

**WELKER SICHELERO**

**MODELAGEM EMPÍRICA PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO  
DE LODO NA ETA DE CHAPECÓ-SC**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção de grau de  
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade Federal da  
Fronteira sul.

Orientador: Prof. Me. Leandro Bassani

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e  
aprovado pela banca em: 05 / 12 / 2019

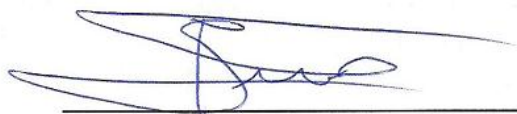
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Me. Leandro Bassani – UFFS



Prof. Dr. Alexandre Augusto Moreira Lapis – UFFS



Prof. Dr. Fernando Grison - UFFS

# MODELAGEM EMPÍRICA PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE LODO NA ETA DE CHAPECÓ-SC

\* Welker Sichelero  
\*\* Leandro Bassani

## Resumo

Foi construída uma equação de correlação entre turbidez e concentração de sólidos na água coagulada com base nas determinações do teor de sólidos e turbidez de amostras de água obtidas na entrada da água bruta na estação de tratamento de água de Chapecó. A partir dessa curva foi estimada a produção de sólidos que formam o lodo proveniente do sistema de tratamento de água. Com os resultados dessa estimativa de sólidos foram calculados os volumes de lodo gerados para algumas tecnologias de desidratação e os respectivos custos de disposição final. Os resultados obtidos indicam que a disposição final de lodos em aterros sanitários é bastante dispendiosa, variando entre R\$ 600 mil e R\$ 1,6 milhão por ano (valores baseados na série de dados de turbidez e vazões registradas na operação da ETA de fevereiro de 2013 até março de 2014). Uma vez que o lodo de estações de tratamento de água tem diversas potencialidades de incorporação à processos industriais sem comprometer a qualidade final dos produtos, deve-se sempre estudar a possibilidade de se buscar parcerias para o aproveitamento desse material antes da decisão pela destinação final como resíduo sólido.

**Palavras-chave:** Modelo empírico, estimativa, produção de lodo.

## Introdução

Equações empíricas são importante ferramenta na definição de parâmetros de projeto quando não existe a possibilidade de medição da grandeza propriamente dita ou pretende-se fazer um prognóstico de determinado processo. Diante disso, pode-se afirmar que a estimativa da produção de lodo em uma estação de tratamento de água é de grande valia tanto para o dimensionamento de sistemas de tratamento da fase sólida para estações já existentes quanto para auxiliar decisões relacionadas a novos projetos. Sabe-se que com o aumento da concentração de material particulado suspenso na água bruta, aumenta proporcionalmente a dosagem do coagulante adicionado para que a floculação seja efetiva, aumentando também a produção de lodo na estação de tratamento. Tanto o aumento do uso de coagulante quanto o maior volume de lodo gerado vêm a agregar significativos custos operacionais ao funcionamento da estação.

Tratar a água torna-se inviável ou ineficaz sob condições em que a concentração de impurezas na água bruta é elevada. Isso se deve ao fato de os espaços intersticiais dos filtros da estação sofrerem uma colmatação acelerada pelo acúmulo da grande quantia de flocos que não sedimenta no decantador. Com esses espaços reduzidos, a perda de carga no filtro evolui muito rapidamente o que torna curtas as carreiras de filtração, resultando em uma diminuição da produção de água tratada em virtude do aumento na frequência de descarte de água para

\* Graduando do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Chapecó – SC, Brasil. E-mail: welkersengenharia@gmail.com

\*\* Engenheiro Sanitarista e Ambiental, Professor Msc na Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Chapecó – SC, Brasil. E-mail: bassani2609@gmail.com

limpeza das unidades (120 m<sup>3</sup> para a limpeza de cada filtro). Em casos extremos essa queda na produção pode levar ao desabastecimento. Portanto é extremamente importante que se adotem medidas de conservação do solo e da água em bacias estratégicas que sejam ou possam vir a ser mananciais de abastecimento humano.

É enfoque principal desse projeto o desenvolvimento de um modelo empírico para a estimativa da produção de lodo na estação de tratamento de água do município de Chapecó usando como dados de entrada a vazão e a turbidez da água bruta, grandezas de fácil aferição e que costumeiramente são registradas durante a operação de estações de tratamento de água.

A estimativa dos custos anuais com tratamento de lodo toma relevante papel como ferramenta de gestão para a operação da unidade de tratamento de água. A inexistência de um modelo ajustado à estação de tratamento em questão acarreta dificuldades de quantificação dos gastos com transporte e disposição dos lodos gerados. É também correto afirmar que os resultados desse estudo poderão servir de apoio ao correto dimensionamento de futuras instalações de tratamento de efluentes de ETA.

Determinou-se a correlação entre turbidez da água bruta e sólido totais na água coagulada realizando-se medições de turbidez ainda na estação de tratamento de água e a determinação dos respectivos teores de sólidos em laboratório. Com os dados de turbidez e de sólidos totais interrelacionados foi estabelecida uma equação empírica que permita a utilização da turbidez para a estimativa da massa de sólidos produzida no tratamento de água.

