lodos de esgoto gerados no município são encaminhados para um Aterro Industrial, não sendo utilizados para fins benéficos.

Sendo assim, a atual conjuntura justifica o estudo desenvolvido neste trabalho, o qual buscou responder a uma única questão: É viável reciclar na agricultura o lodo de esgoto produzido em Florianópolis?

Os resultados obtidos neste estudo pretendem mudar a maneira como este resíduo é visto pela sociedade florianopolitana. No lugar de um custo passivo do sistema de tratamento, o lodo pode se tornar, caso seja viável sua aplicação, um insumo agrícola com diversas vantagens em termos ambientais e produtivos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O trabalho desenvolvido tem como objetivo analisar a viabilidade da reciclagem agrícola do lodo de esgoto produzido em Florianópolis.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcançar o objetivo central, a pesquisa foi realizada sobre três pilares:

- Diagnóstico qualitativo e quantitativo da geração do lodo de esgoto no município de Florianópolis.
- Análise de viabilidade ambiental e agrônômica dos solos da região da Grande Florianópolis, determinando as áreas agrícolas aptas à incorporação do lodo de esgoto.
- Análise de viabilidade econômica do processo, comparando os custos de implantação e operação da Reciclagem Agrícola com os custos da atual alternativa, disposição em Aterro Industrial.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. LODO DE ESGOTO

O tratamento de esgotos possui como finalidade a remoção de poluentes da fase líquida para o lançamento do efluente tratado em ambiente natural. Os poluentes contidos no esgoto estão presentes na sua fração sólida. Esta fração representa cerca de 0,1% do esgoto, e é dividida em sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos (VON SPERLING, 2005).

Os esgotos domésticos são compostos principalmente por materiais orgânicos. Por esta razão, o seu tratamento é realizado, quase que invariavelmente, por processos biológicos. Os sistemas biológicos promovem a degradação da matéria orgânica, a qual é utilizada pelos microrganismos para a formação de novas células (processo anabólico) e como fonte de energia (processo catabólico) (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Como produtos finais gerados nas estações de tratamento de esgoto temos o efluente tratado e o lodo de esgoto, geralmente considerado um rejeito do processo de tratamento.

Embora o lodo seja considerado um rejeito, a eficiência do tratamento biológico do esgoto está diretamente ligada à quantidade de células vivas atuantes no processo. Desta forma, o lodo biológico, por ser rico em atividade microbiana, também é utilizado nos sistemas de tratamento como matéria prima para os processos degradação das cargas poluentes. Sendo assim, somente o seu excesso deve ser considerado um resíduo (FERNANDES, 2000).

Segundo Von Sperling (2005), o lodo biológico, conhecido como lodo secundário, é gerado em todos os processos de tratamento biológico. Além dele, também são subprodutos das estações tratamento de esgoto doméstico:

- i. Os sólidos grosseiros: materiais orgânicos e inorgânicos removidos nos processos de gradeamento e peneiramento;
- ii. Areia: sólidos inorgânicos sedimentáveis retirados no tratamento preliminar por meio do desarenador.
- iii. Escuma: materiais de baixa densidade, como por exemplo gorduras, óleos e graxas, removidos por raspagem da superfície nas diversas etapas do tratamento; e
- iv. Lodo primário: sólidos removidos por processo físico de sedimentação no decantador primário. Este material geralmente é instável e exala um forte odor. Este material só é gerado em

estações que possuem etapa de tratamento primário (decantador primário).

Estes sólidos apresentam uma gestão complexa. Segundo Andreoli et al. (1999), levantamentos realizados em vários países mostraram que o volume de lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) representa cerca de 1 a 2% do volume de esgoto tratado. Porém, de acordo com Miki et al. (2001), o tratamento da fase sólida é responsável por aproximadamente 40% dos custos de implantação, 50% dos custos de operação e por 90% dos problemas operacionais.

Entre as operações realizadas que contabilizam o custo de tratamento do lodo estão: adensamento, desaguamento, estabilização e higienização.

A aplicação destes processos visa garantir a segurança em termos de saúde pública e meio ambiente, e interfere diretamente no destino final a ser escolhido.

Embora a gestão do lodo de esgoto seja bastante complexa, o planejamento e a destinação final têm sido frequentemente negligenciados nos países em desenvolvimento. Em diversos casos, os projetos de estações de tratamento simplesmente ignoram a forma de destino deste material, que acaba sendo gerenciado em situação emergencial pelos operadores, gerando altos custos financeiros e ambientais, comprometendo, em alguns casos, os benefícios de todo o sistema de coleta e tratamento de esgotos (ANDREOLI; PINTO, 2001).

Atualmente, com a ampliação do acesso ao saneamento através de rede de coleta e tratamento de esgoto, há uma perspectiva de incremento na produção de lodo, caracterizando este subproduto como um dos mais graves passivos ambientais urbanos no Brasil (BARBOSA; TAVARES FILHO, 2006). Para a região metropolitana de São Paulo, estima-se que cerca de 286 mil toneladas anuais de lodo em base seca (785 toneladas por dia) serão produzidas no ano de 2015 (TSUTIYA, 2000).

De acordo com Andreoli e Pinto (2001), estimativas de produção de lodo nos Estados Unidos, indicavam uma produção de cerca de 8,2 milhões de toneladas em 2010. Na Europa, no ano de 2005, a produção estimada era da ordem de 10,1 milhões de toneladas (Davis & Hall, 1997 apud ANDREOLI; PINTO, 2001).

Segundo Barbosa e Tavares Filho (2006), não se dispõe de dados consistentes referentes à produção de lodo no Brasil, porém estimativas indicam para valores entre 9.000 a 13.000 toneladas de lodo desaguado por dia.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DO LODO BIOLÓGICO

A constituição do lodo de esgoto é bastante variável por possuir influência direta de diversos fatores. Entre as variáveis que definem as características do lodo estão: a área em que o efluente foi originado, se é domiciliar ou industrial; o processo de tratamento de esgoto; a época do ano em que foi gerado; as características da população local; entre outros fatores (BOEIRA; MAXIMILIANO, 2006).

#### i. Influência locacional

Com relação à área de implantação das ETEs, os lodos gerados em regiões metropolitanas ou em áreas industriais podem possuir alta concentração de metais pesados e compostos orgânicos persistentes. Sendo assim, nos casos onde se almeja uma destinação benéfica do lodo deve-se evitar o lançamento de esgotos industriais nos sistemas de esgotamento sanitário (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Em contrapartida, estações que se localizam em áreas tipicamente residenciais possuem baixa concentração de metais no lodo (TSUTIYA, 2001). Sendo que a pequena quantidade existente geralmente é oriunda de contribuições parasitárias de águas pluviais na rede de esgoto.

#### ii. Influência do tipo de tratamento biológico

A tecnologia empregada no sistema de tratamento de esgoto e a sua operação influenciam diretamente na quantidade e nas condições em que o lodo deixa de ser matéria prima para se transformar em resíduo.

Podemos dividir os tipos de tratamento biológico de esgoto conforme a presença ou não de oxigênio nos reatores (aeróbio ou anaeróbio) e de acordo com o tempo de detenção dos sólidos dentro do reator, conhecido também como idade do lodo.

O quadro abaixo traz um compilado dos volumes de lodo produzidos de acordo com o tipo de tratamento biológico empregado:

Quadro 1 – Volumes de lodo de acordo com o tipo de tratamento empregado.

TIPO DE TRATAMENTO	QUANTIDADE DE LODO PRODUZIDA (M3/HAB.ANO)
Lagoa facultativa primária	0,037
Lagoa facultativa	0,03 - 0,08
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	0,01 - 0,04
Lagoa aerada convencionais	0,03 - 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 - 1,5
Lodos ativados (aeração prolongada)	0,7 - 1,2
Lodos ativados (fluxo intermitente)	0,7 - 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 - 0,6

Filtro biológico (alta carga)	1,1, - 1,5
Biodiscos	0,07 - 0,1
UASB	0,07 - 0,1
Fossa séptica - filtro anaeróbio	0,07 - 0,1

Fonte: Adaptado de Ferreira e Andreoli (1999).

Para melhor interpretar o quadro acima, é importante que se tenha conhecimento das idades do lodo típicas de cada tipo de tratamento.

Segundo Van Haandel e Cavalcanti (2001), para sistemas anaeróbios trabalhando a uma temperatura de 25°C, a idade de lodo necessária fica em torno de 20 a 50 dias.

De acordo com Von Sperling (2012), em sistemas aeróbios convencionais, a idade do lodo usual é de 4 a 10 dias. Já em lodos ativados operando com aeração prolongada, a idade do lodo fica na faixa de 18 a 30 dias.

Nota-se, a partir do quadro 1, que a quantidade de lodo gerada em sistemas aeróbios é significativamente maior do que em sistemas anaeróbios. Além disso, o volume produzido é inversamente proporcional à idade do lodo.

Além da influência sobre a quantidade produzida, a idade do lodo também tem papel fundamental na sua estabilização. Quanto menor a idade do lodo, maior a produção de lodo volátil e mais alta é a concentração de microrganismos vivos (VAN HAANDEL E CAVALCANTI, 2001). As bactérias vivas presentes nos lodos descartados com baixa idade tendem a morrer e entrar em decomposição pouco tempo depois da descarga. Este processo de decomposição faz com que o lodo desenvolva um odor muito desagradável e torna o seu desaguamento mais difícil (MANZOCHI, 2008).

A estabilidade do lodo pode ser medida indiretamente pela concentração de sólidos voláteis: quanto maior a concentração de sólidos voláteis menor é o grau de estabilização do lodo.

Para que o lodo seja considerado estabilizado, a resolução CONAMA 375/2006 especifica que a concentração de sólidos voláteis afluente ao processo de estabilização deve ser reduzida em pelo menos 38%.

O autor Von Sperling (2005) divide o lodo biológico em três tipos:

- a) Lodo biológico aeróbio não estabilizado: proveniente de sistemas de tratamento de lodo ativado convencional e reatores aeróbios com biofilme de alta carga. Estes lodos necessitam de etapa complementar de estabilização, caso contrário haverá emissão de maus odores durante seu tratamento e disposição final. Estes maus

odores são provenientes da decomposição anaeróbia da matéria orgânica em condições não controladas.

- b) Lodo biológico aeróbio estabilizado: oriundo de sistemas com aeração prolongada ou reatores aeróbios com biofilme de baixa carga. Os sistemas de baixa carga apresentam uma menor disponibilidade de alimentos, e a biomassa fica retida por maior tempo no sistema, predominando a respiração endógena. Desta forma, a biomassa utiliza sua própria composição celular como fonte de alimento, resultando em um lodo com uma menor quantidade de matéria orgânica, não necessitando de etapa de digestão posterior.
- c) Lodo biológico anaeróbio estabilizado: oriundo dos diversos sistemas de tratamento anaeróbios, como por exemplo lagoas de estabilização, reatores UASB e filtros anaeróbios. Nestes processos a biomassa fica retida por um longo período, havendo a digestão do próprio material celular. Este lodo é considerado estabilizado e não requer etapa de digestão adicional.

Segundo Andreoli (1999), o lodo de esgoto possui em sua composição água e sólidos, sendo que, do total de sólidos, uma média de 80% são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras, etc.) e 20% inorgânicos (areia, sais, metais, etc).

Para uma melhor compreensão podem-se separar as características do lodo de esgoto em físicas, químicas e microbiológicas:

### 3.2.1. Características Físicas

Uma das principais características que encarecem o tratamento e a disposição do lodo de esgoto é o seu alto teor de umidade. Isso se deve ao fato de que ao transportar o lodo de esgoto para sua destinação final, grande parte da massa transportada é de água.

O Teor de Umidade (%) pode ser definido como igual a 100 - Teor de Sólidos Secos (%). Desta forma, um lodo com 2% de sólidos secos possui um teor de umidade de 98%. Assim, em cada 100 kg de lodo a ser transportado, 98 kg são de água e apenas 2 kg são de sólidos.

O quadro abaixo apresenta os teores de sólidos comumente encontrados de acordo com o tipo de lodo.

Quadro 2 – Características físicas do lodo de esgoto.

Parâmetro	Lodo primário	Lodo secundário	Lodo desidratado
Sólidos secos	2 – 6%	0,5 – 2%	15 – 35%
Sólidos voláteis	60 – 80%	50 – 70%	30 – 60%

Fonte: Adaptado de Tsutiya et al. (2001).

Analisando o teor de sólidos secos dos lodos biológicos, pode se compreender a importância dos processos de desidratação, pois a redução de umidade reduz em igual proporção o custo de transporte.

Outro fator físico de extrema importância é a densidade do lodo. Valores usuais de densidade do lodo situam-se entre 1,02 a 1,03 ton/m<sup>3</sup> para o lodo líquido e de 1,05 a 1,08 para o lodo desidratado (VON SPERLING, 2005).

### 3.2.2. Características Químicas

Diversos componentes do esgoto concentram-se no lodo durante os processos de tratamento. Desses, vários conferem características que agregam valor ao lodo, como nutrientes e material orgânico. No entanto, outros, pelo risco sanitário e ambiental, são indesejáveis, como por exemplo patógenos, metais pesados e compostos orgânicos persistentes (SILVA et al., 2000).

Um lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo, os demais macro e micronutrientes, além de elementos potencialmente tóxicos (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

No estado do Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) identificou os seguintes teores médios de nutrientes de acordo com o tipo de resíduo:

Quadro 3 – Composição média por tipo de resíduo orgânico (SANEPAR).

Tipo de resíduo	Matéria Orgânica (%)	Nitrogênio (%)	Fósforo (%)	Potássio (%)
Lodo Aeróbio Calado	69,4	2,5	0,9	0,2
Lodo Anaeróbio	36,2	1,6	0,2	0,05
Esterco de Bovinos	14,6	0,3	1,17	0,1
Esterco de Equinos	21	0,44	0,32	0,35
Esterco de Ovinos	31,4	0,6	0,3	0,15
Esterco de Suínos	12	0,6	0,6	0,3

Fonte: Adaptado de Ilhenfeld; Pegorini; Andreoli. (1999).

Ao comparar o lodo de esgoto com outros resíduos orgânicos, observa-se que ele apresenta em média teores de nitrogênio e fósforo acima dos demais. Com essas características nutricionais fica evidente que o lodo de esgoto é um resíduo com perspectiva de uso na agricultura (MUNHOZ e BERTON, 2006).

Segundo Bettiol e Camargo (2006), a utilização do lodo de esgoto em solos agrícolas tem como principais benefícios a incorporação de macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e de micronutrientes (zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio). Porém, os lodos são pobres em potássio, necessitando de uma complementação por meio de fertilizantes minerais.

A grande concentração de matéria orgânica no lodo influencia positivamente nos aspectos físicos do solo. Sua aplicação aumenta a retenção de água em solos arenosos, melhora a permeabilidade e infiltração nos solos argilosos, e, por tempo determinado, mantém uma boa estrutura e estabilidade dos agregados na superfície (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

Quanto aos aspectos negativos, o lodo pode possuir altas concentrações de metais pesados, dependendo do efluente que o originou. Segundo Tsutiya (2001), os metais pesados contidos no lodo podem ser divididos em duas categorias, de acordo com o risco que representam às plantas e aos animais. Os metais que oferecem pequeno risco são: manganês, ferro, alumínio, cromo, arsênio, selênio, antimônio, chumbo e mercúrio. Os metais potencialmente perigosos são: zinco, cobre, níquel, molibdênio e cádmio.

Nos casos em que se deseja a reciclagem agrícola e se constata uma presença significativa de metais no lodo, deve-se controlar e monitorar a aplicação. Em especial, zinco, cobre, níquel e cádmio, se presentes em teores elevados podem ser fitotóxicos, prejudicando o desenvolvimento das plantas e sendo deletérios aos animais que se alimentem dessas. Por estas razões é de extrema importância a regulamentação do uso do lodo de esgoto na agricultura, definido concentrações máximas permitidas de metais pesados no lodo e o teor máximo acumulado no solo (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

### **3.2.3. Características Microbiológicas**

Segundo Van Haandel e Além Sobrinho (2006), o lodo gerado em sistema de tratamento de esgotos possui uma péssima qualidade higiênica, tendo uma grande variedade de vírus, bactérias e parasitas (protozoários, ovos de nematóides e helmintos). Embora a grande maioria desses organismos seja inofensiva, alguns grupos de patógenos são considerados perigosos pelo risco que representam para a saúde humana e animal.

A origem da contaminação microbiológica do lodo se dá em função do material fecal contido no esgoto. Sendo assim, é dependente das características epidemiológicas da população local e dos efluentes lançados na rede coletora (FERNANDES; SOUZA, 2001).

O quadro abaixo mostra a o número de alguns microrganismos por grama de lodo de esgoto bruto em base seca:

Quadro 4 – Concentração de bactérias no lodo bruto, observadas nos Estados Unidos, em número/g de peso seco.

Bactéria	Lodo primário bruto	Lodo secundário bruto
Coliformes totais	$1,2 \times 10^8$	$7,0 \times 10^8$
Coliformes fecais	$2,0 \times 10^7$	$8,3 \times 10^6$
Estreptococos	$8,9 \times 10^5$	$1,7 \times 10^6$
Salmonella	$4,1 \times 10^2$	$8,8 \times 10^2$

Fonte: EPA(1983), apud Fernandes e Souza (2001).

Como pode-se notar através do quadro acima, o lodo bruto é rico em patógenos, devendo ser submetido a processos de desinfecção de acordo com o grau de exigência da destinação a ser adotada.

### 3.3. TRATAMENTO DO LODO

Os processos de tratamento de lodo visam reduzir o teor de material orgânico putrescível, a concentração de organismos patogênicos e o teor de umidade. Desta forma, pode-se obter um material sólido e estável, que não constitua perigo para a saúde e possa ser manipulado e transportado com facilidade e a baixo custo (VAN HAANDEL e ALÉM SOBRINHO, 2006).

Entre os processos de tratamentos típicos do lodo de esgotos, tem-se:

#### 3.3.1. Remoção de umidade

Os processos de remoção de umidade tem como principal objetivo a redução do volume do lodo em excesso (VON SPERLING, 2005). Este procedimento é efetuado por processos físicos, como por exemplo: adensamento por gravidade, filtração, flotação, centrifugação e evaporação.

Normalmente a remoção de umidade é dividida em duas etapas físicas, o adensamento e a desidratação (desaguamento). A diferença entre elas é que o adensamento é uma fase preliminar, com eficiência limitada, obtendo teores de sólidos entre 2 e 8%. Com o adensamento, consegue-se diminuir a capacidade volumétrica das unidades

subsequentes, como digestores, tamanho das bombas, etc. Outro benefício importante do adensamento é a redução da utilização de produtos químicos na etapa de condicionamento pré-desidratação (MIKI, et al. 2001).

Já o desaguamento do lodo possui uma eficiência mais elevada, produzindo um lodo desidratado com teores de sólidos que variam entre 15 e 45%, dependendo da tecnologia empregada e do tipo de lodo (VON SPERLING, 2005).

Para aumentar a eficiência da desidratação, o processo deve ser precedido de uma etapa de condicionamento através da adição de produtos químicos que favorecem a formação de flocos e facilitam a separação das fases sólido-líquida (VAN HAANDEL; ALÉM SOBRINHO, 2006). Segundo Miki et al. (2001), os produtos químicos condicionadores podem ter origem inorgânica, por exemplo cal e cloreto férrico, ou orgânica, como polímeros aniônicos e catiônicos, sendo que atualmente há uma tendência de utilização de condicionadores orgânicos pelo seu menor impacto ambiental.

A seleção do processo de desidratação depende do tipo de lodo a ser processado e da área disponível. Os processos utilizados para o desaguamento podem ser divididos em naturais ou mecânicos. Os processos naturais apresentam maior restrição quanto à disponibilidade de área, enquanto os processos mecânicos são mais sensíveis à qualidade do lodo. No Brasil os principais processos naturais utilizados são: leitos de secagem, lagoas de lodos e canteiros de mineralização. Quanto aos processos mecânicos, os mais empregados são: centrifugas, prensas desaguadoras e filtros-prensa (VON SPERLING, 2005).

Assim como os demais processos que envolvem a gestão do lodo, a capacidade de desidratação também é variável de acordo com o tipo de tratamento de esgoto utilizado. Segundo Gonçalves et al. (2001), um lodo ativado, por exemplo, é mais difícil de ser desaguado do que um lodo primário digerido anaerobicamente. Essa variação na capacidade de desidratação se dá em função do tipo de sólido e da forma pela qual a água está ligada às partículas do lodo.

O quadro abaixo apresenta os teores típicos de sólidos obtidos de acordo com o processo de desaguamento e a origem do lodo.

Quadro 5 – Teores típicos de sólidos totais em lodos desaguados, oriundos de diversos processos de tratamento.

Sistema de tratamento de esgotos	Teor de sólidos totais no lodo de esgoto (%)			
	Leito de secagem	Centrifuga	Filtro prensa	Prensa desaguadora
<b>Tratamento primário</b>	35 - 45	25 - 35	30 - 40	25 - 40
<b>Tratamento em lagoas</b>	30 - 40	-	-	-
<b>Lodos ativados convencional (lodo misto)</b>	30 - 40	20 - 30	25 - 35	20 - 25
<b>Lodos ativados (aeração prolongada)</b>	25 - 35	15 - 20	20 - 30	15 - 20
<b>Filtro biológico de alta carga (lodo misto)</b>	30 - 40	20 - 30	25 - 35	20 - 25
<b>Reator UASB</b>	30 - 45	20 - 30	25 - 40	20-30
<b>Reator UASB + lodos ativados</b>	30 - 45	20 - 30	25 - 40	20-30

Lodo misto = lodo primário + lodo secundário

Fonte: adaptado de Von Sperling (2005).

A desidratação do lodo possui como principais vantagens: a redução do custo de transporte; a melhoria nas condições de manejo do lodo, pois o lodo desaguado é mais facilmente processado, transportado e estocado; aumento do poder calorífico, quando o destino final é a incineração; redução do volume para disposição em aterro ou para o reuso na agricultura; e diminuição da produção de lixiviados, quando é disposto em aterros (GONÇALVES et al., 2001).

### 3.3.2. Estabilização

A estabilização tem como principais objetivos atenuar a produção de maus odores, diminuir a concentração de patógenos e reduzir a atração de vetores no processamento e disposição do lodo. Estes objetivos são alcançados através da remoção da matéria orgânica biodegradável presente no lodo bruto (VON SPERLING, 2005).

Segundo Fernandes e Souza (2001), o grau de estabilização tem importância variável de acordo com o destino final previsto para o lodo, sendo:

- Muito importante para a reciclagem agrícola;
- Moderadamente importante para a disposição em aterro sanitário e transporte em geral; e

- Sem importância quando o destino final é a incineração ou disposição oceânica.

Os processos de estabilização podem ser divididos em: biológicos, os quais utilizam os microrganismos para promover a degradação dos sólidos voláteis; químicos, através da oxidação química da matéria orgânica; e térmicos, obtendo a estabilização a partir da ação do calor sobre a fração volátil do lodo (VON SPERLING, 2005).

Para que o lodo seja considerado estabilizado podem ser adotados diversos indicadores. A norma norte americana 40 CFR Part 503 apud Ferreira e Andreoli (1999) aponta como parâmetros de estabilização: odor, redução de patógenos, toxicidade, taxa de absorção de O<sub>2</sub>, atividade enzimática, DBO, DQO, nitratos, pH e alcalinidade, viscosidade, ATP e DNA, valor calorífico, redução de sólidos voláteis e teor de cinzas. Todos esses parâmetros apresentam vantagens e restrições como indicadores de estabilidade.

A norma brasileira CONAMA 375/2006 considera estabilizado o lodo que após processo de estabilização apresente uma redução de pelo menos 38% na concentração de sólidos voláteis.

Como visto no item 3.2. este grau de estabilização pode ser obtido diretamente nos processos de tratamento de esgoto, dependendo da tecnologia empregada.

Porém, em alguns sistemas, como por exemplo os processos aeróbios convencionais, a idade do lodo é reduzida e há a presença de decantador primário. Desta forma, existe a geração de lodo primário, constituído por material de sedimentação e altamente instável, e lodo secundário ativo, também instável, necessitando passar por processos suplementares de estabilização (FERNANDES; SOUZA, 2001).

Segundo o autor supracitado, nos casos onde a idade do lodo é prolongada, ou em sistemas anaeróbios, o lodo é retido por mais tempo dentro do reator, realizando assim sua estabilização. Portanto, nestes casos, o próprio sistema de tratamento de esgotos realiza a estabilização do lodo, não necessitando processos suplementares.

