

CURITIBA 2019 LUAN RUBIO TOZIM

ANÁLISE DE MEDIÇÕES ÓTICAS PARA MEDIR PERFIS DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO EM RESERVATÓRIOS

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de bacharel, Curso de Engenharia Ambiental, setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. TOBIAS BLENINGER

CURITIBA 2019

RESUMO

O monitoramento de grandes reservatórios com dados confiáveis em relação à concentração de sedimentos suspensos pode ser problemática quando utilizados métodos tradicionais, pois esses métodos geralmente são feitos em uma frequência maior do que a desejável, podendo muitas vezes limitar o estudo e manutenção dos recursos hídricos. Nesse contexto, esse trabalho visa estudar o Reservatório do Passaúna, localizado no estado do Paraná e definir correlações através da regressão linear entre os métodos tradicionais para determinação da concentração se sedimentos suspensos totais e métodos mais modernos, tais como o de difração laser. A metodologia utilizando a difração laser mostrou-se nesse trabalho limitada, principalmente quando a análise é feita em locais pontuais e não quando é considerado o reservatório total, devido às questões ainda a serem respondidas. Contudo, baseado em trabalhos já realizados, essa metodologia demonstra ser promissora, podendo reduzir significantemente horas de trabalho em campo e laboratório ao mesmo tempo que garante resultados eficientes.

Palavras-chave: difração laser, concentração de sedimentos suspensos totais, reservatório.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de demonstração dos tipos de transporte de sedimentos11
Figura 2 - Sedimento carregado ao longo de um rio12
Figura 3 - Amostrador DH-5916
Figura 4 - Correlações entre as concentrações de sólidos suspensos em volume
(SSCL) e a concentração mássica (SSCV) em relação ao dia de coleta e com seus
respectivos coeficientes de determinação. (a) 27 de Janeiro de 2014; (b) 29 de
Janeiro de 2014; (c) 20 de Março de 201418
Figura 5 - Componentes do LISST20
Figura 6 - Localização do reservatório do Passaúna23
Figura 7 - Estratificação devido à presença de sedimentos24
Figura 8 - Detalhe das entradas do equipamento LISST28
Figura 9 - Detalhes do equipamento LISST
Figura 10 - (a) Mostra detalhe da câmara de testes e (b) Detalhe da cunha utilizada
para fixar a câmara no LISST29
Figura 11 - Janela de Calibração30
Figura 12 - Janela de calibração quando ocorre um erro
Figura 13 - Opção selecionada para iniciar e parar a amostragem
Figura 14 - Montagem do LISST-100x durante análise de amostras em laboratório.32
Figura 15 - Profundidades a serem selecionadas no Matlab para processar dados do
LISST-100X e 200-X
Figura 16 - Gerada após processamento de dados do LISST no Matlab, no eixo x
são representados os diâmetros e no eixo Y, margem esquerda, a concentração
volumétrica33
Figura 17 - Câmara de testes do LISST-200X35
Figura 18 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em
laboratório, considerando todos os pontos amostrados no reservatório do Passaúna.
Figura 19 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em
laboratório, considerando todos os pontos amostrados no reservatório do Passaúna.

Figura 20 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a barragem (dam)......40 Figura 21 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a barragem (dam)......41 Figura 22 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o ponto de captação (intake).41 Figura 23 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em Figura 24 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando centro do reservatório.42 Figura 25 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em Figura 26 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o Park......43 Figura 27 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o Park......44 Figura 28 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a ponte do Parque A......44 Figura 29 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a Ponte do Parque A.45 Figura 30 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em Figura 31 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a Ponte da Ferraria......46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação granulométrica	11
Tabela 2 – Descrição dos métodos e equipamentos para determinação	da
sedimentometria.	15
Tabela 3 – Pontos de amostragem.	26
Tabela 4 - Dados a serem analisados, com os dados que correspondem	às
anomalias já descartados	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8	
1.1	OBJETIVOS	9	
1.1.1	OBJETIVO GERAL	9	
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9	
2	REVISÃO DA LITERATURA	10	
2.1	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	10	
2.2	FORMAS DE MEDIÇÃO DE SEDIMENTOS		
2.2.1	AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS		
2.2.2	MÉTODO LABORATORIAL	16	
2.2.3	TRABALHORES ANTERIORES COM O LISST	17	
2.2.4	LISST: USO IN SITU	19	
2.2.4.1	Efeitos de tamanho de partícula	21	
2.2.4.2	Efeito de composição da partícula	21	
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22	
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22	
3.2	LISST	26	
3.2.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	26	
3.2.2	LISST – MONTAGEM DO EQUIPAMENTO	27	
3.2.3	LISST – OBTENÇÃO DE DADOS IN SITU	32	
3.2.4	LISST – SOFTWARE E CONFIGURAÇÃO	34	
3.2.5	LISST-200X	34	
3.3	ANÁLISES EM LABORATÓRIO	35	
3.3.1	SÓLIDOS TOTAIS	36	
3.3.2	SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS	37	
4	RESULTADOS E CONCLUSÕES	39	
5	REFERÊNCIAS	48	

1 INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos causa diversos efeitos nas barragens e reservatórios, esse fenômeno é responsável por impactos ecológicos a montante e a jusante de barragens, formação de deltas a montante de reservatórios e que o assoreamento causa a perda de capacidade de armazenamento dos reservatórios. De acordo com a Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) os sedimentos são a 6^a maior causa de prejuízo para a qualidade da água nos Estados Unidos, criando, segundo Pimentel (1995), um prejuízo econômico de mais de 20 bilhões de dólares anualmente, estima-se que esse valor tenha aumentado nos últimos anos.

Para prevenir e controlar os problemas causados devido ao transporte de sedimentos, é necessário quantificar a vazão sólida no escoamento estudado. Nos últimos anos foram desenvolvidas técnicas de medição de concentração de sedimentos em suspensão baseadas em princípios ópticos, sensoriamento remoto, difração laser, entre outros.

O método convencional para determinar a concentração de sedimento suspenso consiste na captura de uma amostra de mistura de água e sedimento, que é então levada ao laboratório e é analisada gravimetricamente. A determinação de dados confiáveis utilizando esse método é difícil, intensa, arriscada, lenta, cara e requer um tempo considerável de prática e treinamento (CZUBA, et al. 2015).

Os instrumentos de difração laser (LISST), focos desse trabalho, provem informações em tempo real, com alta resolução temporal de dados e grande quantidade de amostras (Czuba, et al. 2015). Já existe uma vasta literatura quanto ao uso desses equipamentos e o grande objetivo desse trabalho é complementar a questão e verificar se medidores de difração laser in situ são capazes de substituir os métodos convencionais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a medição de sedimento em suspensão in situ com medições de amostragem e análise laboratorial convencional.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir sedimentos em suspensão in situ com o LISST;
- Amostrar sedimentos para determinação laboratorial da concentração de sedimentos;
- Comparar e discutir os resultados gerados em laboratório com os resultados obtidos in situ.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados e discutidas referencias bibliográficas a respeito da medição de sedimentos em suspensão. Para isto foi feito uma fundamentação teórica do transporte de sedimentos (seção 2.1) e depois descrito em detalhes as diferentes formas de medição (seção 2.2). No final dos capítulos são resumidos diferentes trabalhos comparando medições óticas com tradicionais.

