

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO EM GEOGRAFIA**

Rafael Dezordi

**ANÁLISE ESPACIAL DA TURBIDEZ NO COMPARTIMENTO
AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO, RESERVATÓRIO DE
ITAIPU, PR**

Santa Maria, RS

2020

Rafael Dezordi

**ANÁLISE ESPACIAL DA TURBIDEZ NO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO
FRANCISCO VERDADEIRO, RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Territorial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS

2020

Rafael Dezordi

ANÁLISE ESPACIAL DA TURBIDEZ NO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO, RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Territorial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Aprovado em 17 de janeiro de 2020:

Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Alessandro Carvalho Miola, Dr. (UFSM)

Diego de Almeida Prado, Dr. (PMS)

Santa Maria, RS

2020

Dezordi, Rafael

ANÁLISE ESPACIAL DA TURBIDEZ NO COMPARTIMENTO
AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO, RESERVATÓRIO DE
ITAIPU, PR / Rafael Dezordi.- 2020.

73 p.; 30 cm

Orientador: Waterloo Pereira Filho

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2020

1. Água 2. Turbidez 3. Sensoriamento Remoto I.
Pereira Filho, Waterloo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

AGRADECIMENTOS

A ITAIPU binacional pelo apoio financeiro oferecido por meio de bolsa e custeio das missões de campo e apoio irrestrito no desenvolvimento do trabalho.

Ao apoio fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo 310758/2016-5.

A Universidade Federal de Santa Maria, pela possibilidade de cursar um Ensino de Pós-Graduação gratuito e de qualidade.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias (Labgeotec) da Universidade Federal de Santa Maria pela colaboração e todos os que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

ANÁLISE ESPACIAL DA TURBIDEZ NO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO RESERVATORIO DE ITAIPU, PR

AUTOR: RAFAEL DEZORDI

ORIENTADOR: WATERLOO PEREIRA FILHO

A turbidez é uma variável de fundamental importância para uma gestão otimizada da água em reservatórios, podendo afetar diretamente o processo fotossintético e a cadeia trófica do ecossistema. Tendo em vista o impacto causado pela turbidez em reservatórios o presente trabalho analisou a turbidez de forma abrangente sobre a área contemplada pelo compartimento aquático do Rio São Francisco Verdadeiro (SFV), o qual é afluente do reservatório da hidrelétrica de ITAIPU. Neste sentido, identificou-se um modelo com base na correlação e regressão dos dados de sensoriamento remoto com o comportamento da turbidez ao longo do do SFV. Para tanto, foram coletados dados em 3 níveis: Primeiro nível, oriundos de campo obtida por meio de amostragem in situ e analisada em laboratório (nefelometria). Segundo nível, radiometria de campo realizada com o uso do espectroradiômetro de campo (ASD modelo FieldSpec) que opera no intervalo espectral de 400 a 900 nm. Terceiro nível, dados provenientes do sensor Operational Land Imager (OLI) da plataforma orbital Landsat 8 obtidos a partir da plataforma online do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS) em data concomitante ao levantamento realizado em campo nos dias de 11/08/2016, 27/08/2016 e 11/06/2017 em 13 pontos amostrais distribuídos equidistantemente. Dados de pH, condutividade elétrica e precipitação pluviométrica foram utilizados complementarmente na análise da turbidez. O modelo matemático gerado foi submetido a testes estatísticos e mostrou que a turbidez está significativamente relacionada com dados de sensoriamento remoto. De modo geral a turbidez apresentou-se mais elevadas no setores de alto e baixo curso do SFV, sempre relacionada com as condições pluviométricas em períodos antecedentes as amostragens de campo. O presente trabalho buscou aprofundar o entendimento da dinâmica apresentada pela turbidez no reservatório com o objetivo de otimizar a gestão do reservatório.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; correlação; modelo matemático.

ABSTRACT

SPATIAL ANALYSIS OF TURBIDITY IN THE AQUATIC COMPARTMENT SÃO FRANCISCO VERDADEIRO, RESERVOIR OF ITAIPU, PR

AUTHOR: Rafael Dezordi

ADVISOR: Waterloo Pereira Filho

Turbidity is a variable of fundamental importance for optimized water management of reservoirs, which can directly affect the photosynthetic process and the trophic chain of the ecosystem. In view of the impact caused by turbidity in reservoirs, the present work analyzed turbidity comprehensively over the area covered by the São Francisco Verdadeiro River (SFV) aquatic compartment, which is a tributary of the ITAIPU hydroelectric reservoir. In this sense, a model was identified based on the correlation and regression of the remote sensing data with the turbidity behavior over the SFV. For this, data were collected at 3 levels: First level, from the field obtained through in situ sampling and analyzed in the laboratory (nephelometry). Second level, field radiometry performed using the field spectroradiometer (ASD model FieldSpec) that operates in the spectral range from 400 to 900 nm. Third level, data from the Operational Land Imager (OLI) sensor of the Landsat 8 orbital platform obtained from the online platform of the United States of America Geological Survey (USGS) on a date concurrent with the survey carried out in the field on 08/11/2016, 08/27/2016 and 06/11/2017 in 13 sample points distributed equidistantly. PH, electrical conductivity and rainfall data were used in addition to the turbidity analysis. The mathematical model generated was subjected to statistical tests and showed that turbidity is significantly related to remote sensing data. In general, turbidity was higher in the high and low course sectors of SFV, always related to rainfall conditions in periods prior to field sampling. The present work sought to deepen the understanding of the dynamics presented by the turbidity in the reservoir in order to optimize the management of the reservoir.

Keywords: remote sensing; correlation; mathematical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Ecossistema lântico (lago ITAIPU).....	19
Figura 2.2	- Turbidímetro a vela de Jackson.....	22
Figura 2.3	- Representação do turbidímetro de acordo com o método nefelómetro....	23
Figura 2.4	- Nefelometria de acordo com o equipamento utilizado a campo.....	24
Figura 2.5	- Níveis de pH aquático.....	26
Figura 2.6	- Interação da radiação eletromagnética com a água.....	31
Figura 2.7	- Curva de Absorção e Espalhamento da luz na água pura.....	32
Figura 2.8	- Fotografias de campo em datas de auto e baixo valor de turbidez.....	33
Figura 3.1	- Mapa de localização da área de estudo.....	34
Figura 3.2	- Fluxograma de atividades.....	35
Figura 3.3	- Cenário de coleta no SFV dos 13 pontos amostrais.....	36
Figura 3.4	- Mapa de localização das estações fluviométricas na bacia do SFV.....	37
Figura 3.5	- Sonda multiparâmetro Horiba e seus respectivos sensores.....	38
Figura 3.6	- Foto do radiômetro ASD modelo FieldSpec.....	40
Figura 4.1	- Turbidez superficial amostrada a campo ao longo do SFV.....	43
Figura 4.2	- Interpolação da turbidez no compartimento aquático do SFV.....	44
Figura 4.3	- Turbidez levantada em campo superficial e com os discos de secchi.....	45
Figura 4.4	- Precipitação pluviométrica media da área do SVF no intervalo de 2015 a 2017.....	47
Figura 4.5	- Precipitação diária correspondente a 30 dias prévios a cada missão de campo na área do SFV.....	48
Figura 4.6	- Volume operacional de um reservatório.....	48
Figura 4.7	- Cota do reservatório de ITAIPU durante o intervalo de estudo.....	49
Figura 4.8	- Conjunto dos dados de campo de pH do SFV.....	50
Figura 4.9	- Conjunto dos dados de campo de Condutividade elétrica do SFV.....	51
Figura 4.10	- Valores da reflectância de campo.....	52
Figura 4.11	- Interpolação do pH amostrada a campo no compartimento aquático do SFV.....	54
Figura 4.12	- Interpolação da condutividade elétrica amostrada a campo no compartimento aquático do SFV.....	55
Figura 4.13	- Turbidez da água do SFV geral.....	56

Figura 4.14	- Dispersão da reflectância de campo e satélite e da turbidez da água com seus respectivos modelos matemáticos para missão de campo do dia 11 de agosto de 2016.....	58
Figura 4.15	- Dispersão da reflectância de campo e satélite e da turbidez da água com seus respectivos modelos matemáticos para missão de campo do dia 27 de agosto de 2016.....	59
Figura 4.16	- Dispersão da reflectância de campo e satélite e da turbidez da água com seus respectivos modelos matemáticos para missão de campo do dia 11 de junho de 2017.....	61
Figura 4.17	- Teste de normalidade do conjunto dos dados.....	62
Figura 4.18	- Dispersão da reflectância de campo e satélite e da turbidez da água com seus respectivos modelos matemáticos para o conjunto das missões de campo.....	63
Figura 4.19	- Modelo matemático da turbidez aplicado na imagem de satélite.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados exploratórios da turbidez ao longo SFV.....	42
Tabela 2 - Missões de campo e qualidade das imagens de satélite utilizadas.....	51

LISTA DE SIGLAS

SFV	- São Francisco Verdadeiro
NTU	- Nephelometric Turbidity Units
JTU	- Unidades Jackson de Turbidez
OLI	- Operational Land Imager
GHz	- Giga-Hertz
mm	- Milímetros
ph	- Potencial Hidrogeniônico
µm	- Micrômetro
km²	- Quilômetro quadrado
km	- Quilômetro
Lt	- Radiância total
Lp	- Radiação atmosférica
Ls	- Reflectância de superfície
Lv	- Reflectância volumétrica
Lb	- Reflectância de fundo
K	- Graus Kelvin
DS	- Disco de Sechi
IDW	- Inverse Distance Weighting
USGS	- Serviço Geológico dos Estados Unidos da América
ICE	- Interactive Correlation Environment
REMQ	- Raiz do Erro Médio Quadrático
R²	- Coeficiente de Determinação
r	- Coeficiente de Correlação