Entre os processos específicos realizados para a estabilização do lodo, os principais são:

### 3.3.2.1. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é o principal processo de estabilização de lodo utilizado no Brasil (VON SPERLING, 2005). De acordo com Miki et al. (2001) a preferência por este processo está relacionada ao baixo custo operacional.

No digestor anaeróbio, o lodo rico em material biodegradável é lançado em um reator fechado, onde se desenvolve uma população de bactérias anaeróbias, que transformam os sólidos voláteis em biogás (VAN HAANDEL e CAVALCANTI, 2006).

A digestão anaeróbia apresenta como objetivos: a redução substancial de sólidos voláteis; a atenuação do número de patógenos; e a diminuição do volume do lodo. Além disso, este processo provê ao lodo características favoráveis à redução de umidade, atenua o problema de odor e a presença de vetores (FERREIRA e ANDREOLI, 1999).

Segundo Miki et al., a digestão anaeróbia reduz cerca de 35 a 60% dos sólidos voláteis, dependendo da natureza do lodo e das condições de operação do sistema de digestão.

Em termos genéricos, uma amostra de 100 kg de lodo bruto, contendo 70 kg de sólidos voláteis e 30 kg de sólidos fixos, após a digestão anaeróbia, será transformada em 40 kg de gases, 30 kg de sólidos voláteis e 30 kg de sólidos fixos (FERNANDES e SOUZA, 2001).

Quanto à remoção de patógenos na digestão anaeróbia, segundo Fernandes e Souza (2001), é típica: a redução de duas ordens de magnitude para os coliformes fecais; a eliminação dos cistos de protozoários; e a resistência de ovos de helmintos. O autor conclui que a digestão anaeróbia do lodo é um processo de estabilização eficiente para diminuir o problema do mau odor, porém a redução de patógenos é pequena, o que impõe limites ao uso do biossólido na agricultura.

### 3.3.2.2. Digestão Aeróbia

O funcionamento dos digestores aeróbios é análogo a um reator com aeração prolongada. Nestes digestores o lodo é biodegradado na presença de oxigênio, favorecendo a atividade de bactérias aeróbias na formação do lodo digerido, do gás carbônico e da água (FERREIRA e ANDREOLI, 1999).

O processo de biodegradação ocorre em duas fases distintas. Primeiramente ocorre a oxidação direta da matéria orgânica e como consequência há um aumento da biomassa bacteriana. Em seguida, após o substrato disponível para a biodegradação ser totalmente consumido, o processo é caracterizado pela respiração endógena, onde os microrganismos passam a utilizar o próprio material celular a fim de obter energia, reduzindo o volume do lodo e diminuindo o teor de sólidos voláteis (FERNANDES e SOUZA, 2001).

De acordo com Ferreira e Andreoli (1999), a eficiência do processo é igual, ou maior, do que a digestão anaeróbia com relação à redução de sólidos voláteis, porém apresenta desvantagens relacionadas ao custo operacional, devido ao alto consumo energético.

Segundo Fernandes e Souza (2001), a estabilização biológica, tanto aeróbia quanto anaeróbia, é eficaz na redução de odores, porém o lodo continua com altos níveis de patógenos, e dependendo do destino final escolhido, é necessário um processo adicional de estabilização, também chamado de desinfecção ou higienização, para tornar as características sanitárias do lodo compatíveis com o uso.

### **3.3.3. Higienização**

Mesmo após a estabilização biológica, o lodo estabilizado continua com uma alta concentração de patógenos, e dependendo do tipo de destinação desejada, se faz necessário um controle mais avançado com relação à segurança sanitária do material (FERNANDES e SOUZA, 2001). Este controle é realizado pelo processo de estabilização conhecido como higienização, o qual visa eliminar ou reduzir significativamente a quantidade de patógenos, tornando o produto final biologicamente seguro para as diferentes aplicações desejadas (PASSAMANI et al., 2002).

Na França, é feita uma distinção entre lodo “tratado”, que significa lodo estabilizado (referindo-se principalmente ao lodo digerido), e lodo “higienizado”, referindo-se ao lodo que passou por processo específico, visando a grande redução em seu conteúdo de patógenos (caleação, compostagem) (FERNANDES e SOUZA 2001).

Com relação aos patógenos encontrados no lodo, estudos epidemiológicos têm mostrado que ovos de helmintos, cistos de protozoários e bactérias representam maiores riscos à saúde humana e/ou animal, pois estes organismos apresentam ampla distribuição geográfica, alta frequência de parasitismo na população e grande tempo de sobrevivência. Alguns gêneros de ovos de helmintos são capazes de sobreviver por vários anos no solo, representando um empecilho ao uso do lodo na agricultura (ANDREOLI et al., 2001).

Porém as limitações de destinação do lodo relacionadas aos agentes patogênicos são facilmente controladas por soluções técnicas de higienização que levem à eliminação do patógeno. Estas soluções devem levar em consideração fatores como a viabilidade econômica, segurança e facilidade de aplicação prática. Dentre os processos mais utilizados,

destacam-se: a compostagem, a caleação ou estabilização alcalina, a pasteurização e a secagem térmica (VON SPERLING, 2005).

Estas alternativas possuem como princípios de desinfecção do lodo a temperatura e o pH. Estes fatores apresentam faixas em que os organismos se mantêm presentes ou em desenvolvimento no lodo, e caso seja quebrado este equilíbrio, os organismos são destruídos. A intensidade e o tempo em que os microrganismos são submetidos a estas condições inóspitas determinam a eficiência da desinfecção (ILHENFELD, 1999).

O quadro abaixo apresenta o tempo necessário para destruição de alguns organismos patogênicos de acordo com as temperaturas às quais o lodo é submetido.

Quadro 6 – Temperatura e tempo de manutenção para a destruição de alguns organismos.

<b>Organismo</b>	<b>Tempo (min.)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
1. Salmonella typhosa	Instantâneo	55 a 60
	30	46
2. Salmonella spp.	15 a 30	60
	60	55
3. Shigella	60	55
	5	70
4. Escherichia coli	15 a 20	60
	60	55
5. Entamoeba histolytica (cistos)	Instantâneo	68
6. Taenia saginata	5	71
7. Trichinella spiralis (larvas)	Instantâneo	62 a 72
	60	50
8. Necator americanus	50	45
9. Brucella abortus	50	45
10. Estreptococos fecais	60	70
11. Coliformes fecais	60	70
12. Ascaris spp. (ovos)	60	55
	7	60

Fonte: Ilhenfeld, 1999.

Segundo o autor, as alternativas mais utilizadas são:

### 3.3.3.1. Compostagem

De acordo com Tsutiya (2001), a compostagem é um processo de biodegradação aeróbia. Durante este processo a temperatura é elevada naturalmente a uma faixa de 55 a 65 °C, proporcionando a eliminação ou redução dos microrganismos patogênicos.

Existem diversos sistemas de compostagem, porém para o lodo de esgoto, os mais utilizados são: leiras (revolvidas ou aeradas), pilha estática aerada e reatores (CARVALHO, 2001).

Segundo Tsutiya (2001), os principais benefícios da compostagem são: a conversão da matéria orgânica putrescível em matéria estabilizada; a destruição de patógenos; a redução da umidade do lodo; e a produção de um bio sólido passível de utilização na agricultura.

### 3.3.3.2. Caleação

Durante a caleação três fatores intervêm no processo de desinfecção do lodo: inicialmente a elevação da temperatura, devido à reação exotérmica de hidratação da cal; em seguida o aumento do pH da mistura; e finalmente a ação da amônia que será formada a partir do nitrogênio do lodo em condições de temperatura e pH elevados (ANDREOLI et al., 2001).

A calagem geralmente é realizada através da mistura de cal virgem ao lodo a uma dosagem que varia 30 a 50% do lodo em base seca. A dosagem de 50% do peso seco do lodo faz com que a mistura apresente o pH ligeiramente acima de 12,0. Neste nível de pH todos os patógenos podem ser eliminados, dependendo do tempo em que se mantenha esta condição. Estudos sugerem que um prazo de 60 dias de armazenagem após a mistura é suficiente para uma desinfecção efetiva do lodo (ILHENFELD, 1999).

No quadro abaixo pode se observar o efeito da caleação a uma dosagem de 50% na inviabilização de ovos de helmintos.

Quadro 7 – Número, percentuais de viabilidade e de redução de ovos de helmintos, em lodo aeróbio digerido calado a 50%, proveniente da ETE Belém (PR).

Amostra	pH	Peso Seco (g)	Ovos de Helmintos gMS	Viabilidade %	Redução %	Ovos Helmintos Viáveis/gMS
Lodo	7,3	7	12,19	74	-	9,02

Dia 0	12,5	12,53	0,84	40	-	0,34
Dia 02	12,5	13,23	1,12	40	0	0,45
Dia 15	12,5	14,93	2,75	24	39	0,67
Dia 30	12,13	17,72	1,24	6	84	0,08
Dia 60	10,5	13,25	1,89	0	100	0
Dia 90	9,51	16,25	0,94	0	100	0

Fonte: Thomaz-Soccol et al. (1999) apud Ilhenfeld, 1999.

Os resultados deste estudo indicam uma eficiência de 100% de redução da viabilidade dos ovos encontrados após 60 dias de armazenagem para uma dosagem de cal igual 50% do peso seco de lodo.

É importante salientar que:

Dentre os agentes patogênicos, os helmintos são os que apresentam maior capacidade de resistência às condições do meio, portanto, uma vez realizado o controle desses patógenos, os demais estarão automaticamente em níveis admissíveis, compatíveis com o uso agrícola, não proporcionando riscos aos usuários do produto e ao ambiente (ANDREOLI et al., 2001).

De acordo com Andreoli et al. (2001) a caleação é um método com grande potencial de consolidação pela alta eficiência na desinfecção, relativa facilidade no procedimento (se comparado à compostagem) e pelo baixo custo. Além disso, a maior parte dos solos brasileiros apresentam caráter ácido, necessitando de correção do pH através aplicação de calcário para as práticas agrícolas. Dependendo da proporção de cal e das doses de uso, a reciclagem agrícola do lodo alcalino pode minimizar ou mesmo substituir essa operação, trazendo grandes vantagens ao produtor rural.

### 3.4. DESTINO FINAL

O destino final adequado ao lodo residual é um fator fundamental para o sucesso de um sistema de saneamento. Este material, durante o processo de tratamento, concentra grande parte dos componentes do esgoto coletado. Desta forma, a falta de planejamento da sua gestão e a escolha de alternativas inadequadas para sua destinação comprometem os benefícios dos investimentos realizados nos sistemas de esgotamento sanitário (FERREIRA e ANDREOLI, 2001).

A importância deste tema foi reconhecida mundialmente através da Agenda 21, aprovada na Conferência Mundial de Meio Ambiente,

realizada no Rio de Janeiro em 1992. Nela estão definidos quatro programas prioritários quanto ao manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos (capítulo 21). São eles: a redução da produção de resíduos, o aumento da reutilização e da reciclagem, a promoção de depósitos e tratamento ambientalmente saudáveis, e a ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos (BRASIL, 1992).

Recentemente, no ano de 2010, o Brasil aprovou sua Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a qual vai ao encontro dos programas estipulados pela Agenda 21, definindo como ordem preferencial para a gestão dos resíduos: a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

No atual panorama mundial mais de 90% do lodo produzido tem sua disposição final por meio de três processos: incineração, disposição em aterros e uso agrícola (ANDREOLI; PINTO, 2001). No Brasil, grande parte do lodo gerado nos sistemas de tratamento tem como destino final os aterros sanitários, um sistema oneroso e que limita a reciclagem e reaproveitamento do resíduo (MORAES NETO; JÚNIOR; MURAOKA, 2007).

Esta realidade já foi ultrapassada em países desenvolvidos. Nestes países a forma predominante de disposição final do lodo de esgoto é o chamado uso benéfico, em grande parte por intermédio do uso agrícola, adotado para aproximadamente 55,5% do lodo produzido nos Estados Unidos. Na Europa estes dados não são muito diferentes: a reciclagem agrícola é a opção adotada para 29% do lodo produzido na Bélgica, 54% na Dinamarca, 58% na França, 27% na Alemanha, 33% na Itália, 50% na Espanha e 44% no Reino Unido, sendo que há uma tendência de que estas porcentagens sejam maiores, visto que estes dados correspondem à década passada (BARBOSA; TAVARES FILHO, 2006).

Sendo assim, a quantidade de lodos lançados em aterro sanitário tende a reduzir devido às exigências ambientais crescentes para utilização desta alternativa. Desta forma, devido à necessidade de produção de alimentos em quantidades cada vez maiores e pelo fato do lodo de esgoto ser um insumo de boa qualidade para a agricultura, a opção com maior perspectiva de crescimento em todo o planeta é a reciclagem agrícola (ANDREOLI; PINTO, 2001).

### **3.4.1. Aterro Sanitário**

Esta alternativa consiste no confinamento do lodo em células recobertas com terra. Nestas células, devido à ausência de oxigênio, o lodo é biodegradado de forma anaeróbia, implicando em uma baixa velocidade de degradação e na produção de gás metano (FERREIRA e ANDREOLI, 1999).

A disposição em aterros não requer um tratamento apurado do lodo. O principal fator limitante é o teor de sólidos, que deve ser de pelo menos 15 a 20% de ST. Este teor é necessário para evitar a geração excessiva de chorume e para não prejudicar a estabilidade do aterro. Desta forma, o desaguamento normalmente é a única exigência para disposição de lodo de esgoto em aterro (BITTENCOURT, 2014).

Segundo Tsutiya (2001), deve-se seguir critérios rigorosos para: a elaboração do projeto de aterro; a escolha do local de implantação; e o monitoramento da área. Um aterro mau projetado poderá causar impactos ambientais significativos ao ar (exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou material particulado), às águas superficiais (pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de poluentes pela ação das águas pluviais), ao solo e às águas superficiais (pela infiltração de líquidos percolados).

O principal fator limitante é a grande exigência de área, tornando-as sem fins produtivos. Por exemplo, uma cidade de 300 mil a 500 mil habitantes, gerando 25 t/dia de lodo em base seca, dependendo da tecnologia de aterro utilizada, necessitará de 2 a 20 ha/ano para dispor seu lodo, inutilizando a área (FERREIRA e ANDREOLI, 1999).

O que faz com que os aterros sanitários sejam uma opção tão frequente são os baixos custos. Segundo Manzochi (2008), o aterro normalmente é o procedimento de disposição final mais barato.

Segundo Tsutiya (2000), esta alternativa é interessante para atender os objetivos de absorção dos lodos com características inadequadas ao uso benéfico, absorção de volumes excedentes à demanda, disposição de cinzas de incineração e garantia de disposição adequada independente de quaisquer fatores.

### **3.4.2. Incineração**

A incineração é um processo de combustão controlada de resíduos, aplicável a lodos de esgotos previamente adensados, desaguados a um teor de sólidos mínimo de 25% e macerados (USEPA, 1979, apud MANZOCHI, 2008).

Esta alternativa possui como vantagens uma grande redução do volume do lodo, sua inertização dentro dos critérios ambientais e a possibilidade de recuperação de energia (TSUTIYA, 2001).

Porém, consiste em uma opção com elevado custo por tonelada tratada, apresenta problemas secundários de poluição atmosférica, e ainda resta deste processo a destinação final das cinzas. (FERREIRA e ANDREOLI, 1999).

### **3.4.3. Landfarming**

Esta opção tem como objetivo utilizar o solo como um sistema de tratamento, dispondo, por vários anos, doses elevadas de lodo na área selecionada. Desta forma, o solo passa a ser o suporte da atividade biológica de bioxidação, além de reter os metais e possibilitar a exposição ao sol, promovendo a degradação da matéria orgânica (TSUTIYA, 2001).

Segundo Ferreira e Andreoli (1999), as doses de aplicação variam de 60 a 70 toneladas de lodo em base seca para por hectare/ano para as áreas que não tem impermeabilização da camada inferior a 300 a 600 t/ha/ano, quando o processo é feito dentro de critérios de *landfarming*. Projetos de *landfarming* devem conferir proteção às águas subterrâneas e superficiais em relação à migração de poluentes, pormenorizados em planos específicos de operação, monitoramento, emergência e fechamento (MANZOCHI, 2008).

Esta tecnologia não promove o reaproveitamento nutricional ou energético do lodo. Desta forma, é considerada como uma disposição sem fins benéficos. O *landfarming* possui como principais desvantagens: o acúmulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo, devido à alta taxa de aplicação; possibilidades de contaminação do lençol freático, caso seja mal executado; liberação de odores e atração de vetores; e a dificuldade de reintegração da área após a desativação (LARA et al., 2001 apud VON SPERLING, 2005).

Segundo Ferreira e Andreoli (1999), esta alternativa apresenta um baixo custo e se bem instalada e monitorada, é inócua ao meio ambiente e de simples execução. Sendo assim, é considerada como uma boa alternativa para um plano de emergência de sistemas de reciclagem.

### **3.4.4. Reciclagem Agrícola**

A reciclagem agrícola consiste na incorporação do lodo de esgoto ao solo com o objetivo de aproveitamento nutricional para o desenvolvimento das culturas. Segundo Von Sperling (2005), pode-se

utilizar o termo biossólido para designar o lodo com características químicas e biológicas compatíveis com uma utilização produtiva. Este termo é uma forma de ressaltar o seus aspectos benéficos.

De acordo com Ferreira e Andreoli (1999), o biossólido não é um simples resíduo. Suas características físico-químicas o tornam um excelente condicionador do solo, podendo auxiliar na melhoria das práticas agrícolas.

Segundo os autores, esta opção alia baixo custo e impacto ambiental positivo quando é realizada dentro de critérios seguros. Sendo assim, ambientalmente é a solução mais correta, pois promove o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento no ciclo dos elementos.

As principais características que tornam os biossólidos tão interessantes agronomicamente são:

A quantidade matéria orgânica, macro e micro nutrientes, os quais exercem um papel fundamental na manutenção da fertilidade do solo, também provocando impacto benéfico no desenvolvimento e rendimento das plantas. Além disso, elevada quantidade de matéria orgânica contida no biossólido pode aumentar o conteúdo de húmus, que melhora a capacidade de armazenamento e de infiltração da água no solo, aumentando a resistência dos agregados e reduzindo a erosão, facilitando a penetração das raízes e a vida microbiana (TAMANINI, 2005).

Segundo Evans (1998) apud Ferreira e Andreoli et al. (1999), mais de 50.000 artigos científicos sobre a reciclagem agrícola de lodo esgoto já foram publicados, e nenhum efeito adverso do uso controlado do insumo foi encontrado. Neste contexto entra a importância das regulamentações de uso, que asseguram a proteção à saúde animal e humana, a qualidade das colheitas, do solo e do meio ambiente como um todo.

Os principais riscos associados à utilização agrícola do lodo e que devem ser objeto de regulamentação são: os metais pesados, os aspectos sanitários, os micropoluentes orgânicos e o nitrogênio. Além de se respeitar as recomendações agrônômicas de acordo com os itens citados, segundo a resolução CONAMA 375/2006, é proibida a utilização de qualquer classe de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.

A Organização Mundial de Saúde – OMS (2007) apud Bittencourt et al (2009), em suas diretrizes para o destino seguro de resíduos do tratamento de esgoto, recomenda a utilização agrícola do lodo de esgoto como forma de minimizar as pressões causadas pelo aumento populacional, pela escassez e degradação de recursos hídricos, resultantes do destino inadequado de resíduos, e pela crescente demanda por alimentos e fibras.

Bittencourt et al. (2009) resume as vantagens do uso de lodo de esgoto na agricultura através da seguinte lista:

- Melhora as condições físico-químicas e biológicas dos solos por meio da adição de matéria orgânica e nutrientes existentes no lodo;
- Torna o solo mais resistente à erosão;
- Diminui os efeitos negativos dos períodos de estiagem durante a safra, pois o solo adquire maior capacidade de retenção de umidade;
- Fornece nutrientes para as plantas;
- Aumenta a produtividade agrícola;
- Reduz os custos de produção dos agricultores, pois se diminui o uso de adubos químicos;
- Contribui para o desenvolvimento da agricultura familiar; e
- Reduz os impactos ambientais decorrentes da inadequada disposição final de lodo de esgoto.

Além disso, segundo a autora, a aplicação do lodo higienizado por estabilização alcalina prolongada minimiza ou mesmo substitui a operação de correção de pH do solo com a aplicação de calcário, prática agrícola necessária para correção da acidez observada em vários locais do Brasil, cujos solos são tipicamente ácidos, trazendo vantagens agrônômicas e econômicas aos agricultores.

Segundo estudo desenvolvido na Região Metropolitana de Curitiba, descrito na tese de Bittencourt (2014), a taxa média de aplicação do lodo em base seca no solo entre os anos de 2007 e 2013 foi de 14,6 t/ha.ano em propriedades com área média de 9,6 ha. Esta experiência proporcionou aos agricultores uma redução média no custo com a compra de fertilizantes e corretivos de acidez do solo de R\$ 584,19/ha (valores de novembro de 2014). Esse custo foi evitado devido ao fornecimento de nutrientes N, P, K e da correção de acidez de solo promovida pela aplicação do lodo de esgoto, que forneceu em média: 85,7% do calcário (PRNT 75%); 69,3% do N, 82,6% do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; e 37,0% do K<sub>2</sub>O demandado pelos cultivos agrícolas do estudo de caso.

Dado todos estes fatos, Ferreira e Andreoli (1999) concluíram que a reciclagem do lodo na agricultura é, sem sombra de dúvida, a melhor

alternativa quando este atende aos requisitos necessários com relação à concentração de metais pesados e patógenos.

### 3.4.5. Classificação da aptidão dos solos para reciclagem agrícola

Para que o uso de biossólido na agricultura não gere riscos à saúde e ao meio ambiente é importante que se estabeleçam critérios quanto ao seu uso e inter-relação com as características do solo e da paisagem, de modo a considerar os seus aspectos e possíveis impactos ambientais.

Segundo Ilhenfeld et al. (1999), a avaliação e diagnóstico das potencialidades das terras para aplicação de lodo de esgoto tem duas funções:

- i. não avaliar o uso do resíduo nas propriedades rurais em que este procedimento ponha em risco o meio ambiente e a saúde humana e animal; e
- ii. planejar a relação produção/demanda de lodo, base para a solução de problemas relacionados com sua disposição final.

Com base nestes preceitos, Souza et al. (1994) adaptaram o sistema de classificação do solo proposto por Norton (1945), para uma abordagem relacionada à aplicação do lodo, relacionando fatores ambientais do solo e do relevo com o grau de risco associado a cada um deles.

De acordo com Manzochi (2008), este sistema foi elaborado visando tanto a utilização em nível de campo, definindo a aptidão de cada gleba, quanto em nível gerencial e de planejamento, definindo zonas preferenciais a partir dos mapas de solo.

O quadro abaixo traz a relação dos aspectos analisados relacionados à influência que estes têm sobre a aptidão das terras para o uso do lodo de esgoto.

Quadro 8 –Aspectos ambientais considerados na avaliação de aptidão das terras para disposição final do lodo de esgoto.

Aspecto	Influência na aptidão das terras para uso do lodo de esgoto
<b>Profundidade do solo e do lençol freático</b>	O solo como meio filtrante dificulta a lixiviação de nutrientes do lodo e conseqüentemente a contaminação do lençol freático. No entanto, elementos de alta solubilidade, como nitrogênio e potássio, tem maior mobilidade e podem ocasionar problemas. Assim, para evitar riscos de lixiviação dos nutrientes do lodo no perfil do solo é recomendável uma profundidade do solo mínima de 1,5 m.