2.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

De acordo com Amaral (2010), sedimentos são partículas sólidas originadas da degradação de rochas ou material biológico que podem ser transportados por algum fluido. Os sedimentos são separados em categorias de acordo com seu tamanho, podendo ser, cascalho, areia, argila ou silt, do maior para o menor respectivamente. Partículas de diferentes tamanhos e geometrias apresentam velocidades e mecanismos de transporte diferentes.

Sedimento por definição é o resultado da deposição de detritos de rochas, ou do acúmulo de detritos orgânicos ou da precipitação química (Guerra e Guerra, 2001). Podemos classificar os sedimentos tanto em origem detrítica, que surgem devido a fragmentação de rochas e orgânicas, cuja origem ocorre pela ação de seres vivos, vegetais e animais. Os sedimentos de origem química surgem pela dissolução, precipitação ou pela ação coloidal.

O sedimento pode ser classificado em suspenso (flutuando na coluna d'água) ou depositado no fundo do corpo da água.

Como o foco desse trabalho será nos sólidos suspensos totais (SST), é importante definir e identificar os aspectos que os caracterizam. Sólidos suspensos totais são partículas maiores que 2 micrômetros encontrados na coluna de água. (Fondrieste Environmental, 2014).

Segundo Carvalho (1994), o transporte de sedimentos é dividido em 3 tipos: transporte de sedimentos em suspensão, partículas em arrasto e saltação, como observado na Figura 1.



Figura 1 - Esquema de demonstração dos tipos de transporte de sedimentos. Fonte: Mielgo (2015).

Essas formas de transporte dependem principalmente de algumas propriedades dos sedimentos, como: forma, tipo, tamanho e densidade do grão.

- Tipo: classificados em não coesivos (areia), em que a resistência à erosão depende do tamanho, formato e densidade da partícula e coesivos (argila) em que a resistência à erosão depende principalmente da ligação entre as partículas.

- Tamanho: Geralmente definidos por uma peneira de diâmetro, que é a abertura pela qual cada partícula passa. São classificados conforme Tabela 1.

FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA	DIÂMETRO (mm)
Matacão	> 200
Calhau	200 - 20
Cascalho	20 - 2
Areia grossa	2-0,2
Areia fina	0,2 - 0,05
Silte	0,05 - 0,002
Argila	< 0,002

Tabela 1 - Classificação granulométrica.

- Forma: Não pode ser definida diretamente, mas sabe-se que influência a velocidade de movimento das partículas, velocidade de queda e transporte no leito.

 Densidade: A densidade do grão em relação à densidade da água influência no comportamento do sedimento. Kiehl (1979) apresentou alguns valores de densidade de partículas para alguns minerais do solo, como por exemplo o quartzo (2,65 < Dp < 2,66 mg/m³ e a caulinita, um dos minerais mais comuns no solo, cuja densidade varia entre 2,60 e 2,68 mg/m³.

O processo de transporte ocorre quando os sedimentos depositados no leito vencem a resistência ao movimento começa o rolamento, ou o arraste ou os dois, sempre mantendo contato com o leito em um movimento intermitente. O movimento nesse caso, não é uniforme nem contínuo (Fondriest Environmental, 2014). O movimento de fundo ocorre quando a força do fluxo da água é forte o suficiente para superar o peso e coesão dos sedimentos. Cerca de 5 a 20% do transporte total de sedimentos é de fundo (Fondriest Environmental, 2014). Com o aumento da velocidade, as partículas começam a saltar mais regularmente, o que caracteriza o movimento de saltação. Quando a velocidade do leito excede a velocidade de queda das partículas, as mesmas podem ser elevadas e então são carregadas pela turbulência, como resultado os sedimentos ficam suspensos, quando esse processo ocorre em excesso, figuras tais como a Figura 2 podem ser observadas.



Figura 2 - Sedimento carregado ao longo de um rio. Fonte: NASA Visible Earth, via USGS.

O processo de sedimentação começa a ocorrer devido à redução de velocidade do fluxo, quando a velocidade do fluxo diminui, consequentemente a velocidade da partícula diminui, até o momento que a mesma começa a sedimentar.

Grãos com tamanhos maiores tendem a se depositar mais rapidamente, ao contrário de grãos mais finos que costumam ficar suspensos por um período maior de tempo até que a velocidade de queda seja maior que a velocidade de transporte, depositando o mesmo.

O transporte de sedimentos não é constante e está sempre em mudança. Em conjunto com as mudanças nos sedimentos devido à geologia, geomorfologia e elementos orgânicos, o transporte de sedimentos pode ser afetado por fatores externos (Fondriest Environmental, 2014). As alterações no transporte de sedimentos podem ser ocasionadas pelo fluxo da água, nível da água, eventos climáticos e influência humana.

O fluxo da água é o evento mais importante no transporte de sedimentos, pois é responsável por levantar, mover e depositar o sedimento ao longo do curso. Sem o fluxo, os sedimentos ficariam flutuando ou em repouso, não percorreriam o corpo da água. (Fondriest Environmental, 2014). O fluxo pode ser calculado através da Equação 1.

Na realidade, a complexidade da relação entre fluxo e transporte de sedimentos é mais complexa, devido ao elevado número de incógnitas (por exemplo geometria do leito, tamanho da partícula, forma, concentração, turbulência, velocidade e direção de flutuação, etc). O transporte de sedimento também é especialmente difícil de se medir pois qualquer instrumento utilizado para tal acaba por alterar o fluxo e taxas que estiverem sendo medidas.

Os dois fatores principais no transporte de sedimentos são a taxa de deposição e a tensão de cisalhamento da camada limite. A taxa de deposição é a taxa na qual o sedimento decai através de um líquido e é controlado pela força de arrasto (mantendo a partícula suspensa) e a forca gravitacional.

A taxa de transporte de sedimento por unidade de largura é uma unidade que depende de outras 7 variáveis, como visto na Equação 2 e que pode ser observada mais detalhadamente na bibliografia (Fondriest Environmental, 2014).

$$Qs = f(\tau, h, D, \rho_p, \rho_f, \mu, g)$$
(2)

Onde:

- T = tensão de cisalhamento
- h = profundidade
- D = diâmetro da partícula
- ρ_p = densidade da partícula

- ρ_f = densidade do fluido
- µ = viscosidade da água
- g = constante gravitacional

As influências climáticas e de nível da água estão intimamente ligadas, visto que a precipitação (ou falta de) é a principal causa de mudança do nível da água. O tamanho da influência no transporte de sedimento depende da quantidade de sedimento disponível. Por exemplo, o derretimento da neve numa área glacial resultará num alto nível de carga de sedimentos graças ao silt glacial (Fondriest Environmental, 2014). Chuvas intensas numa área de solo solto e vegetação mínima criarão escoamentos, carregando as partículas soltas para o corpo da água.

A influência antropogênica, tais como represas e terras modificadas, sejam urbanizadas ou rurais afetarão tanto a carga de sedimentos quanto a taxa de transporte dos mesmos. As represas alteram o fluxo da água devido à canais restritos e contenção. O fluxo restrito pode tornar a jusante escassa em sedimentos, enquanto a carga de sedimentos antes da represa aumenta. Um ambiente escasso em sedimentos possivelmente não proverá habitats adequados para peixes, por exemplo (Fondriest environmental, 2014), enquanto ambientes muito ricos em sedimentos podem ocasionar a eutrofização.