SUMÁRIO

1. Introdução.....	14
2. Referencial Teórico.....	17
2.1. Bacia Hidrográfica.....	18
2.2 Reservatório E Limnologia.....	18
2.3 Turbidez.....	20
2.3.1. Processo de Medida.....	21
2.4. Potencial Hidrogeniônico.....	25
2.5. Condutividade Elétrica.....	27
2.6. Sensoriamento Remoto.....	28
2.6.1. Sensoriamento Remoto da Água.....	29
2.6.2. Efeitos da Presença da Turbidez na Refletância da Água.....	32
3. Metodologia.....	33
3.1 Área de Estudo.....	33
3.2. Variáveis Climáticas.....	36
3.2.1. Precipitação Pluviométrica.....	36
3.2.2. Dados de Cota.....	37
3.3. Variáveis Limnológicas.....	38
3.3.1. Dados de Campo.....	38
3.3.2. Espacialização das Variáveis.....	39
3.3.3. Correlação Entre as Variáveis.....	39
3.4. Dados Espectrais.....	39
3.4.1. Espectrorradiometria de Campo.....	39
3.4.2. Imagens de Satélite.....	40
3.5. Conjunção e Discussão dos Resultados.....	41
4. Resultados.....	42
4.1.1. Turbidez.....	42
4.1.1.1. Dados de Turbidez da Coluna D'água.....	45
4.1.2. Dados de Precipitação.....	46
4.1.3. Cota do Reservatório de Itaipu.....	48
4.1.4. Análise dos Dados de Campo de pH.....	49

4.1.5. Análise dos Dados de Campo de Condutividade Elétrica.....	50
4.1.6. Dados Provenientes de Sensoriamento Remoto.....	51
4.1.6.1. Dados Proveniente de Plataformas de Satélite.....	51
4.1.6.2. Dados Proveniente de Espectroradiometria de Campo	52
4.2. Análise dos Resultados.....	53
4.2.1. Relação da Turbidez com a Chuva e a Cota.....	53
4.2.2. Análise da Espacialidade das Variáveis.....	53
4.2.2.1. pH.....	53
4.2.2.1. Condutividade Elétrica.....	54
4.2.3.1. Análise da Refletância de Campo.....	55
4.2.3.2. Refletância de Satélite.....	56
4.2.3.3. Estimativa e Modelagem.....	57
5. Conclusões.....	65
6. Referencial Bibliográfico.....	66

1. INTRODUÇÃO

As reservas de águas continentais representam a grande maioria dos estoques de água doce disponíveis sob a superfície terrestre. Entretanto, o uso descontrolado deste recurso aliado a falta de tratamento de esgotos domésticos e industriais, somado à utilização excessiva de inseticidas em áreas agrícolas, estão acarretando graves problemas relacionados à baixa qualidade das águas. A água doce é um recurso distribuído de modo desigual em todo o planeta e deixa de ser consumida por aproximadamente 1,4 bilhões de pessoas por ano, condição mediada principalmente pela intensificação das ações antrópicas, GIATTI e CUTOLO (2012).

Nesse contexto, às altas taxas de consumo de água somadas ao crescimento exponencial da população mundial aceleram os processos de contaminação dos recursos hídricos e, por consequência, aumentam a escassez e geram perdas qualitativas e quantitativas. Portanto, um grande desafio se apresenta à sociedade e à ciência: manter o abastecimento de água em qualidade e quantidade para a atual e futuras gerações.

Deste modo, um dos impactos observados da depreciação da qualidade das águas é notado a partir do acompanhamento dos valores de turbidez. Embora a turbidez por si só não seja um indicador direto de poluição dos corpos hídricos devido aos diferentes contextos apresentados pelos ecossistemas sendo possível constatar a existência de meios em que altos índices de turbidez são naturais e desejáveis para a manutenção da fauna e flora presentes, desta forma o estudo da turbidez tem seu foco no monitoramento de sua variação, que é regida por parâmetros ecológicos inter-relacionados com o equilíbrio ecossistêmico.

Alterações nesta variável podem interferir diretamente o processo fotossintético e, por consequência, nos índices de eutrofização dos ecossistemas. O aumento exacerbado de turbidez gera a necessidade da utilização de produtos químicos nas estações de tratamento a fim de equalizar os compostos dissolvidos na água, além de afetar a preservação dos organismos aquáticos bem como o uso para fins de recreação (ANA, 2009); LOPES et al. (2013).

Em acordo, CONCEIÇÃO et al. (2017) relataram em suas pesquisas que a turbidez associada a fatores como o pH e presença de coliformes totais evidenciaram a má qualidade da água no córrego Guará Velho em Guaraí, estado do Tocantins. Os autores apontam que dentre os fatores, a turbidez contribuiu significativamente para tornar as águas desse corpo hídrico completamente inapropriada para o consumo humano. Em trabalho semelhante, SIQUEIRA et al. (2012) utilizaram os índices de turbidez para avaliar a qualidade das águas do rio Parauapebas Pará – Brasil. Os autores encontraram os valores dentro dos padrões da legislação

embora os números tenham oscilados devido a presença de material suspenso oriundos do carreamento para o interior do rio por meio da lixiviação. Condições parecidas foram encontradas nas pesquisas desenvolvidas por QUEIROZ et al. (2010) com o trabalho “Influência do uso do solo na qualidade da água de uma microbacia hidrográfica rural” no município de Cascavel-PR. Os autores não encontraram modificações significativas na turbidez que comprometessem a qualidade das águas.

Nesse contexto, a qualidade da água está intimamente vinculada a variações nos valores de turbidez, esta situação está diretamente relacionada à presença de sólidos orgânicos e inorgânicos em suspensão, que associados interferem na penetração da luz na coluna d'água. A diminuição de luz no meio aquático faz com que as partículas tendam a acomodar uma maior quantidade de poluentes, microrganismos patogênicos e sua sedimentação prejudica o processo reprodutivo de diversas espécies de peixes, OLIVEIRA et al. (2008); FERREIRA et al. (2015).

A turbidez faz parte de um conjunto de variáveis limnológicas consideradas opticamente ativas, que podem ser relacionadas com o espalhamento e absorção da luz por partículas e moléculas presentes na água. Esta variável é composta por fatores como quantidade de matéria suspensa, partículas em estado coloidal, matéria orgânica e inorgânica, providas de diversas fontes como solo, esgoto, mineração e indústria, (EPA, 1999); DALL'OLMO et al., (2003). Nesse cenário, as principais causas da degradação da qualidade da água são classificadas em pontuais e difusas. Os pontuais são caracterizados pelos efluentes domésticos e industriais, já as difusas, são provenientes de resíduos da agricultura tal como fertilizantes, herbicidas e inseticidas carregados até os corpos de água pelo escoamento superficial da água da chuva.

Diante dos impactos supracitados, causados pela variação na turbidez, o presente trabalho tem por objetivo geral identificar a dinâmica apresentada pela turbidez no compartimento aquático por meio de um modelo matemático que permite estimar a turbidez com o uso de imagens orbitais, dados de laboratório e radiometria (reflectância da água) de campo. Frente ao exposto, é indispensável a preservação recursos hídricos que fornecem subsídios para o desenvolvimento das mais variadas atividades vinculadas a desenvolvimento da sociedade e da preservação do meio ambiente. Nesse sentido, a turbidez é uma variável de fundamental importância para uma gestão otimizada dos recursos hídricos disponíveis. Em face disso, justifica-se o acompanhamento e mensura dos seus valores bem como as suas condicionantes no entorno da bacia. Para tanto, faz-se necessário a obtenção de um conjunto de informações sobre o funcionamento dinâmico dos sistemas no interior dos corpos hídricos.

Nesse cenário GITELSON et al. (2011); PEREIRA et al. 2009; LOPES et al. (2013) relatam que o sensoriamento remoto (SR) pode viabilizar o monitoramento da qualidade das águas em grande escala. Os instrumentos de SR possuem grande potencial para o monitoramento da qualidade das águas em amplas escalas temporal, espacial e espectral. Os autores afirmam que com o uso das tecnologias vinculadas ao SR é possível avaliar as respostas decorrentes de perturbações induzidas pelas atividades antrópicas, de modo a prever tais impactos sobre as condições de sustentabilidade a médio e longo prazo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A turbidez da água é uma característica indispensável no estudo da água continental. Variações na turbidez da água podem influenciar negativamente os elementos orgânicos do sistema modificando as características de penetração da luz (DONOHUE, 2009). Enquanto alguns sistemas são caracterizados por altos índices de turbidez da água, muitos lagos e rios são caracterizados por águas claras e são impactados negativamente pela redução na penetração da luz. Reduções na claridade da água podem afetar a absorção de energia solar nos sistemas de lagos, causando retardo no aquecimento radiante (oriundo da radiação solar) causando a redução da produção fotossintética (KIRK, 1985).

Variações deste gênero podem acarretar em efeitos em cascata na cadeia alimentar do meio, ocasionando em redução da produtividade primária, macrófitas, disponibilidade de zooplâncton e redução da energia alimentar disponível para níveis tróficos de macro invertebrados, moluscos e peixes (HENLEY, 2000).

2.1. Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é caracterizada como a área de captação natural da precipitação pluviométrica que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único na jusante. Bacia hidrográfica é, portanto, uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou por um sistema conectado de cursos d'água, de forma que toda a vazão efluente seja descarregada por uma simples saída (ESTEVES, 1998).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo. A ideia da bacia de drenagem como um quadro adequado para o estudo e organização dos fatos da geografia física e humana tem uma longa tradição na história da geografia (SILVA et al, 2009).