<b>Textura</b>	A textura do solo está relacionada à sua capacidade de filtração e de percolação dos componentes do lodo através do perfil do solo. Solos muito arenosos, muito permeáveis, permitem a lixiviação destes componentes com facilidade; por outro lado, solos muito argilosos dificultam a drenagem.
<b>Erosão</b>	O grau de susceptibilidade à erosão do solo está associado ao risco de transporte de componentes do lodo por escoamento superficial, o qual é avaliado pela associação das características de relevo (forma, declividade e comprimento de rampa) e das características físicas (textura e agregação) deste solo.
<b>Relevo</b>	As características de relevo estão diretamente associadas à velocidade de escoamento superficial das águas, e consequentemente à susceptibilidade à erosão. A aplicação do lodo em áreas declivosas pode favorecer o transporte para cursos d'água, ou a acumulação em áreas mais baixas, tendo como consequência a poluição destes ambientes. Assim, recomenda-se sua utilização em áreas com declividade até 8%, admitindo declividades até 20% e não sendo recomendado em declividades superiores.
<b>Drenagem e hidromorfismo</b>	Solos mal drenados ou hidromórficos tendem a criar condições de anaerobiose e alta umidade, indesejáveis no uso agrícola do lodo. Estas condições são favoráveis à manutenção de alguns patógenos no solo e prejudiciais à atividade de degradação biológica da matéria orgânica. Estes tipos de solos ocorrem nas cabeceiras 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.
<b>Estrutura</b>	Diz respeito à organização das partículas que formam os agregados do solo. Estruturas muito missivas restringem o movimento da água, a penetração das raízes e a aeração do solo. A restrição à infiltração da água facilita o transporte do lodo por erosão, enquanto que a falta de aeração diminui a velocidade de biodegradação do lodo.

Fonte: Souza et al. (2008).

A classificação desenvolvida por Souza et al. (1994) interpretou as unidades taxonômicas que compõem o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo desenvolvido pela EMBRAPA, visando enquadrar os aspectos ambientais considerados na classificação em parâmetros que indiquem o grau de risco que estes podem oferecer.

Desta forma, o quadro a seguir apresenta os critérios para identificar, de forma paramétrica, a classe, subclasse e unidade de aptidão dos componentes das unidades taxonômicas do Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, permitindo uma análise sintética dos solos em relação ao seu provável comportamento após adição de lodo.

Quadro 9 – Identificação dos aspectos ambientais e do grau de limitação das unidades de aptidão.

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe
<b>PR</b> <b>Profundidade</b>	Latossolos, cambissolos ou argissolos profundos.	0 - Nulo	I
	Cambissolos ou argissolos pouco profundos.	2 - Moderado	III
	Neossolos litólicos ou outras unidades de solos rasos.	4 - Muito Forte	V
<b>TE</b> <b>Textura superficial</b>	Textura argilosa, de 35 a 60% de argila.	0 - Nulo	I
	Textura muito argilosa, superior a 60% argila.	1 - Ligeiro	II
	Textura média, de 15 a 35% argila.	2 - Moderado	III
	Textura siltosa, inferior a 35% de argila e inferior a 15% de areia.	3 - Forte	IV
	Textura arenosa, inferior a 15% de argila.	4 - Muito Forte	V
<b>ER</b> <b>Suscetibilidade à erosão</b>	Solos em relevo plano ou latossolos argilosos em relevo ondulado.	0 - Nulo	I
	Outros solos em relevo suave ondulado.	1 - Ligeiro	II
	Solos textura média ou siltosa em relevo suave ondulado. Solos com textura argilosa em relevo ondulado.	2 - Moderado	III
	Solos de textura média ou arenosa e/ou caráter abrupto em relevo ondulado. Solos de textura muito argilosa em relevo forte ondulado.	3 - Forte	IV
	Solos de textura média em relevo forte ondulado. Relevo montanhoso ou escarpado independente da classe textural.	4 - Muito forte	V
<b>DR</b> <b>Drenagem</b>	Solos acentuadamente e bem drenados.	0 - Nulo	I
	Solos fortemente drenados.	1 - Ligeiro	II
	Solos moderadamente drenados.	2 - Moderado	III

	Solos imperfeitamente drenados.	3 - Forte	IV
	Solos mal a muito mal drenados.	4 - Muito forte	V
<b>RE Relevo</b>	Relevo plano, declividade de 0 a 3%.	0 - Nulo	I
	Relevo suave ondulado, declividade de 3 a 8%.	1 - Ligeiro	I
	Relevo ondulado, declividade de 8 a 20%.	2 - Moderado	III
	Relevo forte ondulado, declividade de 20 a 45%.	3 - Forte	IV
	Relevo montanhoso ou escarpado, declividade superior a 45%.	4 - Muito forte	V
<b>PD Pedregosidade</b>	Solos sem fase pedregosa.	0 - Nulo	I
	Solos sem fase pedregosa com presença de cascalho.	2 - Moderado	III
	Solos com citação de pedregosidade.	4 - forte	V
<b>HI Hidromorfismo</b>	Solos sem indicação de hidromorfismo.	0 - Nulo	I
	Solos com caráter gleico.	2 - Moderado	IV
	Solos hidromórficos.	4 - Muito forte	V
<b>FE Fertilidade</b>	Solos distróficos e álicos com horizonte A moderado ou fraco.	0 - Nulo	I
	Solos com horizonte A proeminente e eutróficos com A moderado.	1 - Ligeiro	I
	Solos com horizonte A chernozêmico ou antrópico.	2 - Moderado	III
	Solos com horizonte A húmico.	3 - Forte	IV
	Solos com horizonte turfoso ou solo orgânico.	4 - Muito Forte	V

Fonte: Souza et al. (1994).

De acordo com Manzochi (2008), a aptidão é definida como a classe mais restritiva obtida. Por exemplo, o solo pode ser enquadrado como classe I para profundidade, III para textura, III quanto à suscetibilidade à erosão, IV como relevo e I para pedregosidade, hidromorfismo e pH. A classe de aptidão final deste solo será IV; considerando o grande risco associado à forte declividade da gleba, risco elevado para erosão e escorrimento superficial.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho abrange o sistema de esgotamento sanitário do município de Florianópolis. A cidade é a capital do Estado de Santa Catarina e se localiza na região sul do Brasil. Ela ocupa uma área de 438,5 km<sup>2</sup>, constituída por uma parte insular, que apresenta área de 426,6 km<sup>2</sup>, e por uma parte continental, com área de 11,9 km<sup>2</sup> (PMISB, 2011).

Segundo o Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico de Florianópolis (PMISB, 2011) o sistema de esgotamento sanitário da cidade é composto por onze Estações de Tratamento de Esgotos. Entre elas, nove são operadas pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, uma por empreendedor privado (SES do Balneário de Jurerê Internacional) e uma por entidade pública federal (SES da Base Aérea).

Abaixo segue o quadro resumo dos onze sistemas de esgotamento sanitário do município de Florianópolis:

Quadro 10 – Sistemas de esgotamento sanitário do município de Florianópolis.

Sistemas de esgotamento sanitário	Adm.	Área de abrangência	Estação de Tratamento de Esgoto
Florianópolis Continente	CASAN	Coqueiros e Estreito (trecho no Município de São José)	ETE Potecas
Florianópolis Insular	CASAN	Distrito administrativo Sede Ilha	ETE Insular
Lagoa da Conceição	CASAN	Bairros Dunas da Lagoa, Retiro da Lagoa, Canto da Lagoa e Lagoa da Conceição	ETE Lagoa da Conceição
Barra da Lagoa	CASAN	Bairro Barra da Lagoa	ETE Barra da Lagoa
Canasvieiras	CASAN	Bairro Canasvieiras	ETE Canasvieiras
Saco Grande	CASAN	Centro administrativo do governo do Estado, conjuntos habitacionais Vila Cachoeira e Parque da Figueira	ETE Saco Grande

Praia Brava	CASAN	Bairro Praia Brava	ETE Praia Brava
Parque Tecnológico PARQTEC	CASAN	Parque Tecnológico – PARQTEC ALFA I (Bairro João Paulo)	ETE PARQTEC
Vila União	CASAN	Conjuntos habitacionais da Vila União, Caminho do Mar e Caminho da Praia (Bairro Vargem do Bom Jesus)	ETE Vila União
Jurerê Internacional	HABITASUL	Bairro Jurerê Internacional (Jurerê oeste)	ETE Jurerê Internacional
Base aérea	INFRAERO	Base aérea	ETE Base aérea

Fonte: Adaptado do PMISB Florianópolis (2011).

Atualmente boa parte dos esgotos domésticos gerados na cidade não é coletado pelos sistemas públicos. Nestas áreas o esgotamento sanitário é realizado através de soluções individuais, com ou sem tratamento, dispondo o efluente em rios, rede de drenagem, mar ou solo (PMISB, 2011).

Estima-se que os sistemas de tratamento operados pela CASAN em Florianópolis produzam cerca de 1.500 toneladas de lodo por mês (18 mil toneladas/ano), e o destino final deste material é a disposição em aterros sanitários (CASAN, 2014). Tendo-se em vista o fato de que a abrangência do sistema de esgotamento sanitário em Florianópolis ainda é baixa, este volume de produção de lodo tende a aumentar consideravelmente, sendo primordial a busca por soluções mais adequadas para gestão deste passivo ambiental.

Além do sistema de esgotamento sanitário de Florianópolis, fazem parte deste trabalho as áreas agricultáveis da mesorregião da Grande Florianópolis.

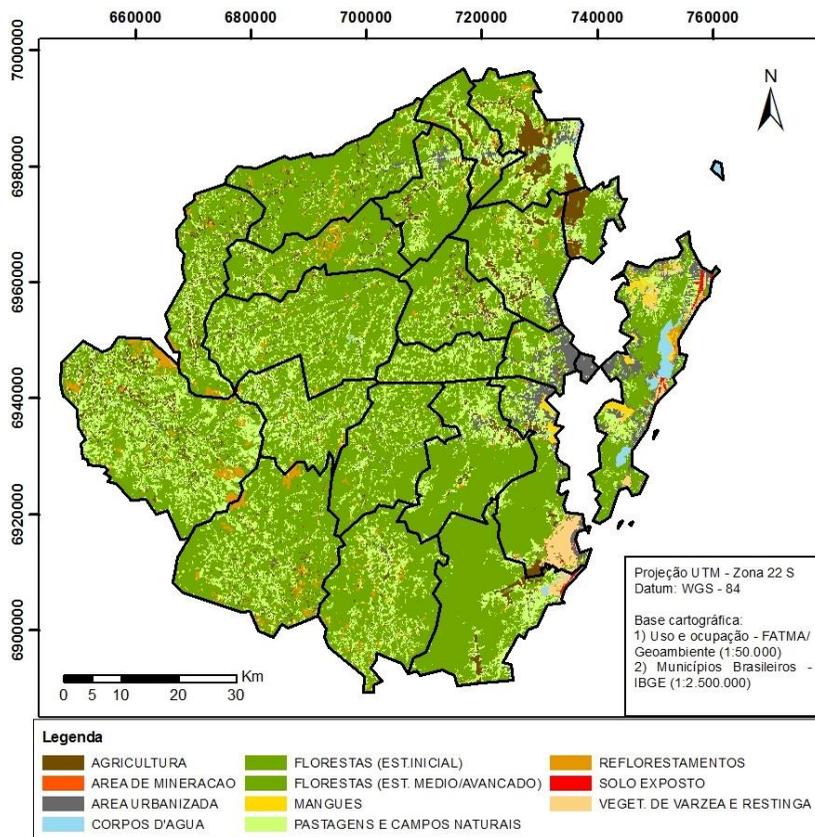
A região é composta por 21 municípios e ocupa uma área de aproximadamente 7 mil km<sup>2</sup>. O mapa indicando a localização dos municípios pode ser encontrado no APÊNDICE A – Municípios da Grande Florianópolis.

A área é ocupada predominantemente por florestas em estágio médio ou avançado, cobrindo cerca de 64% da superfície.

As áreas agrícolas, alvo deste estudo, representam 4,34% da área total, somando cerca de 30.300 hectares distribuídos principalmente no cinturão verde que abastece o conglomerado urbano.

A figura 1, a seguir, apresenta o mapa de uso e ocupação do solo da região, elaborado a partir dos dados geoespaciais fornecidos pela Fundação do Meio Ambiente (FATMA).

Figura 1 – Uso e ocupação do solo (Grande Florianópolis).



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para a realização da análise de viabilidade da reciclagem agrícola do lodo de esgoto na região da Grande Florianópolis, o trabalho buscou abordar os três principais aspectos que interferem nesta temática, sendo eles:

- A questão técnica;
- A questão ambiental; e

- A questão econômica.

Desta forma, o desenvolvimento deste trabalho contemplou as seguintes etapas:

#### 4.2. DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO DE LODO DE ESGOTO

A produção de lodo de esgoto foi diagnosticada sob os aspectos quantitativos e qualitativos. Foram analisados, por estação de tratamento, os processos de tratamento de esgoto empregados, as técnicas de desidratação e desinfecção do lodo em operação e a destinação final adotada para o lodo de esgoto.

Essas informações foram levantadas diretamente com a prestadora de serviços, Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), a partir de uma solicitação formal de dados enviada à Companhia e respondida via e-mail.

Foram solicitados, para cada estação de tratamento, os seguintes dados:

- Nome da ETE;
- Coordenadas UTM;
- Volume de lodo úmido/mês;
- Volume de lodo desaguado/mês;
- Vazão de operação atual;
- Vazão de projeto da estação;
- Unidades e processos de tratamento de efluentes existentes; e
- Técnica de desidratação e desinfecção do lodo em operação.

Embora não se tenha obtido, na integralidade, as informações requisitadas, o material disponibilizado foi suficiente para um diagnóstico satisfatório da produção de lodos.

#### 4.3. SELEÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS APTAS À INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NO SOLO

A seleção de áreas aptas à incorporação de lodo de esgoto no solo seguiu a metodologia proposta por Souza et al. (1994).

O sistema de classificação relaciona atributos do solo e da paisagem com o risco ambiental inerentes à cada um deles. São avaliados parâmetros que interferem no processo erosivo do solo e na mecanização, como profundidade, textura, suscetibilidade a erosão, drenagem, relevo, pedregosidade, hidromorfismo e fertilidade (SOUZA et al., 2008).

Para definição das áreas aptas à incorporação do lodo de esgoto nos solos da Grande Florianópolis, foi realizado um extensivo trabalho de geoprocessamento, sendo executadas as seguintes etapas:

#### i. Obtenção de dados espaciais

Os principais dados espaciais utilizados neste estudo foram os mapas de divisão territorial do Brasil, mapa de solos de Santa Catarina e mapa de uso e ocupação do solo de Santa Catarina, todos obtidos em formato *shapefile* (*shp.*), conforme quadro-resumo abaixo:

Quadro 11 – Dados espaciais utilizados.

Dado espacial ( <i>shapefile</i> )	Datum original	Escala	Fonte
MUNICIPIOS_IBGE_2007	SAD69	1:2.500.000	IBGE (2007)
SOLOS_SC	WGS84	1:250.000	Embrapa Solos (2004)
USO_DO_SOLO_POL	SAD69	1:50.000	FATMA/Geoambiente (2005)

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Visando facilitar a sobreposição das informações com as imagens de satélite disponíveis no *software* Google Earth, o trabalho de geoprocessamento foi realizado utilizando o sistema de projeção WGS 1984 UTM Zone 22S. Sendo assim, os arquivos *shp.* que não estavam nesta projeção foram convertidos.

#### ii. Aplicação da metodologia e criação do banco de dados

A partir das informações dos solos de Santa Catarina, foi possível implementar a metodologia de classificação quanto à aptidão do solo para aplicação de lodo proposta por SOUZA et al. (1994).

Os dados referentes às características do solo e da paisagem foram tratados e cruzados, conforme metodologia descrita no Quadro 9, obtendo-se como resultado as classes de aptidões para o tipo de solo dominante de cada unidade amostral conforme o quadro a seguir:

Quadro 12 – Classes de aptidão das terras para a aplicação de lodo de esgoto.

Classe de aptidão	Aptidão das terras	Uso de lodo de esgoto	Observação
Classe I	Muito Boa		
Classe II	Boa	Permitido	Permitida a utilização do lodo de esgoto sem restrições.
Classe III	Regular		

Classe IV	Restrita	Não recomendado	Poderá ser permitido o uso, no processo de obtenção do Licenciamento Ambiental mediante apresentação de fatores atenuantes.
Classe V	Inapta	Vetado	Não deve ser permitida aplicação.

Fonte: Souza et al. (1994).

Após construir o banco de dados foi necessário espacializá-lo, associando-o ao arquivo *shapefile* dos solos de Santa Catarina, tendo como resultado o mapa de aptidões para o uso de lodo de esgoto no solo, segundo os diversos critérios ambientais avaliados.

### iii. Definição das terras agrícolas aptas

Com a base de dados espacializada foi realizada a intersecção destas informações com as áreas agrícolas, obtidas a partir do mapa de uso e ocupação de Santa Catarina.

Como produto foi gerado o mapa de aptidão das terras agrícolas da Região da Grande Florianópolis para disposição final de lodo de esgoto.

Esta etapa foi de extrema importância, por possibilitar a visualização de quais áreas estariam realmente disponíveis para a destinação do lodo de esgoto e apoiar as demais decisões referentes a este estudo. Através da análise dos solos e das áreas agrícolas da Grande Florianópolis, foi possível responder tecnicamente se a reciclagem agrícola é viável do ponto de vista ambiental, agrônômico e mercadológico – produção (ETEs) *versus* demanda (propriedades agrícolas).

### iv. Análise e geração dos mapas temáticos

A partir dos dados geoespaciais obtidos e do banco de dados criado neste estudo, foram elaborados os diversos mapas temáticos utilizados neste trabalho.

## 4.4. ESCOLHA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA UGL

Conhecendo os locais das estações de tratamento e os volumes de lodo produzidos por estas, bem como os centros geométricos e as áreas dos locais passíveis de incorporação, foi realizada a análise e a determinação de um local estratégico para implantação da Unidade Gerencial de Lodos (UGL) centralizada

Para isto, foi calculado o baricentro logístico da produção (ETEs) *versus* demanda (propriedades agrícolas), identificando o local geometricamente ideal para a instalação da UGL, de forma que os custos de transporte sejam os minimizados.

Em seguida, foi realizada uma análise de zoneamento e impactos de vizinhança. Procurou-se identificar zonas com atividades similares à que será realizada na UGL, com o objetivo de integrar da melhor maneira possível o empreendimento à vizinhança e viabilizá-lo em nível de zoneamento municipal. Entre as áreas de similaridade estão zonas: industriais; de gerenciamento de resíduos; e de tratamento de efluentes.

Como resultado do estudo locacional foi determinado o local ideal para implantação da UGL.

Esta Unidade Gerencial de Lodos tem como objetivo centralizar a logística de distribuição do lodo de esgoto para agricultura, bem como torná-lo apto a este tipo de destinação a partir de processos de estabilização e higienização. Neste estudo foi adotado o processo de higienização por via alcalina por meio de adição de cal virgem, escolha que será justificada no decorrer deste trabalho.

Após a escolha do local de instalação da UGL, foram calculadas as distâncias percorridas entre as estações de tratamento e a unidade gerencial, bem como a distância média entre a UGL e os solos agricultáveis passíveis de incorporação de lodo de esgotos. Para a determinação dos percursos foram utilizados os recursos de rota do software Google Earth.

Estas informações serviram de base para a determinação dos custos de transporte.

#### 4.5. ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica da alternativa foi realizada para um horizonte de projeto de 20 anos. Para a análise dos custos, foram tomados como referência, na maior parte dos casos, os parâmetros estimados na tese desenvolvida por Manzochi (2008).

Os parâmetros adotados dizem respeito aos aspectos do lodo de esgoto e ao dimensionamento da UGL. Entre estes dados estão: densidades, teor de sólidos do lodo, teor de cal aplicada, áreas ocupadas, índices de produtividade, entre outros que serão citados posteriormente.

Além destes dados, foram utilizadas informações referentes aos custos de instalação e operação da UGL. Essas informações foram baseadas no trabalho da autora supracitada, e os valores foram corrigidos de acordo com o Índice Nacional de Custo da Construção (INCC-DI) nos

casos de obras de instalação e conforme o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M/FGV) para os demais itens.

Nesta etapa foram calculados tanto os custos de instalação, através da aquisição de equipamentos, área de implantação do empreendimento e construção dos galpões da UGL, quanto os custos operacionais relacionados ao monitoramento do lodo, transporte, consumo de produtos químicos e mão de obra.

Em seguida foram obtidos os índices de custo, relacionando os dispêndios com o peso de lodo desaguado a ser gerenciado (R\$/T lodo desaguado).

A partir dos valores obtidos foi realizada uma comparação entre os custos da atual alternativa (Aterro Industrial) e da solução proposta (Unidade Gerencial de Lodos – UGL). Para esta análise, foram utilizados métodos consagrados de engenharia econômica, como por exemplo: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno do investimento e o período de *Payback*. Esta análise permitiu responder economicamente se a alternativa proposta é viável.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1. DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO DO LODO DE ESGOTO EM FLORIANÓPOLIS**

Nesta etapa foram diagnosticadas as produções de lodo das quatro principais estações geradoras de lodo inseridas no município e administradas pela CASAN. São elas: ETE Insular, ETE Lagoa da Conceição, ETE Canasvieiras e ETE Saco Grande.

Ficaram de fora deste estudo: a ETE PARQTEC por se tratar de um empreendimento privado, a ETE Vila União por se encontrar inoperante e as ETES Potecas, Praia Brava e Barra da Lagoa, por apresentarem um período de retirada de lodo muito superior aos demais, as duas primeiras estações, por possuírem sistema de tratamento composto por lagoas de estabilização, e a última por apresentar um canteiro de mineralização do lodo

Abaixo pode se observar as ETES que fazem parte do escopo deste trabalho, bem como a localização do ponto atual de disposição final dos lodos gerados em Florianópolis: o Aterro Industrial (Classe IIA e IIB) administrado pela empresa Rio Vivo e localizado em Gaspar (SC) em coordenadas UTM zona 22J de aproximadamente 705454 m E e 7017180 m S.

Figura 2 – Principais estações geradoras de lodo e local de disposição final.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

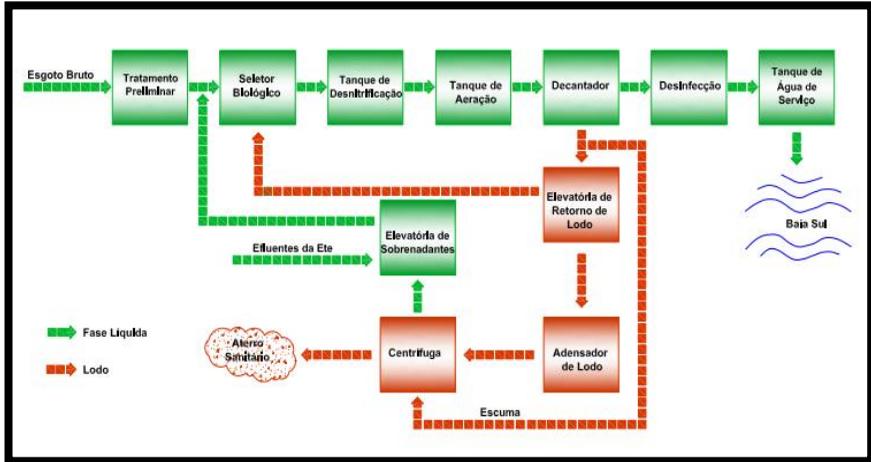
### 5.1.1. ETE Insular

A estação de tratamento de esgotos Insular, localizada na zona UTM 22J nas coordenadas 741217 m E e 6944705 m S, atende a aproximadamente 150.000 habitantes, opera com uma vazão média na faixa de 272 L/s e foi projetada em sua primeira etapa para uma vazão máxima de 417 L/s.

A ETE insular apresenta como tratamento biológico o sistema de lodos ativados com aeração prolongada. Ao entrar na estação o esgoto é submetido ao tratamento preliminar composto de gradeamento

automático e duas caixas de areia. Em seguida passa pelo tratamento biológico, constituído por seletor biológico, tanque de desnitrificação, dois tanques de aeração e três decantadores secundários. Por fim o efluente é exposto à desinfecção por meio de cloração, sendo logo após enviado ao tanque de água de serviço (para reuso na emulsão de polímeros) e o seu excesso lançado no mar da Baía Sul.

Figura 3 – Fluxograma de tratamento ETE Insular.



Fonte: CASAN (2015).

Por não apresentar decantador primário, o lodo produzido na estação é integralmente de origem secundária (processos biológicos). O fato do lodo ser procedente de tratamento por aeração prolongada, com idade do lodo entre 18 e 30 dias, faz com que ele seja estabilizado no próprio tanque de aeração, não necessitando de unidades específicas para estabilização (VON SPERLING, 2012).

O lodo removido do decantador secundário é essencialmente recirculado, retornando ao seletor biológico, onde servirá de matéria prima para o processo de tratamento. Apenas o excesso é descartado e enviado para disposição final.