2.2 FORMAS DE MEDIÇÃO DE SEDIMENTOS

Há várias técnicas de medição de sedimentos em suspensão, diferenciandose entre técnicas de amostragem e análise laboratorial, técnicas acústicas e técnicas óticas. A seguir são descritos os métodos de amostragem e análise laboratorial, que posteriormente serão comparados à análise com o uso de instrumentos óticos.

2.2.1 AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS

A amostragem de sedimentos consiste na coleta de diversas porções que representem os materiais a serem analisados. A coleta deve ser feita de uma maneira que toda a dimensão da área e volume possam estar representados, tanto no sentido vertical quanto da camada de sedimentos quanto horizontal.

Diversas metodologias existem para determinar as quantidades de sedimentos transportados pelos cursos da água, podendo as mesmas serem diretas ou indiretas. A tabela 2 exemplifica alguns dos principais métodos e equipamentos utilizados a fim de determinar a sedimentometria.

Medição	Descrição	Equipamento ou metodologia de medida
Direta	Usa equipamentos que medem diretamente no curso d`água a concentração.	Medidor nuclear (portátil ou fixo), ultrassônico ótico, ultrassônico doppler de dispersão, turbidímetro
Direta	Por acumulação do sedimento num medidor (proveta graduada)	Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta)
Indireta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água e sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida	Equipamentos: de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (exemplo: DH-59, D-49, P-61)
Indireta	Uso de imagens de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, utilizado em grandes rios	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das imagens com as concentrações medidas.

Tabela 2 – Descrição dos métodos e equipamentos para determinação da sedimentometria.

Fonte: Modificado de: Carvalho, (1994) apud Carvalho (2000).

Robete (2016), utilizou o amostrador DH-59, podendo ser observado um modelo na Figura 6.



Figura 3 - Amostrador DH-59. Fonte: EnvcoGlobal.

2.2.2 MÉTODO LABORATORIAL

O método de medição de concentração e transporte de sedimentos laboratorial é muito trabalhoso, pois envolve etapas de amostragem e análises intensas de amostras.

O processo de tratamento das amostras para análise é feito através do processo gravimétrico, onde primeiramente foram pesadas cápsulas de porcelana após um período de 1 hora a 550°C (P0). Quando as cápsulas atingiram a temperatura ambiente foram então dispostas as amostras nos recipientes, secadas na estufa por 24 horas, resfriadas e em seguida novamente pesadas. O peso após essa etapa corresponde ao peso para determinação de sólidos totais (P1). O valor portanto de sólidos totais (St), é calculado da diferença entre o peso inicial (P0) e o peso após a secagem das amostras na estufa (P1).

A determinação de sólidos voláteis é feita quando as cápsulas são levadas à mufla após a determinação de sólidos totais. Após um período de 1 hora a 550°C, as cápsulas são novamente resfriadas no dessecador e então pesadas, determinando o peso P2. A obtenção de sólidos voláteis se dá pela diferença entre P1 e P2, determinando portanto os sólidos voláteis (Sv).

2.2.3 TRABALHORES ANTERIORES COM O LISST

O LISST é um equipamento moderno e que já foi utilizado em algumas pesquisas para garantir sua aplicabilidade e eficácia. A seguir são descritos alguns trabalhos realizados, com foco nos pontos em comum com este, a fim de mostrar as limitações do equipamento, bem como seus pontos fortes.

Haun & Lizano, 2018, usaram o LISST no reservatório de Peñas Blancas na Costa Rica para medir a concentração de sedimentos em suspensão e a distribuição do tamanho de partículas simultaneamente. Seu foco era realizar uma correlação entre o LISST e o ADCP (Acoustic Doppler Current Profier). Foram selecionados 4 pontos de amostragem, sendo o 1º escolhido para que a profundidade fosse suficiente para o LISST operar e o 4º ponto para que fosse viável o uso do ADCP. Os pontos intermediários foram escolhidos numa distância equivalente entre os pontos 1 e 2. As amostragens estacionárias com o LISST tiveram duração de 60 segundos e em 2 colunas da água diferentes. Os resultados obtidos por Haun & Lizano mostram que houve um aumento da concentração de sedimentos à medida que a profundidade aumentava, como por exemplo, no ponto 4 à 1m de profundidade foi obtida a concentração de sólidos suspensos de 15,3mg/L enquanto no ponto 4 à 4m de profundidade foi obtida a concentração de 57,3mg/L. Quando relacionados os resultados obtidos com o ADCP e o LISST, é concluído por Haun & Lizano que a combinação de equipamentos mais modernos permite a economia de tempo e custos, pois não foram necessárias análises laboratoriais posteriores.

Santos (2018) realizou estudos no reservatório de Mogi-Guaçu, em São Paulo, que é um dos principais fornecedores de água para a região de Mogi-Guaçu e Mogi-Mirim, além de contar com uma grande usina hidroelétrica, responsável por abastecer as cidades ao redor. As amostragens foram realizadas em dois períodos, Janeiro e Março de 2014 e foram coletadas amostras de 20 pontos diferentes. Assim como nesse trabalho, o método de difração laser foi integrado ao método gravimétrico e as amostras a serem analisadas em laboratório bem como a coleta de dados utilizando o LISST in situ foram feitas em pontos equivalentes.

Os resultados obtidos pelo equipamento de difração laser são expressos na unidade µL/L e portanto é necessário calibrar os mesmos. De acordo com Czuba et al (2015), a conversão da concentração em volume (SSCL) para a concentração gravimétrica (SSCV) é um dos maiores desafios. Em teoria, se o range do tamanho

dos sedimentos está incluso no SSC_I medido, e a densidade do sedimento (g/cm³) é conhecida para todos os tamanhos, a concentração volumétrica pode ser convertida simplesmente ao se multiplicar as medidas volumétricas pelo peso específico do sedimento (Czuba et al. 2015). No entanto, em um reservatório essa metodologia não pode ser adotada. As características do corpo da água são dinâmicas, bem como a densidade. É necessário encontrar a correlação entre SSC_V e SSC_L através da regressão linear, obtendo a densidade efetiva (a qual não é a real densidade do sedimento). A Figura 4 podem ser observados os resultados obtidos por Santos et al. 2018.



Figura 4 - Correlações entre as concentrações de sólidos suspensos em volume (SSC_L) e a concentração mássica (SSC_V) em relação ao dia de coleta e com seus respectivos coeficientes de determinação. (a) 27 de Janeiro de 2014; (b) 29 de Janeiro de 2014; (c) 20 de Março de 2014.

Como foram obtidas correlações boas nos casos estudados ($R^2 = 0,775$; $R^2 = 0,7287$ e $R^2 = 0,8506$) é possível afirmar que a combinação de medições indiretas com medições diretas de sólidos suspensos permite a conversão de dados indiretos em concentrações de sólidos suspensos (Santos et al. 2018). Santos et al. 2018 conclui em seu trabalho que comparado com os métodos tradicionais, a metodologia de difração laser apresenta vantagens significativas, tais como a redução do tempo

de amostragem e a possibilidade de coletar uma enorme quantidade de dados. As concentrações em volume µL/L, geralmente difíceis de se interpretar, podem ser aplicadas em modelos de transporte de sedimentos, podendo se tornar um método convencional.