De fato, as bacias hidrográficas estão conectadas pelos divisores topográficos, formando uma rede conjunta de drenagem da água, que transporta material sólido e dissolvido oriundo da bacia em direção a jusante, a desaguar em um rio de hierarquia igual ou superior, reservatório, lago ou no oceano. Desta forma, a bacia está sujeita a um aumento no fluxo energético (descarga de material suspenso sólido e dissolvido) oriunda da captação da água da chuva sobre a

superfície da área contemplada pela bacia, tal acréscimo nos níveis energéticos é atribuído a processos naturais como erosão, clima e tectônicas locais e principalmente a intervenção antrópica por meio da atividade agrícola, expansão urbana e desmatamento (GUERRA, 1999).

A atividade antrópica na bacia de captação tem diversos impactos na qualidade da água e por consequência no ecossistema como um todo. Tais atividades causam impactos em diferentes níveis na bacia como, por exemplo a prática agrícola, que apresenta um caráter intermitente e o emprego de defensivos e fertilizantes que apresentam alta concentração de fósforo, nitrogênio, potássio, entre outros micronutrientes (EMBRAPA, 2000), que em virtude da precipitação pluviométrica serão transportados para o curso d'água onde acarretará em uma sobrecarga de nutrientes que torna o ambiente propício para florações de algas e a eutrofização do corpo d'água(LAMPARELI, 2004).

Estudos realizados por PEREIRA FILHO (2009) constaram a alta correlação do uso e cobertura do solo e seu respectivo período de exposição em decorrência de rotações de cultura sazonais da agricultura na bacia de captação e a preservação das áreas de APP referentes a vegetação ripária que contingencia o processo de assoreamento diminuindo a carga de sedimentos carregados para o curso d'água.

2.2 Reservatório e Limnologia

O Brasil devido a seu potencial hidrológico teve grande parte de suas bacias hidrográficas moldadas pela construção de reservatórios, que inevitavelmente modificaram aspectos físicos da paisagem, transformando drasticamente o ecossistema local e influenciando no fluxo de energia presente no reservatório (ESTEVES, 1998).

A construção de reservatórios gera uma série de alterações ambientais de grande relevância para o monitoramento da qualidade da água, tendo em vista que a construção de um reservatório modifica expressivamente as características de uma determinada fração do rio. Desta forma gerando uma modificação nas áreas de correnteza onde o tempo de residência da água no reservatório seria baixo em ambientes lênticos, e por consequência alterando o tempo de permanência da água no reservatório e provocando uma modificação drástica nas características físicas da água ao longo do reservatório (BRANCO, 1977).

Ecossistemas lênticos são caracterizados pela alta capacidade de solubilização de compostos orgânicos, baixo teor de sais dissolvidos, alta densidade e viscosidade da água, capacidade de sedimentação, temperatura e radiação subaquática (Figura 2.1). O processo de desenvolvimento de vegetação aquática no reservatório está diretamente relacionado as

variáveis a velocidade da água, disponibilidade de luz, temperatura da água, concentração de nitrogênio, fósforo, carbono inorgânico dissolvido e a topografia submersa (PEREIRA FILHO, 1998).

Figura 2.1- Ecossistema lântico (lago ITAIPU).



Fonte: Acervo fotográfico da ITAIPU

ESTEVES (1998) classifica ambientes lóticos em três zonas:

- Zona inicial - correntes de águas rápidas, leitos profundos, turbulência e um número limitado de espécies;
- Zona média - correnteza moderada, predomínio de vegetação nas margens favorecendo diversos seres vivos;
- Zona final - água turva, predomínio de matéria orgânica com acúmulo de sedimento, número reduzido de seres vivos.

A construção de reservatórios tem uma ampla gama de efeitos no ecossistema. Tais efeitos não se limitam apenas a flora, tendo influência também na fauna local, física e química da água, devido à mudança na sedimentação oriunda do processo de transformação do ambiente para um sistema lântico o que vai refletir no ecossistema aquático, podendo a longo prazo acarretar em mudanças na composição química do solo das áreas alagadas (ESTEVES, 1998).

2.3 Turbidez

DAVIES-COLLEY e SMITH (2007) apresentam a turbidez como uma propriedade não inerente a água, diferente da temperatura ou o pH que são indissociáveis, o que levou ao tardio reconhecimento da turbidez como indicador de conservação ambiental dos corpos hídricos, com seu crescimento em função da relevância de estudos ambientais na última década, o que por consequência aumentou a procura por uma forma de mensuração otimizada e barata para os valores de turbidez presentes em reservatórios.

A resolução n° 357 do CONAMA impõe limites de turbidez de 40 NTU para águas doces classe 1 e de 100 NTU para as classes 2 e 3. A turbidez também é categorizada como um parâmetro de qualidade estética da água para consumo. Nas estações de tratamento de água, a turbidez é uma variável operacional indispensável para o controle dos processos de coagulação, sedimentação e filtração.

A presença de altos ou baixos índices de turbidez na água por si só não caracteriza um ecossistema como preservado ou degradado. Existem variados contextos dentro do estudo de reservatórios, nos quais índices elevados de turbidez são tidos como naturais em determinados sistemas. No entanto para ecossistemas em que os índices de turbidez naturais são mais baixos, desta forma o estudo da turbidez da água deverá estar focado na análise de seu contexto e variação de acordo com ecossistema em que está inserido (EPA, 2018).

A elevação nos valores de turbidez de um reservatório afeta diretamente o processo fotossintético do ecossistema, devido à redução da presença de luz nos níveis mais profundos do reservatório prejudicando de modo direto as populações de fitoplânctons e vegetação submersa. A sedimentação da matéria em suspensão que caracteriza a turbidez acarreta no soterramento de microrganismos bentônicos e de locais de desova de determinadas espécies de peixes, o que acarreta na formação de bancos de lodo onde a digestão anaeróbica leva à formação de gases metano e carbônico, além de nitrogênio gasoso e do gás sulfídrico fazendo com que o impacto oriundo do aumento da turbidez na coluna d'água afete toda cadeia trófica do ecossistema (LAMPARELLI, 2004).

Por meio do estudo da turbidez é possível identificar diversos problemas no ecossistema. No caso de a turbidez ser de origem natural a tendência é de que não apresente consequências sanitárias graves, apesar de possuir uma estética desagradável, e apresentar sólidos em suspensão que servirão como abrigo para microrganismos patogênicos, quando adsorvidos por estas partículas, acarretando na diminuição da eficiência de processos de desinfecção. Quando de origem antrópica o cenário se agrava por geralmente estar associada a compostos tóxicos e

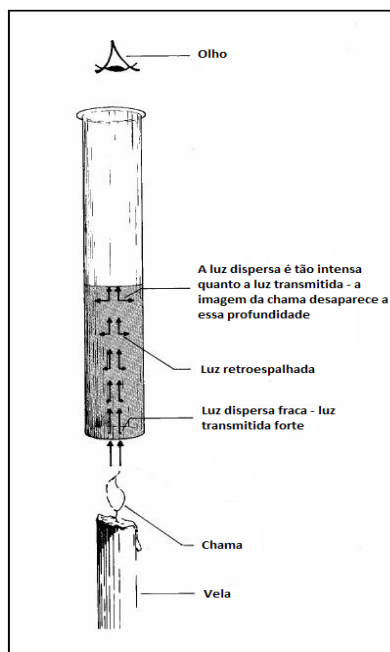
metais pesados que afetam diretamente as espécies presentes no reservatório e aumentam consideravelmente a concentração de organismos patogênicos presentes no meio (VON SPERLING, 1996).

2.3.1. Processo de Medida

A turbidez é a medida utilizada para estimar o grau de atenuação que a radiação solar incidente sofre ao atravessar a amostra de água. Historicamente, a forma mais antiga utilizada para aquisição de medidas de turbidez é o turbidímetro a vela de Jackson (1926) (Figura 2.2), este instrumento foi construído a partir de uma vela e um tubo de vidro de fundo plano.

A água é derramada no tubo até que a chama da vela não seja mais visível. A luz não desaparece completamente, apenas a imagem da chama. Isso ocorre quando a intensidade da luz transmitida é igual à quantidade de luz espalhada pelas partículas na água. Quanto mais turva a água, mais rápida a imagem da chama desaparece, utilizando-se a quantidade de água necessária para tal efeito a medida para estimar a turbidez, que era medida em unidades Jackson de turbidez (JTU) (EPA, 2009).

Figura 2.2 - Turbidímetro a vela de Jackson



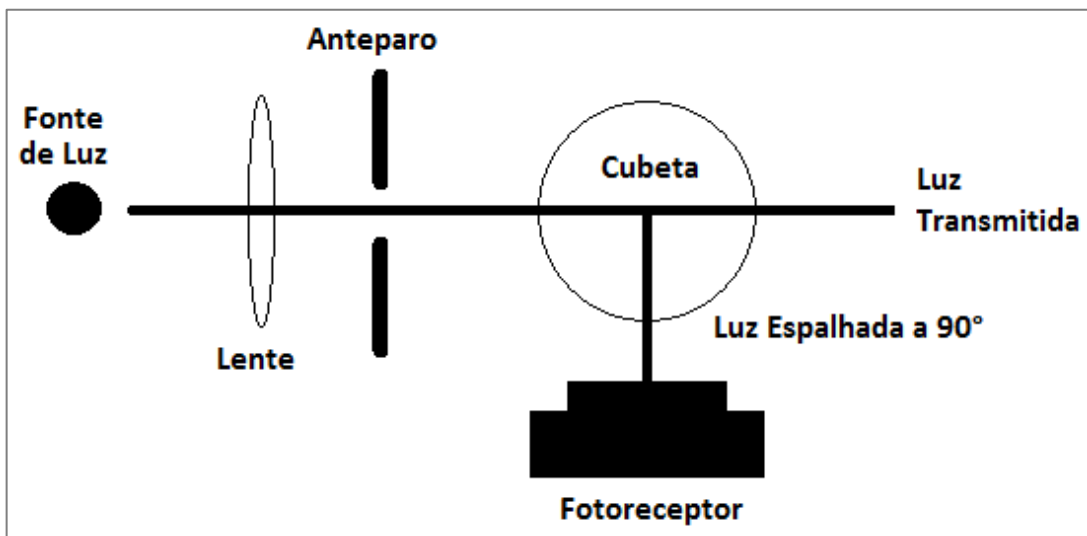
Fonte: Adaptado de EPA, 2009

Embora o método Jackson proporcione medidas coerentes dos valores de turbidez presentes nas amostras, o método sofre grande interferência de duas fontes de erro inerentes a sua metodologia, uma sendo caracterizada pela natureza da fonte de luz que apresenta

inconstância na intensidade e cor apresentando a limitação de não determinar valores baixos de turbidez (abaixo de 25 UJT), porque partículas muito pequenas não dispersam a luz na faixa amarelo-vermelho do espectro eletromagnético, que corresponde a cor da chama da vela, outra limitação inerente ao processo é seu caráter subjetivo de medida, que em virtude da sua avaliação ser oriunda do aparato visual humano inevitavelmente apresentará variação comprometendo assim a precisão da sua medida (EPA, 2009).