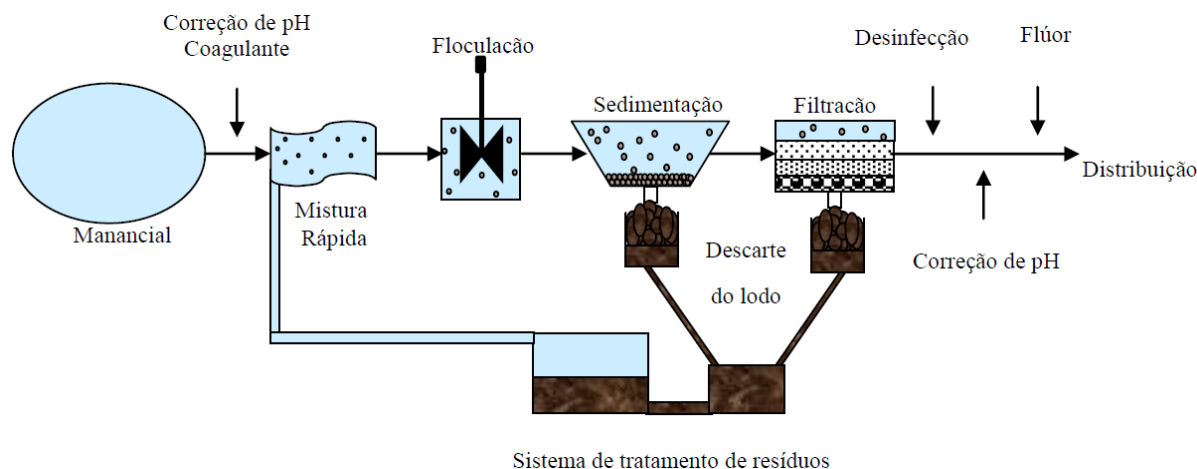
## **Desenvolvimento**

Atualmente quase a totalidade da água de abastecimento da cidade de Chapecó é captada do Lajeado São José. A bacia hidrográfica situa-se na microrregião Colonial Oeste de Santa Catarina nos municípios de Chapecó e Cordilheira Alta, abrangendo uma área total de 77,44 km<sup>2</sup>. Tem forma alongada no sentido norte-sul e sua característica geológica principal é o derrame de lavas básicas da formação Serra Geral. O solo da bacia é composto por 80% de Latossolo Bruno-Roxo Álico e de 10 a 20% de Cambissolo Eutrófico. Parte da cidade de Chapecó situa-se dentro da bacia hidrográfica do Lajeado São José e o processo de urbanização da bacia gera grande carregamento de sedimentos provenientes de loteamentos, terraplenagens e abertura de ruas pela remoção da proteção vegetal do solo (BASSI, 2002).

No intento de que a água oferecida à população seja de qualidade e, portanto, não exponha os indivíduos a fatores patogênicos, a água é submetida a procedimentos técnicos dos sistemas de tratamento de água para obtenção de um produto físico-químico e bacteriologicamente seguro para consumo humano (CUNHA, M. P. O, 2004).

Nas estações brasileiras o que predomina é o tratamento em ciclo completo. Esse método de tratamento é composto pelas seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, conforme o fluxograma da figura 1, exceto pela parte de desaguamento do lodo (sistema de tratamento de resíduos) e recirculação da água resultante desse último processo.

Figura – 1 – Fluxograma do ciclo de tratamento completo em ETA.



Fonte: (CUNHA, M.P.O, 2004).

As impurezas mais comuns encontradas em águas superficiais são sólidos dissolvidos em forma ionizada, gases dissolvidos, compostos dissolvidos e material em suspensão (tais como microrganismos e coloides). A maioria delas tem cargas superficiais negativas fazendo com que permaneçam em suspensão na água por longos períodos de tempo devido à repulsão mútua entre elas (PAVANELLI, 2001). Para que se desestabilize a suspensão coloidal efetua-se a adição de sais de alumínio ou de ferro, caracterizando assim a coagulação. A adição de um cátion num sistema coloidal diminui o alcance de influência das partículas às quais o cátion neutraliza eletricamente, ocorrendo a coagulação por compressão da dupla camada elétrica. Uma vez a dupla camada elétrica comprimida, as partículas da suspensão coloidal perdem a sua repulsão mútua e sua distribuição passa a ocupar um volume menor na solução. Além da neutralização de cargas, existe também o mecanismo de varredura, no qual hidróxidos insolúveis precipitam carregando consigo as impurezas presentes na coluna de água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Na unidade de floculação – que pode ser uma câmara com agitação mecânica ou um floculador com chicanas – a água é lentamente agitada, forçando a aproximação das partículas já eletricamente neutras com uma intensidade de agitação seguramente menor do que a suficiente para a quebra dos flocos. Em floculadores mecânicos essa agitação é feita através do movimento de pás com o auxílio de um motor. No floculador de chicanas o caminho sinuoso da água através dos estreitamentos de passagem causados pela colocação de paredes no interior das unidades são os responsáveis pela turbulência que resulta na aglomeração dos flocos.

A sedimentação é o fenômeno físico no qual as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica pela ação da gravidade, indo depositar-se no fundo do decantador (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; RIBEIRO, 2007). No interior da unidade são utilizadas técnicas de controle de fluxo para que a turbulência cesse e então os flocos possam ser dirigidos ao fundo do decantador.

A clarificação do meio líquido, que consiste na separação entre as fases sólida e líquida, na maioria das estações de tratamento brasileiras, é obtida através de sedimentação. Os flocos separados no processo formam uma camada de lodo no fundo dos decantadores que é removida periodicamente (RIBEIRO, 2007). Após a

decantação da maior parte dos flocos a água é dirigida à unidade de filtração. A filtração representa uma importante barreira sanitária para que a água produzida seja de qualidade e atenda às normas de potabilidade em quaisquer circunstâncias, uma vez que uma filtração ineficiente acarreta em insuficiência do sistema de desinfecção pelo aumento de micro-organismos e outros materiais na solução.

De 60 a 95% do lodo gerado na estação de tratamento de água provém dos decantadores e o restante resulta da lavagem dos filtros, variando essa proporção de acordo com o tipo e dosagem do coagulante, eficiência hidráulica das unidades e propriedades físicas e químicas da água (RICHTER 2001).

A desinfecção consiste no processo em que os microrganismos patogênicos presentes na água são inativados e tem sua população suficientemente reduzida pela ação de um agente químico ou físico através da ocorrência de um ou mais dos seguintes mecanismos: destruição da estrutura celular; interferência no metabolismo com inativação de enzimas; interferência na biossíntese e no crescimento celular, evitando a produção de proteínas, ácidos nucleicos e coenzimas. Os agentes químicos mais utilizados tem sido os oxidantes cloro, bromo, iodo, dióxido de cloro, ozônio, permanganato de potássio, peróxido de hidrogênio, ácido peracético, ferrato de potássio e os íons metálicos prata e cobre. Os agentes físicos mais utilizados são o calor e radiação ultravioleta. O método mais comum em estações de tratamento de água tem sido a cloração, realizada através do borbulhamento de gás cloro dentro de um tanque de contato e mostra-se um dos melhores por garantir uma desinfecção que continua após a saída da água da estação de tratamento. Essa desinfecção durante a distribuição é resultante da formação de residuais de cloro persistentes na água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; RIBEIRO, 2007).