Czuba, et al, 2015, realizou uma pesquisa cujo propósito era relacionar as concentrações de sedimentos suspensos obtidas pelo uso do LISST com as concentrações adquiridas ao se utilizar amostradores físicos e mais tradicionais. Czuba analisou 16 rios que compões as estações de medição de fluxo nos estados de Illinois e Washington, os rios tinham profundidade variada de 0.6m à 9.1m e velocidades variadas de 0,2 à 2,3m/s, no total foram coletadas 262 amostras em duplicata. As comparações entre as amostras físicas e coletadas pelo LISST foram feitas em alturas e pontos equivalentes do corpo da água amostrado e qualquer amostra que apresentasse algum desvio extraordinário foi descartada. A correlação obtida por Czuba foi de 95% de equivalência, excluindo os tamanhos das partículas que não podem ser percebidas pelo LISST. A correlação realizada foi para obter a densidade efetiva do sedimento (Concentração de sólidos suspensos do laboratório (mg/L)/concentração de sólidos suspensos obtidas pelo LISST (mL/L). Czuba et al. (2015) gerou uma estimativa de concentração de sólidos suspensos melhores ao multiplicar a concentração em volume (SSCL) por uma densidade efetiva de 1,24g/cm³ obtida através da regressão linear, ao invés de usar a densidade média da partícula, cujo valor era 2,67g/cm³. Apesar dos bons resultados, são feitas ressalvas, indicando que o a densidade efetiva obtida serve melhor como um fator de correção do que como a densidade real.

2.2.4 LISST: USO IN SITU

O funcionamento do equipamento ocorre da seguinte maneira: um laser é emitido e penetra na amostra de água com sedimentos que foi introduzida, a luz é dispersa pelas partículas e é percebida por um detector com vários anéis posicionado atrás de lentes receptoras. Cada anel corresponde à um diâmetro, dessa maneira, é feita a amostra de diversos tamanhos de partículas em um curto período de tempo. A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento do LISST. A teoria da difração laser tem como princípio simplificações da equação de Maxwell, o

que inclui a aproximação do espalhamento de pequenos ângulos aplicada a partículas esféricas de composições homogêneas. Para essas partículas o espalhamento de luz em pequenos ângulos é análoga a difração para abertura de diâmetro equivalente (CZUBA et al., 2015).



Figura 5 - Componentes do LISST. Fonte: Sequoia (2017).

Segundo Sequoia (2017), a conversão do espalhamento multiangular em distribuição de tamanho de partícula envolve uma inversão matemática, ou seja, nessa etapa é encontrada uma distribuição de tamanho de partícula que produziria o espalhamento multiangular encontrado. O conteúdo informativo dos dados é recuperado pelo uso de detectores com vários anéis, com cada anel medindo o espalhamento sobre uma sub-gama de ângulos, o que resulta em diversas classes de tamanho, dependendo do ruído nos dados. A inversão é explicada da seguinte maneira: considere "E" o 32 elemento que contém o espalhamento angular de energia percebido pelo 32 anel. O volume de distribuição é percebido de acordo com a Equação 3:

$$E = K^* N_v \tag{3}$$

Onde "K" é o domínio de espalhamento e "Nv" é a distribuição volumétrica portanto esse volume é obtido invertendo a equação acima, pois o LISST é incorporado com um software que obtém o Nv invertido.

Segundo Czuba et al. (2015), as principais limitações do LISST para determinação de concentração de sedimentos suspensos e distribuição espacial de

partículas se devem principalmente a efeitos do formato da partícula, efeitos da composição das mesmas, a abrangência do tamanho das partículas a serem analisadas, falta de informações com relação a densidade do sedimento e erros devido a grandes variações de temperatura e/ou densidade. Como esses fatores afetam as análises podem ser compreendidos a seguir:

2.2.4.1 Efeitos de tamanho de partícula

Conforme Agrawal et al. (2007), grãos de formatos aleatórios podem ser aproximados em formatos equivalentes ao de esferas, isso foi feito considerando as similaridades e diferenças entre as formas. Grãos suavemente arredondados tendem a se comportar como esferas, sedimentos de diferentes regiões apresentaram diferenças insignificantes, comprovando que o LISST é consistente com praticamente todas as partículas (SEQUOIA). Segundo Agrawal et al. (2008), partículas irregulares pequenas espalham mais luz do que esferas equivalentes, partículas irregulares são cerca de 20 a 40% maiores do que as esferas equivalentes, mas essa aproximação não inclui partículas alongadas e achatadas como as de mica e feldspato,

Foi demonstrado por Felix et al. (2013), que apesar de esforços para aproximar o formato das partículas, a irregularidade no formato contribui significantemente para a propagação no erro da determinação de concentração de sedimentos suspensos e distribuição espacial de partículas.

2.2.4.2 Efeito de composição da partícula

A composição e cor da partícula pode afetar o índice refratário da partícula, como mostrado por Andrews et al. (2010) que apenas partículas menores que 20 micrômetros tem seu padrão de espalhamento afetado pela sua composição. Os efeitos de composição são mais relevantes quando a proporção de partículas orgânicas (geralmente menores que 20 micrômetros) é proporcional ao de partículas inorgânicas, pois cada partículas possui um índice de refração.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender ao objetivo de comparar medições in situ com medições convencionais de sedimentos em suspensão foram feitas medições in sito num ambiente lêntico e lótico. Ao mesmo tempo foram coletadas amostras para análise em laboratório. Aqui está descrita a região da área de estudos bem como as amostragens e processo comparativo aplicado.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhido é no rio e reservatório do Passaúna em Curitiba, Paraná (Figura 8) A escolha se deve ao projeto Mudak (https://www.mudakwrm.kit.edu/) que levantou dados ambientais em vários ambientes, permitindo assim uma correlação de estudos de diversas tecnologias.

A bacia hidrográfica do reservatório da barragem do rio Passaúna localiza-se no Primeiro Planalto Paranaense e abrange os municípios de Curitiba, Campo Magro, Almirante Tamandaré, Campo Largo e Araucária, como pode ser observado na Figura 6. A bacia é uma sub-bacia do Rio Iguaçu, com aproximadamente 150km² de superfície. A barragem do rio Passaúna foi construída entre 1985 e 1989, essa construção ocasionou a retenção de material em grande parte do reservatório, dando início ao processo de assoreamento e diminuição de vida útil do reservatório.



Figura 6 - Localização do reservatório do Passaúna. Fonte: Marcon (2018).

O Reservatório do Passaúna é responsável por abastecer cerca de 500mil pessoas em Curitiba e Região Metropolitana, portanto é importante entender possíveis consequências que a presença de sedimentos, em especial os sólidos suspensos totais traria para a população e como podem ser feitos estudos para acompanhar esse processo.

Em questão da transparência da água, níveis altos de sólidos suspensos elevam a temperatura e diminuem os níveis de oxigênio dissolvido. Esse acontecimento se deve ao fato de partículas sólidas absorvem mais radiação solar do que moléculas de água. Esse calor é então transferido por condução para a água ao redor, podendo causar a estratificação do corpo da água (Fondriest Environmental, 2014). Quando a coluna da água é estratificada, a camada superior e inferior não se misturam, como a decomposição e respiração normalmente ocorrem nas camadas inferiores, ela pode se tornar hipóxica, afetando a capacidade de organismos vivos sobreviverem. A Figura 7 representa esse processo.