O lodo descartado possui elevado teor de umidade (superior a 95%), fazendo-se necessário o desagumamento. Na ETE Insular este processo ocorre por meio de adensamento, seguido de condicionamento com polímero catiônico e por fim passagem pela centrífuga desagumadora.

Figura 4 – Centrífugas desagumadoras ETE Insular.



Fonte: CASAN (2015).

O sistema de desaguamento de lodo em operação produz uma “torta” com concentração de sólidos de aproximadamente 20%. Este material é encaminhado ao Aterro Industrial localizado em Gaspar (SC).

Na ETE Insular são gerados aproximadamente 700 m<sup>3</sup>/mês de lodo desidratado. O custo para disposição do lodo é de R\$ 121,15 por tonelada de lodo desidratado transportado ao aterro mais R\$ 0,54 por tonelada de lodo x Km percorrido.

A ETE se encontra a uma distância percorrida de aproximadamente 129 Km do aterro, representando um custo de transporte de R\$ 69,66/T, e por consequência um custo total de disposição de R\$190,81 por tonelada de lodo desidratado.

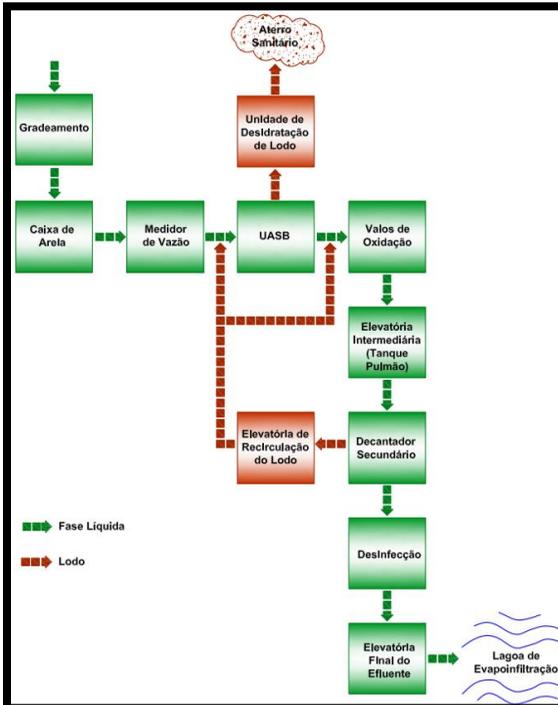
### **5.1.2. ETE Lagoa da Conceição**

A estação de tratamento de esgotos Lagoa da Conceição, localizada na zona UTM 22J nas coordenadas 751724 m E e 6943248 m S, atende a aproximadamente 36.000 habitantes, opera com uma vazão média na faixa de 35 L/s e foi projetada para uma vazão máxima de 73 L/s.

O sistema de tratamento biológico implantado consiste na combinação do reator anaeróbio UASB com os Valos de Oxidação que operam em sistema de aeração prolongada.

O esgoto afluyente passa pelo tratamento preliminar composto por gradeamento fino e grosseiro e duas caixas de areia. O efluente segue para o tratamento biológico, que conta com um reator anaeróbico (UASB), dois Valos de Oxidação e um decantador secundário. Por fim o esgoto tratado é exposto à desinfecção por meio da cloração, sendo em seguida lançado em uma lagoa de evapotranspiração.

Figura 5 – Fluxograma de tratamento ETE Lagoa da Conceição.



Fonte: CASAN (2015).

O lodo produzido na estação é integralmente de origem secundária e por ser originário de um sistema de tratamento anaeróbico seguido de aeração prolongada, o material já sai dos reatores estabilizado.

Existem dois pontos de retirada de lodo do sistema: no reator UASB e no decantador secundário. Neste último, o lodo é recirculado para as entradas do UASB e dos valos de oxidação. Deste modo, apenas o excesso de lodo retirado do reator UASB é descartado.

O excesso de lodo é encaminhado para uma centrífuga desaguadora, para possibilitar desidratação e posteriormente é destinado ao Aterro Industrial localizado em Gaspar (SC).

Figura 6 – Decanter (centrífuga desaguadora) ETE Lagoa da Conceição.



Fonte: CASAN (2015).

Na ETE Lagoa da Conceição são produzidos cerca de 20 m<sup>3</sup>/mês de lodo desidratado. O custo para disposição do lodo é de R\$ 121,15 por tonelada de lodo desidratado transportado ao aterro mais R\$ 0,54 por tonelada de lodo x Km percorrido. A ETE se encontra a uma distância percorrida de aproximadamente 142 Km do aterro, representando um custo de transporte de R\$ 76,68/T, e por consequência um custo total de disposição de R\$197,83 por tonelada de lodo desidratado.

### 5.1.3. ETE Canasvieiras

A estação de tratamento de esgotos Canasvieiras, localizada na zona UTM 22J nas coordenadas 753664 m E e 6963106 m S, atende a aproximadamente 80.000 habitantes e foi projetada para uma vazão média de 156 L/s.

O sistema de tratamento biológico implantado consiste na combinação de reator anaeróbio UASB seguido de Valos de Oxidação que operam em sistema de aeração prolongada.

O esgoto afluyente passa pelo tratamento preliminar composto por gradeamento automático e duas caixas de areia. Em seguida o efluente é submetido ao tratamento biológico, que conta com três reatores UASB, três valos de oxidação e três decantadores secundários. Por fim o esgoto tratado é exposto à desinfecção por meio da cloração, sendo logo após enviado ao tanque de água de serviço e o seu excesso lançado no Rio Papaquara.

Além do sistema de tratamento dos efluentes provenientes das redes coletoras, a ETE é dotada de um sistema compacto para o pré-tratamento de efluente de caminhões limpa-fossa, com gradeamento automatizado, sistema de remoção de areia e flotação de gordura por ar dissolvido.

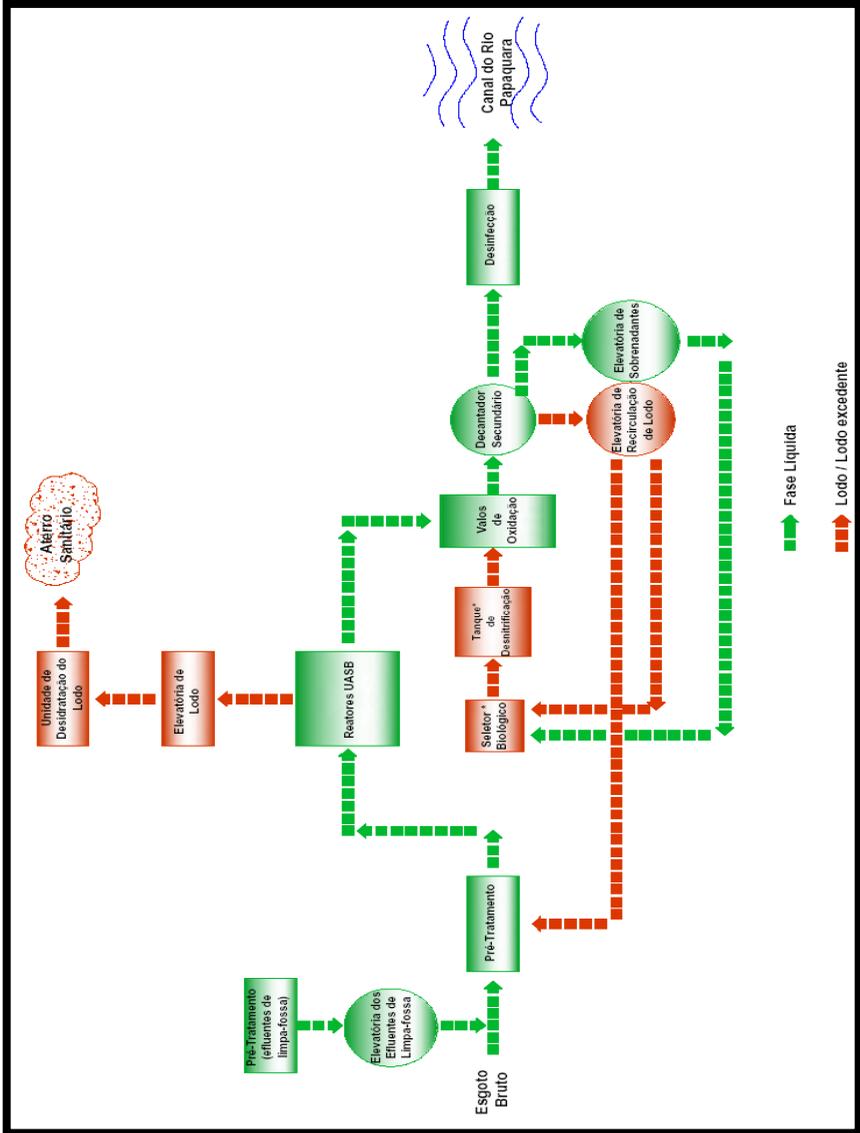
Existem dois pontos de retirada de lodo do sistema – decantador secundário e UASB, porém o lodo que sai do decantador secundário é recirculado nas entradas do tratamento preliminar e do seletor biológico, desta forma apenas o lodo descartado no reator UASB segue para disposição final.

Este lodo possui elevado teor de umidade (superior a 95%), motivo pelo qual se faz necessária a desidratação. Na ETE Canasvieiras esse processo ocorre de duas formas: centrífuga desaguadora e leitos de secagem. Em ambos os casos, o lodo é destinado para o aterro industrial localizado em Gaspar (SC).

A centrífuga desaguadora (Figura 8) é a principal unidade de desidratação do lodo da estação. Esta unidade é precedida de um tanque de homogeneização de lodo, que recebe o lodo do fundo dos três reatores UASB.

De forma a melhorar a desidratabilidade do lodo, utiliza-se solução com polímero catiônico, que é misturada ao lodo antes da entrada da centrífuga, permitindo uma melhor aglutinação do material.

Figura 7 – Fluxograma de tratamento ETE Canasvieiras.



Fonte: CASAN (2015).

Figura 8 – Centrífuga desaguadora ETE Canasvieiras.



Fonte: CASAN (2015).

Na ETE Canasvieiras são produzidos cerca de 150 m<sup>3</sup>/mês de lodo desidratado. O custo para disposição do lodo é de R\$ 121,15 por tonelada de lodo desidratado transportado ao aterro mais R\$ 0,54 por tonelada de lodo x Km percorrido. A ETE se encontra a uma distância percorrida de aproximadamente 158 Km do aterro, representando um custo de transporte de R\$ 85,32/T, e por consequência um custo total de disposição de R\$206,47 por tonelada de lodo desidratado.

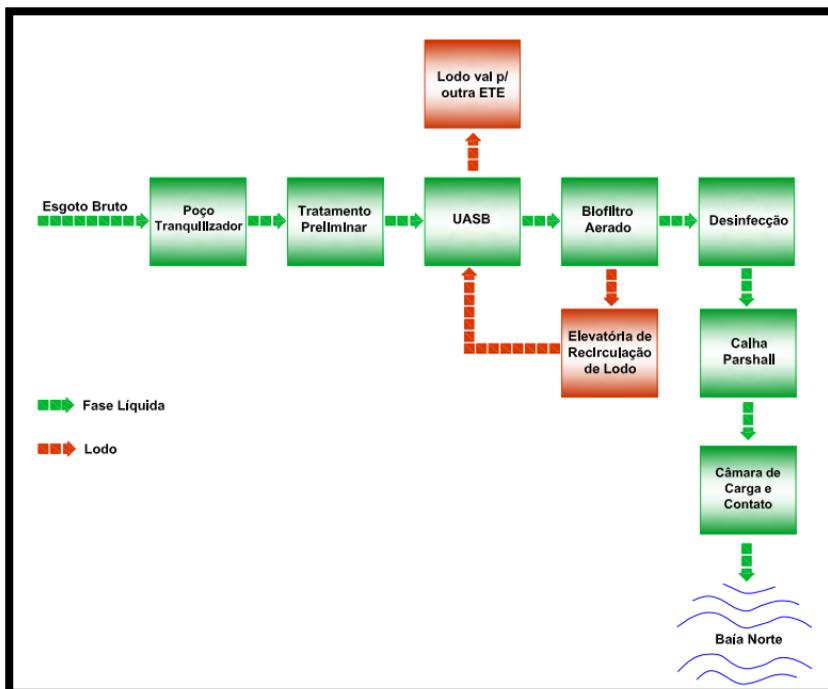
#### 5.1.4. ETE Saco Grande

A estação de tratamento de esgotos Saco Grande, localizada na zona UTM 22J nas coordenadas 746169 m E e 6949777 m S, atende a aproximadamente 6.000 habitantes e apresenta uma vazão média de operação em torno de 11,5 L/s.

O sistema de tratamento biológico empregado é constituído de reator anaeróbio tipo UASB, seguido de biofiltro aerado.

O esgoto afluyente à ETE passa pelas seguintes etapas antes de ser lançado no mar da Baía Norte: tratamento preliminar composto por gradeamento, caixa de areia e caixa de gordura, seguindo para o tratamento biológico formado por um reator anaeróbio tipo UASB e um biofiltro aerado submerso, por fim é submetido a desinfecção por cloração e lançado no mar.

Figura 9 – Fluxograma de tratamento ETE Saco Grande.



Fonte: CASAN (2015).

São gerados cerca de 20 m<sup>3</sup> de lodo úmido por mês. Este material sai do reator UASB já estabilizado e é encaminhado aos Leitos de secagem da ETE Canasvieiras.

Desta forma, este volume já está contabilizado nos 150 m<sup>3</sup> de lodo desidratado geridos por mês na ETE Canasvieiras, devendo apenas incidir para efeito de contabilização dos custos o trajeto de 20,5 Km da ETE Saco Grande até os leitos de secagem. Considerando o valor de R\$ 0,54 por tonelada de lodo x Km percorrido, este trajeto representa um custo de transporte de R\$ 11,07/T.

### 5.1.5. Parâmetros adotados e quantificação do lodo a ser gerenciado

Com o objetivo de quantificar a massa de lodo a ser gerenciada, foram utilizados os seguintes parâmetros para a quantificação:

Quadro 13 – Parâmetros adotados para quantificação do lodo de esgoto.

Parâmetros adotados para a quantificação do lodo			
Tipo de lodo	Parâmetro	Valor	Unidade
Lodo bruto	Densidade	1,03	T/m <sup>3</sup>
	Teor de sólidos	3%	MS
Lodo desaguado em centrífuga desaguadora	Densidade	1,02	T/m <sup>3</sup>
	Teor de sólidos	20%	MS
	Massa de sólidos no lodo desaguado	0,20	T MS/ ton lodo desaguado

Fonte: Adaptado de MANZOCHI (2008).

A partir destas considerações foram calculados as massas de lodo a serem gerenciadas:

Quadro 14 – Quantificação do lodo a ser gerenciado.

ETE	Vol. Lodo desaguado (m <sup>3</sup> /mês)	Teor de Sólidos (%)	Massa de lodo desaguado (T/mês)	Massa de lodo Base Seca (TMS/mês)
ETE Insular	700,00	20%	714,00	142,80
ETE Lagoa da Conceição	20,00	20%	20,40	4,08
ETE Canasvieiras	150,00	20%	153,00	30,60
<b>Total</b>	<b>870,00</b>		<b>887,40</b>	<b>177,48</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Vale ressaltar que o volume de 20 m<sup>3</sup>/mês produzido na ETE Saco Grande está contabilizado no total da ETE Canasvieiras.

### 5.1.6. Área agrícola necessária para disposição do lodo

Segundo a resolução CONAMA 375/2006, a taxa de aplicação do lodo (T base/ha.ano) deve ser o menor valor calculado de acordo com os seguintes critérios: quantidade de N recomendada; pH final da mistura solo-lodo menor que 7; e não supere os limites de carga total de substâncias inorgânicas acumuladas no solo.

Por não possuir dados do lodo referentes aos parâmetros citados, a área necessária para disposição do lodo para fins de reciclagem agrícola foi calculada de acordo com a instrução normativa do Instituto Ambiental do Paraná (IN-IAP, 2003), a qual dispõe sobre o licenciamento ambiental para utilização agrícola de lodo de estações de tratamento de esgotos.

A IN-IAP/2003 (PARANÁ, 2003), define que a taxa de aplicação do biossólido não poderá exceder ao aporte máximo de 50 toneladas secas por hectare num prazo de 10 anos.

Desta forma, a taxa de aplicação agrícola anual adotada foi de 5 T MS/ha, resultando em uma área necessária de 426 hectares, conforme calculado no Quadro 15. A taxa de aplicação adotada é quase 3 vezes menor do que a taxa média de aplicação, 14,6 T MS/ha.ano, utilizada nos solos da Região Metropolitana de Curitiba (BITTENCOURT, 2014).

Quadro 15 – Área agrícola necessária para aplicação de lodo.

<b>Área necessária para aplicação (IAP - 2003)</b>		
<b>Taxa aplicação agrícola</b>	50,0	T MS/ha em 10 anos
<b>Produção anual de lodo em base seca</b>	2129,8	T MS/ano
<b>Área necessária para aplicação</b>	426,0	ha

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

## 5.2. SELEÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS APTAS À INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NO SOLO

### 5.2.1. Tipos de solo da Grande Florianópolis

A região da grande Florianópolis apresenta como tipo de solo predominante os Cambissolos Háplicos, representando cerca de 60 % da área total e cobrindo uma região de 4204,7 Km<sup>2</sup>.

Estes solos são normalmente identificados em relevos forte ondulados ou montanhosos, apresentam fertilidade natural variável e possuem como principais limitações para uso o relevo com declives acentuados, a pequena profundidade e a ocorrência de pedras na massa do solo (EMBRAPA SOLOS, 2004).

Outra característica de relevante interesse para a destinação do lodo é relacionada ao pH destes solos, os quais são fortemente e extremamente ácidos, com valores variando de 4,2 a 5,1 ao longo do perfil (EMBRAPA SOLOS, 2004).

O outro tipo de solo predominante na região são os Argissolos Vermelho-Amarelo, cobrindo uma área de 877,3 Km<sup>2</sup> e representando aproximadamente 13% do território.

Segundo EMBRAPA (2004), estes solos são medianamente profundos a profundos, moderadamente drenados, textura argilosa e baixos teores de matéria orgânica. Com relação ao pH, são solos fortemente ácidos com valores de pH entre 4,4 e 5,1, tanto na superfície quanto em profundidade.

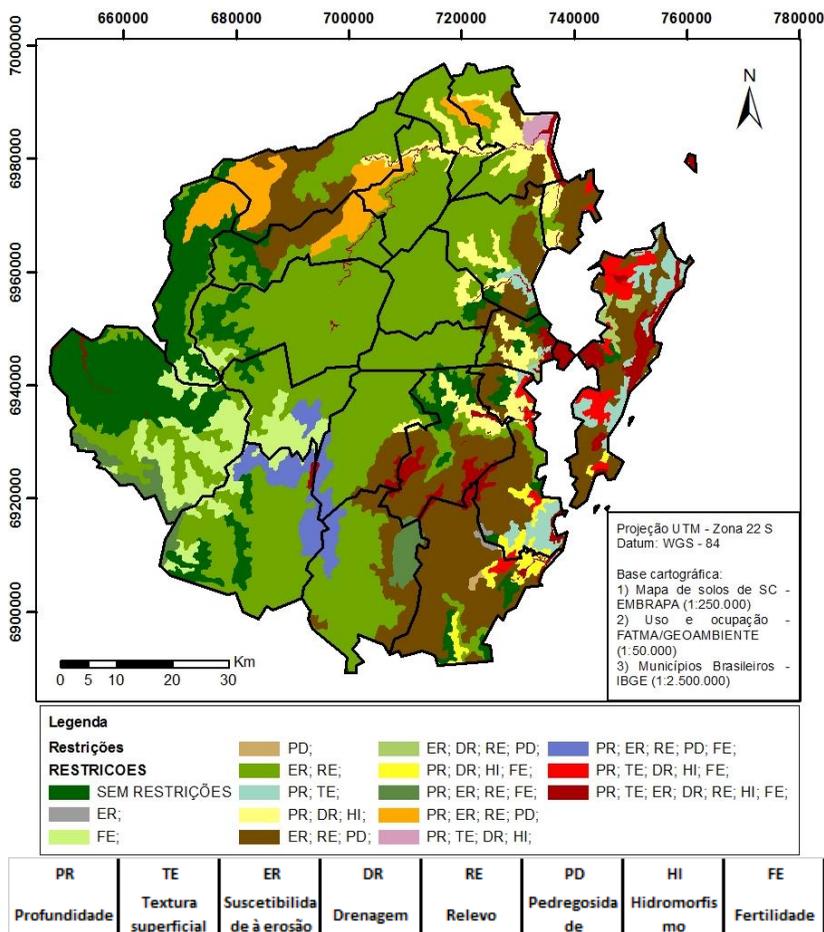
A figura a seguir apresenta o mapa com as distribuições de tipos de solos dominantes na Grande Florianópolis.



aumentando o risco de contaminação do lençol devido à lixiviação dos nutrientes do lodo.

Abaixo pode-se visualizar o mapa identificando os tipos de restrições ao uso de lodo de esgoto no solo da região, conforme nomenclatura indicada no Quadro 9 (item 3.4.5):

Figura 11 – Mapa de restrições ao uso de lodo de esgoto no solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Como resultado da classificação verificou-se que 12,8% da área da Grande Florianópolis apresenta solos propícios para a disposição do lodo de esgoto. Os solos propícios são de classe III, possuindo uma aptidão regular e ocupando aproximadamente 89.417 hectares.

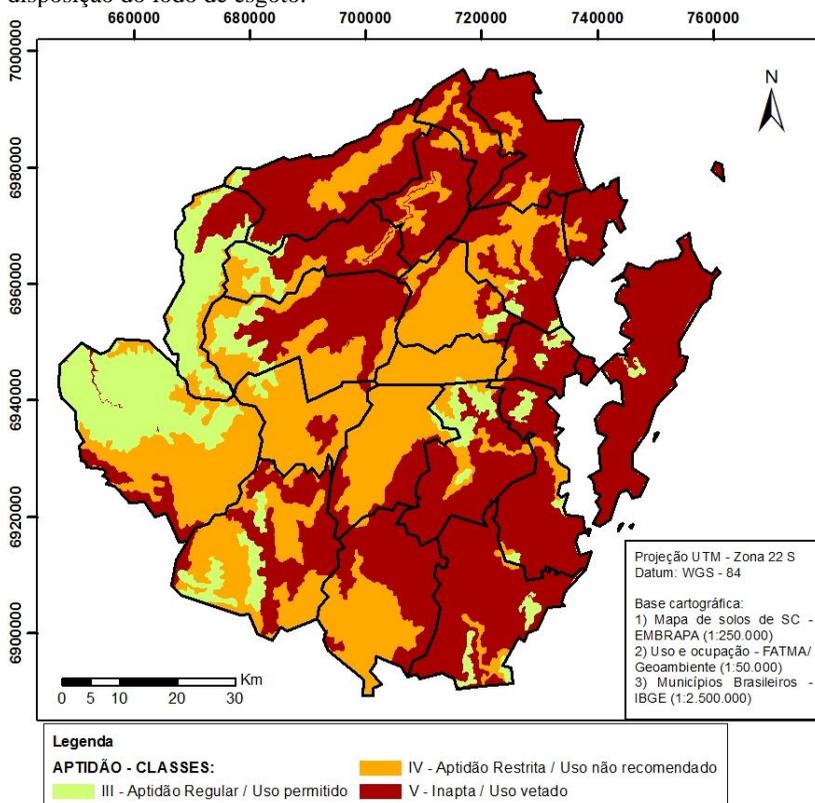
Abaixo pode-se visualizar o quadro resumo do estudo de aptidão e o mapa final de classificação de aptidão dos solos ao uso de lodo de esgoto:

Quadro 16 – Classificação de aptidão do solo da Grande Florianópolis à disposição do lodo de esgoto.