### Geração de lodo

Somando-se os municípios com sistemas de abastecimento isolados e integrados no Brasil, 3630 estações de tratamento de água para abastecimento captam água de mananciais superficiais (ANA 2010). Estações que tratam águas superficiais trabalham com água cuja turbidez e cor são elevadas, o que leva a uma significativa produção de lodo.

A turbidez das águas se dá devido à presença de partículas em suspensão, podendo ser resultado da existência de substâncias como areia, argila, matéria orgânica e microrganismos em geral e é medida através da atenuação de um feixe de luz ao atravessar a amostra de água. É importante observar que águas com a mesma turbidez podem conter diferentes tamanhos e quantidades de partículas. A distribuição granulométrica das partículas faz com que as condições de coagulação se alterem, devendo-se tomar cuidado ao se comparar águas de diferentes mananciais (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Porém, sabe-se que a dosagem de coagulante aumenta de forma diretamente proporcional ao aumento da turbidez para águas que tenham uma granulometria de sólidos parecida. Portanto com um modelo empírico ajustado às características da água do correspondente manancial, é possível estimar a quantidade de lodo gerado no tratamento de água através da medida de sua turbidez.

A qualidade da água bruta, o tipo e dosagem dos produtos químicos utilizados e o desempenho hidráulico das unidades de tratamento são fatores que influenciam primordialmente na quantidade e qualidade do lodo produzido em estações de tratamento de água. A quantificação do lodo produzido é de indiscutível importância para o dimensionamento dos sistemas de adensamento e desidratação assim como

das formas de uso e disposição desse subproduto do processo de tratamento de água (RIBEIRO 2007).

Dimensionar qualquer sistema de desidratação de lodo, seja natural ou mecânico, exige fundamentalmente que se conheça a quantidade de lodo gerada durante o tratamento de água. A determinação rotineira da quantidade de sólidos gerados no tratamento de água pode facilitar a redução de sua produção através da otimização dos processos de tratamento de água. O registro de informações mensais de quantidade de lodo produzido em cada unidade é prática aconselhável e de grande importância para a melhoria dos modelos que estimam a quantidade de lodo produzido, com vistas a dar maior segurança aos projetos de sistemas de tratamento de lodo de ETAs ainda não instaladas (SARON; LEITE, 2001).

### Métodos de desaguamento de lodo

Para que se viabilize o tratamento adequado do lodo gerado na estação de tratamento, é necessário que ele seja adensado. Isso se deve ao elevado teor de água no lodo – dependendo do coagulante utilizado e o tipo de estação de tratamento, pode chegar a mais de 99% da massa de lodo produzida (RICHTER, 2001).

A água contida no efluente de ETA pode ser separada em função de sua energia de ligação às partículas e alocação na estrutura do efluente (FERRANTI, 2005):

- *Água intersticial*: adsorvida na superfície dos sólidos e pode ser removida por ação mecânica ou uso de flocculante;
- *Água intracelular ou de ligação*: é parte integrante da partícula e só pode ser removida através de energia térmica que provoque grande mudança no estado de agregação da água;
- *Água superficial*: é aquela que está presa a superfície das partículas sólidas por adesão e adsorção;
- *Água livre*: consiste na água que ocupa os espaços entre as partículas, não tem ligação com os sólidos e pode ser removida facilmente por gravidade.

### Adensamento

O adensamento consiste no aumento da concentração dos sólidos no lodo pela retirada da água livre no material. De acordo com Richter (2001), os lodos brutos dos sistemas de tratamento de água saem da linha de tratamento de água com uma concentração de sólidos de 0,5%. O adensamento permite que se reduza o volume do lodo, atingindo-se concentrações de sólidos em torno de 2%. Com esse pequeno aumento percentual (de 0,5 para 2%) na concentração de sólidos o volume do material se reduz para um quarto do seu volume inicial. O líquido sobrenadante pode ser redirecionado à unidade de mistura rápida da ETA. Outro fator a favor dos sistemas de adensamento é que, para que os equipamentos de desidratação mecânica existentes no mercado funcionem de forma adequada, recomenda-se uma concentração de sólidos no lodo de entrada de 2% (FERREIRA FILHO, 1997).

As duas formas mais comuns de adensamento são o adensamento por gravidade e o adensamento por flotação. Em sistemas de adensamento por gravidade as partículas flocosas com alto teor de sólidos sedimentam como uma massa única (manto de lodo), submetida simultaneamente a sedimentação e adensamento (CHAO, 2001). Tratando-se de volume, as taxas de aplicação usuais

em adensamento por gravidade são  $3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , sem adição de polímero, e de  $4,0$  a  $8,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , com a aplicação de polímero. (RICHTER, 2001)

No adensamento por flotação a fase sólida é separada da fase líquida de forma parecida com o adensamento por decantação, porém de forma reversa. No processo é feita a recirculação de água clarificada a uma câmara de saturação alimentada por um compressor onde ela atinge a saturação de oxigênio dissolvido. Ao ser encaminhada a região de entrada do adensador, essa água saturada de oxigênio passa por uma mudança brusca de pressão que a faz liberar microbolhas. Com isso, as partículas sólidas do lodo tem sua densidade diminuída através da adesão das microbolhas à sua superfície o que as faz se deslocarem ascendentemente no líquido, formando uma cobertura de lodo que é removida periodicamente por raspadores. Flocos de sulfato de alumínio têm densidade relativa aproximada de 1,003 e diâmetro aproximado de 1mm. Com o ar incorporado sua densidade se reduz a 0,99-0,98 ou menos, obtendo-se velocidades de flotação da ordem de dez vezes superiores em relação a velocidade de sedimentação sob as mesmas condições (RICHTER, 2001).