Figura 7 - Estratificação devido à presença de sedimentos.

A turbidez elevada, causada pela alta concentração de sólidos suspensos, pode inibir a fotossíntese, pois inibe a penetração da luz solar. Sem a realização da fotossíntese, plantas e algas podem morrer, causando diversos efeitos. Quanto menos fotossíntese, menos oxigênio será produzido e portando menores serão os valores de oxigênio dissolvido no ambiente. Outro efeito se dá na cadeia alimentar, pois essas plantas são a fonte alimentar de diversos organismos aquáticos, quanto menos plantas disponíveis para alimentação, as populações no topo da cadeia tendem a diminuir consequentemente.

Os processos descritos acima exemplificam como os sedimentos suspensos podem afetar não apenas os organismos aquáticos, mas como também a qualidade da água potável. Sólidos suspensos orgânicos, tais como matéria orgânica em decomposição ou esgoto normalmente contem nível altos de microrganismos, como protozoários, bactérias e vírus. Tais agentes patógenos contribuem para doenças proliferadas pela água, como cólera e giardíase, por exemplo. Água altamente turva deve passar por um processo mais complicado de purificação, pois as partículas sólidas tendem a "esconder" esses organismos. (Fondriest Environmental, 2014)

De acordo com Sauniti (2004) a região já não possui a maior parte de sua cobertura vegetal original, sendo observadas pastagens e áreas agrícolas onde antes existiam campos naturais e matas ciliares. A falta de cobertura vegetal tem como consequência o maior transporte de sedimentos para os rios (Suguio e Bigarella 1979) e portanto para o Reservatório. Ainda segundo Sauniti (2004) o crescimento do processo erosivo na bacia hidrográfica se deve a novos loteamentos, agricultura agressiva e desmatamento, o que acarretou em mudanças no comportamento hídrico do local e consequentemente no transporte de sedimentos no Reservatório.

Os pontos do reservatório foram escolhidos de forma a termos dados representativos a respeito das influências externas e de processos internos que possam ser relevantes ao longo do eixo longitudinal do reservatório. Foram analisados 6 pontos do reservatório do Passaúna e as coletas de dados e amostras foram realizadas na data de 05 de Fevereiro de 2019:

- Ponte da Ferraria
- Park
- Captação (intake)
- Centro do reservatório
- Ponte do Parque A
- Represa (dam)

A Ponte da Ferraria é um local de fácil acesso e também uma zona de transição entre buffer e reservatório, além de ser um local onde as linhas de correntes estão mais alinhadas e com maior fluxo dentro de um ambiente lêntico.

O Park possui influência do parque e de usos de montante.

A área de captação é importante de ser analisada, pois é o local de captação de água realizada pela Companhia Paranaense de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

O centro do reservatório é um local importante de ser estudado, pois possui características diferentes dos demais locais.

A represa e Ponte do Parque A são locais de fácil acesso, que contribuem para a coleta de dados.

Foram realizadas diversas amostras, mas foram mantidas apenas as que teriam correlação com os pontos amostrado a serem analisados em laboratório, conforme Tabela 3.

PONTO	LISST 100-X	LISST 200-X
Dam (superfície)	\checkmark	\checkmark
Dam (4m)	\checkmark	\checkmark
Dam (10m)	\checkmark	\checkmark
Dam (14m)	\checkmark	\checkmark
Intake (superfície)	\checkmark	\checkmark
Intake (2,5m)	\checkmark	\checkmark
Intake (7m)	\checkmark	\checkmark
Intake (10m)	\checkmark	\checkmark
Centro (superfície)	\checkmark	\checkmark
Centro (3m)	\checkmark	\checkmark
Centro (8m)	\checkmark	\checkmark
Park (superfície)	\checkmark	\checkmark
Park (3m)	\checkmark	\checkmark
Park (7m)	\checkmark	\checkmark
Ponte Parque A (sup)	\checkmark	\checkmark
Ponte Parque A (1m)	\checkmark	\checkmark
Ponte Parque A (1,5m)	✓	\checkmark
Ponte Ferraria (sup)	\checkmark	\checkmark
Ponte Ferraria (1m)	✓	\checkmark
Ponte Ferraria (2m)	√	√

Tabela 3 – Pontos de amostragem.

3.2 LISST

3.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O LISST é o equipamento que utiliza a técnica de difração laser para obter a distribuição de tamanho das partículas e concentração de sólidos em um ambiente.

Esse método determina a distribuição do tamanho das partículas em uma amostra, contrapondo-se aos outros métodos, como por exemplo peneiramento, que determinam um tamanho de partícula por vez.

A difração laser não depende da composição da partícula pois o espalhamento é observado por diversos ângulos pequenos, nesses ângulos a dispersão da luz é determinada quase inteiramente pela luz difratada pela partícula. A luz transmitida pela partícula quase não contribui para a medição do espalhamento. Como apenas a luz que passa pela partícula experimenta a composição da mesma, isso é, seu fator de refração, o método de difração laser se torna independente da composição da partícula.

Na água os índices de refração das partículas ainda são pouco conhecidos pois as partículas são normalmente uma mistura de grãos minerais e partículas (mortas e vivas) biológicas. Portanto, exceto para efeitos de forma, a difração laser é um excelente método para estimar a distribuição do tamanho das partículas.

3.2.2 LISST – MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

Para a coleta de dados utilizando o equipamento, o LISST-100X segue um padrão de funcionamento. As configurações devem ser estabelecidas antes das análises, a fim de garantir um resultado consistente que será analisado posteriormente.

Primeiramente é realizada a montagem do equipamento, de acordo com o Manual do Usuário do LISST-100X (Sequoia), é necessário conectar o dispositivo à uma fonte de energia.

Antes de conectar o LISST-100X ao computador, deve-se abrir o Software para que seja estabelecida a conexão, o cabo utilizado para realizar a conexão possui a entrada com 5 pinos em uma extremidade e a entrada com 9 pinos na outra. Os tipos de entrada do equipamento podem ser observados na Figura 8.



Figura 8 - Detalhe das entradas do equipamento LISST. Fonte: Sequoia (2017).

É preciso verificar se as duas janelas ópticas estão completamente limpas. A janela receptora (*receive window*) está na extremidade do equipamento e a janela de transmissão (*transmit window*) está ligada à trave. Para garantir que não existam interferências de partículas externas e de impressões digitais, deve-se limpar as janelas com água destilada e um pano devidamente higienizado. A Figura 9 demonstra detalhes do equipamento.



Figura 9 - Detalhes do equipamento LISST. Fonte: Sequoia (2017).

O próximo procedimento é a instalação da câmara de testes, que conta com um agitador de partícula para garantir a suspensão constante dos sedimentos, a mesma deve ser alocada entre a janela de transmissão e a janela receptora. Uma vez que a câmara está encaixada, é preciso deixa-la estática com a ajuda de cunhas, vistas em detalhe na Figura 10. Nesse estudo a câmara de testes estava inapta, portanto, cada amostra permaneceu por um período de tempo de 2 minutos durante a fase de coleta de dados.