Classe	Aptidão das terras	Uso de lodo de esgoto	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
I	Muito Boa	Permitido	0.00	0.0%
II	Boa		0.00	0.0%
III	Regular		894.17	12.8%
IV	Restrita	Não recomendado	2400.47	34.5%
V	Inapta	Vetado	3664.75	52.7%

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Figura 12 – Mapa de classificação de aptidão do solo da Grande Florianópolis à disposição do lodo de esgoto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

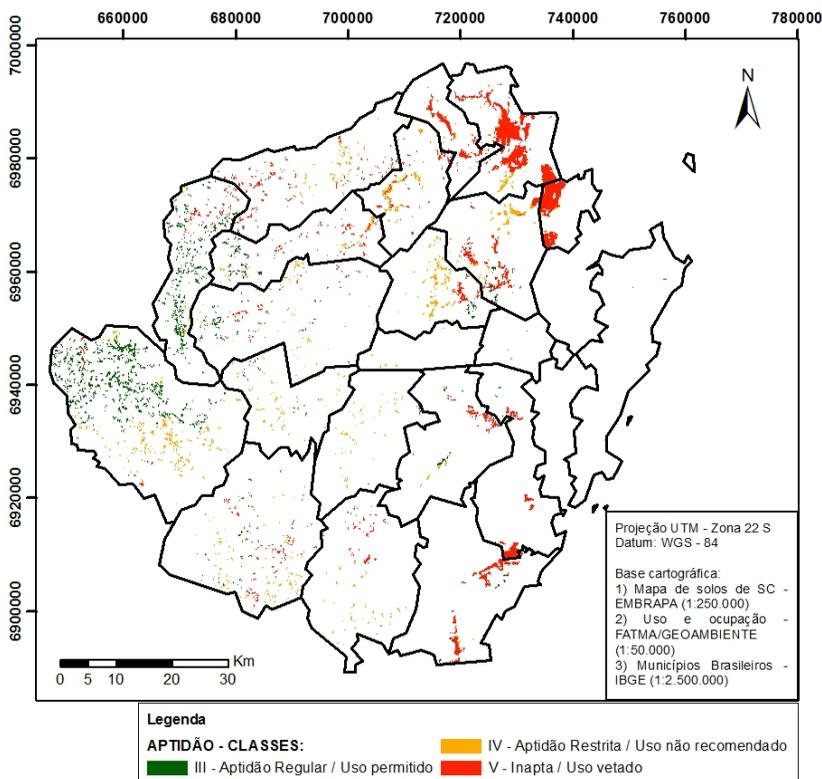
As áreas propícias estão distribuídas sobretudo nos municípios de Alfredo Wagner e Leoberto Leal. Nota-se também a presença de áreas aptas em municípios mais próximos das ETEs, como São José, Biguaçu, Antônio Carlos, Palhoça, Santo Amaro da Imperatriz e Paulo Lopes.

Mais detalhes sobre a aplicação da metodologia e os seus resultados podem ser visualizados no APÊNDICE B – Classificação da aptidão dos solos para disposição do lodo de esgoto.

### 5.2.3. Áreas agrícolas aptas à incorporação do lodo de esgoto

O resultado da classificação dos solos foi cruzado com as áreas agrícolas, obtidas a partir do mapa de uso e ocupação da região. Desta forma, foi possível avaliar qual a área que está verdadeiramente disponível para a reciclagem do lodo. O resultado deste cruzamento pode ser verificado na figura abaixo:

Figura 13 – Mapa de aptidão das áreas agrícolas à incorporação do lodo de esgoto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A região da Grande Florianópolis possui cerca de 6.800 hectares de terras agrícolas aptas à incorporação do lodo de esgoto (Classe III). Este valor mostra-se satisfatório e permite chegar à conclusão de que ambientalmente a reciclagem agrícola do lodo é viável na região, pois a área apta disponível supera em aproximadamente 16 vezes a necessidade de área (426 ha) calculada para este estudo.

Abaixo segue o quadro resumo da aptidão das terras agrícolas:

Quadro 17 – Classificação das áreas agrícolas quanto ao uso de lodo.

Classe	Aptidão das terras	Uso de lodo de esgoto	Área (ha)	Área (%)
III	Regular	Permitido	6814,31	22,5%
IV	Restrita	Não recomendado	6989,88	23,0%
V	Inapta	Vetado	16521,70	54,5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

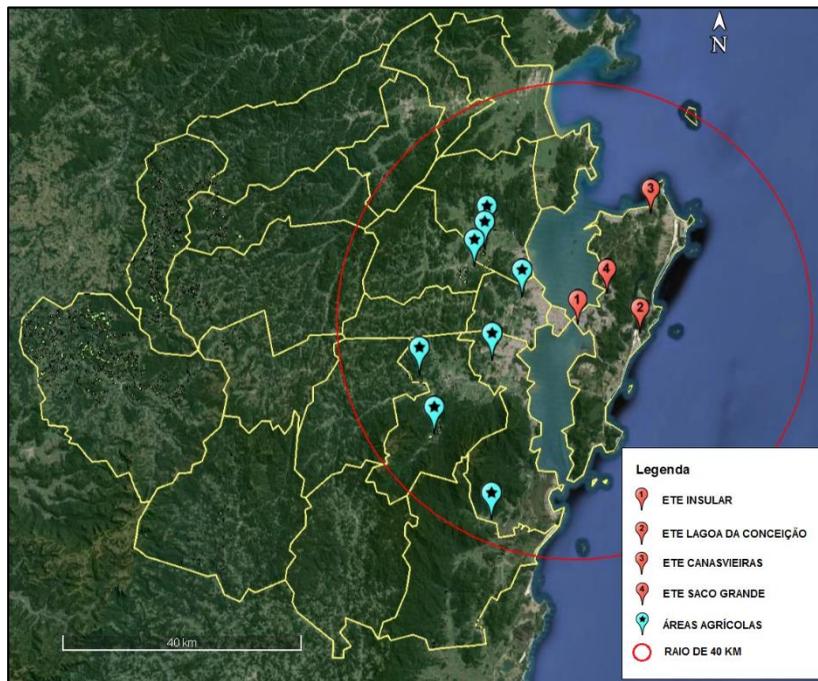
#### 5.2.4. Áreas agrícolas selecionadas para a reciclagem agrícola

Visando dar continuidade ao estudo de viabilidade de implantação da UGL e considerando que a área agrícola apta supera significativamente a área necessária calculada, foi estipulado um raio de viabilidade apoiado em um estudo desenvolvido por Ilhenfeld, Pegorini e Andreoli (1999), o qual estabeleceu, baseado em valores históricos dos nutrientes no lodo (N, K e P), que a distância economicamente viável entre a ETE e a agricultura é de aproximadamente duas vezes o teor de sólidos (%) do lodo.

Este estudo é baseado em valores puramente econômicos, comparando o custo de fertilizantes com o valor do gerenciamento do lodo. Os valores devem ser revistos dependendo da quantidade de nutrientes do lodo, porém, por se tratar de uma análise de viabilidade preliminar, foi considerado que o raio de viabilidade deste estudo corresponde a 40 Km, referentes aos 20% de teor de sólidos do lodo produzido.

Este raio foi aplicado sobre a estação Insular por esta apresentar a maior quantidade de lodo a ser gerenciado. Na figura abaixo podem ser visualizadas as estações de tratamento e as áreas agrícolas selecionadas para destino do lodo.

Figura 14 – Áreas agrícolas selecionadas para disposição do lodo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

As áreas consideradas viáveis por este estudo constituem 7 polígonos, com área total de 500,25 ha, superior a área necessária de 426 ha. Estas áreas estão distribuídas no cinturão agrícola da grande Florianópolis e apresentam os tipos de solo Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háptico, os quais possuem baixa fertilidade e pH ácido.

Desta forma, a higienização por via alcalina mostra-se como técnica ideal para a desinfecção do lodo de Florianópolis. Esta é uma técnica relativamente barata e de fácil operação. Ela tornará a aplicação de lodo ainda mais interessante por gerar uma economia para o agricultor referente à correção do pH, além da economia com fertilizantes em função das características do biossólido.

Abaixo segue o quadro resumo das áreas agrícolas escolhidas. As coordenadas “E” e “S” representadas no quadro estão na zona UTM 22J e correspondem aos centros geométricos das áreas agrícolas selecionadas.

Quadro 18 – Descrição das áreas agrícolas selecionadas.

<b>Tipo de Solo</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Capacidade (T MS/ano)</b>	<b>Distância (Km) - ETE Insular</b>	<b>Cidade</b>
Argissolo Vermelho Amarelo (Pva1)	725999,96	6960004,83	57,34	286,68	21,58	Biguaçu
Argissolo Vermelho Amarelo (Pva1)	725609,26	6957400,40	14,50	72,52	20,12	Biguaçu
Argissolo Vermelho Amarelo (Pva1)	723853,65	6954432,67	218,62	1093,08	19,90	Antônio Carlos
Argissolo Vermelho Amarelo (Pva12)	731838,46	6949337,26	4,53	22,65	10,46	São José
Argissolo Vermelho Amarelo (Pva1)	714519,35	6936524,99	92,77	463,85	27,92	Santo Amaro da Imperatriz
Argissolo Vermelho Amarelo (Pva12)	726724,50	6938810,05	20,68	103,39	15,65	Palhoça
Cambissolo Haplico (Cx2)	716931,10	6926614,54	86,18	430,91	30,28	Santo Amaro da Imperatriz
Cambissolo Haplico (Cx2)	726401,28	6912182,83	5,64	28,18	35,74	Palhoça
		Total (ha)	500,25	2501,25		

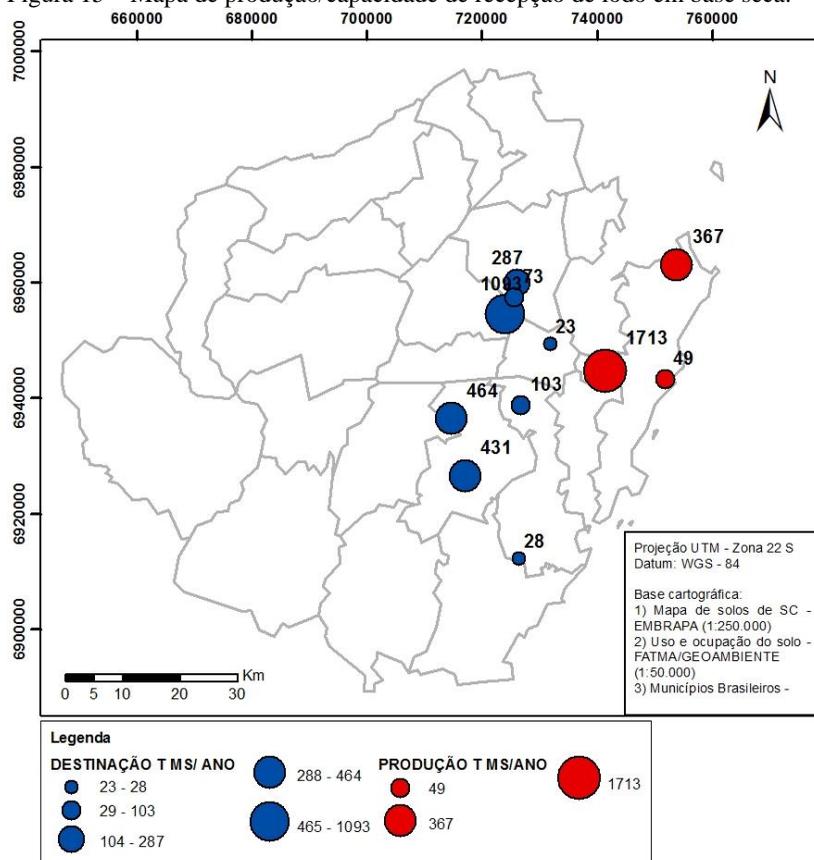
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

### 5.3. ESCOLHA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA UGL

Conhecendo a localização das Estações de Tratamento de Esgotos, bem como as áreas de disposição na agricultura, foi realizado um estudo locacional para instalação da UGL. Este estudo visou minimizar os custos de transporte e os impactos de vizinhança.

Primeiramente foi avaliada a influência no transporte que cada unidade geométrica (ETEs e terras agrícolas) possui sobre o projeto. Para isso foram analisadas as coordenadas geométricas juntamente com suas capacidades de geração (ETEs) e recepção (terras agrícolas) do lodo em base seca. Geoprocessando estas informações chegou-se ao seguinte mapa:

Figura 15 – Mapa de produção/capacidade de recepção de lodo em base seca.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A partir do mapa percebe-se claramente que a posição de cada ETE e terra agrícola tem importância variável de acordo com a quantidade que será manejada. Com o objetivo de chegar ao ponto geometricamente mais favorável para a localização da UGL, foi calculado o baricentro das unidades considerando os pesos de massa seca de lodo para cada coordenada geométrica das unidades de manejo (ETE/terra agrícola).

Quadro 19 – Cálculo do centro de massa das unidades de manejo do lodo.

E	S	T MS/ano	E x T MS/ano	S x T MS/ano	Cidade / ETE
725999,96	6960004,83	286,68	208126039,68	1995259385,21	Biguaçu
725609,26	6957400,40	72,52	52621183,46	504550677,08	Biguaçu
723853,65	6954432,67	1093,08	791226331,75	7601716494,04	Antônio Carlos
731838,46	6949337,26	22,65	16576141,03	157402488,96	São José
714519,35	6936524,99	463,85	331429800,03	3217507117,08	Santo Amaro da Imperatriz
726724,50	6938810,05	103,39	75132411,92	717368877,02	Palhoça
716931,10	6926614,54	430,91	308932778,58	2984747472,29	Santo Amaro da Imperatriz
726401,28	6912182,83	28,18	20469988,18	194785312,15	Palhoça
741217,00	6944705,00	1713,60	1270149451,20	11900446488,00	ETE Insular
751724,00	6943248,00	48,96	36804407,04	339941422,08	ETE Lagoa Da Conceição
753664,00	6963106,00	367,20	276745420,80	2556852523,20	ETE Canasvieiras
			E	S	Bairro
<b>Localização do baricentro</b>			731636,86	6946781,69	Potecas (São José)

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Após este cálculo foi identificado que o centro de massa da Produção X Destinação do lodo está nas coordenadas UTM 731636,86 E e 6946781,69 S zona 22J. Este ponto está localizado no bairro Potecas, município de São José (SC).

Conhecendo o local geometricamente ideal para a implantação do empreendimento, partiu-se para uma nova análise: a minimização dos impactos de vizinhança.

Nesta etapa buscou-se identificar locais que possuam atividades similares já instaladas, viabilizando o empreendimento quanto ao zoneamento municipal e minimizando a influência dos impactos de vizinhança. Entre as áreas de similaridade estão zonas de: gerenciamento de resíduos, tratamento de efluentes e instalações industriais.

Avaliando as imediações do local geometricamente ideal, foi identificada a Estação de Tratamento de Esgotos de Potecas a uma distância linear de aproximadamente 1,5 quilômetros. A ETE Potecas dispõe de um sistema de tratamento do tipo lagoas australiano.

Seguindo a lógica de se implantar a UGL em locais já utilizados para atividades semelhantes, foi possível concluir que a área ideal para instalação da UGL localiza-se ao lado da Estação de Tratamento de Esgotos de Potecas, conforme pode ser visualizado na figura a seguir.

Figura 16 – Área escolhida para implantação da UGL.

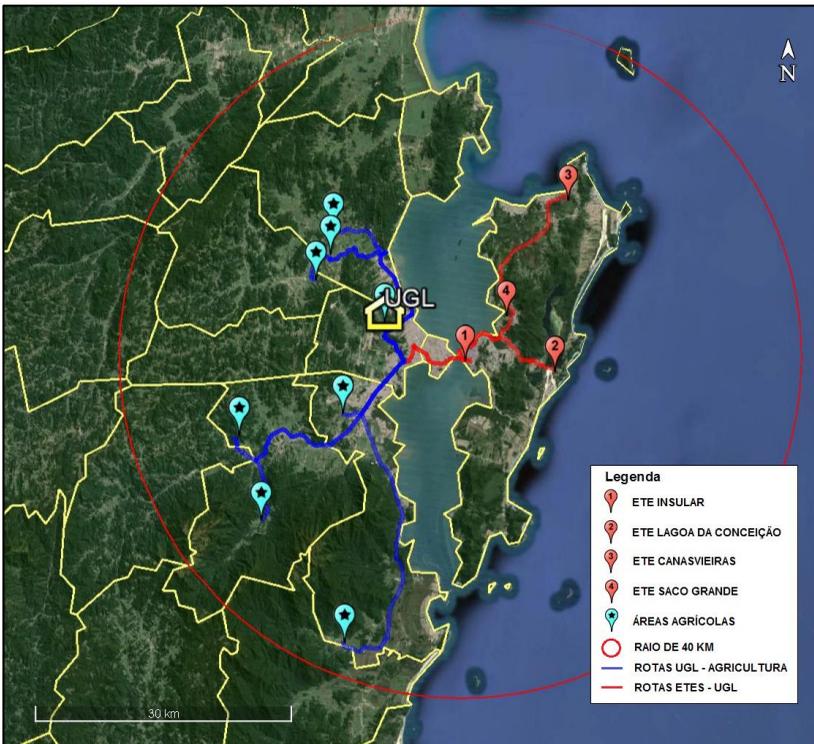


Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para verificar a viabilidade final do local de implantação, foi analisada a disponibilidade de área em comparação com a área necessária para implantação da Unidade Gerencial. A partir do dimensionamento da UGL, item 5.4.2.1, foi calculada uma necessidade de área de aproximadamente 6.500 m<sup>2</sup>. A área do terreno adjacente à estação possui cerca de 65 mil m<sup>2</sup>, dez vezes mais do que o necessário.

Como resultado deste estudo locacional, pode-se visualizar as rotas de transporte do lodo gerenciado.

Figura 17 – Rotas de transporte do lodo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Definido o local da UGL, foram calculadas as distâncias e os momentos de transporte do lodo desaguado ( $T$  lodo desaguado  $\times$  Km percorrido) entre as estações de esgoto e a UGL. Estes dados serviram para embasar o estudo econômico, e estão detalhados no quadro a seguir.

Quadro 20 – Momentos de transporte (T lodo desaguado x distância) entre as ETEs e a UGL.

ETE	Massa de lodo desaguado (T/mês)	Distância ETE - UGL (Km)	Momento de transporte (T lodo desaguado x Km)
ETE INSULAR	714,00	16,20	11566,80
ETE LAGOA DA CONCEIÇÃO	20,40	34,20	697,68
ETE CANASVIEIRAS	153,00	44,70	6839,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Também objetivando coletar informações para o estudo econômico, foram calculadas as distâncias entre a UGL e as áreas agrícolas. Considerando que a disposição será proporcional à área das propriedades agrícolas, foi determinada a média ponderada entre as distâncias e as áreas dos polígonos, sendo esta média utilizada para os cálculos dos custos de transporte. Abaixo pode-se observar o produto desta análise.

Quadro 21 – Distâncias entre UGL e áreas agrícolas.

X	Y	Área (ha)	Distância UGL - Agricultura (Km)	Área X Distância
725999,96	6960004,83	57,34	22,80	1307,24
725609,26	6957400,40	14,50	23,60	342,29
723853,65	6954432,67	218,62	27,80	6077,50
731838,46	6949337,26	4,53	2,70	12,23
714519,35	6936524,99	92,77	34,10	3163,46
726724,50	6938810,05	20,68	15,10	312,22
716931,10	6926614,54	86,18	37,70	3249,06
726401,28	6912182,83	5,64	47,40	267,15
			Distância média ponderada (Km)	29,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

## 5.4. ANÁLISE ECONÔMICA

### 5.4.1. Custos da atual alternativa: Aterro Industrial

Os custos da atual alternativa, por estarem fixados em contrato, resumem-se aos seguintes parâmetros:

Quadro 22 – Índices de custo - Aterro Industrial.

Índices de custo – Aterro Industrial		
<b>Custo de transporte</b>	0,54	R\$/T.Km
<b>Custo de disposição no aterro</b>	121,15	R\$/T de lodo desidratado

Fonte: CASAN (2015).

Desta forma, forma dividiu-se esta análise em:

#### 5.4.1.1. Custos de transporte

De acordo com a massa de lodo desaguada enviada ao aterro, juntamente com as distâncias percorridas das ETEs até o mesmo, foi possível estimar o custo de transporte para cada uma das estações, conforme detalhamento no quadro abaixo.

Os custos unitários de transportes (R\$/T lodo) foram calculados para cada estação multiplicando a distância percorrida pelo índice de custo de 0,54 R\$/T.Km.

Quadro 23 – Custos de transporte (ETE – Aterro).

ETE	Massa de lodo desaguado (T/mês)	Distância ETE - Aterro (Km)	Custo unitário de transporte ETE - Aterro (R\$/T lodo)	Custo de transporte ETE -Aterro (R\$/mês)
Insular	714,00	129,00	R\$ 69,66	R\$ 49.737,24
Lagoa da Conceição	20,40	142,00	R\$ 76,68	R\$ 1.564,27
Canasvieiras	153,00	158,00	R\$ 85,32	R\$ 13.053,96
Saco Grande (lodo bruto até ETE Canasvieiras) *	20,60	20,40	R\$ 11,02	R\$ 226,93
<b>Total Mensal (T Lodo desaguado)</b>	887,40		<b>TOTAL MENSAL (R\$)</b>	R\$ 64.582,40
<b>Total Anual (T Lodo desaguado)</b>	10648,80		<b>TOTAL ANUAL (R\$)</b>	R\$ 774.988,82
<b>Índice de Custo (R\$/T Lodo desaguado)</b>	R\$ 72,78			

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

\* Os custos referentes à ETE Saco Grande incidem apenas sobre o transporte do lodo bruto para os leitos de secagem que se encontram na ETE Canasvieiras. A partir daí os demais custos estão contabilizados juntamente com massa de lodo desaguado desta ETE.

A atual solução possui um custo anual com transportes de R\$ 774.988,82, o que representa um valor médio de R\$ 72,78 por tonelada de lodo desaguado enviada ao aterro.

#### 5.4.1.2. Custos de taxa de disposição no Aterro

Sabendo-se a massa de lodo desaguado enviada ao aterro, foram calculados os seguintes custos de disposição do lodo:

Quadro 24 – Custos de disposição do lodo no Aterro.

ETE	Massa de lodo desaguado (T/mês)	Custo unitário de disposição no Aterro (R\$/T lodo)	Custo de Disposição no Aterro (R\$/mês)
Insular	714,00	R\$ 121,15	R\$ 86.501,10
Lagoa da Conceição	20,40	R\$ 121,15	R\$ 2.471,46
Canasvieiras	153,00	R\$ 121,15	R\$ 18.535,95
<b>Total Mensal (T Lodo desaguado)</b>	887,40	<b>TOTAL MENSAL (R\$)</b>	R\$ 107.508,51
<b>Total Anual (T Lodo desaguado)</b>	10648,80	<b>TOTAL ANUAL (R\$)</b>	R\$ 1.290.102,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A atual solução requer um desembolso anual de aproximadamente R\$ 1.290.102,12 para a taxa de disposição do lodo no aterro, o que representa um índice de custo de R\$ 121,15 por tonelada de lodo desaguado.

#### 5.4.1.3. Custo total de disposição no Aterro

Somando-se os custos totais da atual solução, conclui-se que a empresa possui um dispêndio anual de R\$ 2.065.090,94 para a destinação dos lodos produzidos nas quatro estações alvo deste estudo. Isto nos gera um índice de custo médio de R\$ 193,93 por tonelada de lodo desaguado enviada ao aterro.

Analisando os custos referentes ao transporte, os quais correspondem a aproximadamente 37,5% do valor total, nota-se que o Aterro para o qual são destinados os lodos não está localizado em um local estratégico, gerando um custo excessivo relativo ao transporte.

Abaixo pode-se observar o quadro final de custos da atual solução (Aterro Industrial).

Quadro 25 – Custos totais de disposição do lodo no Aterro.