No ano de 1971, foi introduzido o método nefelométrico (dispersão da luz) como forma de medida padrão da turbidez, a partir desta data passou-se a empregar a expressão padrão NTU (Nephelometric Turbidity Unit) em detrimento da unidade JTU. O nefelômetro mede a luz difundida a 90° a partir de uma fonte policromática, que pode ser de vários tipos (lâmpada de mercúrio, laser, tungstênio, silício, xénon) e emitir em diferentes comprimentos de onda (400 a 800nm), tornando-os mais ou menos sensíveis a partículas com diferentes dimensões (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Representação do turbidímetro de acordo com o método nefelométrico.



Fonte: Adaptado de EPA 2009.

O método permite a diluição se a amostra for superior a 40 NTU. Uma vez que a amostra é diluída abaixo de 40 NTU e medida novamente, a nova leitura é multiplicada pelo fator de diluição para calcular a turbidez da amostra original.

$$NTU = \frac{A*(B+C)}{C} \quad (1)$$

Onde:

A = NTU diluído nas mostras de campo

B = Volume de água diluída (ml)

C = Volume de amostra retirado para diluição (ml)

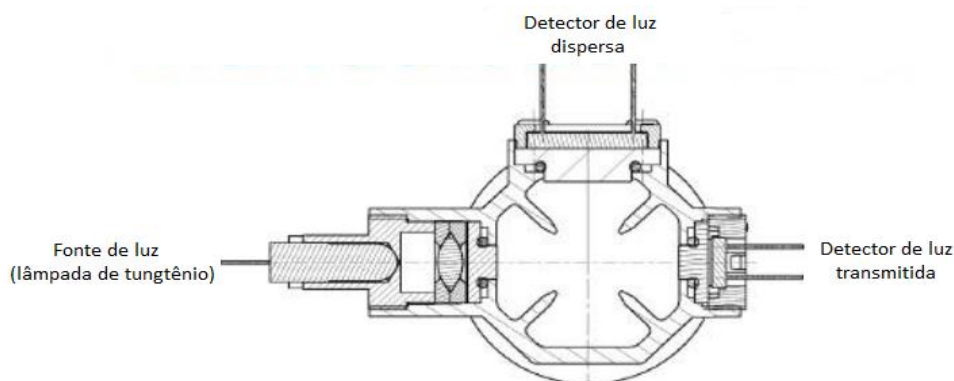
O emprego de uma lâmpada de tungstênio como fonte de luz requer uma verificação diária de sua calibração. Isso se dá em função da deterioração da lâmpada devido a incandescência. À medida que a lâmpada queima, como qualquer outra lâmpada incandescente, a saída de luz vai diminuindo, alterando a leitura da medição. A calibração tem a função de minimizar o erro devido à deterioração da fonte de luz.

O método de medida nefelométrico é baseado na comparação entre o espalhamento da luz em uma amostra em condições predeterminadas com a intensidade da luz dispersa por uma amostra de referência padrão (polímero de formazina com valor constante de turbidez em 4000 NTU) sob as mesmas condições, de forma que, quanto maior o efeito de espalhamento da luz pela amostra maior será a turbidez (APHA, 2012).

A turbidez da água é umas das variáveis oticamente ativas que apresenta maior dificuldade de obtenção. Em virtude desta dificuldade são empregados diferentes métodos e unidades de media com o propósito de padronização para facilitar suas comparações. Embora a turbidez possa ser amostrada de forma simples, existem variáveis que exercem influência em sua medida, tal como, cristais em suspensão e a presença de bolhas de ar (BARBOSA, 2019).

Para a medida de turbidez foi optado pelo método EPA 180.1. este método utiliza a tecnologia nefelométrica, que mede a dispersão de luz a um ângulo de 90 graus em relação ao caminho inicial da luz. O fotodetector deve estar centrado nesse ângulo e não pode se estender além de 30 graus daquele ponto central. Para minimizar as diferenças nas medições de dispersão de luz, o método afirma que a luz incidente e dispersa não pode percorrer mais de 10 cm da fonte de luz até o fotodetector (Washington State Department of Ecology, 1991). São permitidos fotodetectores adicionais neste método, desde que o ângulo de 90 graus seja o detector primário (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Nefelometria de acordo com o equipamento utilizado a campo.



Fonte: Adaptado do manual da sonda Horiba YSI

O Método EPA 180.1 necessita que a fonte de luz usada em cada turbidímetro seja oriunda de uma lâmpada de tungstênio com uma temperatura de cor entre 2.200 °K a 3.000 °K (EPA,2009;APHA,2012). Isto significa que a saída de tungstênio tem natureza policromática. Quando a luz atinge o fotodetector, a resposta do pico espectral deve oscilar entre 400-600 μm . O uso de uma ampla faixa espectral significa que o medidor de turbidez pode sofrer interferência de matéria orgânica colorida em suspensão (CDOM). Como o CDOM pode absorver alguns comprimentos de onda, a precisão do medidor pode diminuir. No entanto, um espectro de banda larga também permite que o medidor seja sensível a partículas menores. Essa sensibilidade significa que uma fonte de lâmpada de tungstênio fornecerá uma resposta mais precisa do que uma fonte de luz monocromática ao medir uma amostra com partículas muito finas (APHA, 2012).

O processo de calibração para a medida nefelometria 180.1 foi realizado utilizando como constante de calibração a formazina, este método de medida embora amplamente difundido e utilizado por diversas entidades de monitoramento da qualidade da água apresenta uma limitação relacionada a sua precisão quando as medidas de turbidez ultrapassam a casa de 40 NTU.

O Método 180.1 de determinação da turbidez por nefelometria é o padrão utilizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para projeto de medidores de turbidez. Os critérios padronizados visam garantir a precisão e a comparabilidade entre medidores em conformidade. Instrumentos em conformidade com o Método EPA 180.1 por meio da fórmula.

$$T = a_0 * I_{90} \quad (2)$$

Onde:

T = Turbidez em NTU (0 - 40)

a_0 = Constante de calibração

I_{90° = Detector de corrente a 90°

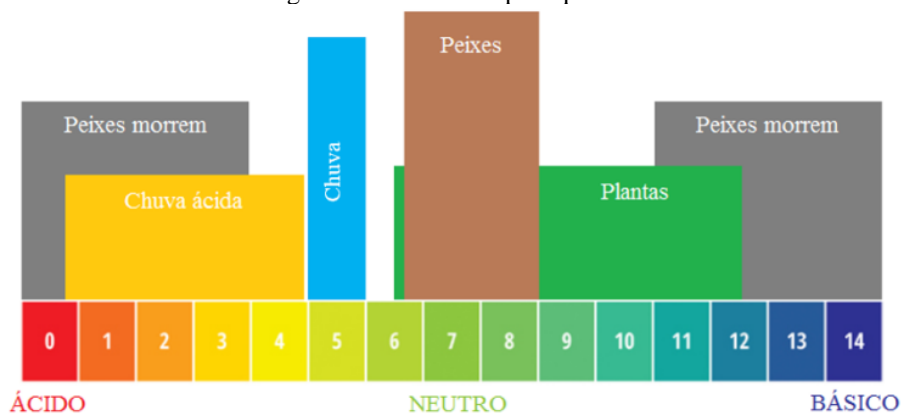
2.4. Potencial Hidrogeniônico

O termo pH corresponde ao potencial de hidrogênio iônico. Definido como o logaritmo da recíproca correspondente a concentração de íons livres de hidrogênio, devendo se atentar ao fato de que a medida de pH não consiste na concentração, mas na atividade dos íons de hidrogênio, medida por meio das diferenças de atividade do íon de hidrogênio, rapidamente liberadas e incorporadas a partir de moléculas doadoras de prótons. Por definição, os valores de pH não podem ser calculados, mas a média deve ser estimada a partir do logaritmo de seu recíproco (WETZEL, 2001).

A água pura apresenta uma concentração de íons H^+ e OH^- equivalentes o que a caracteriza a solução como neutra, em contrapartida se a solução apresentar maior concentração de íons H^+ é considerada ácida, para o caso inverso, em que a concentração de OH^- seja maior será caracterizada com básica (ESTEVES, 1998; APHA, 2012).