### Tecnologias de desidratação

O procedimento seguinte no tratamento da fase sólida dos resíduos de estação de tratamento de água é a desidratação. Os métodos mais usuais de desidratação apontados por Richter (2001) são:

- *Métodos de desidratação mecânica:*
  - Filtração a vácuo: Muito pouco usada na desidratação de lodos de estações de tratamento de água devido a características operacionais que o tornam inviável, tais como a blindagem da tela de saída de água pela passagem do lodo através do tecido do filtro, o que pode ser evitado com o uso de revestimento com terra diatomácea, o que agrega excessivo custo operacional;
  - Filtro prensa: foi uma das primeiras tecnologias capazes de produzir uma torta com teor de sólidos alto o suficiente para serem depositados em aterro sanitário. Os mais utilizados no tratamento de lodos de estação de tratamento de água são o tipo câmara e o de membrana ou diafragma. Filtros prensa de câmara consistem em uma série de placas tipo câmara, dispostas entre uma meia placa fixa e uma meia placa móvel nas extremidades do equipamento. Todas as placas tem uma reentrância na qual será acomodada a torta final. O meio filtrante é instalado contra as paredes internas das placas e retém os sólidos.
  - Prensa desaguadora: também conhecida como filtro prensa de correia, é capaz de produzir uma torta que pode ser diretamente encaminhada a aterro sanitário e alia características tanto do filtro prensa quanto do filtro rotativo a vácuo. Sua operação consiste nas seguintes etapas: a) condicionamento químico para flocular o lodo em uma massa fibrosa e extrair a água aderente às partículas; b) drenagem gravitacional para permitir que a água liberada no condicionamento químico esorra livremente através de uma correia porosa contínua; c) estágio de baixa pressão, quando o lodo passa por um afunilamento formado pelas duas correias móveis sobrepostas, expelindo água por compressão e formando um tapete de lodo exprimido entre as correias; d) estágio de alta pressão, onde a torta de lodo está presa entre as correias que passam por uma série de rolos, cujos diâmetros variam do maior

- para o menor, aumentando a pressão compactando a torta ao extremo e drenando mais água através da correia porosa; e) as correias se afastam e é realizada a raspagem da torta de lodo;
- Decantadores centrífugos: Consta de um tambor tronco-cônico de eixo horizontal que gira em torno de seu eixo a uma velocidade de 3000 a 4000rpm. Um parafuso transportador gira no interior do tambor a uma velocidade ligeiramente diferente realizando a raspagem do material centrifugado para fora da máquina. Com os recentes aperfeiçoamentos no projeto dessas máquinas, aliados ao uso de polímeros no condicionamento, essas máquinas são capazes de drenar lodos tanto de estações de abrandamento a cal quanto das que utilizam coagulantes metálicos.
  - *Métodos não mecânicos de desidratação*:
    - Leitos de secagem de areia: Os mecanismos responsáveis pela retirada de água dos lodos nesses sistemas são essencialmente decantação, percolação e evaporação. A operação consiste em enchimento e secagem e são construídos para um tempo total de duração do ciclo de 3 a 4 meses, pois sua eficiência depende de condições climáticas. Consequentemente cada leito de secagem recebe apenas 3 ou 4 aplicações por ano. A altura máxima de lodo depositado para esse método é de 60 cm, exigindo grandes áreas de construção;
    - Lagoas: Funcionam com base nos mesmos mecanismos que os leitos de secagem de areia, porém com altura líquida de até 1,80 m. Ambos os sistemas são capazes de receber uma carga superficial igual, que varia de 10 a 60 kg·m<sup>2</sup>. Portanto a profundidade das lagoas é de 3 a 4 vezes a profundidade dos leitos de secagem. Desse modo, o número de cargas em cada unidade e o tempo de secagem é proporcionalmente maior, resultando em um único ciclo por ano.

#### Disposição final

Diversas são as opções de tratamento e disposição desse subproduto do tratamento de água. As alternativas de disposição usualmente utilizadas são: lançamento em corpos de água; lançamento no mar; lançamento na rede de esgotos sanitários; lagoas; aplicação no solo e a destinação a aterro sanitário. O lançamento em rios é o método menos financeiramente oneroso de disposição e também o mais frequentemente utilizado nas ETAs brasileiras. Entretanto depende da permissão das autoridades ambientais em função das características e do volume do curso de água escolhido. As principais limitações são atribuídas a existência de coagulante e outros produtos químicos aplicados que vem a aumentar a sedimentabilidade tanto dos materiais despejados quanto dos já existentes no corpo receptor, podendo causar acúmulos indesejáveis. Quando se opta pela descarga em redes de esgoto sanitário, a responsabilidade pelo tratamento do efluente da estação de tratamento de água é transferida para a operadora da estação de tratamento de esgoto. Entretanto, o lodo de tratamento de efluentes urbanos, que poderia ser facilmente utilizado para aplicação agrícola, passa a ser contaminado pelos metais provenientes do lodo do tratamento de água. Caso não exista estação de tratamento para os efluentes da rede coletora, a capacidade do corpo de água que recebe a emissão dessa rede deve ser analisada. O despejo no mar, por meio de embarcações, já foi considerado uma opção viável no passado, porém caiu em desuso por estar atualmente submetida a severas considerações legais relativas ao



meio ambiente. Lagoas já foram bastante utilizadas como um método de disposição de lodos, entretanto são apenas uma destinação temporária para o lodo que terá que ser removido das lagoas mais cedo ou mais tarde e então aplicado no terreno ou disposto em aterro sanitário (RICHTER, 2001).

Tratando-se de legislação, existe a Política Nacional de Recursos Hídricos que foi instituída pela Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, com o intuito de preservar os recursos hídricos e regulamentar seu uso adequado, submetendo o lançamento de efluentes de sistemas de tratamento de água em corpos hídricos ao processo de outorga do direito de uso. Há ainda a NBR 10.004/2004 que classifica os lodos provenientes de estação de tratamento de água como resíduos sólidos, estando sua disposição final regulamentada por essa norma.