Figura 10 - (a) Mostra detalhe da câmara de testes e (b) Detalhe da cunha utilizada para fixar a câmara no LISST.

A câmara deve ser, portanto, preenchida com água destilada para garantir a pureza dos testes de calibração. A calibração é um processo crítico para garantir a boa performance do equipamento, assegurando que o funcionamento está em perfeito estado e que existe um alinhamento óptico. A Figura 11 demonstra a janela que é aberta para realizar a calibração, a mesma pode ser aberta clicando no símbolo correspondente ou selecionando *Collect Background Scatter Data* na barra de ferramentas. No caso do uso do equipamento in situ, não é necessária instalar a câmera com o agitador.



Figura 11 - Janela de Calibração. Fonte: Sequoia (2017).

Para começar a calibrar, é pressionada a opção *Begin Collect,* a partir desse instante são exibidas 20 amostras enquanto forem coletadas. Após a coleta de 20 amostras, a média é exibida, caso o valor se adeque ao desejável, basta salvar e nomear o arquivo no local pretendido. Se o cenário ocorrido não for de sucesso, devido à problemas com o equipamento, sujeira nas janelas ou na água utilizada, presença de bolhas, partículas, uma situação como na Figura 12 ocorrerá, devendo, portanto, realizar a limpeza dos materiais e a repetição do procedimento.



Figura 12 - Janela de calibração quando ocorre um erro. Fonte: Sequoia (2017).

Uma vez superada a etapa de calibração, é selecionado as condições de iniciação e de encerramento. No caso foi selecionada a opção "*External Mechanical Switch*", como visto na Figura 13, ou seja, ambas as condições dependem da mudança manual de uma alavanca, indicada na Figura 8. O ponto "0" indica que ainda não houve a emissão do faixe de laser, portanto não existe a coleta de dados nesse ponto. A partir do momento em que a alavanca é alternada para "1", começa a obtenção de dados.

SST Instrument Operation	6
nstrument Status Operating Mode Start Condition Stop Condition	
 Depth Start when depth exceeds 19 meters. Time Start Date: 12 / 31 / 2000 (mm/dd/yyyy) Start Time: 23 : 59 : 59 (hh:mm:ss) External Mechanical Switch External Digital Input 	
C Delay	
0 Hours 1 Minutes	
	-
in the second se	-
SEQUOIA	1 de
SENCOTA	
OK Cannal Annh	
CalicalMphy	

Figura 13 - Opção selecionada para iniciar e parar a amostragem. Fonte: Sequoia (2017).

Foram coletadas 9 amostras, cada uma permaneceu por cerca de 2 minutos sobre a incidência do feixe de laser do LISST-100X. Para iniciar a amostragem é preciso abrir o terminal, selecionando "*terminal window*" da aba "*communication*" ou a imagem correspondente.

Selecionando a opção "start", começa a coleta de dados de cada amostra. Quando terminada a coleta de dados de uma amostra, a água é descartada em um balde plástico e a câmara de testes é limpa cuidadosamente com água destilada. As amostras são feitas em sequência, sem necessidade de desligar ou parar o equipamento. Uma vez que todos os dados foram coletados, basta selecionar a opção "*stop*".



A Figura 14 ilustra a montagem do LISST-100X.

Figura 14 - Montagem do LISST-100x durante análise de amostras em laboratório. Fonte: Tozim (2018).

3.2.3 LISST – OBTENÇÃO DE DADOS IN SITU

Os procedimentos de calibração devem ser realizados quando se deseja trabalhar com o equipamento em campo também, com a diferença que após essa etapa vencida, não é necessária a utilização da câmara de testes.

A amostragem com o LISST foi feita com medições de 2 minutos em média.

O processamento de dados é realizado em Matlab, onde é necessário que todos os dados a serem analisados, bem com os programas, estejam em uma mesma pasta. Uma vez iniciado o programa, é preciso determinar se serão analisados dados do LISST 100 ou do LISST 200, quando for escolhido o equipamento, deve-se então selecionar as profundidas amostradas pelo equipamento, conforme Figura 15.



Figura 15 - Profundidades a serem selecionadas no Matlab para processar dados do LISST-100X e 200-X. Fonte: Wosniacki (2018).

Por exemplo, na Figura 15, existem 2 profundidades e devemos clicar 4 vezes para defini-las. A primeira profundidade, de cerca de 0,2m (x = 100, 400) e a segunda profundidade tem cerca de 0,75m (x = 470, 550). Após esses passos, o programa continua rodando e gera gráficos semelhantes a Figura 16, um para cada profundidade, bem como uma planilha no Excel que fornece a concentração em μ L/L.



Figura 16 - Gerada após processamento de dados do LISST no Matlab, no eixo x são representados os diâmetros e no eixo Y, margem esquerda, a concentração volumétrica.

Para obtermos a concentração volumétrica em cada profundidade, devemos somar todas as colunas geradas, sendo 32 colunas para o LISST-100X e 36 colunas para o LISST-200X e em seguida realizar a conversão de µL/L para mL/L.

3.2.4 LISST – SOFTWARE E CONFIGURAÇÃO

O software utilizado é o LISST-SOP, fornecido pela fabricante. É necessário primeiramente seguir um padrão de configuração do software, de acordo com o manual do equipamento. É possível escolher entre 3 modos de operação, sendo eles: tempo real, "burst "e "fixed rate. A operação em tempo real envia o dado bruto para o Software para ser convertido e exibido diretamente na tela, nenhum dado fica salvo no equipamento quando esse modo é utilizado. Os modos Burst e Fixed Sample Rate são usados para salvar dados em um arquivo de dados brutos a bordo do equipamento. O software verifica automaticamente os valores inseridos para garantir que não existam conflitos. Por exemplo, quando uma amostra é feita para ser a média de valor, o intervalo mínimo da amostra é calculado e se este valor for menor do que o mínimo permitido, o valor será alterado para o mínimo e o texto ficará vermelho, indicando o problema.

É necessário determinar também as condições de início e de fim, podendo selecionar entre as opções de profundidade, tempo, interruptor externo, entrada digital externa e intervalo de tempo para condição inicial e para condição final excluise a opção de intervalo de tempo e pode-se escolher ainda entre número fixo de amostras e máximo/mínimo de bateria. Algumas outras configurações devem ser feitas ainda de acordo com o manual do equipamento antes da amostragem começar. Após a amostragem existe um procedimento correto, descrito abaixo, de como deve ser feito o *download* dos dados e processamento dos mesmos.

Para descarregar os dados armazenados seleciona-se o botão "Query" e então o botão "Offload", abrindo uma lista de arquivos. Após selecionar os arquivos que serão baixados, deve-se escolher o local onde os mesmos ficarão salvos. Os arquivos são salvos sempre da forma "Ldddhhmm.dat" onde "ddd" indica o dia do ano, "hh" a hora e "mm" o minuto em que a amostra foi captada.

3.2.5 LISST-200X

O LISST-200X é um dispositivo com o princípio de funcionamento igual ao do LISST-100X, mas relativamente menor e com menores baterias, podendo ir à uma profundidade de 600 metros.