	<b>Custo de transporte ETE -Aterro (R\$/mês)</b>	<b>Custo de Disposição no Aterro (R\$)</b>	<b>Custo total para disposição em Aterro (R\$/mês)</b>
<b>TOTAL MENSAL (R\$)</b>	R\$ 64.582,40	R\$ 107.508,51	R\$ 172.090,91
<b>TOTAL ANUAL (R\$)</b>	R\$ 774.988,82	R\$ 1.290.102,12	R\$ 2.065.090,94
<b>% DO CUSTO</b>	37,53%	62,47%	100,00%
<b>ÍNDICE DE CUSTO (R\$/ T lodo desaguado)</b>	R\$ 72,78	R\$ 121,15	R\$ 193,93

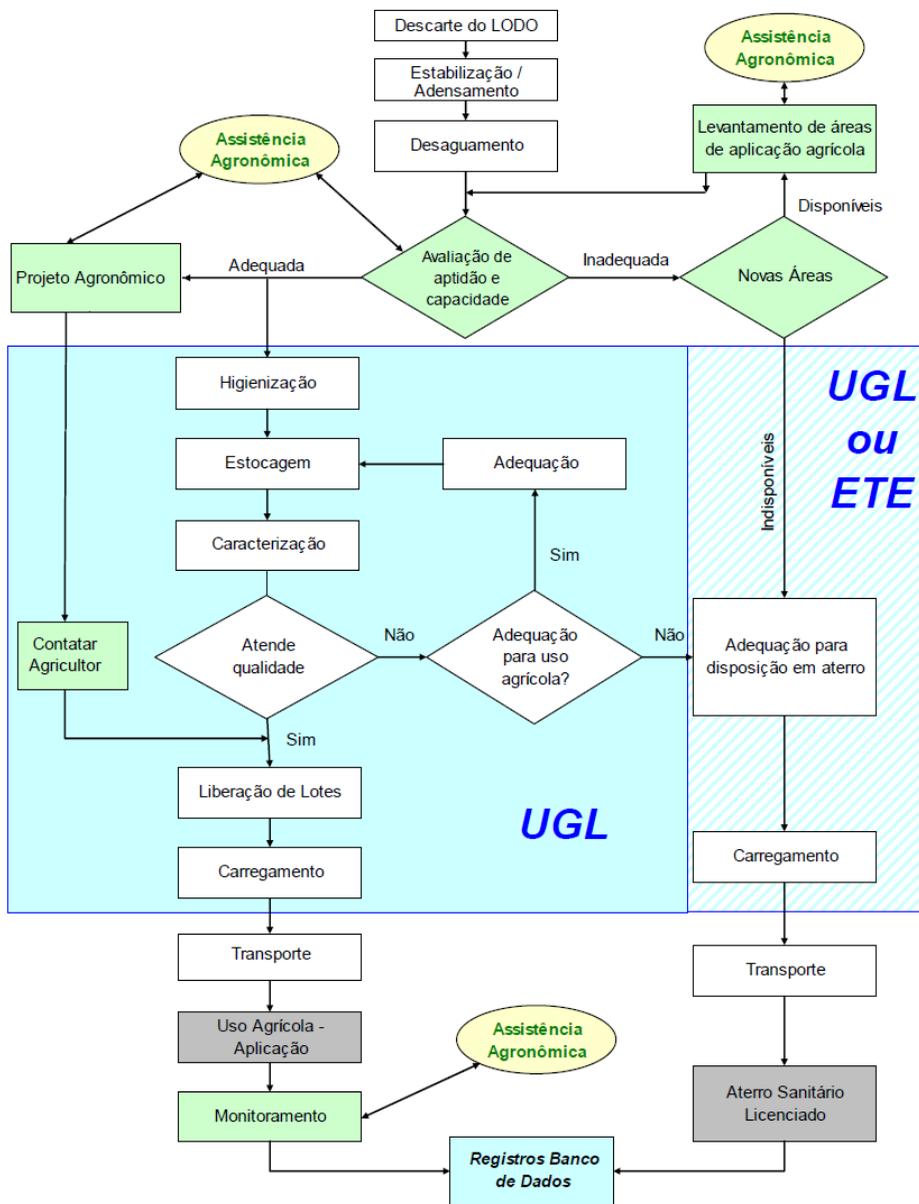
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### **5.4.2. Custos da solução proposta: Reciclagem Agrícola**

A alternativa proposta consiste na implantação de uma Unidade Gerencial de Lodos centralizada. Neste local, o lodo das estações será recebido, higienizado em meio alcalino através da adição de cal virgem, estocado e distribuído para as áreas de utilização na agricultura.

O modelo conceitual para o gerenciamento do lodo seguiu a logística implantada no estado do Paraná pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). A cadeia de processos executados, desde o descarte do lodo na ETE até a reciclagem na agricultura, está pormenorizada na figura a seguir, desenvolvida por Manzochi (2008).

Figura 18 – Fluxograma de gerenciamento do lodo de esgoto.



Fonte: MANZOCHI (adaptado de PEGORINI E ANDREOLI, 2003) (2008).

### 5.4.2.1. Dimensionamento da UGL

Após o descarte nas ETEs, o lodo de esgoto deverá ser encaminhado à UGL central. Na unidade de gerenciamento o bio-sólido será submetido a um processo de higienização via caleação.

Neste estudo estimou-se uma dosagem de cal virgem correspondente à 50% do peso seco do lodo, conforme padrão utilizado pela SANEPAR (MANZOCHI, 2008).

Os parâmetros base utilizados para a quantificação do processo de caleação estão descritos no quadro abaixo:

Quadro 26 – Parâmetros adotados para caleação.

Parâmetros adotados para a caleação		
<b>Teor de cal virgem adicionada para o teor de sólidos no lodo de 20%</b>	0,5	T cal/ T MS de lodo
<b>Densidade Cal</b>	0,7	T/m <sup>3</sup>

Fonte: MANZOCHI (2008).

Definidos estes parâmetros, foi possível quantificar o consumo mensal de cal virgem por estação de tratamento. O consumo de cal em toneladas é igual à massa de lodo em base seca multiplicada pela dosagem de 50% do peso.

Também foi estimada a massa total de lodo caleado, somando a massa de cal com a massa de lodo desaguado. Já o volume de lodo caleado foi obtido somando o volume de lodo desaguado com a massa de cal dividida pelo seu peso específico.

O resultado desta quantificação pode ser observado no quadro abaixo.

Quadro 27 – Quantificação do processo de caleação.

ETE	Massa de lodo desaguado (T/mês)	Massa de lodo Base Seca (TMS/mês)	Massa de cal adicionada (T cal/mês)	Massa de lodo desaguado caleado (T/mês)	Vol. Lodo desaguado caleado (m <sup>3</sup> /mês)
<b>Insular</b>	714,00	142,80	71,40	785,40	802,00
<b>Lagoa da Conceição</b>	20,40	4,08	2,04	22,44	22,91
<b>Canasvieiras</b>	153,00	30,60	15,30	168,30	171,86
<b>TOTAL MENSAL</b>	887,40	177,48	88,74	976,14	996,77

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para a realização da caleação é necessário definir o processo de mistura da cal ao lodo de esgoto. Neste estudo foi considerada a utilização de misturadores mecanizados com carregamento manual, conhecidos como maromba. Estes equipamentos tem um rendimento esperado de processamento de 16 m<sup>3</sup> de lodo por dia, utilizando a mão de obra de 4 operadores (MANZOCHI, 2008).

Foi considerado que a higienização funcionará 30 dias por mês, havendo 1 funcionário a mais por equipe, para que seja realizado um rodízio de folga na semana. Desta forma, conhecendo-se a quantidade de lodo, foram estimados o volume de lodo a ser processado por dia de trabalho. Isso baseou o dimensionamento das equipes e equipamentos necessários para higienização. O resultado pode ser observado no quadro abaixo.

Quadro 28 – Equipes e equipamentos de higienização do lodo.

<b>Equipes e equipamentos de higienização</b>		
<b>Produtividade considerando a utilização de um misturador (maromba) e equipe de 5 pessoas</b>	16,00	m <sup>3</sup> /dia
<b>Lodo desaguado a ser higienizado por dia útil</b>	29,00	m <sup>3</sup> /dia útil
<b>Nº de equipes e equipamentos de higienização necessários</b>	2,00	equipes

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Levantadas estas informações, foi realizado o dimensionamento da UGL. Para tanto foram utilizados os seguintes fatores de ocupação de área:

Quadro 29 – Parâmetros de dimensionamento da UGL.

<b>Parâmetros - Dimensionamento da UGL</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Empilhamento máximo de sacos de cal virgem</b>	10,00	sacos
<b>Quantidade de cal virgem em 1 saco</b>	25,00	Kg
<b>Área ocupada para cada pilha de cal</b>	0,50	m <sup>2</sup>
<b>Área ocupada lodo desaguado</b>	0,80	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Área ocupada lodo caleado</b>	1,00	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
<b>Área/equipe maromba (m<sup>2</sup>)</b>	20,00	m <sup>2</sup>

Fonte: MANZOCHI (2008).

Para o dimensionamento foi considerado que a UGL comportará, em seu pátio de estocagem pré-caleação, um volume equivalente a um mês de produção de lodo das ETEs.

Já os pátios de armazenamento pós-caleação terão uma capacidade de armazenamento de três meses. Este período englobará o processo de higienização, maturação e liberação dos lotes de lodo caleado.

Sendo assim, as seguintes unidades serão necessárias:

Quadro 30 – Dimensionamento da UGL.

<b>Dimensionamento da UGL</b>		
<b>Instalações</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
<b>Volume de lodo desaguado/mês</b>	870,00	m <sup>3</sup> /mês
<b>Período de estocagem (recebimento)</b>	1,00	mês
<b>Área de recebimento de lodo desaguado</b>	1087,50	m <sup>2</sup>
<b>Massa de cal/mês</b>	88,74	T/mês
<b>Sacos de cal virgem por mês</b>	3549,60	sacos
<b>Área armazenamento da cal</b>	177,48	m <sup>2</sup>
<b>Volume de lodo caleado/mês</b>	996,77	m <sup>3</sup> /mês
<b>Período de estocagem (lote)</b>	3,00	meses
<b>Área de estocagem de lodo caleado</b>	2990,31	m <sup>2</sup>
<b>Nº de equipamentos de mistura (maromba)</b>	2,00	unidades
<b>Área necessária para equipes / equipamentos de higienização</b>	40,00	m <sup>2</sup>
<b>Fator de área necessária as demais instalações e vias de acesso</b>	1,50	-
<b>Área total do terreno</b>	6442,94	m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A partir do modelo conceitual e do dimensionamento da UGL, foi possível estimar os custos envolvidos na execução da solução proposta. Esta contabilização foi dividida em custos operacionais e em custos de instalação.

#### 5.4.2.2. Custos de instalação

De acordo com Manzochi (2008), a estrutura civil das unidades de manejo de lodo deve ser executada de forma que, minimamente, o piso

não permita a infiltração do percolado no solo e haja uma cobertura com lona ou estocagem em área coberta com proteção lateral contra a chuva.

Desta forma, foram estimados os custos referentes a pátios cobertos para as operações de recebimento, estocagem, condicionamento, higienização e armazenagem do lodo.

A autora indicou valores de referência para a estimativa de custos das estruturas civis da UGL, bem como para a aquisição do equipamento de mistura. Estes valores foram utilizados como base para este estudo, e estão descritos no quadro a seguir. Por se tratarem de custos referentes ao ano de 2007, foram corrigidos conforme o Índice Nacional de Custo da Construção (INCC) e de acordo com o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M/FGV), no caso do equipamento de mistura.

O custo médio referente ao m<sup>2</sup> para compra do terreno onde será implantada a UGL foi obtido por intermédio do consultor imobiliário Vilmar Cesar Martins (CRECI-SC 20770).

O quadro abaixo mostra os valores base utilizados neste estudo econômico:

Quadro 31 – Parâmetros referentes aos custos de instalação.

Parâmetros - Custos de Instalação					
Item	Valor base (jan/07)	Valor corrigido (jan/15)	Unidade	Fator de correção	Índice
<b>Custo de pátio coberto para área de recebimento estocagem do lodo</b>	R\$ 250,00	R\$ 442,25	R\$/m <sup>2</sup>	1,769018	01/2007 para 01/2015 - INCC-DI
<b>Custo de pátio coberto para área de higienização</b>	R\$ 1.000,00	R\$ 1.769,02	R\$/m <sup>2</sup>	1,769018	01/2007 para 01/2015 - INCC-DI
<b>Custo de desapropriação da área da UGL</b>	-	R\$ 200,00	R\$/m <sup>2</sup>		Consultor Imobiliário
<b>Maromba</b>	R\$ 58.200,00	R\$ 93.394,47	R\$/un	1,604716	01/2007 para 01/2015 - IGP-M

Fonte: Pesquisa de campo e adaptado de MANZOCHI (2008).

A partir destes parâmetros foi possível estimar um custo aproximado de R\$ 3,66 milhões para a implantação da UGL.

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade do estudo econômico, o custo total de instalação foi acrescido de uma taxa de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) de 25%. Este é um valor comumente utilizado em obras e serviços de saneamento.

O detalhamento dos valores pode ser obtido no quadro a seguir.

Quadro 32 – Custos de instalação da UGL.

<b>Custos de instalação da UGL</b>				
<b>Instalações</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo unitário (R\$)</b>	<b>Custo total (R\$)</b>
Área de recebimento de lodo desaguado	1087,50	m <sup>2</sup>	R\$ 442,25	R\$ 480.951,77
Área de armazenamento da cal	177,48	m <sup>2</sup>	R\$ 1769,02	R\$ 313.965,31
Área de estocagem de lodo caleado	2990,31	m <sup>2</sup>	R\$ 442,25	R\$ 1.322.479,95
Nº de equipamentos de mistura (maromba)	2,00	unidades	R\$ 93394,47	R\$ 186.788,94
Área necessária para equipe / equipamentos de higienização	40,00	m <sup>2</sup>	R\$ 1769,02	R\$ 70.760,72
Fator de área necessária as demais instalações e vias de acesso	1,50	-		
Área total do terreno	6442,94	m <sup>2</sup>	R\$ 200,00	R\$ 1.288.588,29
			<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 3.663.534,98</b>
			<b>TOTAL COM BDI (25%)</b>	<b>R\$ 4.579.418,73</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### 5.4.2.3. Custos de operação

##### i. Custo com produto químico

A UGL terá um custo mensal com a aquisição de cal virgem para higienização do lodo. Este valor foi estimado em 2007 como sendo R\$0,24/Kg de cal virgem (MANZOCHI, 2008). Corrigindo este custo de janeiro de 2007 para janeiro de 2015 pelo IGP-M, temos um valor de aproximadamente R\$0,39/Kg de cal.

A partir do consumo mensal de cal, 88,74 tonelada/mês, foi estimado um desembolso de R\$ 34.176,60 por mês com a aquisição de cal. Isto representa um índice de custo de R\$38,51 por tonelada de lodo desaguado.

## ii. Custo com mão de obra

Como já verificado anteriormente, a UGL terá duas equipes de higienização, contendo cinco trabalhadores em cada. Além disso, será necessária uma equipe agrônômica, encarregada de efetuar a assistência e a recomendação de dosagem do lodo junto os agricultores. Pelo fato de a UGL atender apenas a região da grande Florianópolis, estimou-se a necessidade de um Engenheiro Agrônomo e de um Técnico Agrícola.

Para a precificação da mão de obra foram considerados os valores de um salário mínimo por trabalhador da equipe de higienização, dois salários mínimos para o Técnico Agrícola e seis salários mínimos para o Engenheiro Agrônomo. Além do salário foi somado um adicional de 130% referentes a benefícios e aos impostos.

A tabela abaixo contém os valores referentes à mão de obra:

Quadro 33 – Custos de mão de obra da UGL.

Mão de obra	Nº de trabalhadores/equipe	Nº de equipes	Salário (R\$)	Encargos	Custo (R\$/mês)	Custo unitário (R\$/T lodo desaguado)
Equipe de higienização	5	2	788,00	130%	<b>R\$ 18.124,00</b>	<b>R\$ 20,42</b>
Engenheiro Agrônomo	1	1	4728,00	130%	<b>R\$ 10.874,40</b>	<b>R\$ 12,25</b>
Técnico Agrícola	1	1	1576,00	130%	<b>R\$ 3.624,80</b>	<b>R\$ 4,08</b>
<b>Total</b>					<b>R\$ 32.623,20</b>	<b>R\$ 36,76</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Foi estimado um custo mensal de R\$32.623,20 com mão de obra, o que representa R\$ 36,76 por tonelada de lodo desaguado.

## iii. Custos com análises do lodo

Segundo a resolução CONAMA 375/2006 o lodo de esgoto deverá ser caracterizado conforme seu potencial agrônômico, indicadores biológicos, presença de substâncias potencialmente tóxicas e quanto à sua estabilidade.

A precificação destas análises foi realizada tomando como base os valores identificados pela autora Bittencourt (2014). Em sua tese a autora lista os custos referentes aos diversos tipos de análises necessárias para a caracterização do lodo de esgoto, conforme exigido pela CONAMA 375. Estes valores foram obtidos de quatro laboratórios

brasileiros distintos. Por se tratarem de valores levantados em janeiro de 2014, foi realizada a correção pelo índice IGP-M.

A tabela a seguir apresenta os custos por análise do lodo:

Quadro 34 – Custos de referência para análise do lodo.

Laboratório	Custo por grupo de parâmetros (R\$) - janeiro de 2014				TOTAL	Valor corrigido (jan/2015)
	Agrônomicos	Substâncias Inorgânicas	Sanidade	Orgânicos		
A	370,00	280,00	1150,00	750,00	2.550,00	2643,71
B	550,00	430,00	1450,00	810,00	3.240,00	3359,07
C	772,65	260,91	886,98	4061,70	5.982,24	6202,08
D	382,00	286,00	655,00	2940,00	4.263,00	4.419,66
					<b>Valor médio jan/2015 (R\$/lote)</b>	<b>4156,13</b>

Fonte: Adaptado de Bittencourt (2014).

A frequência de monitoramento do lodo foi definida conforme preconizado pela resolução CONAMA 375/2006. Segundo esta resolução, a frequência de monitoramento deverá ser estabelecida de acordo com a massa de lodo em base seca produzida anualmente.

Para o caso em estudo, temos uma produção anual de 2.129,76 toneladas, fazendo com que a UGL se enquadre na categoria de 1.500 a 15.000 toneladas, necessitando de uma frequência de monitoramento bimestral.

Conhecendo os custos envolvidos e as frequências de monitoramento, foi possível quantificar os dispêndios necessários com as análises do lodo, os quais estão descritos no quadro a seguir:

Quadro 35 – Custos com análises do lodo e do solo.

Custos de análises				
Análise	Valor	Unidade	Custo mensal (R\$/mês)	Custo unitário (R\$/T lodo desaguado)
Período de análise	2,00	meses		
Massa de lodo desaguado no período	1774,80	T/período		
<b>Análise do lodo por lote</b>	<b>R\$4.156,13</b>	<b>R\$/período</b>	<b>R\$2.078,06</b>	<b>R\$ 2,34</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Além da caracterização do lodo de esgoto, a resolução exige que sejam caracterizados os solos onde o biossólido será incorporado. Porém, a exemplo da experiência do estado do Paraná, estes custos ficam a cargo do agricultor (BITTENCOURT, 2014).

### iii. Custos com transporte

A partir dos recursos de rota do software *Google Earth*® foram obtidas as distâncias ETEs – UGL e UGL – agricultura. Os valores de transportes foram baseados nos atuais custos de transporte da CASAN, ou seja, R\$ 0,54 por tonelada de lodo x Km percorrido.

Sendo assim, temos os custos de transporte ETEs – UGL:

Quadro 36 – Custos com transporte ETEs – UGL.

ETE	Massa de lodo desaguado (T/mês)	Distância ETE - UGL (Km)	Custo unitário de transporte ETE - UGL (R\$/T de lodo)	Custo de transporte ETE - UGL (R\$/mês)
Insular	714,00	16,20	R\$ 8,75	R\$ 6.246,07
Lagoa da Conceição	20,40	34,20	R\$ 18,47	R\$ 376,75
Canasvieiras	153,00	44,70	R\$ 24,14	R\$ 3.693,11
Saco Grande (lodo bruto até ETE Canasvieiras)	20,60	20,40	R\$ 11,02	R\$ 226,93
Quantidade de Lodo desaguado mensal (T/mês)	887,40	<b>TOTAL MENSAL (R\$)</b>		R\$ 10.542,86
		<b>Índice de Custo (R\$/T Lodo desaguado)</b>		R\$ 11,88

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O custo UGL – Agricultura foi estimado a partir da distância média ponderada entre a UGL e as terras agrícolas:

Quadro 37 – Custos com transporte UGL – Agricultura.

Massa de lodo desaguado (T/mês)	Distância média UGL - Agricultura (Km)	Custo unitário de transporte ETE - UGL (R\$/T de lodo)	Custo de transporte UGL - Agricultura (R\$/mês)
887,40	29,45	R\$ 15,90	R\$ 14.111,19
<b>TOTAL MENSAL (R\$)</b>			R\$ 14.111,19
<b>Índice de Custo (R\$/T Lodo desaguado)</b>			R\$ 15,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

#### iv. Custo operacional total

Visando aumentar a confiabilidade do estudo econômico, o custo total operacional da solução proposta foi acrescido de uma taxa de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) de 25%. Este valor é tipicamente utilizado em obras e serviços de saneamento, e neste estudo foi considerado para minimizar os efeitos das simplificações na obtenção dos custos.

Os custos operacionais da solução proposta estão descritos abaixo:

Quadro 38 – Custos operacionais da UGL.

Custos operacionais				
Item	Custo mensal (R\$/mês)	Custo anual (R\$/ano)	Custo unitário (R\$/T lodo desaguado)	% do custo operacional
<b>Aquisição de cal virgem</b>	R\$ 34.176,60	R\$ 410.119,19	R\$ 38,51	37%
<b>Mão de obra</b>	R\$ 32.623,20	R\$ 391.478,40	R\$ 36,76	35%
<b>Análises do lodo</b>	R\$ 2.078,06	R\$ 24.936,78	R\$ 2,34	2%
<b>Transporte ETEs - UGL</b>	R\$ 10.542,86	R\$ 126.514,35	R\$ 11,88	11%
<b>Transporte UGL - Agricultura</b>	R\$ 14.111,19	R\$ 169.334,24	R\$ 15,90	15%
<b>Total</b>	R\$ 59.355,31	R\$ 1.122.382,97	R\$ 105,40	100%
<b>Total com BDI de 25%</b>	R\$ 74.194,14	R\$ 1.402.978,71	R\$ 131,75	125%

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Desta forma, temos um custo total operacional de R\$ 1.402.978,71 por ano, o que nos gera um índice de custo de R\$131,75 por tonelada de lodo desaguado.

Analisando o custo operacional total, pode-se verificar que a solução proposta traz uma redução significativa referente aos custos de transporte, os quais representam 26% do valor total. Na solução atual (aterro) estes custos representam 40% do total. Isto nos gera uma redução anual de aproximadamente 480 mil reais referente ao transporte.

##### 5.4.2.4. Custo total da reciclagem agrícola

Com o objetivo de estimar os custos unitários da alternativa proposta dentro do horizonte de projeto de 20 anos, considerou-se que o

investimento será integralmente depreciado pelo método linear. Isto significa dizer que o valor do investimento será dividido pelo período do projeto.

Desta forma, temos uma depreciação mensal em torno de R\$ 19 mil, o que nos gera um índice de custo de instalação por tonelada de lodo desaguado de R\$ 21,50.

Esta metodologia analisa de forma grosseira o valor unitário, pois está considerando que todo o investimento realizado, inclusive a compra do terreno, terá um valor residual igual a zero no fim do projeto. Isto serve apenas para nortear quanto a uma faixa de valor da solução proposta, analisando o pior caso.

Quadro 39 – Custos totais da UGL.

<b>Custos totais</b>			
<b>Item</b>	<b>Custo mensal (R\$/mês)</b>	<b>Custo anual (R\$/ano)</b>	<b>Custo unitário (R\$/T lodo desaguado)</b>
<b>Operação com BDI de 25%</b>	R\$ 74.194,14	R\$ 1.402.978,71	R\$ 131,75
<b>Instalação com BDI de 25% (depreciada linearmente em 20 anos)</b>	R\$ 19.080,91	R\$ 228.970,94	R\$ 21,50
<b>Total (R\$)</b>	R\$ 93.275,05	R\$ 1.631.949,65	R\$ 153,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

### 5.4.3. Comparação econômica das alternativas

Visando analisar qual seria a economia efetiva da proposta de reciclagem agrícola frente ao aterro industrial, foi implementado um modelo de fluxo de caixa.

Para estimar os valores do fluxo de caixa, considerou-se que as tarifas referentes ao aterro, bem como os custos operacionais da reciclagem agrícola, serão reajustados conforme uma inflação aproximada de 6% ao ano.