Algumas das alternativas com potencial de uso são apontados por Tsutiya e Hirata (2001):

- Fabricação de cimento: O lodo de ETA vem nesse caso a suprir a deficiência de sílica ferro e alumínio do calcário utilizado na fabricação de cimento, visto que o calcário representa entre 70 e 80% da matéria prima bruta. O lodo é introduzido no processo na fase de pré-homogeneização das matérias primas. Porém, para isso precisa ter uma concentração de sólidos de ao menos 50%. A presença de óxidos de potássio e de sódio no lodo diminuem a formação de álcalis que causam expansão e fissuras em estruturas de concreto. Quando apresentam altas concentrações de matéria orgânica, antracito, metais pesados e permanganato de potássio (composto altamente oxidante capaz de comprometer a armadura metálica das estruturas) não é aconselhável sua incorporação no processo de fabricação de concreto;
- Fabricação de tijolos telhas e cerâmicas: O lodo de estações de tratamento de água apresenta características muito semelhantes ao material retirado das jazidas naturais de xisto e argila. A adição do lodo pode ser feita durante fabricação do tijolo ou ainda na jazida de onde o material natural é retirado. Para aplicação diretamente na jazida, a concentração de sólidos precisa ser de ao menos 20%, para introdução direta no processo de fabricação a concentração de sólidos tem que ser em torno de 50%. Devido à retração que ocorre na argila natural, que chega a 20%, as dosagens de lodo precisam ser rigorosamente controladas para que se garanta a resistência do produto final. A presença de carvão ativado ou antracito no lodo torna sua utilização inviável para esse fim devido a expansão desses componentes causar fissuras no tijolo.
- Aplicação em solo agrícola: Aumento da capacidade de retenção de água, melhoria estrutural do solo, melhora a aeração, e introduz traços de minerais. Os contrapontos da aplicação em solos agricultáveis são a tendência de indisponibilizar fósforo para as plantas e a fitotoxicidade do alumínio em pH maior que 6,5. Frente aos prós e contras da aplicação de lodo em solos agrícolas, cabe destacar que quando se trata de lodo de estação de tratamento de água a baixa concentração de matéria orgânica torna a prática menos interessante;
- Reaproveitamento para aumento da sedimentabilidade de águas com baixa turbidez: Águas de baixa turbidez apresentam concentração de sólidos sedimentáveis muito baixas, dificultando a formação de flocos com tamanho e densidade ideais para a decantação. Estudos indicam que o bombeamento de lodo gerado nos decantadores para as unidades de

coagulação e floculação melhora aumenta a formação de flocos pesados e diminui o gasto com produtos químicos;

- Compostagem e solo comercial: O lodo confere uma melhor estrutura para o solo, maior capacidade de retenção de água e micronutrientes importantes. A compostagem geralmente é realizada misturando-se o lodo à restos material vegetal proveniente de podas. Porém seu uso é restrito devido às mesmas implicações descritas para a aplicação no solo.

## Metodologia

Foram coletadas as amostras na entrada de água bruta na estação de tratamento de água antes de qualquer etapa do tratamento. As amostragens no período de 1 a 25 de setembro foram realizadas três vezes por semana e no período de 28 de setembro à 16 de outubro as amostras foram coletadas seis vezes por semana, contabilizando um total de 30 amostras. Em consequência do período de escassês de chuvas com capacidade de alterar significativamente a turbidez da água na entrada da estação de tratamento, não foram coletadas mais amostras, pois essas concentrariam-se em uma faixa de turbidez que já ocupa a maior parte do conjunto amostral. A conservação das amostras até o momento da determinação de sólidos foi realizada em refrigerador sob temperaturas em torno de 4°C por um período máximo de quatro dias.

As medidas de turbidez foram aferidas o mais rapidamente possível após as coletas com a intenção de se garantir uma medida de turbidez representativa da existência tanto dos sólidos mais finos quanto dos sólidos mais grosseiros, cuja velocidade de decantação é elevada. Para a estimativa da produção de lodo, fez-se necessária a determinação de sólidos totais da água já coagulada. A coagulação e floculação da água foi realizada na estação de tratamento com o auxílio de aparelho de jar test (ou teste de jarros), simulando as condições de agitação e dosagem de coagulante mantidas na estação de tratamento.

As determinações de sólidos totais foram realizadas em triplicata para a água bruta e para a água coagulada utilizando-se para a construção da curva de correlação apenas o valor médio das três determinações de sólidos totais associado a cada valor de turbidez.

Para que as alíquotas fossem representativas foi utilizado um agitador magnético para uniformização da amostra, principalmente no caso da água coagulada, cujos sólidos rapidamente se depositam no fundo do recipiente. Em cada ensaio foi pipetado um volume de 100 mL da amostra sendo esse colocado em cápsula de porcelana. Após a determinação da massa da alíquota, com balança analítica, as cápsulas contendo a água foram levadas a estufa de secagem a uma temperatura e 98°C por 24 horas e posteriormente, tiveram sua massa aferida novamente. O teor de sólidos foi calculado dividindo-se a diferença entre a massa da capsula vazia e da capsula após a secagem pela massa de água posta na capsula. Todas as capsulas foram manuseadas com o auxílio de uma pinça para que se evitasse a adição de massa pela adesão de materiais não pertencentes às alíquotas.

As metodologias de amostragem, conservação de amostras, determinação de turbidez e determinação de sólidos secos seguidas foram as apresentadas pelo Standard Methods Committee no livro *Standard methods for the examination of water & wastewater* (2130 - Turbidity; 2540B - Total Solids Dried at 103-105°C), com a adaptação da temperatura de secagem na estufa de 103-105°C para 98°C

para que se evitasse a perda de material através de respingos causados pela possível intensa ebulição da água à temperaturas acima de 100°C.

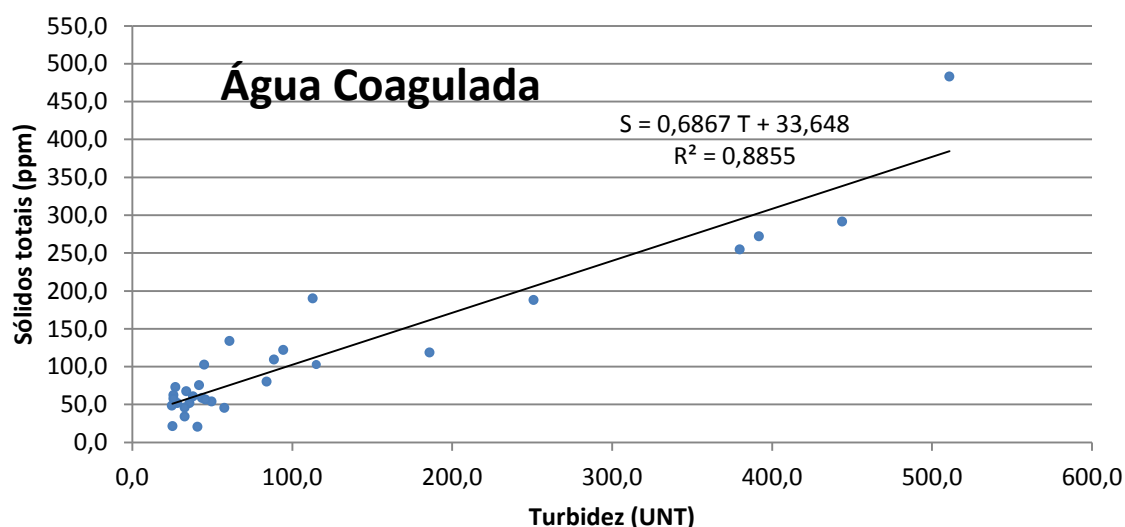
Os dados das medidas de turbidez e concentração de sólidos foram armazenados na planilha do anexo A, a qual foi utilizada para a determinação dos ajustes matemáticos que correlacionam as medidas de turbidez com a concentração de sólidos. Para a estimativa da geração de lodo no tratamento de água foi utilizada a curva gerada pela regressão linear resultante da distribuição dos pontos correspondentes aos pares de turbidez e concentração de sólidos na água coagulada.