Os softwares utilizados para os dois equipamentos são muito similares, bem como toda a etapa de coleta de dados. Uma das diferenças mais significativas entre os dois aparelhos é a câmara de testes, que nesse dispositivo é de acrílico e não necessita de cunha para encaixe, como visto na Figura 17 a seguir.



Figura 17 - Câmara de testes do LISST-200X.

A principal diferença entre os 2 equipamentos está no range de medição de partículas. Enquanto o LISST-200X consegue medir até 36 tamanhos diferentes de partículas (de 1,0 à 500 micrômetros), o LISST-100X trabalha em 2 faixas, sendo o tipo B, com 32 faixas, de 1,25 à 250 micrômetros e o tipo C, também com 32 faixas, de 2,5 à 500 micrômetros.

Outras diferenças entre os equipamentos seria um instrumento ótico do LISST-200X que permite analisar o dobro do da concentração máxima existente no LISST-100X, a presença de filtro de luz ambiente no LISST-200X, que não existe no seu modelo anterior. As demais diferenças e especificações podem ser encontradas no site do fabricante, Sequoia.

3.3 ANÁLISES EM LABORATÓRIO

A análise das amostras foi feita baseada em uma adaptação de STANDARD METHODS, method 2540 B, E e F (APHA, 1998). O método utilizado é baseado no princípio gravimétrico, ou seja, apoia-se na diferença de peso entre o seco e o úmido, em relação ao volume de amostra utilizado no ensaio. São feitos dois procedimentos analíticos, um para determinar os sólidos totais, e outro para determinar os sólidos suspensos. São realizadas triplicatas para todas as amostras. A definição de sólidos totais (ST) são os resíduos que restam em uma amostra após a evaporação de toda a água e posterior secagem.

Sólidos em suspensão (SS) são os sólidos que ficam retidos após uma filtragem, possuindo a unidade de concentração de massa/volume.

3.3.1 SÓLIDOS TOTAIS

Para determinar sólidos totais, são utilizadas cápsulas, mufla, dessecador, proveta, estufa, pinça e balança de precisão. O método consiste no preparo da cápsula, que deve ser feito na mufla a 550°C por 1 hora, seguindo então para estufa a 105°C por 45min e finalmente para o dessecador por 45min. Ao fim dessa etapa é necessário pesar a cápsula e anotar o resultado em gramas, esse peso será o peso de referência P0.

Para determinar os sólidos totais (ST) é necessário transferir para a cápsula, uma alíquota homogênea de volume adequado de amostra, no caso 100 ml, medido em proveta, e manter sob evaporação em banho-maria até atingir secura completa, o manuseio da cápsula deve ser feito sempre com o auxílio da pinça e não com as mãos. Ao fim do banho-maria a cápsula deve ficar na estufa a 105°C por 45 minutos e em seguida no dessecador pelo mesmo período de tempo. Após o dessecador, a cápsula deve ser pesada e o resultado em gramas corresponde a P1. Os sólidos totais podem ser calculados através da fórmula:

$$ST\left(\frac{mg}{L}\right) = (P1 - P0) * \frac{1.000.000}{Vamostra(mL)}$$
(4)

Para determinar os sólidos totais fixos (STF) em mg/L, deve-se transferir a cápsula, após a pesagem de P1, para a mufla a 550°C por 1 hora, seguindo para a estufa a 105°C por 30 minutos e então para o dessecador por 45 minutos, então é pesada novamente a cápsula e é obtido o valor para P2 em gramas. Os sólidos totais fixos podem ser calculados através da fórmula:

$$STF\left(\frac{mg}{L}\right) = (P2 - P0) * \frac{1.000.000}{Vamostra(mL)}$$
(5)

Os sólidos totais voláteis (STV) são determinados através da diferença entre os sólidos totais e os sólidos totais fixos:

$$STV = ST - STF \tag{6}$$

3.3.2 SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

Para determinar sólidos suspensos totais (SST), são utilizados cadinhos, membranas de fibra de vidro, mufla, dessecador, proveta, estufa, pinça e balança de precisão

O preparo do cadinho deve começar na mufla a 550°C por 1h e então por 45min na estufa a 105°C e no dessecador por 45min. Quando retirado do dessecador, o cadinho deve ser pesado para se ter o resultado em gramas de P0.

A determinação de sólidos suspensos totais ocorre da seguinte maneira: coloca-se a membrana de fibra de vidro no cadinho e então transfere-se o mesmo para um porta filtro adaptado ao kit kitassato para filtração. Para a filtração foi utilizado o volume de 1 litro com auxílio de uma proveta graduada. O cadinho deve ser retirado e levado para a estufa a 105°C por 1 hora, em seguida deve ser levado para a o dessecador por 30min, finalmente, pesa-se o cadinho e é anotado o resultado P1 em gramas. Os sólidos suspensos totais podem ser calculados através da fórmula:

$$SST\left(\frac{mg}{L}\right) = (P1 - P0) * \frac{1.000.000}{Vamostra(mL)}$$
(7)

Para a determinação de sólidos suspensos fixos (SSF), é necessário transferir o cadinho para a mufla a 550°C por 1 hora, em seguida o cadinho segue para a estufa a 105°C por 30min e então para o dessecador por 45min, o cadinho é então pesado e o resultado obtido em gramas, P2, deve ser anotado. Os sólidos suspensos fixos são determinados pela fórmula:

$$SSF\left(\frac{mg}{L}\right) = (P2 - P0) * \frac{1.000.000}{Vamostra(mL)}$$
(8)

Os sólidos suspensos voláteis (SSV) são a diferença entre os sólidos suspensos totais e os sólidos suspensos fixos, ou seja:

$$SSV\left(\frac{mg}{L}\right) = SST - SSF \tag{9}$$

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir da análise das amostras laboratoriais bem como os dados do LISST 100-X e 200-x podem ser observados na Tabela 4. Foram mantidos somente os dados que serão analisados, contendo os valores da concentração para sólidos suspensos totais.

	05/02/19	05/02/19	05/02/19
PONTOS			
	Sólidos	LISST 100	LISST 200
	suspensos		
	totais		
	SST	SST	SST
	mg/L	mL/L	mL/L
Dam (4 m)		0,089	0,006995
Dam (10 m)	2,1	0,0165	0,013388
Dam (14 m)	10,8	0,0023	0,005635
Intake (surface)	3,9	0,010608	0,019005
Intake (2,5 m)	3,4	0,09298	0,010834
Intake (7 m)	8,0	0,008222	0,010651
Intake (10 m)	3,1	0,006144	0,013315
Reservoir center (surface)	3,2	0,056729	0,025256
Reservoir center (3m)	7,3	0,022652	0,012472
Reservoir center (8m)		0,016605	0,037977
Park (surface)	4,6	0,032789	0,030659
Park (3 m)	4,6	0,023907	0,023368
Park (7 m)	6,7	0,046637	0,048766
Ponte Parque A (surface)	9,5	0,01906	0,021415
Ponte Parque A (1m)		0,199775	0,023368
Ponte Parque A (1.5m)	15,6	0,0841616	0,086506
Ferraria Bridge (surface)	51,0	0,078341	0,12045
Ferraria Bridge (1 m)		0,093178	0,071528
Ferraria Bridge (2 m)	56,7	0,12599	
Buffer meio(surface)	52 <i>,</i> 0	0,059049	

Tabela 4 - Dados a serem analisados, com os dados que correspondem às anomalias já descartados.