Desta forma, incide-se sobre estes custos os juros compostos segundo a fórmula:

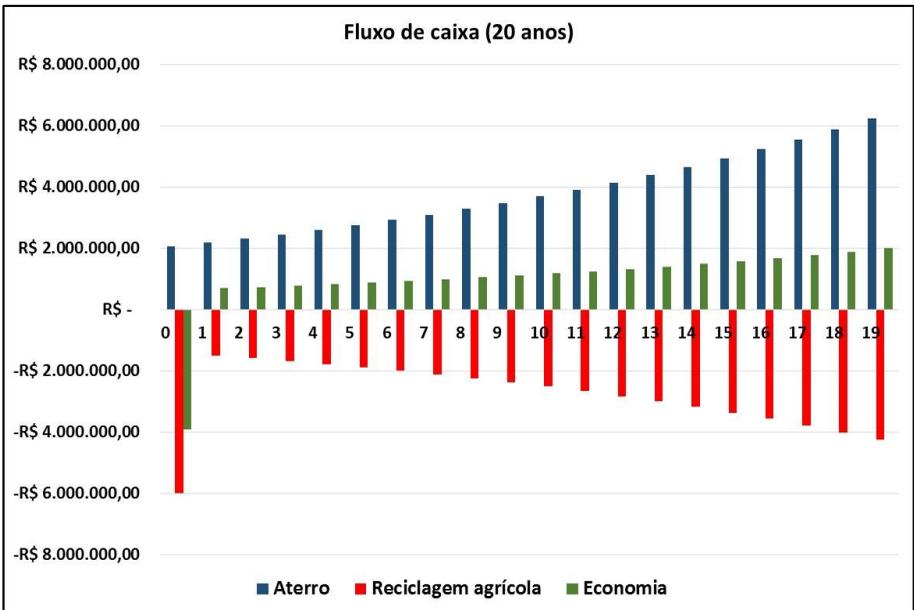
$$\text{Valor futuro} = \text{Valor Presente} \times (1 + \text{juros})^{\text{período}}$$

Com o objetivo de verificar o valor que deixaria de ser gasto caso a alternativa proposta fosse implementada, os valores da atual alternativa (aterro) foram inseridos no fluxo de caixa como entradas.

Em seguida foram contabilizados os valores da alternativa proposta (reciclagem agrícola) como saídas. Subtraindo as entradas das saídas, temos como resultado a economia ao longo dos anos, referente à adoção da solução proposta.

O modelo de fluxo de caixa aplicado para um horizonte de projeto igual a 20 anos pode ser observado na figura abaixo. Para maiores detalhes deve-se consultar o APÊNDICE C – Fluxo de caixa comparativo das alternativas.

Figura 19 – Fluxo de caixa comparativo (Aterro x Reciclagem Agrícola).



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para se obter a economia real em valores atuais, foi utilizado o método do Valor Presente (VP) sobre a economia gerada ao longo dos 20 anos.

Este método traz os valores do fluxo de caixa para o presente, aplicando sobre eles uma taxa mínima de atratividade (TMA). Isto permite comparar o lucro de um empreendimento, ou neste caso a

economia gerada ao longo dos anos, com o investimento necessário para a sua implantação. Se ao finalizar a análise, o valor presente for positivo, então o investimento é viável perante a rentabilidade esperada.

Neste estudo foi aplicada como taxa mínima de atratividade a própria da taxa inflacionária de 6% ao ano, considerada anteriormente.

Como resultado do método do Valor Presente, temos que a economia potencial em valores atuais, para um horizonte de projeto de 20 anos de projeto, é de R\$ 8.662.825,83.

Outros indicadores de atratividade econômica foram aplicados ao estudo:

i. *Payback*: Análise do período necessário para que o investimento inicial seja pago pelos benefícios gerados pela alternativa.

Para esta análise foi dividido o valor total de instalação pela economia gerada no tempo zero. A economia considerada no tempo zero é igual ao valor para disposição no aterro menos o valor operacional inicial da reciclagem agrícola. Com isso temos um tempo necessário para recuperação do investimento de 6,92 anos.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Economia}} = \frac{4.579.418,73}{2.065.090,94 - 1.402.978,71} = 6,92 \text{ anos}$$

ii. Taxa interna de retorno (TIR): Este indicador mostra a taxa necessária para zerar o fluxo de caixa no valor presente, ou seja, representa a taxa de retorno real do investimento. Se este valor for maior do que o rendimento mínimo esperado (taxa mínima de atratividade), então o investimento deverá ser realizado.

Neste estudo a TIR, taxa que zera o fluxo de caixa no valor presente, é de 22,83%. Sendo assim, caso a taxa mínima de atratividade adotada pela empresa para realizar seus investimentos seja menor do que este valor, então a solução proposta de ser adotada.

Além da economia direta potencial da solução proposta, existe o benefício econômico indireto, que não está contabilizado nesta análise, relativo à redução de custos do agricultor com a compra de fertilizantes e corretores de pH. Segundo estudos realizados por Bittencourt (2014), estes valores foram em média R\$ 584,19 por hectare de 2007 a 2013 na Região Metropolitana de Curitiba, e de R\$ 443,28 por hectare no período de 2011 a 2013 para todo o estado do Paraná.

Desta forma, conclui-se que a alternativa proposta além de ser viável economicamente, pode gerar uma economia real significativa aos cofres da empresa e um benefício direto aos agricultores da região de Florianópolis.

## 6. CONCLUSÃO

Através do estudo realizado foi possível responder claramente ao questionamento que fundamentou este trabalho: É viável realizar a reciclagem agrícola do lodo de esgoto na região da Grande Florianópolis? A resposta é positiva.

De acordo com o diagnóstico da produção de lodo de Florianópolis, são descartados nas quatro principais estações produtoras de lodo do município por volta de 2.130 toneladas de lodo em base seca por ano. Considerando uma taxa de aplicação anual de biossólido em base seca de 5 toneladas por hectare, seriam necessários 426 hectares de terras agrícolas para a destinação final do lodo gerado.

Segundo os critérios ambientais avaliados, a região possui aproximadamente 89.417 hectares de terras aptas à disposição do lodo de esgoto. Estas terras possuem um grau de aptidão classe 3, segundo a metodologia desenvolvida por Souza et al. (1994), o que significa que é permitida a utilização do lodo de esgoto sem restrições, tornando a reciclagem do lodo ambientalmente viável.

Estas áreas estão situadas sobretudo nos municípios de Alfredo Wagner e Leoberto Leal. Nota-se também a presença de áreas aptas em municípios mais próximos de Florianópolis, como São José, Biguaçu, Antônio Carlos, Palhoça, Santo Amaro da Imperatriz e Paulo Lopes.

Do total de terras aptas, cerca de 6.800 hectares se encontram em terras agrícolas, o que supera em 16 vezes a relação produção *versus* demanda, tornando a opção viável em termos mercadológicos, pois toda produção poderá ser absorvida pelas áreas agricultáveis aptas. Por superar significativamente a necessidade de área para disposição do lodo, foi considerado neste estudo que o lodo será enviado apenas às áreas agrícolas dentro de um raio de viabilidade de 40km, o que representa 500,25 hectares de áreas agrícolas aptas, atendendo a necessidade de demanda.

Os solos das áreas agrícolas aptas à destinação do lodo de esgoto são dos tipos Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háptico. Estes solos possuem baixa fertilidade e pH ácido. Sendo assim, necessitam da aplicação de fertilizantes e acalinizantes para práticas agrícolas, tornando a aplicação do biossólido extremamente vantajosa para os agricultores, pois representará uma economia quanto a compra destes produtos. Desta forma, conclui-se que o empreendimento é viável em termos agrícolas.

Com o objetivo de maximizar as vantagens aos agricultores, infere-se que o método de higienização ideal para região da grande Florianópolis é por via alcalina, através da caleação. Este é um método com custo

relativamente baixo e de fácil aplicação. Além disto trará vantagens à composição do biossólido por lhe conferir características alcalinas, permitindo que este substitua os corretores de pH utilizados nos solos ácidos da região, representando mais uma economia aos agricultores.

Do ponto de vista logístico, foi possível determinar que a área ideal para instalação da UGL localiza-se ao lado da Estação de Tratamento de Esgotos de Potecas – São José (SC). A área disponível apresenta cerca de 65 mil m<sup>2</sup>, aproximadamente 10 vezes mais do que o necessário para implantação da UGL – 6,5 mil m<sup>2</sup>. Esta área apresenta uma localização privilegiada quanto à logística do transporte, pois encontra-se a apenas 1,5 km do baricentro logístico da produção *versus* destinação do lodo. Além disso, está localizado em uma zona já utilizada para atividades similares, como a ETE de Potecas, e com baixa densidade demográfica, minimizando os impactos e viabilizando o empreendimento do ponto de vista locacional.

Quanto a viabilidade econômica, primeiramente foram analisados os custos da atual solução – Aterro Industrial. A partir da análise foi verificado que a empresa gasta cerca de R\$ 193,93 por tonelada de lodo desaguado para dispor o lodo no aterro. Destes, R\$ 72,78 reais são referentes aos custos de transporte, o que representa 37,5% do valor total da solução. Sendo assim, é notável que a localização do Aterro não é estratégica, ficando a uma distância média de 143 km dos polos geradores, o que acarreta um desembolso de R\$ 774.988,82 anual apenas com transporte. O valor anual total gasto com a disposição no aterro é de R\$2.065.090,94.

Para a reciclagem agrícola foram analisados os custos de implantação da Unidade Gerenciadora de Lodos centralizada e os principais custos operacionais, desde a saída do lodo das ETEs até a entrega do lodo nas áreas de aplicação na agricultura. Como resultado desta análise, foi estimado um investimento para implantação de R\$ 4.579.418,73 reais para um horizonte de projeto de 20 anos.

Os custos operacionais da solução correspondem a R\$ 1.402.978,71 por ano, o que representa um índice de custo de R\$131,75 por tonelada de lodo desaguado. O gasto operacional mais significativo é relativo à compra de cal virgem, representando 37% do custo operacional, o que equivale a R\$38,51 por tonelada de lodo desaguado. Através do estudo locacional de implantação da UGL foi possível reduzir consideravelmente os custos referentes ao transporte. Na solução proposta estes custos representam 26% do valor operacional, correspondente a um índice de custo de R\$27,78 por tonelada de lodo desaguado. Comparando estes valores com a solução atual, obteve-se uma

redução com custos de transporte de aproximadamente R\$ 480 mil por ano.

Visando obter um índice de custo total por tonelada de lodo desaguado reciclado na agricultura, optou-se de modo conservador por depreciar todo o investimento realizado de forma linear, considerando o valor residual da implantação ao final dos 20 anos igual a zero. Com isto obteve-se um índice de custo de R\$ 153,25 por tonelada de lodo desaguado, do qual R\$ 21,50 são referentes ao valor de depreciação do investimento.

Contabilizados os custos de disposição no Aterro Industrial e os custos de Reciclagem Agrícola do biossólido, foi realizada uma análise de engenharia econômica, visando determinar a real atratividade do investimento frente à atual solução.

Através da análise econômica, utilizando o método do valor presente líquido para um horizonte de 20 anos, seriam economizados R\$ 8.662.825,83 em 20 anos, caso a Reciclagem fosse implementada.

Outra análise realizada foi o período de *Payback*. Com a economia relativa à adoção da Reciclagem Agrícola seriam necessários 6,92 anos para recuperar o valor investido na implantação da UGL.

Por fim foi analisada a taxa interna de retorno (TIR) do investimento. Este indicador mostrou que a implantação da UGL geraria um retorno de 22,83% ao ano. Desta forma, caso a taxa mínima de atratividade para investimentos da concessionária (CASAN) seja menor do que este valor, então o investimento é atrativo e deve ser realizado.

Além da economia gerada pela solução proposta, existe o benefício econômico indireto relativo à redução de custos do agricultor com a compra de fertilizantes e corretores de pH. Estes valores não foram contabilizados neste trabalho, porém pesquisas demonstram que a economia é de cerca de R\$500,00 por hectare (BITTENCOURT, 2014).

Com isso é possível concluir que o empreendimento é, além de viável, vantajoso em termos: ambientais, por minimizar os impactos gerados com a destinação não benéfica do lodo; agrícola, por melhorar as condições físico-químicas e biológicas do solo, representando um aumento na produtividade das culturas e uma economia aos agricultores; e econômica, por apresentar um significativo retorno financeiro em comparação com o Aterro Industrial.

## 7. RECOMENDAÇÕES

O trabalho buscou elencar os principais fatores que influenciam na viabilidade da reciclagem agrícola na região da Grande Florianópolis, porém, por se tratar de uma análise preliminar, existem diversos pontos que devem ser aprofundados.

A metodologia de aptidão do solo aponta em termos gerais os locais onde o uso do lodo é recomendado, contudo a escala adotada é ampla e não contempla as possíveis peculiaridades. Por exemplo, há uma grande restrição quanto ao relevo, mas este é um fator que foi avaliado em blocos (polígonos de tipos de solo), uma análise mais detalhada poderia ampliar a quantidade de áreas agrícolas aptas.

Outro ponto que não foi avaliado é quanto as culturas agrícolas das áreas de incorporação, a resolução CONAMA 375/2006 proíbe a utilização do lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. Desta forma, este fator deverá ser considerado para determinar a viabilidade final de cada área agrícola.

Quanto a taxa de aplicação de lodo no solo, por não se conhecerem as características nutricionais do biossólido não foi possível estimar uma taxa de aplicação real para as áreas. Como simplificação foi adotada uma taxa conservadora de 5 T MS lodo/hectare.ano, entretanto sabe-se que os solos da região são favoráveis à utilização do biossólido por apresentarem baixa fertilidade e pH ácido. Desta forma há uma tendência de que as taxas de aplicação possam ser maiores, diminuindo a quantidade de área agrícola necessária para a incorporação.

Considerando que a maior parte das ETEs ainda não está operando em capacidade máxima de projeto e que a abrangência do sistema de esgotamento sanitário de Florianópolis é muito baixa, existe uma tendência de que a produção de lodo aumente consideravelmente nos próximos anos. Recomenda-se que seja considerada uma projeção da produção de lodo de esgoto ao longo do tempo. Uma maior quantidade de lodo a ser gerenciado ajudará a diluir os custos de implantação e operação. Além disso, os custos de transporte são proporcionais a massa de lodo produzida. Considerando que este é o principal fator de otimização econômica da solução proposta (Reciclagem Agrícola) frente à atual solução (Aterro Industrial), a atratividade econômica da solução tende a aumentar com o passar do tempo e deverá ser considerada em um estudo econômico mais aprofundado.

Para finalizar, foram contabilizados os custos mais relevantes para implantação da Reciclagem Agrícola, porém estes valores poderão ser mais detalhados em estudos posteriores, podendo-se chegar mais próximo do valor real da solução.

## 8. REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V. et al. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Prosab, 2001. 273 p.
- ANDROLI C. V; PINTO, M. A. T. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). In: ANDREOLI, C. V. (coordenador). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Prosab, 2001.
- ANDREOLI, C. V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema**. Curitiba: Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, 1999.
- ANDREOLI, C. V. et al. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (prosab), 1999. 98 p.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Revista Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, n. 4, p. 565-580, out./dez. 2006.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna; Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p.
- BITTENCOURT, Simone et al. Uso agrícola de lodo de esgoto, estudo de caso da região metropolitana de Curitiba. **Revista Aidis: de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica.**, Curitiba, v. 2, p.1-11, nov. 2009.
- BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no Estado do Paraná: aplicabilidade da resolução CONAMA 375/06**. 220 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. **Dinâmica da Mineralização de Nitrogênio de Lodos de Esgoto**. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.

A. (Ed.). Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. Cap. 7. p. 125-137.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 375 de 29 de Agosto de 2006**. Brasília, DF, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21**. Brasília, DF, 1992.

Cálculo Exato. **Atualização de um valor por um índice financeiro**. Disponível em: <<http://calculoexato.com.br/parprima.aspx?codMenu=FinanAtualizaIndice>>. Acesso em: 05 de maio de 2015.

CARVALHO, P. C. T. **Capítulo 6: Compostagem**. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). *Biossólidos na agricultura*. 1. ed. São Paulo: ABES/SP, 2001. 468p.

CASAN, Edna Colombo. **Solicitação de dados - TCC Reciclagem**. Mensagem recebida por < lucassmartinss@hotmail.com > em 9 de abril de 2015.

CASAN. **Lodo produzido pela CASAN**. Disponível em: <<http://www.casan.com.br/noticia/index?url/lodo-produzido-pela-casan-sera-transformado-em-adubo-e-distribuido-gratuitamente-a-agricultores#0>>. Acesso em: 11 de dezembro 2014.

EMBRAPA SOLOS (Rio de Janeiro). **Solos do Estado de Santa Catarina**: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 46. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 745 p.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (coordenador). **Resíduos sólidos do saneamento**:

**processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: Prosab, 2001. Cap. 2. p. 29-55.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. **Produção e características dos biossólidos.** In: ANDREOLI, C. V. Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba: PROSAB, 1999. Cap. 1 p. 8 – 17.

GEOAMBIENTE, PPMA-SC/KFW/FATMA. **Mapeamento Temático Geral do Estado de Santa Catarina.** Relatório Técnico: GEO-RLT-C0715-33608-01. São Paulo: FATMA, 2008. 90p.

GONÇALVES, R. F. et al. Desidratação de Lodo de Esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (coordenador). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: Prosab, 2001. Cap. 3. p. 57-86.

ILHENFELD, R. G. K.; PEGORINI E. P.; ANDREOLI, C. V. **Fatores limitantes.** In: Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba: PROSAB, 1999. Cap. 5 p. 41 – 61.

ILHENFELD, R. G. K. **Higienização do lodo de esgoto.** In: Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba: PROSAB, 1999. Cap. 4 p. 27 – 40.

MANZOCHI, C. I. S. **Logística para tratamento e disposição final de lodos de ETE's visando reciclagem agrícola.** 2008. 331 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MIKI, M. K. **Capítulo 3: Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos.** In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). Biossólidos na agricultura. 1. ed. São Paulo: ABES/SP, 2001. p. 41-88.

MORAES NETO, Sebastião Pires de; JÚNIOR, Cassio Hamilton Abreu; MURAOKA, Takashi. **Uso de Biossólido em Plantios Florestais.** Planaltina: Embrapa, 2007. 24 p. (ISSN 1517-5111).

MPB ENGENHARIA (Santa Catarina). Prefeitura de Florianópolis. **Plano Municipal Integrado de Saneamento.** Florianópolis: Pmf, 2011. 299 p.

MUNHOZ, R. O.; BERTON, R. S. **Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto.** In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. Cap. 6. p. 91-124.

PASSAMANI, Fabiana Reinis Franca; KELLER, Regina; GONÇALVES, Ricardo Franci. Higienização de lodo utilizando Caleagem e Pasteurização em uma Pequena Estação de Tratamento de Esgoto combinando reator UASB e Biofiltro aerado submerso. In: **XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, Cancun: México, 2002.

PARANÁ (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Instituto Ambiental do Paraná. **Instrução Normativa, 2003.** Dispõe sobre o licenciamento ambiental para utilização agrícola de Lodo de Estações de Tratamento de Efluentes Domésticos (ETE). Curitiba, 2003.

SILVA, J. E., DIMAS, V. S. R., SHARMA, R. D. Alternativa agrônômica para biossólido: a experiência de Brasília. In: **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** BETTIOL, W. e CAMARGO, O. A. (coord), Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, p. 143-162, 2000.

SOUZA, M. L. P. et al. **Aptidão das terras do estado do Paraná para disposição final do lodo de esgoto.** Revista DAE, São Paulo: Cia de Saneamento do Estado de São Paulo, n. 177, ano LXXI , p. 20 - 29, maio 2008.

SOUZA, M.L.P.; ANDREOLI, C.V.; PAULETTI, V.; GIOPPO, P.J. Desenvolvimento de um Sistema de Classificação de Terras para Disposição Final de Lodo de Esgoto. In: VI SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABES – APRH, 1994. p. 403-420.

TAMANINI, C. R. et al. Estudo da utilização de altas doses de biossólido na recuperação de área decapada em São José dos pinhais. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária E Ambiental**, 23., 2005, Campo Grande. Anais... . Curitiba: Abes, 2005. p. 1 - 16.

TSUTIYA, M. T. **Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos.** In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa, 2000. cap. 4, p. 69-105.

TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). **Biossólidos na agricultura.** 1. ed. São Paulo: ABES/SP, 2001. p. 89-132.

TSUTIYA, M. T. **Capítulo 4: Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos.** In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). Biossólidos na agricultura. 1. ed. São Paulo: ABES/SP, 2001. p. 89-132.

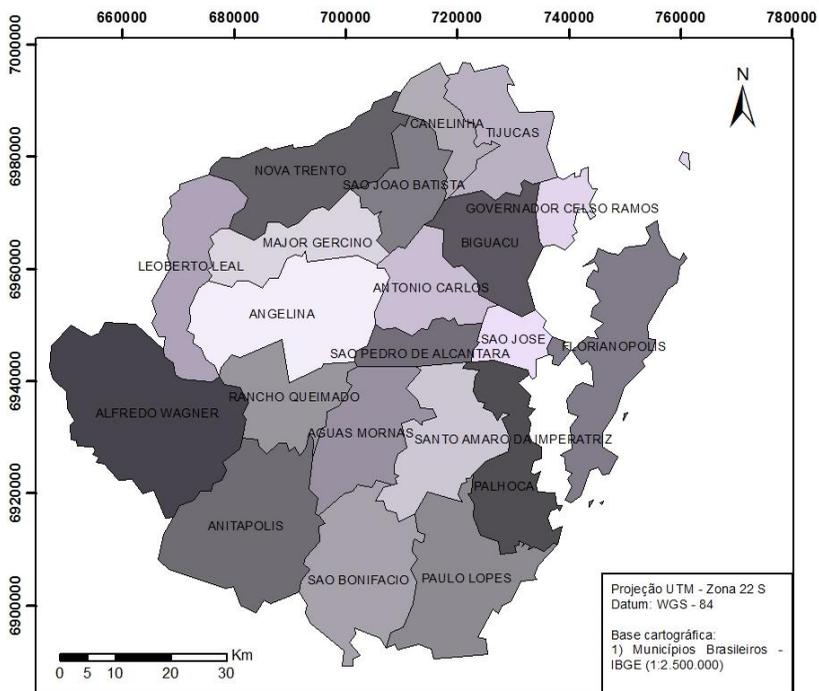
VAN HAANDEL, A.; ALÉM SOBRINHO, P. **Produção e Constituição do lodo de Esgoto.** In: ANDREOLI, C. V (coordenador). Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

VAN HAANDEL, A; CAVALCANTI, P. F. F. Geração e Composição de Lodo em Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (coordenador). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: Prosab, 2001. Cap. 1. p. 3-27.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2005. 452 p.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.

## APÊNDICE A – Municípios da Grande Florianópolis



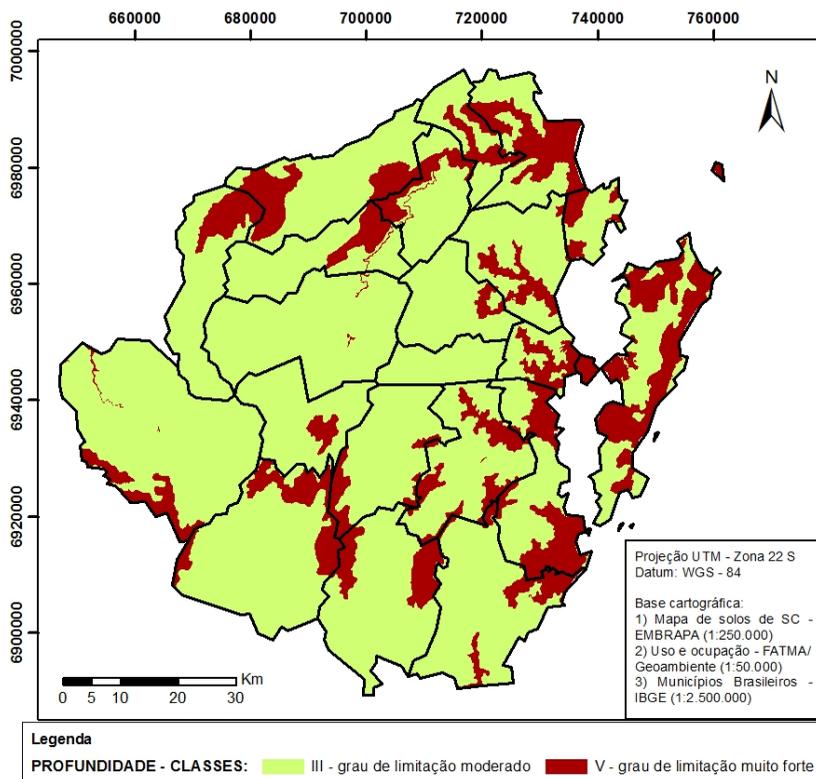
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

## APÊNDICE B – Classificação da aptidão dos solos para disposição do lodo de esgoto

Todas as figuras e quadros presentes neste apêndice foram elaborados pelo autor.