Em ambiente natural as proporções de H^+ e OH^- são determinadas pelos sais, ácidos e bases presentes no meio. A maioria dos ecossistemas aquáticos continentais apresentam o pH variando de 6 a 8, o que afeta diretamente o ecossistema aquático (Figura 2.5), embora algumas espécies se adaptem a água com níveis de pH fora dessa faixa, geralmente ecossistemas aquáticos apresentam valores baixos de pH em virtude da elevada concentração de ácidos orgânicos dissolvidos de origem alóctone e autóctone (ESTEVES, 1998; TUNDISI, 2008).

Figura 2.5 - Níveis de pH aquático.



Fonte: Adaptado de EPA (2016).

À medida que os níveis de pH se afastam dessa faixa (para ácido ou para base), pode estressar os sistemas animais e reduzir as taxas de eclosão e sobrevivência. Quanto mais fora da faixa ideal de pH estiver a água, maiores serão as taxas de mortalidade. Quanto mais sensível uma espécie, mais suscetível a alterações no pH. Além dos efeitos biológicos, níveis extremos de pH geralmente aumentam a solubilidade de elementos e compostos, tornando os produtos químicos tóxicos mais “móveis” e aumentando o risco de absorção pela vida aquática (AFHA, 2012; BARBOSA, 2019).

Mesmo pequenas alterações de pH podem ter efeitos a longo prazo. Uma leve mudança no pH da água pode aumentar a solubilidade do fósforo e outros nutrientes carregados da bacia de captação tornando-os mais acessíveis para o crescimento das plantas. Em um lago oligotrófico, ou um lago com baixo teor de nutrientes e alto teor de oxigênio dissolvido, isso pode causar uma reação em cadeia. Com nutrientes mais acessíveis, as plantas aquáticas e as algas florescem, aumentando a demanda por oxigênio dissolvido, eutrofizando o ecossistema e tornando o corpo d’água rico em nutrientes e plantas, mas baixo em concentrações de oxigênio dissolvido (LAMPARELI, 2004).

O pH é tido como um importante indicador da interferência antrópica na qualidade da água. Em águas sob condições mais ácidas é constatado um aumento na solubilidade de agroquímicos, além de dificultar a atividade bentônica, ao diminuir os índices de decomposição e ciclagem de nutrientes, processos que afetam diretamente as populações de organismos vitais para a cadeia alimentar, como a comunidade planctônica e organismos invertebrados, sendo também altamente influenciado pelos índices de decomposição e por consequência a eutrofização (HERMES et. al, 2004).

2.5. Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica é definida como a capacidade inerente a uma solução de transportar uma corrente elétrica, essa capacidade está diretamente relacionada à concentração de íons na água. Esses íons condutores provém de sais dissolvidos e materiais inorgânicos em suspensão, como álcalis, cloretos, sulfetos e compostos de carbonato, sendo medido em micro ou milissegundos por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm) (APHA, 2012).

O valor da condutividade está diretamente relacionado com a quantidade de íons presentes na solução, de forma que, uma maior quantidade de íons resulta em uma condutividade alta e o contrário em casos de baixa presença de íons, sabendo-se que a água destilada por sua baixíssima concentração de íons possui propriedade isolante. Os íons conduzem eletricidade devido a suas cargas positivos e negativos e à medida que as substâncias dissolvidas se dividem em água, as concentrações de cada carga positiva e negativa permanecem iguais, de forma que mesmo com o aumento na quantidade de íons a solução permaneça eletricamente neutra (ESTEVEVES, 1998; APHA, 2012).

A condutividade elétrica da água possui alta correlação com a afluência oriunda da drenagem da água da chuva que precipita sobre a área de captação da bacia hidrográfica, de forma que, a ocorrência de chuva intensa tem a tendência de reduzir a condutividade elétrica por diluir a quantidade de sais presentes no meio, no entanto, esta tendência irá apresentar considerável variação de acordo com as características do solo, estudos prévios realizados por WELCOMME (1985) constataram que ocorrem picos de condutividade durante os momentos iniciais da afluência da água da chuva devido à descarga de nutrientes ricos em sais minerais, variando em intensidade de acordo com a natureza do solo.

A condutividade é um dos parâmetros de qualidade de água mais úteis e comumente medidos. Além de ser a base da maioria dos cálculos de salinidade e sólidos dissolvidos totais, a condutividade é um indicador precoce de mudanças em um sistema aquático, devido ao fato de que a maioria dos corpos hídricos mantém uma condutividade relativamente constante, de forma que, alterações na condutividade elétrica geralmente estão relacionadas com altos índices de precipitação pluviométrica, o processo de evaporação ou poluição oriunda da atividade antrópica, podendo ser muito prejudiciais para a qualidade da água e o ecossistema como um todo (ESTEVEVES, 1998).

2.6. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é descrito como a aplicação de um conjunto de sensores, sistemas de processamento, equipamentos aerotransportados para transmissão de dados, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar a dinâmica espacial, fenômenos e processos na superfície do planeta a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem os alvos em suas mais diversas manifestações sem estabelecer contato direto com o alvo (JENSEN, 2009; BARBOSA, 2019).

A informação referente ao objeto de interesse é transportada por meio da energia eletromagnética incidente, que é refletida pelo alvo e captada pelo sensor que a converte em uma grandeza radiométrica, para então armazená-la em níveis de cinza correspondentes a intervalos monocromáticos predeterminados, que por meio de seu comportamento e contexto servirá para a extração de informações da superfície e seus processos (MENESES, 2001).

Sob esta lógica, a ferramenta sensoriamento remoto possui um imenso potencial de discernimento de alvos, tendo em vista que cada elemento possui uma resposta espectral característica, no entanto, a capacidade dos sensores de discernir alvos sofre uma série de limitações devido a fatores como interferência atmosférica e a resolução espacial, que de acordo com a dimensão do pixel imageado devido à mistura espectral gerada pela impossibilidade de amostrar um alvo puro.

De acordo com BARBOSA (2019) as grandezas fundamentais do sensoriamento remoto são divididas em, irradiância, radiância, absortância, reflectância e transmitância. A irradiância consiste no fluxo de energia incidente na superfície. A radiância corresponde ao fluxo radiante por unidade de ângulo sólido que deixa uma fonte em uma determinada direção. A absortância se refere a intensidade com que a energia incidente é absorvida pela superfície. A reflectância é dada pela relação entre a energia incidente com a energia refletida. E a transmitância é caracterizada como a razão entre a energia transmitida como o total de energia incidente sobre a superfície.

A energia eletromagnética é a forma com que a informação é transferida do objeto de interesse para o sensor e pode ser definida como uma resposta dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com o objeto. A principal fonte de energia eletromagnética disponível para a prática do sensoriamento remoto é o sol. A dinâmica espectral da distribuição da radiação eletromagnética e sua intensidade dependem do ângulo de inclinação da fonte de radiação com relação ao alvo imageado, da composição e densidade da atmosfera no momento

da obtenção da resposta espectral do alvo e da natureza da fonte de energia eletromagnética (LORENZZETTI, 2015).

A coleta de informação referente a energia eletromagnética pode ser realizada por sensores passivos que apenas utilizam a energia eletromagnética disponível no meio (sol) ou pode ser obtida por sensores ativos que emitem a energia para então captá-la após ser refletida pelo alvo. Um dos fatores de maior relevância do sensoriamento remoto, enquanto estudo da superfície terrestre, é o registro de informações de alvos presentes na superfície terrestre em um determinado momento no tempo, também conhecido como resolução temporal. A obtenção de múltiplos registros de um mesmo alvo no transcorrer do tempo tem um valor imprescindível para o estudo da evolução da paisagem, identificação de processos em desenvolvimento e modelagem para previsões futuras (HAACK et al, 1997).

A resolução radiométrica possui grande influência na capacidade de discernimento dos alvos na superfície por ser definida como a sensibilidade de um detector de sensoriamento remoto as diferenças na potência do sinal à medida que ele registra o fluxo radiante refletido, emitido ou retroespalhado pelo alvo, definindo o número de níveis de sinais claramente discriminados (JENSEN, 2009).

Para a maioria dos estudos de sensoriamento remoto é de suma importância registrar os atributos espaciais do terreno, devido a estreita correlação que se estabelece entre a medida do pixel imageado e o grau de detalhe com que se acompanha o alvo ou processo de interesse sobre a superfície, tendo como premissa que a resolução espacial necessária para o estudo de determinado processo seja no mínimo a metade da dimensão do processo em si (JENSEN, 2009).

A resolução espectral é associada ao número de faixas e à largura espectral das faixas nas quais a radiação eletromagnética é medida. As faixas espectrais correspondem aos intervalos de comprimento de onda nos quais o sistema sensor capta informação. Quanto maior o número de faixas e menor sua largura, maior será a capacidade do sistema de registrar diferenças espectrais entre os alvos (MOREIRA, 2005).

2.6.1. Sensoriamento Remoto da Água

O sensoriamento remoto de corpo d'água é regido por dois processos inerentes a interação da água com energia incidente, a absorção e o espalhamento. A absorção se refere a capacidade da molécula de água ou de alguma partícula em suspensão de absorver a energia incidente, tal processo altera a composição e a intensidade do campo de luz e podem ser

identificados e quantificados a partir de medidas das grandezas radiométricas. O processo de espalhamento por outro lado retrata a alteração na direção de propagação do feixe devido a sua interação com o meio em que se propaga, ocorrência oriunda de flutuações de densidade no meio ou pelas partículas presentes, essencialmente o processo de espalhamento faz com que o fóton de luz se propague em uma trajetória irregular sofrendo constantes desvios de acordo com a densidade de partículas presentes no meio, dificultando sua penetração vertical em direção as camadas mais profundas da água, mas possibilitando que uma fração dos fótons espalhados retornem para atmosfera (BARBOSA, 2019).