A série de dados de turbidez e vazão, entre outros parâmetros, registrados digitalmente durante a operação da ETA compreende o período de 21 de fevereiro de 2013 até 20 de março de 2014. Aplicando a equação empírica obtida para a geração diária de sólidos à série de dados foi possível fazer uma estimativa anual da quantidade de lodo gerado na estação. Cabe a observação de que o resultado restringe-se ao período dos registros informados.

## Resultados e discussão

O ajuste que apresentou melhor correlação é do tipo linear (Figura 2). Essa reta foi utilizada nas estimativas diárias de produção de lodo para todo o período de treze meses a que correspondem os dados fornecidos pela companhia de saneamento. Com os dados de turbidez e vazão média diários aplicados à equação 1, chegou-se a massa de sólidos gerada para cada dia.

Figura – 2 – Curva de correlação entre teor de sólidos e turbidez da água coagulada.



Fonte: Autor

$$M_s = Q \cdot (0,6867 T + 33,648) \cdot 8,64 \times 10^{-5} \quad (1).$$

Sendo:

$M_s$ : Massa de sólidos [t·dia<sup>-1</sup>];

$Q$ : vazão de água bruta na ETA [L·s<sup>-1</sup>];

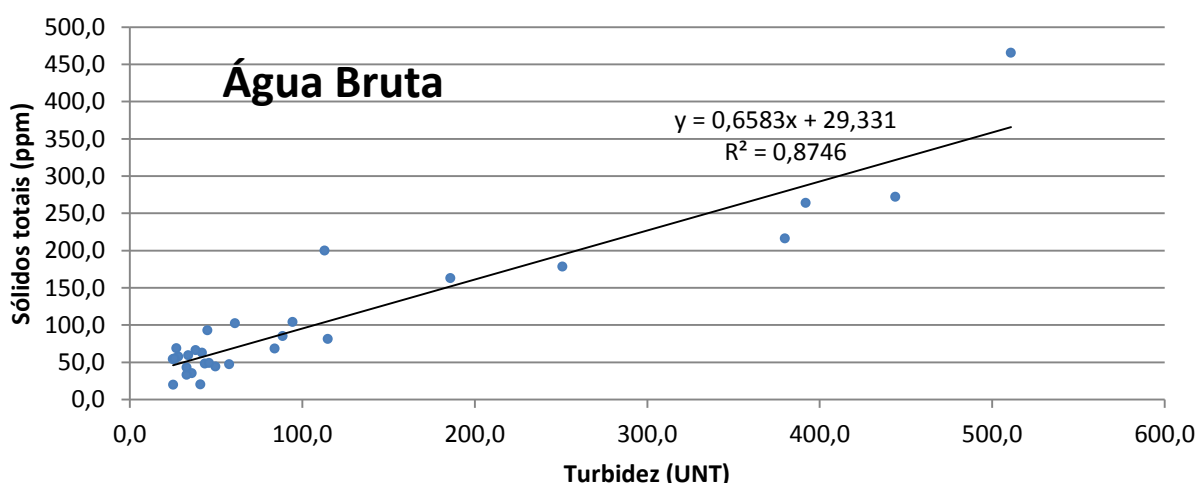
$T$ : turbidez da água bruta [UNT].

A série de dados de vazão e turbidez disponibilizada contém apenas 392 dias de registros válidos. A Equação 1 foi aplicada para cada dia, os resultados foram somados e o resultado dessa soma foi multiplicada pela fração 365/392 para que se obtivesse o resultado correspondente a 1 ano de operação. O resultado obtido foi uma massa de sólidos produzida de 1003,50 t·ano<sup>-1</sup>.

Foram realizadas determinações de sólidos totais também para a água bruta, o que resultou no gráfico da Figura 3. A diferença entre os ajustes da água coagulada e da água bruta afirma o pressuposto de que a adição do coagulante aumenta a massa de sólidos gerada. Aplicando-se o ajuste correspondente aos sólidos na água bruta à Equação 1, o resultado é uma estimativa da massa de sólidos que entra na estação de tratamento. O resultado em termos de massa anual de sólidos é 919,3 t·ano<sup>-1</sup>. Com isso pode-se supor que a massa de sólidos gerada anualmente pela adição do coagulante, mantido o mesmo padrão de dosagem, é de 84,2 t·ano<sup>-1</sup>.

O ajuste resultante da dispersão de dados da água bruta também serve de parâmetro para adequação de modelos empíricos da produção de lodo que separem em seu cálculo as parcelas correspondentes a contribuição de lodo pela dosagem do coagulante e turbidez afluente, substituindo o coeficiente que converte turbidez em concentração de sólidos.

Figura – 3 – Correlação entre concentração de sólidos e turbidez da água bruta.



Fonte: Autor

Lodos de tratamento físico-químico costumam sair dos equipamentos de retirada de água com as concentrações de sólidos mostradas no quadro 1.

Quadro 1: Concentração de sólidos em função do processo de desidratação (%).

Filtro a vácuo	Lagoa de Lodo	Decantador centrífugo	Prensa desaguadora	Filtro prensa
27 - 35	25 - 35	15 - 20	15-25	20 - 25

Fonte: Adaptado de Richter, C.A (2001).