A partir da Tabela 4 foram geradas correlações através de regressão linear. Os gráficos que foram gerados são tanto para o reservatório como um todo, quanto para cada local analisado e podem ser observados a seguir.



Figura 18 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando todos os pontos amostrados no reservatório do Passaúna.



Figura 19 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando todos os pontos amostrados no reservatório do Passaúna.



Figura 20 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a barragem (dam).



Figura 21 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a barragem (dam).



Figura 22 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o ponto de captação (intake).



Figura 23 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o ponto de captação (intake).



Figura 24 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando centro do reservatório.



Figura 25 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando centro do reservatório.



Figura 26 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o Park.



Figura 27 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas o Park.



Figura 28 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a ponte do Parque A.



Figura 29 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a Ponte do Parque A.



Figura 30 - Regressão linear feita entre o LISST100-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a Ponte da Ferraria.



Figura 31 - Regressão linear feita entre o LISST200-X e os dados obtidos em laboratório, considerando apenas a Ponte da Ferraria.

Os poucos pontos em comum entre os dados obtidos em laboratório através do método gravimétrico e do uso de equipamentos de difração laser afetaram consideravelmente a análise de resultados. Como pode-se observar, muitos gráficos tiveram uma correlação teoricamente perfeita R² = 1, fator ocorrido em consequência da análise de somente 2 pontos no local. Esse fenômeno pode ser observado nas analises da Ponte Ferraria, Ponte do Parque A, centro do reservatório e na barragem para o LISST-200X.

O melhor resultado considerando apenas um local de amostragem pode ser observado no Park, que obteve uma correlação $R^2 = 0,8497$ para o LISST-100X e R^2 = 0,9222 para o LISST-200X. O ponto de captação da água apresentou valores de correlação $R^2 = 0,11786$ e $R^2 = 0,13966$ para o LISST-100X e 200-X respectivamente.

Considerando o reservatório como um todo, o coeficiente R² para o LISST 100-X correspondeu à 0,40337 e para o LISST-200X à 0,72073.

Em geral nota-se que nos casos em que há mais pontos de amostra correspondentes entre o método gravimétrico e de difração laser, o R² apresenta um valor confiável.

Conforme Czuba (2015), dados que representam anomalias foram descartados a fim de minimizar a interferência na análise e correlação. As anomalias podem se dar devido diversos fatores, tais como erro na calibração do equipamento, condições anormais no ambiente, falta de treinamento da equipe e outros fatores.

Dados da metodologia gravimétrica também fora descartados quando apresentaram um desvio mais elevado do que o esperado.

O LISST-200X, quando comparado com os resultados obtidos pelo LISS-100X apresentou uma melhor performance, podendo ser devido à sua tecnologia mais moderna ou por algum outro fator a ser investigado.

O principal próximo passo numa pesquisa como essa, é a determinação do coeficiente de densidade do sedimento, para conversão do que é medido pelo LISST (mL/L) em unidades mássica usuais (mg/L). Como feito por Czuba, (2015), essa relação também foi feita nesse trabalho para a média total do reservatório. Com a concentração de sólidos suspensos totais médias de 15,15mg/L e a média da concentração volumétrica sendo 57,08µL a densidade efetiva correspondente seria 0,265g/mL, um valor realmente muito baixo e que deve ser investigado.

No entanto, pesquisas realizadas anteriormente que fazem uso da metodologia descrita nesse trabalho demonstram que o método é promissor, visto que essa tecnologia oferece ferramentas mais eficientes, tempo reduzido de medição e processamento, e possibilidade de coleta de mais dados, conforme recomendado por Santos et al (2018). Logo, em trabalhos futuros, é recomendável uma análise maior de amostras, a fim de garantir que a correlação permita o uso do LISST para determinação da concentração de sedimentos em suspensão.

5 REFERÊNCIAS

AMARAL, J. F.. Análise Do Transporte De Sedimentos Na Bacia Do Rio Claro. Monografia (Graduação). Instituto Tecnológico De Aeronáutica, São José Dos Campos, 2010.

AGRAWAL Y. C. Et Al., Light Scattering By Random Shaped Particles And Consequences On Measuring Suspended Sediments By Laser Diffraction

BASSO, L. A, At Al. A Influência Da Precipitação Na Concentração E Carga De Sólidos Em Cursos D´Água Urbanos: O Caso Do Arroi Dilúvio, Porto Alegre –Rs.

BOLETIM PARANAENSE DE GEOCIÊNCIAS, N. 54, P. 65-82, 2004. Editora Ufpr.

Bruno Bernardo dos Santos, Renato Billia de Miranda, Marcus Vinícius Estigoni, João Marcos Vilela & Frederico Fábio Mauada (2019) Evaluation of the laser diffraction method for the measurement of suspended sediment concentration in Mogi-Guaçu reservoir (São Paulo, Brazil), International Journal of River Basin Managemente, 17:1, 89-99, DOI: 10.1080/15715124.2018.1446965

FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. "SEDIMENT TRANSPORT AND DEPOSITION." FUNDAMENTALS OF ENVIRONMENTAL MEASUREMENTS. 5 DEC. 2014. WEB. < HTTPS://WWW.FONDRIEST.COM/ENVIRONMENTAL-MEASUREMENTS/PARAMETERS/HYDROLOGY/SEDIMENT-TRANSPORT-DEPOSITION/ >.

GAMARO PE. Medidores Acústicos Doppler De Vazão. Foz Do Iguaçu, Brasil: Itaipu Binacional Press. 2012.

GUEERRO M. Et Al. Acoustic Measuring Of Stream Flow And Sediment Transport To Assist River Morphodynamics Modelling

GODDIJN L.M., White M. Using A Digital Camera For Water Quality Measurements In Galway Bay. Estuar. Costal Shelf Sci. 2006;66:429–436. Doi: 10.1016/J.Ecss.2005.10.002.

HAUN, S & LIZANO, L. Sensitivity analysis of sediment flux derived by laser diffraction and acoustic backscatter within a reservoir. (2018)

KURIYAMA Y., Field Investigation Of Size Distribution Of Suspended Sediment Using Lisst-100

LEEUW T. The Hydrocolor App: Above Water Measurements Of Remote Sensing Reflectance And Turbidity Using A Smartphone Camera

Manual Do Usuário – Lisst 100x

MERAL, R. Laboratory Evaluation Of Acoustic Backscatter And Lisst Methods For Measurements Of Suspended Sediments.

OLIVEIRA, C. C. Análise Comparativa De Medições De Vazão Utilizando Equipamentos Doppler, 2015.

PEREIRA, R. B. Variabilidade Temporal Das Características Hidráulicas De Uma Seção Transversal E A Curva-Chave. XII Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos.

PIMENTEL, D. et al. Environmental and Economics Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits, 1995.

ROBETE, M. Determino Do Transporte Total De Sedimentos No Rio Taquari, Coxim-Ms. Xii Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos.

Sauniti. R. M. Et Al., Estudo Do Assoreamento Do Reservatório Da Barragem Do Rio Passaúna - Curitiba – Pr (2004).

URICK RJ. 1975. Principles Of Underwater Sounds. 2nd Edition. P. 384. Mc Graw Hill, Nova York