Para o entendimento do sensoriamento remoto da água é necessária a compreensão da radiação eletromagnética a partir de sua entrada na atmosfera, e sua interação ar-água, a relação com a coluna d'água até o retorno da energia eletromagnética para o sensor. De acordo com a dinâmica apresentada pela radiação proveniente da água o sensor a bordo do satélite captará a energia eletromagnética oriunda de quatro fontes explicitada na equação (JENSEN, 2009).

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b \quad (2)$$

Onde:

L_t = Radiância total;

L_p = Radiação atmosférica;

L_s = Reflectância de superfície;

L_v = Reflectância volumétrica;

L_b = Reflectância de fundo.

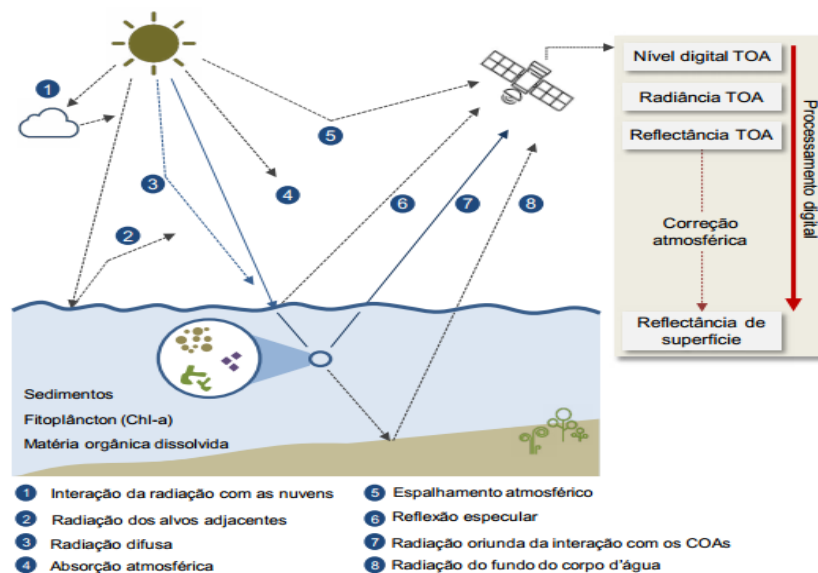
De acordo com Jensen (2009) as interações intrínsecas da energia eletromagnética com água podem ser ordenadas da seguinte forma, radiação atmosférica (L_p), proveniente da radiação que é refletida pelos componentes que constituem a atmosfera, ou seja, não estabelecem contato com o alvo, sendo categorizada como ruído atmosférico. Radiância de superfície (L_s), constituída pela radiação que passa através da atmosfera para ser refletida após o contato com a lamina d'água, penetrando cerca de 1 mm. Reflectância volumétrica (L_v), caracterizada como a porção da radiação eletromagnética que penetra a superfície da água, mas não estabelece contato com o fundo subsidiando assim a resposta espectral dos componentes opticamente ativos em suspensão na coluna d'água. Reflectância de fundo (L_b), oriunda da

fração da energia eletromagnética incidente que penetra na camada mais profunda do corpo d'água e retorna para o sensor.

A quantidade de energia refletida sofre variação de acordo com as condições da superfície da água (plana ou ondulada), suscetível a influência do vento que aumenta consideravelmente a proporção de energia refletida de forma especular, e por consequência diminui a resposta da coluna d'água que pode variar de 2 a 100% do total da energia incidente (KIRK, 1985).

O processo de aquisição de informação espectral do meio aquático é diretamente influenciado por uma série de fatores, tal como a as propriedades espectrais intrínsecas da água e dos componentes opticamente ativos em suspensão (COAs), definidos como toda e qualquer substância presente na trajetória do feixe de energia eletromagnética que interaja com o mesmo, ocasionando na sua absorção ou espalhamento de acordo com suas características espectrais inerentes (Figura 2.6). O estudo destas propriedades se torna possível estimar sua contribuição para a resposta espectral do meio e até mesmo mensurar sua concentração (BARBOSA, 2019).

Figura 2.6 - Interação da radiação eletromagnética com a água.



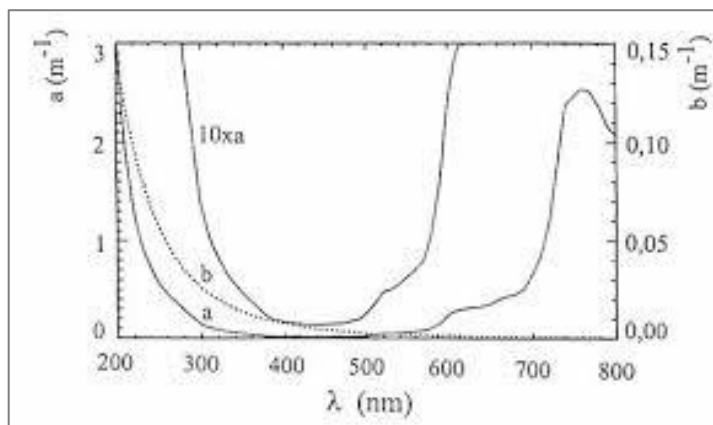
Fonte: Barbosa 2019

A parte de um corpo de água que recebe luz solar em quantidade suficiente para que ocorra a fotossíntese é chamada de zona eufótica ou fótica. A profundidade da zona eufótica varia de acordo com as condições do meio e é fortemente influenciada pela turbidez da água, a partir do contato da água com a atmosfera até o ponto em que a intensidade da luz chega a 1% da intensidade existente na superfície. A espessura da zona fótica oscila de acordo com a

atenuação da radiação incidente na coluna d'água, tal variação pode ir de poucos centímetros em lagos eutrofizados a até 200 metros de profundidade em mar aberto (ESTEVES, 1998).

Dentre as propriedades ópticamente ativas da água é indispensável transcorrer sobre as características da água em sua forma pura (molécula H₂O), pois suas propriedades espectrais são consideradas constantes, apresentando baixa absorção nos comprimentos de onda na faixa do visível, aumentando no infravermelho próximo em função do estado de vibração fundamental das moléculas de água. O processo de espalhamento da água pura ocorre de forma inversa com seu pico no comprimento de onda do azul de crescendo em direção ao infravermelho (figura 2.7) (PEREIRA FILHO, 2009).

Figura 2.7 - Curva de Absorção e Espalhamento da luz na água pura.



Fonte: MOBLEY, 1994

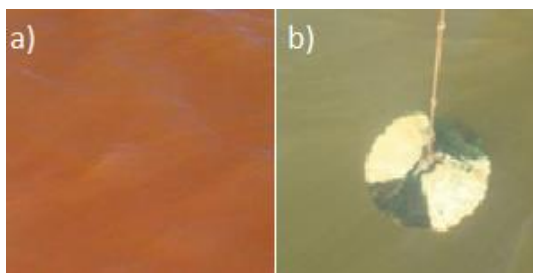
2.6.2. Efeitos da Presença da Turbidez na Reflectância da Água

A turbidez de uma amostra de água é caracterizada como o grau de atenuação que a energia incidente sofre ao atravessar a coluna d'água, o que a categoriza como uma das propriedades físicas da água, causada pela redução de sua transparência pela presença de matéria em suspensão composta por partículas orgânicas e inorgânicas (BOLLMANN et al, 2005; SILVA et al, 2008).

De modo geral os componentes orgânicos e inorgânicos apresentam baixa absorção na faixa do vermelho e apresentam aumento da absorção com o encurtamento do comprimento de onda, no entanto pesquisas realizadas por DALL'OLMO et al. (2006) constataram que existe uma alta correlação da turbidez com o tipo de lago em que está inserida, o que pode fazer com que a matéria em suspensão apresente respostas espectrais diferentes de acordo com o contexto em que estão inseridas.

A turbidez possui alta relação com a cor aparente da água, explicitado por meio da figura 2.8, a qual apresenta duas fotografias com valores altos de turbidez em a e baixos em b respectivamente, nas quais é visível que em circunstâncias de alta turbidez há uma tendência da água apresentar um matiz mais avermelhado, em contrapartida, baixos valores registram logicamente um aumento na profundidade da zona fótica e a água exibe uma tonalidade verde (PEREIRA FILHO, 2019).

Figura 2.8 - Fotografias de campo em datas de alto e baixo valor de turbidez.



a) Foto do campo em que foram registrados altos valores de turbidez;
b) foto do campo em que foram registrados baixos valores de turbidez.

Uma das principais consequências da dispersão da radiação para o ambiente aquático é a redução na profundidade da zona fótica, devido ao movimento da radiação dispersa, aumentando a chance de a energia ser absorvida ou refletida de volta para a atmosfera, podendo representar até 3% do total da radiação presente na coluna d'água (ESTEVEZ, 1998).