A partir da estimativa da massa de sólidos retirada da água durante o tratamento, foram calculados os volumes do lodo em função da capacidade de retirada de água de cada equipamento dos quais se tinha informação. O volume de

lodo gerado é de importância fundamental quando se fala de transporte e disposição final.

Para o cálculo do volume do lodo é necessário que se determine a densidade desse material. Richter (2007) apresenta a Equação 2 para o cálculo da densidade do lodo.

$$\delta_L = \frac{1}{\frac{C}{\delta_s} + \frac{(1-C)}{\delta_a}} \quad (2)$$

Onde:

$\delta_L$ : Densidade do lodo [ $t \cdot m^{-3}$ ]

C: Concentração de sólidos em valores absolutos

$\delta_s$ : Densidade dos sólidos [ $t \cdot m^{-3}$ ]

$\delta_a$ : Densidade da água [ $t \cdot m^{-3}$ ]

No cálculo da densidade do lodo, por meio da Equação 2, foi considerada uma densidade dos sólidos do lodo de  $1,5 t \cdot m^{-3}$  e densidade da água igual a  $1 t \cdot m^{-3}$ . Com a densidade e massa de lodo calculada para cada concentração de sólidos foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 2.

Em consulta com uma empresa local de disposição de resíduos sólidos, obteve-se a informação de que, por se tratar de resíduo sólido Classe II A (não perigoso e não inerte), o valor cobrado pela empresa para o transporte e disposição final do resíduo é R\$ 250,00 por metro cúbico. Com base no volume de lodo gerado e o valor cobrado para a disposição chegou-se aos resultados também apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Custos com disposição final de lodo em função das concentrações de sólidos nas tortas de lodo geradas por cada equipamento.

Métodos de desaguamento (numerados de forma crescente em função de seu custo de implantação e operação)	5	Lagoas de lodo				
		Filtro a vácuo				
C (%)	4	Filtro prensa		30	35	
		Decantador Centrífugo				
MI (t)	3	Prensa desaguadora				
		2				
Densidade do lodo ( $t \cdot m^{-3}$ )	1					
		15	20	25	30	35
MI (t)		6.689,99	5.017,49	4.013,99	3.345,00	2.867,14
Densidade do lodo ( $t \cdot m^{-3}$ )		1,05	1,07	1,09	1,11	1,13
Volume final do lodo ( $m^3$ )		6.366,89	4.691,04	3.685,53	3.015,19	2.536,37
Disposição final (R\$)		1.591.721,59	1.172.759,28	921.381,90	753.796,98	634.093,46

Fonte: Autor.

Diante desses valores fica evidente que a disposição final em aterro sanitário é uma das destinações menos economicamente viáveis para o lodo de estação de tratamento de água. Além disso, tratar como resíduo um material cheio de potencialidades como o lodo nos dias de hoje é no mínimo irracional. Das alternativas de destinação final, a de mistura no processo de fabricação de tijolos e

telhas mostra-se a mais promissora por aceitar tortas de lodo com concentração de sólidos menores – cerca de 20% quando misturado na jazida – por imobilizar o alumínio proveniente dos coagulantes.

Aplicados na Equação 1 valores médios de turbidez diária e de vazão diária correspondentes ao mesmo período e multiplicando-se o resultado pela duração de um ano (como mostra a Equação 3), os valores se aproximam do valor resultante da soma dos resultados diários usados na estimativa de custos. O valor médio da vazão nos treze meses analisados é  $462,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  e o valor médio de turbidez para o período é 51,3 UNT.

$$M_{s(ano)} = Q_m \cdot (0,6867 T_m + 33,648) \cdot 8,64 \times 10^{-5} \cdot 365 \quad (3)$$

$$M_{s(ano)} = 462,5 \cdot (0,6867 \cdot 51,3 + 33,648) \cdot 8,64 \times 10^{-5} \cdot 365$$

$$M_{s(ano)} = 1004,60 \text{ t}$$

Esse valor de massa de sólidos gerada difere em apenas 0,1 % da massa de sólidos calculada ponto a ponto para toda a série de dados. Isso indica que a estimativa da produção de sólidos dada pela vazão média e pela turbidez média é uma boa estimativa da massa de sólidos gerada. Essa proximidade dos resultados decorre de que o ajuste da correlação é uma equação linear.

### **Conclusões**

Fica evidente que o custo com disposição final do lodo produzido na ETA de Chapecó não é irrelevante, sendo a média dos valores encontrados para os diferentes sistemas de desidratação de R\$ 1.014.750. Diante disso exalta-se a importância do controle operacional da ETA para que sejam diminuídos os custos com produtos químicos, e conseqüentemente da desidratação, transporte e disposição final dos efluentes.

Diante dos custos com transporte e disposição final e da possibilidade de incorporação do lodo de ETA em processos industriais torna relevância o firmamento de parcerias com empresas que possam diminuir os custos totais no processamento desse material e utilizá-lo como matéria prima, dando-se preferência para atividades que produzam artefatos ou materiais que imobilizem o alumínio adicionado no tratamento.

Frente ao fato de que o aumento da turbidez da água que adentra a estação causa um aumento na geração de lodo e dos custos com produtos químicos, fica clara a necessidade de existirem políticas públicas de ocupação do solo restritivas à urbanização e adensamento populacional na área da bacia hidrográfica de captação, porque além de os trabalhos em terra nos loteamentos aumentarem o aporte de sedimentos, a recarga de água subsuperficial é diminuída em função da impermeabilização do solo causada pela urbanização. Uma vez reduzido o abastecimento da reserva subsuperficial, se reduz conseqüentemente a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica em intervalos de tempo com pouca chuva.

## Trabalhos futuros

O presente estudo mostra a importância do desenvolvimento de futuros trabalhos que poderão complementar contemplando os seguintes aspectos:

- Melhoria da equação empírica pela obtenção de um conjunto amostral melhor distribuído;
- Determinação da densidade dos sólidos produzidos pelo uso de PAC com vistas à obtenção de uma estimativa do volume de lodo mais acurada;
- Determinação do coeficiente estequiométrico de contribuição de lodo para o PAC, o que permitiria o uso de modelos que tem como parâmetro a dosagem de coagulante;
- Avaliação técnico-econômica dos custos de implantação das diversas tecnologias de desidratação;
- Acompanhamento da evolução do transporte de sedimentos na bacia através do acompanhamento das alterações na curva de permanência da turbidez (ANEXO B).