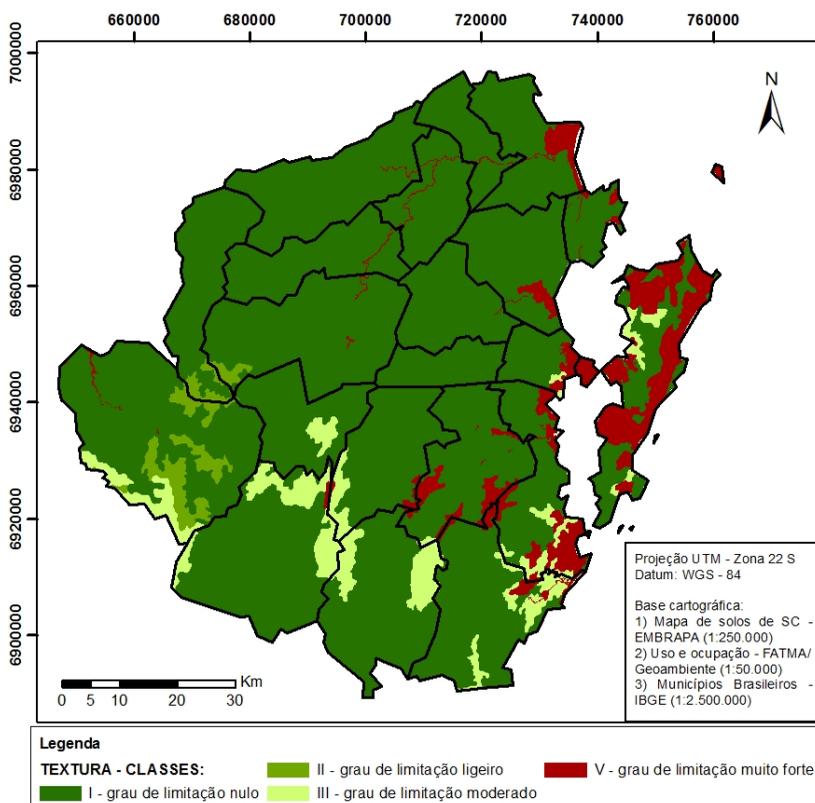
### FATOR – PROFUNDIDADE:

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
PR Profundidade	Latossolos, cambissolos ou argissolos profundos.	0 - Nulo	I	0.00	0.0%
	Cambissolos ou argissolos pouco profundos.	2 - Moderado	III	5537.35	79.6%
	Neossolos litólicos ou outras unidades de solos rasos.	4 - Muito Forte	V	1422.04	20.4%



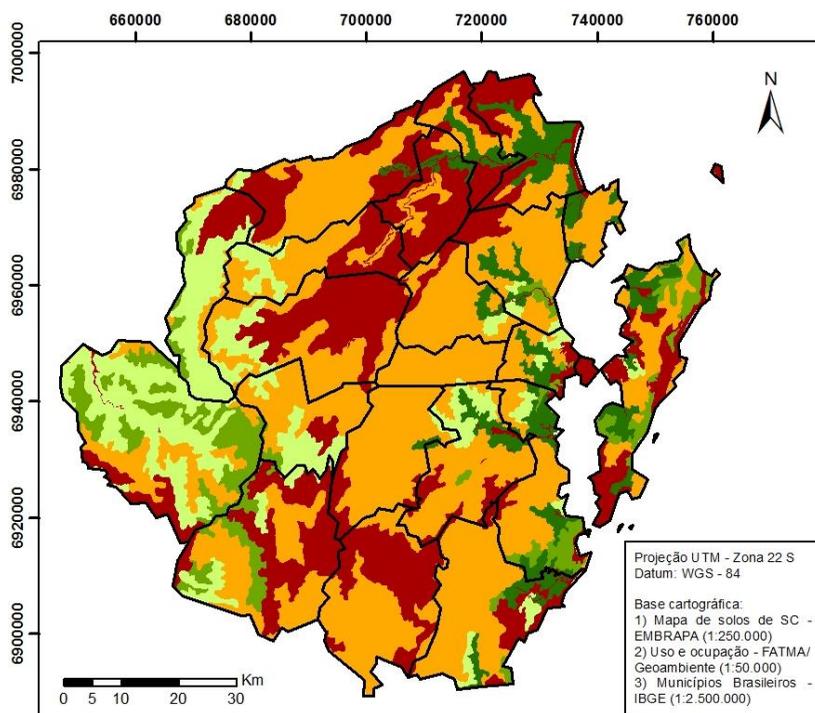
**FATOR – TEXTURA:**

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>TE Textura superficial</b>	Textura argilosa, de 35 a 60% de argila.	0 - Nulo	I	5910.64	84.9%
	Textura muito argilosa, superior a 60% argila.	1 - Ligeiro	II	144.16	2.1%
	Textura média, de 15 a 35% argila.	2 - Moderado	III	415.04	6.0%
	Textura siltosa, inferior a 35% de argila e inferior a 15% de areia.	3 - Forte	IV	0.00	0.0%
	Textura arenosa, inferior a 15% de argila.	4 - Muito Forte	V	489.55	7.0%



## FATOR– SUSCETIBILIDADE À EROSÃO:

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
ER Suscetibil idade à ero são	Solos em relevo plano ou latossolos argilosos em relevo ondulado.	0 - Nulo	I	499.03	7.2%
	Outros solos em relevo suave ondulado.	1 - Ligeiro	II	476.63	6.8%
	Solos textura média ou siltosa em relevo suave ondulado. Solos com textura argilosa em relevo ondulado.	2- Mode- rado	III	916.37	13.2%
	Solos de textura média ou arenosa e/ou caráter abrupto em relevo ondulado. Solos de textura muito argilosa em relevo forte ondulado.	3 - Forte	IV	3250.18	46.7%
	Solos de textura média em relevo forte ondulado. Relevo montanhoso ou escarpado independente da classe textural.	4 - Muito forte	V	1817.18	26.1%



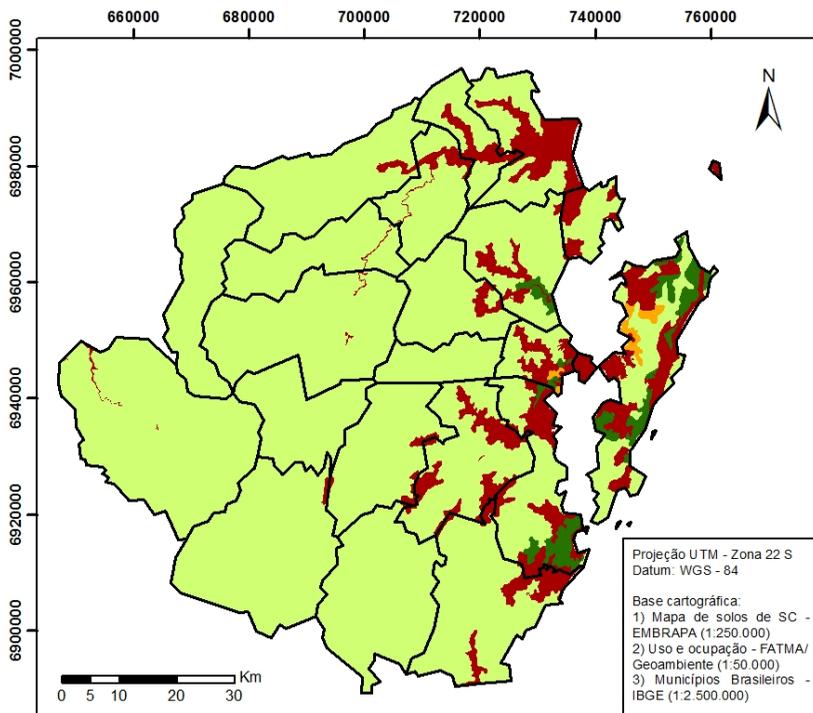
### Legenda

ERODIBILIDADE - CLASSES:

<span style="color: green;">■</span> II - grau de limitação ligeiro	<span style="color: orange;">■</span> IV - grau de limitação forte
<span style="color: darkgreen;">■</span> I - grau de limitação nulo	<span style="color: red;">■</span> V - grau de limitação muito forte
<span style="color: lightgreen;">■</span> III - grau de limitação moderado	

**FATOR – DRENAGEM:**

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>DR Drenagem</b>	Solos acentuadamente e bem drenados.	0 - Nulo	I	140.30	2.0%
	Solos fortemente drenados.	1 - Ligeiro		0.00	0.0%
	Solos moderadamente drenados.	2 - Moderado	III	6064.23	87.1%
	Solos imperfeitamente drenados.	3 - Forte	IV	26.90	0.4%
	Solos mal a muito mal drenados.	4 - Muito forte	V	727.96	10.5%

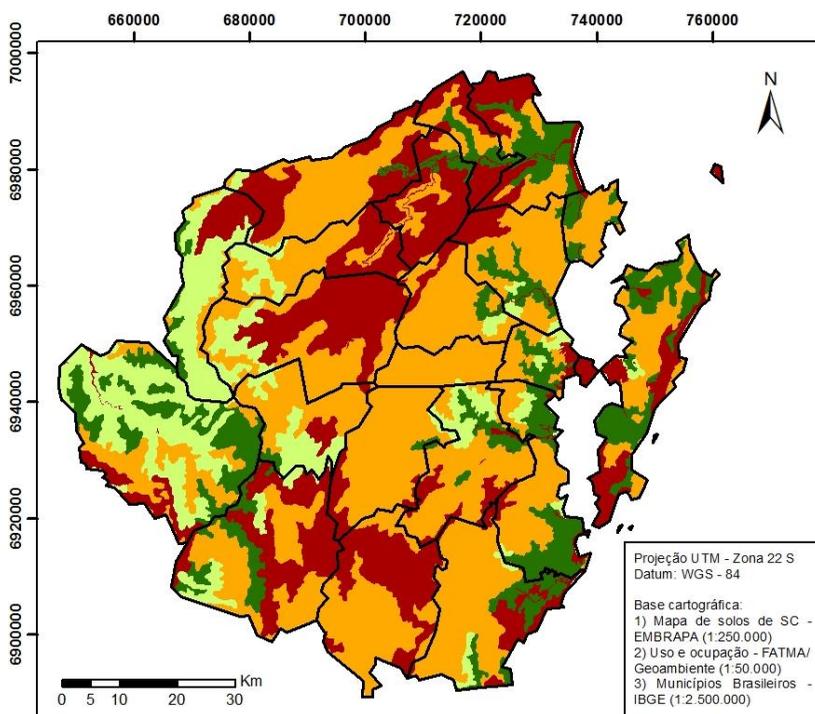
**Legenda**

**DRENAGEM - CLASSES:**

■ I - grau de limitação nulo
 ■ III - grau de limitação moderado
 ■ IV - grau de limitação forte
 ■ V - grau de limitação muito forte

**FATOR – RELEVO:**

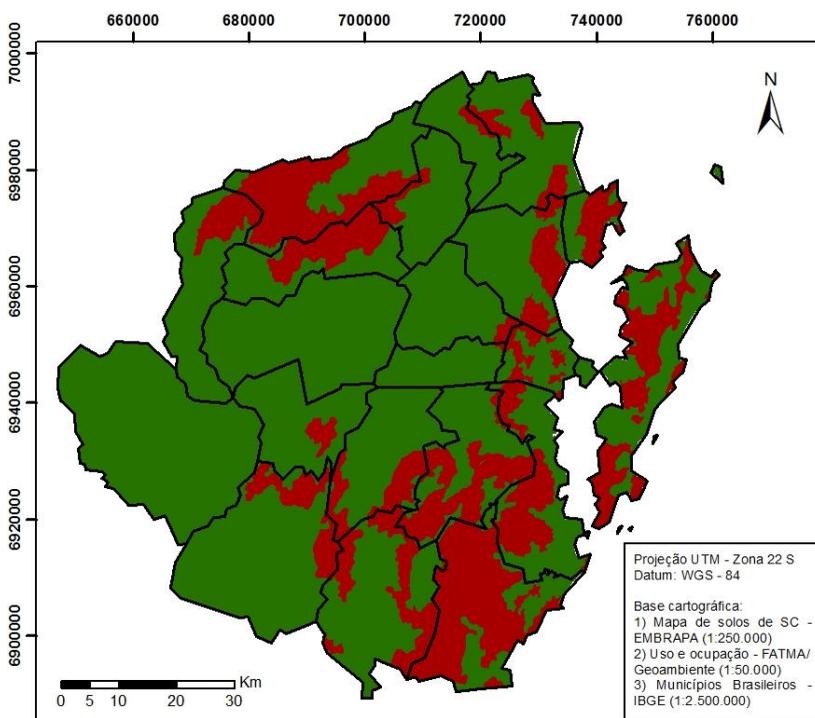
Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>RE Relevo</b>	Relevo plano, declividade de 0 a 3%.	0 - Nulo	I	499.03	7.2%
	Relevo suave ondulado, declividade de 3 a 8%.	1 - Ligeiro		488.22	7.0%
	Relevo ondulado, declividade de 8 a 20%.	2 - Moderado	III	912.42	13.1%
	Relevo forte ondulado, declividade de 20 a 45%.	3 - Forte	IV	3276.55	47.1%
	Relevo montanhoso ou escarpado, declividade superior a 45%.	4 - Muito forte	V	1783.16	25.6%

**Legenda****RELEVO - CLASSES:**

■ III - grau de limitação moderado    ■ V - grau de limitação muito forte  
■ I - grau de limitação nulo    ■ IV - grau de limitação forte

**FATOR – PEDREGOSIDADE:**

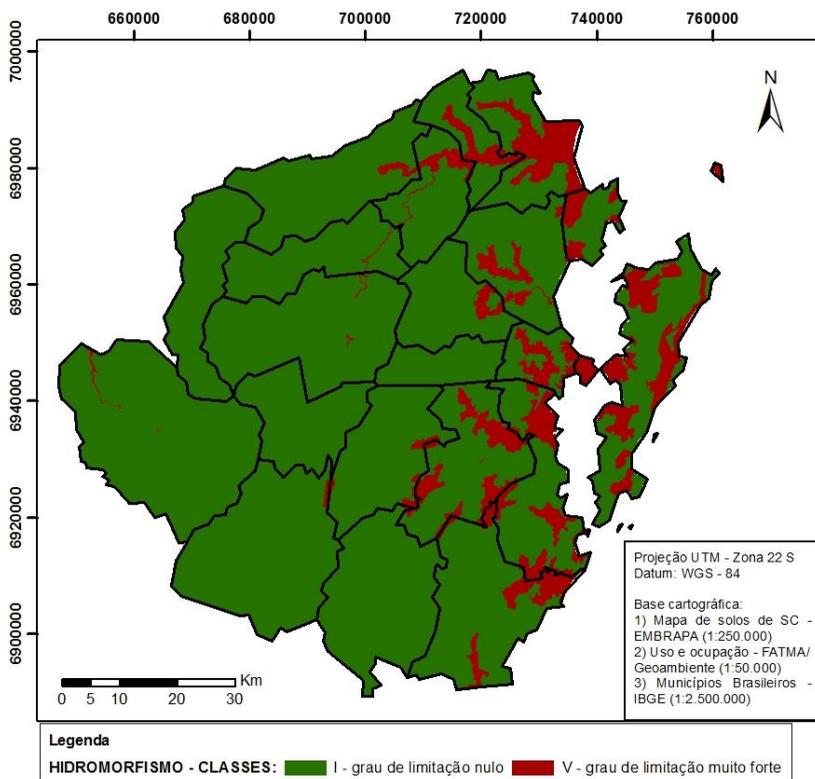
Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>PD Pedregosidade</b>	Solos sem fase pedregosa.	0 - Nulo	I	5142.24	73.9%
	Solos sem fase pedregosa com presença de cascalho.	2 - Moderado	III	0.00	0.0%
	Solos com citação de pedregosidade.	4 - forte	V	1817.15	26.1%

**Legenda**

**PEDREGOSIDADE - CLASSES:** ■ I - grau de limitação nulo ■ V - grau de limitação muito forte

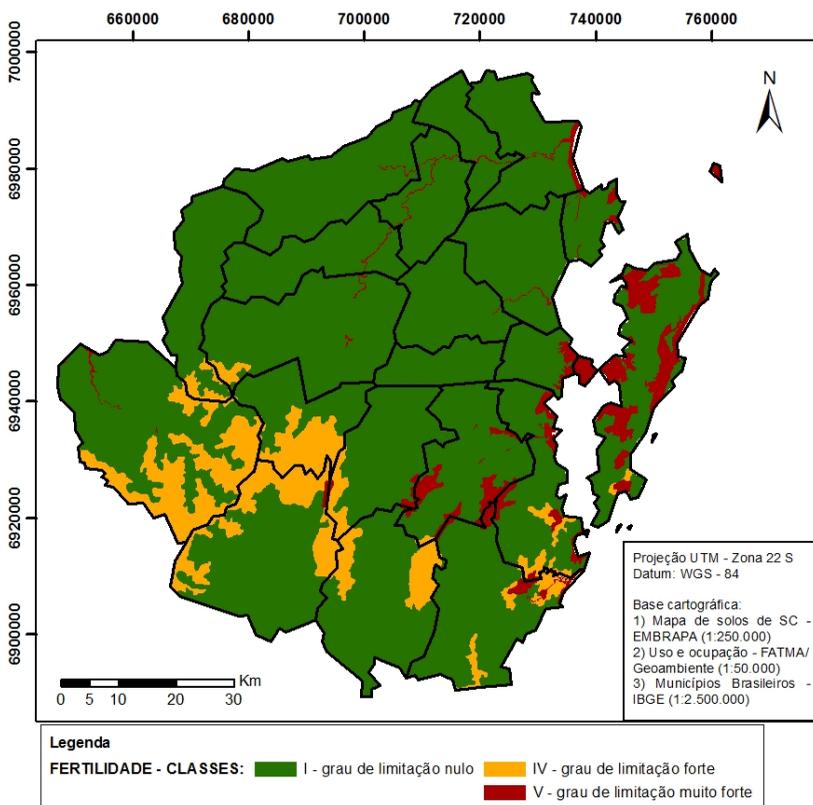
**FATOR – HIDROMORFISMO:**

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>HI Hidromorfismo</b>	Solos sem indicação de hidromorfismo.	0 - Nulo	I	6231.43	89.5%
	Solos com caráter gleico.	2 - Moderado	IV	0.00	0.0%
	Solos hidromórficos.	4 - Muito forte	V	727.96	10.5%



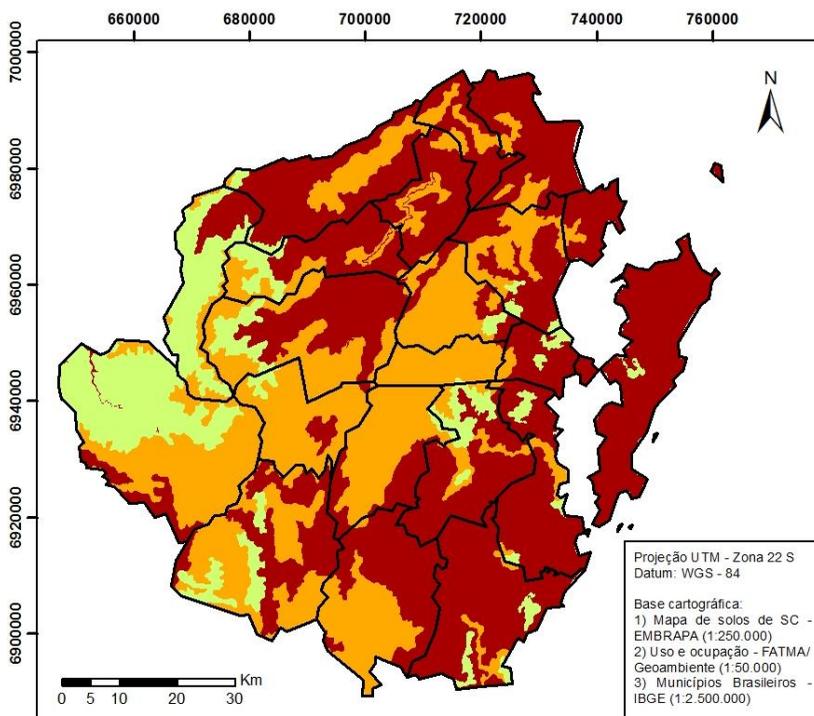
**FATOR – FERTILIDADE:**

Fator	Critério	Grau de Limitação	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
FE Fertilidade	Solos distróficos e álicos com horizonte A moderado ou fraco.	0 - Nulo	I	5142.30	73.9%
	Solos com horizonte A proeminente e eutróficos com A moderado.	1 - Ligeiro		765.99	11.0%
	Solos com horizonte A chernozêmico ou antrópico.	2 - Moderado	III	0.00	0.0%
	Solos com horizonte A húmico.	3 - Forte	IV	722.91	10.4%
	Solos com horizonte turfoso ou solo orgânico.	4 - Muito Forte	V	328.18	4.7%



## CLASSIFICAÇÃO FINAL

Classe	Aptidão das terras	Uso de lodo de esgoto	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
I	Muito Boa	Permitido	0.00	0.0%
II	Boa		0.00	0.0%
III	Regular		894.17	12.8%
IV	Restrita	Não recomendado	2400.47	34.5%
V	Inapta	Vetado	3664.75	52.7%



### Legenda

#### APTIDÃO - CLASSES:

III - Aptidão Regular / Uso permitido

IV - Aptidão Restrita / Uso não recomendado

V - Inapta / Uso vetado

### APÊNDICE C – Fluxo de caixa comparativo das alternativas

Período (anos)	Aterro Industrial	Reciclagem agrícola		Economia
		Investimento inicial	Custo operacional	
0	R\$ 2.065.090,94	-R\$ 4.579.418,73	-R\$ 1.402.978,71	-R\$ 3.917.306,50
1	R\$ 2.188.996,40	-	-R\$ 1.487.157,43	R\$ 701.838,96
2	R\$ 2.320.336,18	-	-R\$ 1.576.386,88	R\$ 743.949,30
3	R\$ 2.459.556,35	-	-R\$ 1.670.970,09	R\$ 788.586,26
4	R\$ 2.607.129,73	-	-R\$ 1.771.228,30	R\$ 835.901,43
5	R\$ 2.763.557,51	-	-R\$ 1.877.502,00	R\$ 886.055,52
6	R\$ 2.929.370,97	-	-R\$ 1.990.152,12	R\$ 939.218,85
7	R\$ 3.105.133,22	-	-R\$ 2.109.561,24	R\$ 995.571,98
8	R\$ 3.291.441,22	-	-R\$ 2.236.134,92	R\$ 1.055.306,30
9	R\$ 3.488.927,69	-	-R\$ 2.370.303,01	R\$ 1.118.624,68
10	R\$ 3.698.263,35	-	-R\$ 2.512.521,19	R\$ 1.185.742,16
11	R\$ 3.920.159,15	-	-R\$ 2.663.272,47	R\$ 1.256.886,69
12	R\$ 4.155.368,70	-	-R\$ 2.823.068,81	R\$ 1.332.299,89
13	R\$ 4.404.690,82	-	-R\$ 2.992.452,94	R\$ 1.412.237,88
14	R\$ 4.668.972,27	-	-R\$ 3.172.000,12	R\$ 1.496.972,16
15	R\$ 4.949.110,61	-	-R\$ 3.362.320,13	R\$ 1.586.790,48
16	R\$ 5.246.057,25	-	-R\$ 3.564.059,33	R\$ 1.681.997,91
17	R\$ 5.560.820,68	-	-R\$ 3.777.902,89	R\$ 1.782.917,79
18	R\$ 5.894.469,92	-	-R\$ 4.004.577,07	R\$ 1.889.892,86
19	R\$ 6.248.138,12	-	-R\$ 4.244.851,69	R\$ 2.003.286,43
<b>Reajuste ao ano</b>		6%		
		<b>Taxa</b>	<b>Economia em valor presente</b>	
<b>VPL</b>		6%	R\$	8.662.825,83
<b>TIR</b>		22,83%		
<b>Payback</b>		6,92 anos		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).