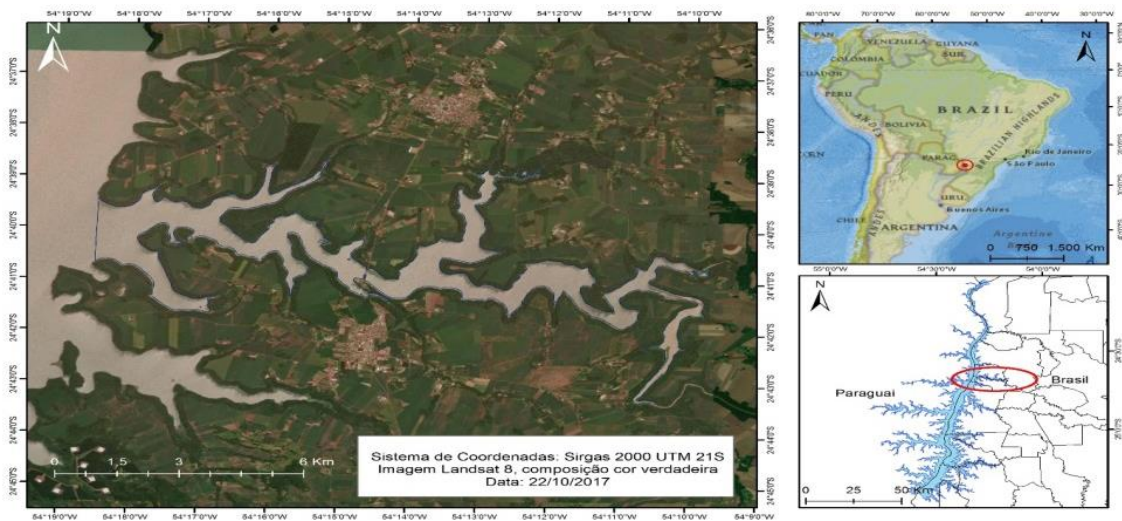
No entanto, para a realização das medidas de concentração de sedimentos em suspensão bem como suas dimensões se fazem necessários levantamentos de campo aliando o processo de nefelometria com a radiometria. Por meio das quais é possível identificar que a medida que há um aumento nos índices de turbidez do meio aquático a resposta espectral da água tende a crescer em todos os comprimentos de onda de acordo com a medida e composição químicas das moléculas em suspensão (JENSEN, 2009).

3. METODOLOGIA

3.1 Área De Estudo

A dissertação esteve relacionada ao estudo de uma área piloto do reservatório de Itaipu definida pelo compartimento aquático do Rio São Francisco Verdadeiro (SFV). Localizado na margem esquerda do reservatório de ITAIPU, entre os municípios de Entre Rios do Oeste e Pato Bragado no oeste do estado do Paraná (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Mapa base National Geographic, IBGE e imagens GeoEye.

O padrão de drenagem predominante é dendrítico e sub-dendrítico, apresentando densidade de drenagem baixa, de valor médio de 0,65 km². Sob a perspectiva do aspecto geológico a bacia do SFV situa-se no interior da Bacia Sedimentar do Paraná, formada predominantemente por rochas basálticas da Formação Serra Geral, oriundas de derrames vulcânicos ocorridos durante o período Cretáceo (145 milhões e 100,5 milhões de anos) (MINEROPAR, 2001; IBGE, 2016).

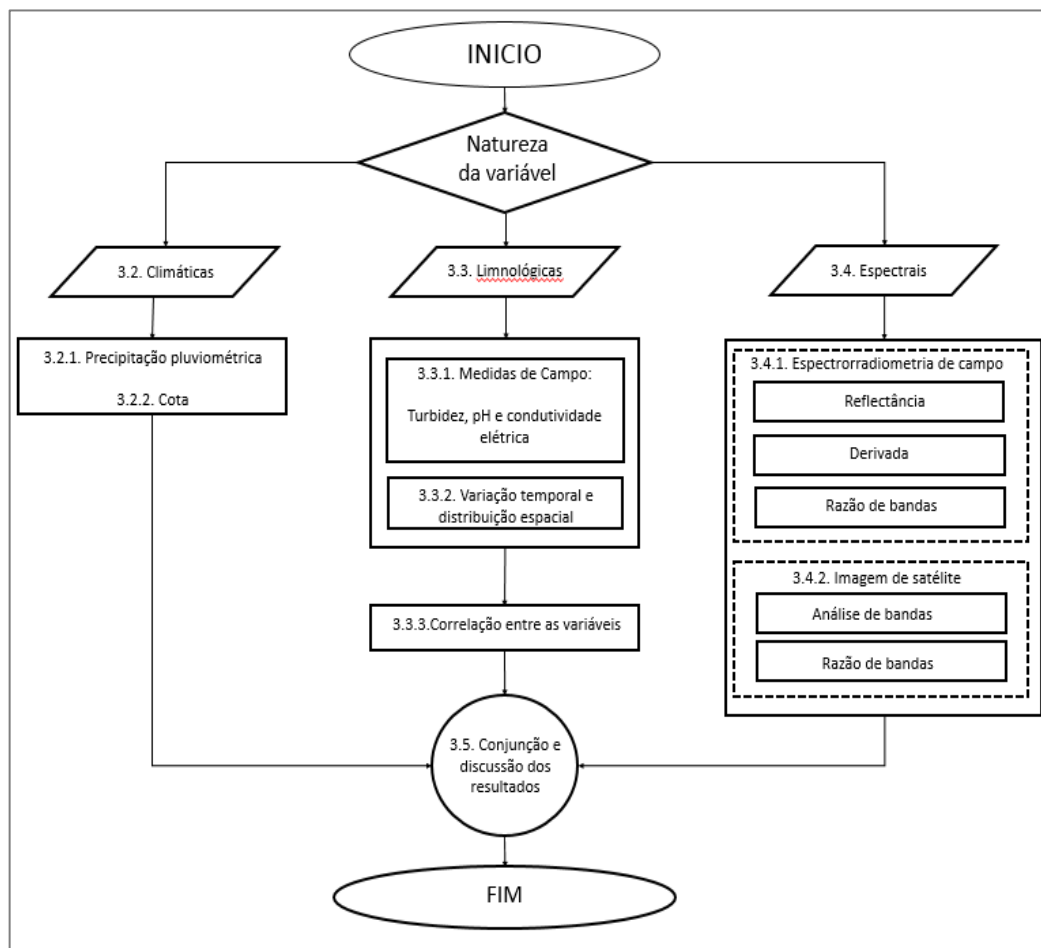
A bacia hidrográfica com área de 2.219,11km² abrange os municípios de Pato Bragado, Entre Rios do Oeste, Quatro Pontes, Marechal Cândido Rondon, Santa Helena, São José das Palmeiras, São Pedro do Iguaçu, Toledo, Ouro Verde do Oeste, Santa Tereza do Oeste, Cascavel (IBGE, 2016).

O compartimento do SFV apresenta superfície aproximada de 21,5 km², largura mínima de 0,2 km e máxima de 1km e extensão de 23 km. O clima da região é do tipo temperado úmido com verão quente (CFa), de acordo com a classificação climática de Köppen, sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia, proposta em 1900 pelo climatologista alemão Wladimir Köppen. As atividades desenvolvidas na área são predominantemente rurais com o cultivo da soja, milho e trigo. Em menor escala são desenvolvidas as atividades da bovinocultura, suinocultura e avicultura (IBGE, 2016).

As missões de campo foram realizadas em conjunto entre a Itaipu Binacional, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e a Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC) sob o convênio 4500034629. A vigência do projeto foi entre agosto de 2015 e agosto de 2018. O projeto foi desenvolvido em quatro frentes principais, uma que caracteriza a natureza climática presente no rio São Francisco Verdadeiro (SFV) do lago Itaipu, outra

consistiu no levantamento a campo de variáveis limnológicas e o terceiro na amostragem da reflectância dos componentes opticamente ativos da água a partir de dados orbitais e de campo (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Fluxograma de atividades.

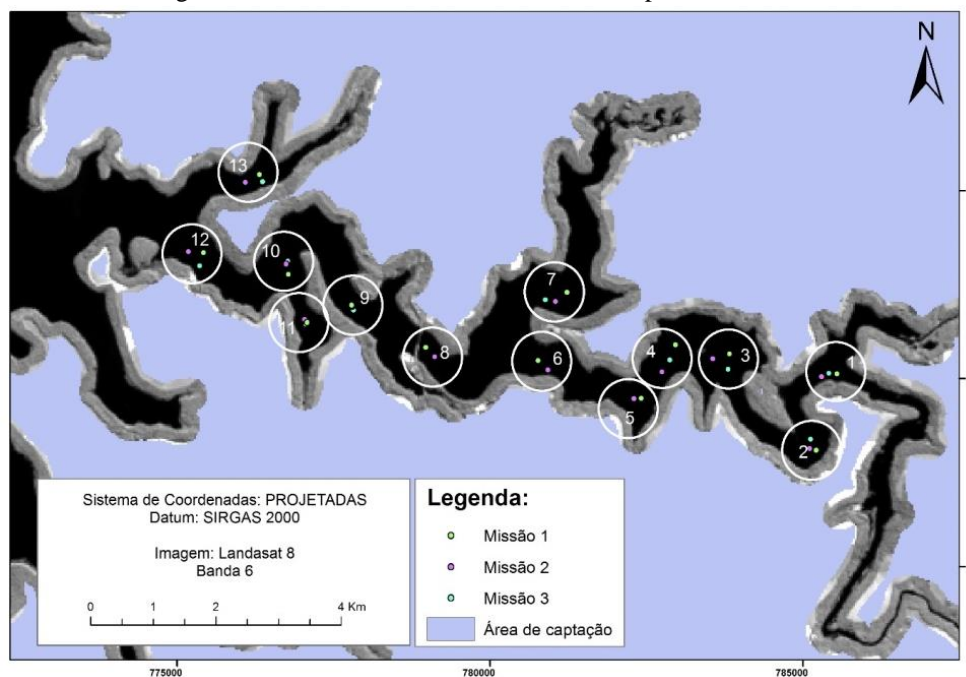


Fonte: Autor

As missões de campo ocorreram concomitantemente às passagens do satélite em 3 datas, no intervalo de agosto de 2016 a julho de 2017, nas datas de 11 de agosto de 2016, 27 de agosto de 2016 e 11 de junho de 2017. Para a seleção das datas em que as missões de campo seriam realizadas foi necessário que as suas condições climáticas fossem favoráveis de forma que o dia necessitaria apresentar o céu aberto sem nuvens ou vento forte.

Em cada missão de campo foram selecionados 13 pontos amostrais, devidamente georreferenciados e distribuídos de forma representativa ao longo do SFV (PEREIRA FILHO, 2005). O levantamento de campo gerou um banco de dados de amostras, que foram coletadas em 3 níveis de profundidade, superficial, 1x Secchi e 3x Secchi (Figura 3.3). Sequencialmente, os dados coletados em campo foram tabelados e armazenados em banco de dados geográfico.