## EMPIRICAL MODELLING FOR THE EVALUATION OF THE SLUDGE PRODUCTION AT THE WATER TREATMENT PLANT OF CHAPECÓ-SC

### Abstract

Was built an equation that express the relation between turbidity and solids concentration in the coagulated water based in the solids determination and turbidity of water samples obtained at the entry of raw water on the water treatment plant of Chapecó. This curve allowed to estimate the production of solids that will integrate the sludge. Using the results of this estimative were calculated the generated sludge volumes according to the dehydration technology accompanied by the respective final disposal costs. The results indicate that the final disposal of this kind of sludges in landfills is expensive, varying between R\$ 1,6 mi and 600 thousand by year (values based in data registered during the water treatment plant's operation at the period of February of 2013 until march of 2014). Once the sludge of water treatment plants have several possibilities of incorporation in industrial processes without endanger the final products quality, the disposal in landfills as waste shall to be better evaluated giving preference for the reuse of this material.

**Keywords:** Empirical model, estimative, sludge production.

## Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (Brasil). **Atlas Brasil**: abastecimento urbano de água: panorama nacional. Brasília: ANA: Engecorps/Cobrape, 2010. Disponível em:

<<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%201%20-%20Panorama%20Nacional.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2014.

ANDREOLI, C. V (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. 1ª ed. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. Projeto PROSAB.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21º ed. Washington: APHA, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004, de 30 de maio de 2004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BASSI, Lauro. **Valuation of land use and management impacts on water resources in the Lajeado São José micro-watershed - Chapecó, Santa Catarina State**. Roma: FAO, 2002. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd66/brazilpix.pdf> >. Acesso em: 03 jul. 2014.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 3ª ed. Ver. – Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2009.146p.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de Dezembro de 1989. 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm)>. Acesso em: 07 jul. 2014.

CHAO, Iara R. Soares. **Diagnóstico e otimização dos adensadores por gravidade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001.

CUNHA, Márcia Porto de Oliveira. **Importância da frequência de descarte de lodo na eficiência dos decantadores de estações de tratamento de água em ciclo completo**. 2004. 263f. Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.



DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2º ed. São Carlos: RiMA, vol.1 e 2, 2005.

FERRANTI, Maria Eliana. **Desidratação de lodos de estação de tratamento de água**. 2005. 116f. (Recursos hídricos e saneamento ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FERREIRA FILHO, Sidnei Seckler. **Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade**. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19. 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1997.

PAVANELLI, Gerson. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216p. (Hidráulica e saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RIBEIRO, Frederico L. De Matos. **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito – MG**. 2007. 133f. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas-Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001.

SARON, A.; LEITE V. M. B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001.

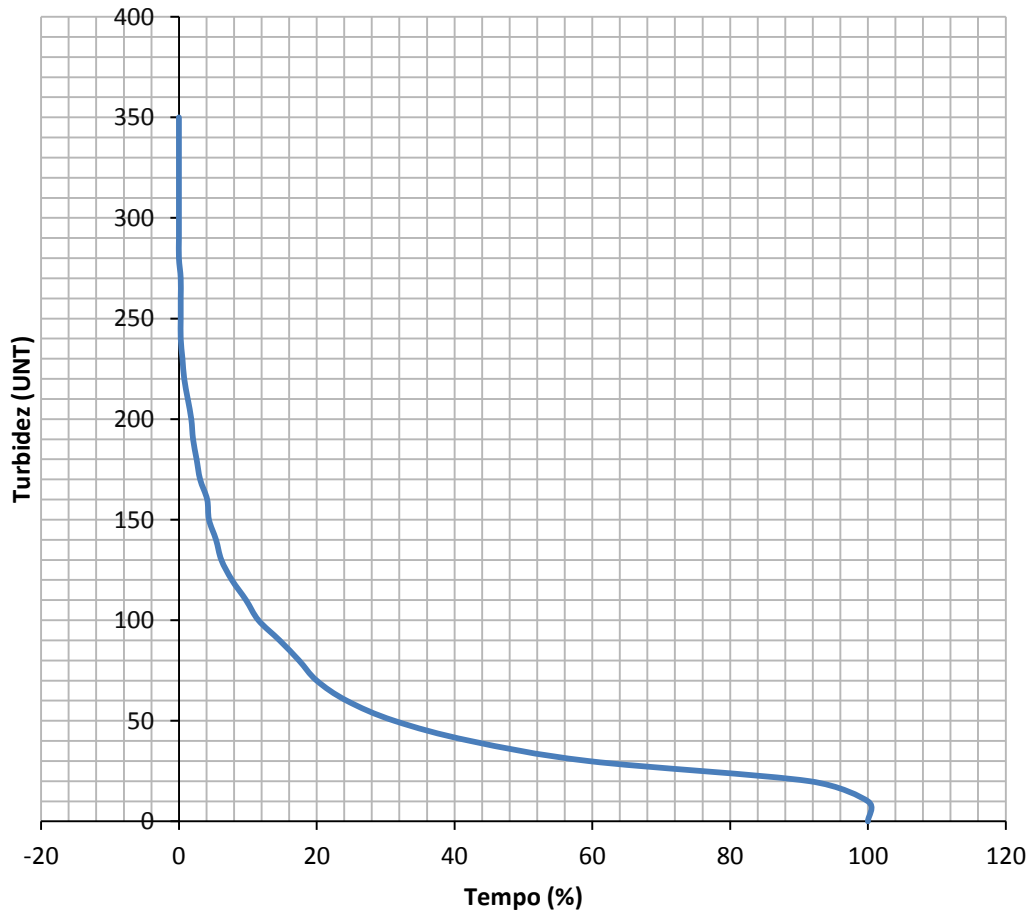
TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água no estado de São Paulo**. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21. 2001, João Pessoa. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/brasil/i-025.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2014.



**ANEXO B:** Curva de permanência de turbidez contruída com base na série de dados fornecida pela companhia de saneamento.

A curva de permanência da turbidez na água na entrada da ETA correlaciona o valore de turbidez com a porcentagem do tempo em que é igualado ou superado.

### Curva de permanência de turbidez



Fonte: Autor.