Figura 3.3 - Cenário de coleta no SFV dos 13 pontos amostrais.



Fonte: Imagem de 21/07/2017 proveniente do banco de dados da USGS.

3.2. Variáveis Climáticas

3.2.1. Precipitação Pluviométrica

Os dados de precipitação foram obtidos por meio da plataforma do Instituto das Águas do Paraná implementado no ano de 2009, como parte da Secretaria Estadual do Meio Ambiente, substituindo a Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA). O Instituto das Águas do Paraná é um órgão executivo e gestor do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SEGRH/PR que dispõem de diversas estações meteorológicas ao longo do estado do Paraná (Figura 3.4)

Figura 3.4 - Mapa de localização das estações fluviométricas na bacia do SFV.



Fonte: Autor

As estações pluviométricas do Instituto das Águas do Paraná têm a sua coleta de dados realizada por meio de pluviômetros ou pluviógrafos de registro automatizado disponíveis online na forma de relatórios das precipitações diárias, mensais e anuais, as quais foram especializadas de forma gráfica para caracterizar o regime pluviométrico presente na área de estudo e posteriormente analisar a sua relação com a turbidez da água.

3.2.2. Dados de Cota

Para a análise do nível da água no compartimento aquático do SFV é essencial estabelecer a sua relação com o reservatório da usina hidroelétrica de Itaipu que tem como fatores reguladores do seu nível as necessidades intrínsecas a produção de energia. Para tanto, os dados de cota do reservatório de Itaipu são adquiridos por meio da Agência Nacional de Águas (ANA), que possui um banco de dados online em que constam as informações das represas do país o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR).

O SAR encontra-se operacional oficialmente desde 2014 provendo informações operacionais dos principais reservatórios do país com o objetivo de subsidiar gestores de recursos hídricos a tomarem medidas para garantir a segurança hídrica nas suas respectivas regiões. Com base nos dados do SAR foi identificada a variação do nível da água no reservatório de Itaipu e a sua relação com o SFV e a turbidez.

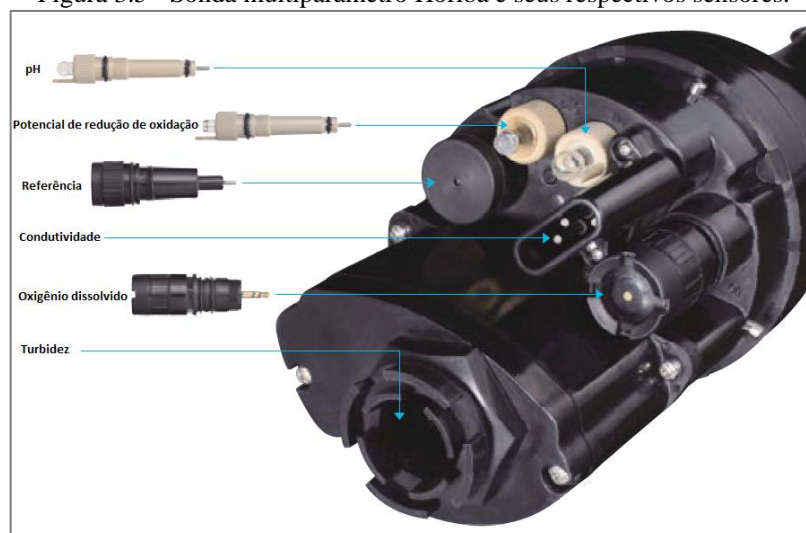
3.3.Variáveis Limnológicas

3.3.1. Dados de Campo

O processo de levantamento de campo teve início com a distribuição espacial dos pontos de coleta, de forma que fossem dispersos ao longo do SFV de forma equidistantes e que melhor representasse o compartimento aquático, tendo o número de missões limitado pelas condições climáticas e amplitude orçamentária do convenio. O total de pontos amostrais foi subdividido de acordo com a sua localização, sendo 10 pontos localizados no curso principal do SFV e 3 nos seus tributários localizados em áreas adjacentes.

Como parte do convênio do laboratório com a Itaipu os dados de campo foram disponibilizados pelo setor de análises ambientais da Itaipu, que para o processo de leitura das amostras de água empregou a sonda multiparâmetro (Horiba - U53). A sonda é equipada com os instrumentos necessários para a obtenção das medidas de turbidez (nefelometria), oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, potencial de redução de oxidação e potencial hidrogeniônico (pH) (Figura 3.5). A sonda multiparâmetros U-53 da HORIBA está equipada para medir e gravar numa memória interna dados de diversos parâmetros simultaneamente com uma única sonda (HORIBA, 2018).

Figura 3.5 - Sonda multiparâmetro Horiba e seus respectivos sensores.



Fonte: Autor

A turbidez também foi identificada em três profundidades distintas, a primeira em nível sub-superficial, outra na profundidade do disco de Sechi (DS) e a última considerou-se três vezes a profundidade do DS, alcançando o limite da zona fótica onde está disponível apenas

1% de energia radiante, com objetivo de identificar a sua variação da variável na coluna d'água (APHA, 2012).

3.3.2. Espacialização das Variáveis

A espacialização dos dados de campo (turbidez, pH e Condutividade) foi gerada por meio da inserção dos valores das variáveis no banco de dados do software de geoprocessamento ArcGis 10.2. Uma tabela de atributos foi construída com os dados pontuais associados à sua localização. Posteriormente os dados foram submetidos a um processo de interpolação pelo inverso do quadrado da distância (Inverse Distance Weighting - IDW) tendo o seu resultado subdividido em 6 classes temáticas para melhor identificação de seu contexto com base na amplitude apresentada pelos dados.

3.3.3. Correlação Entre as Variáveis

Os dados de campo foram organizados e tabelados no software Excel para sequencialmente serem submetidos aos testes estatísticos. Os testes estatísticos empregados no processo foram a correlação, que tem o objetivo de avaliar o grau de associação existente entre duas variáveis, a dispersão que consiste na avaliação do quanto os dados diferem e se distanciam do seu valor central e a regressão que informa que fração da variabilidade de uma característica é explicada estatisticamente pela outra variável (LOPES et. al, 2014; YU et. al, 2014).

3.4. DADOS ESPECTRAIS

Os dados provenientes de sensoriamento remoto tiveram duas fontes de obtenção a espectrorradiometria de campo e imagens orbitais de sensores abordo de plataformas de satélite, ambas utilizaram a reflectância. O primeiro foi realizado com o emprego do radiômetro ASD modelo FieldSpec e para o segundo foi optado pela plataforma Landsat 8 sensor Operational Land Imager (OLI), por sua amplitude espectral, imagens com boa resolução radiométrica (8 bits) e por sua resolução temporal que disponibiliza a revisita na área no intervalo de 16 dias.

3.4.1. Espectrorradiometria de Campo

A radiometria de campo foi obtida por meio das medidas da reflectância com o radiômetro ASD modelo FieldSpec. O radiômetro da marca ASD modelo FieldSpec disponibilizado pela ITAIPU realiza leitura de dados na faixa do visível, infravermelho do espectro eletromagnético. Mesmo dispor desta ampla faixa espectral optou-se por trabalhar

com o intervalo de 400 a 900 μm devido ao fato da intensa presença de ruído nos comprimentos de onda fora deste intervalo espectral. Nesta faixa de operação a resolução espectral nominal é de 3 μm , mas o produto final é disponibilizado com uma resolução de 1 μm . A imagem do aparelho de radiometria é mostrada na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Foto do radiômetro ASD modelo FieldSpec.



Fonte: Autor

A análise dos dados provenientes do espectrorradiômetro teve o seu foco na identificação dos comprimentos de onda com melhor correspondência com a reflectância espectral, derivada de primeira ordem e razão de bandas com os dados de turbidez obtidos em campo tal como, realizado por CHEN et al. (1992) e MORENO-MADRINAN et al. (2010).

3.4.2. Imagens de Satélite

Para o processo de análise de imagens de satélite da área de estudos optou-se pelo sensor OLI da plataforma Landsat8. Dentre as bandas disponibilizadas pelo sensor foram selecionadas as bandas de 2 a 7. A plataforma dispõe de um intervalo de revisita de 16 dias, intervalo que foi levado em consideração para o planejamento das datas das missões de campo com objetivo de realizá-las em datas em que o satélite faça o imageamento da área de estudo.

As imagens orbitais referentes às datas das missões de campo foram amostrados os pixels correspondentes aos pontos onde foram realizadas as amostras de campo para posteriormente relacioná-las com os dados de laboratório. O processamento digital das imagens foi realizado no software Envi 5.4. As imagens foram disponibilizadas pela plataforma online da instituição de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (USGS) com suas respectivas correções fornecidas em valores de reflectância de superfície.

Os dados orbitais passaram por análise visando identificar as correlações banda a banda e a razão de bandas. Procedimentos desta natureza foram adotados por MORENO-MADRINAN et al. (2010).

3.5. Conjunção e Discussão

Análise integrada das variáveis climáticas, limnológicas e espectrais teve por objetivo de identificar as relações da turbidez da água com os seus fatores reguladores. Diferentes proporções das variáveis contribuem para a formação do contexto da coluna d'água do SFV, tendo em vista o caráter multifatorial que dita o comportamento da turbidez foram empregados métodos estatísticos com o objetivo de verificar e mensurar as suas relações com o meio e outras variáveis, para posteriormente implementar modelos matemáticos capazes de estimar a concentração da turbidez da água remotamente.

A análise dos dados de turbidez deu-se por meio da relação estabelecida entre os dados de reflectância levantados a campo com a turbidez obtida por nefelometria. O procedimento abordado para a análise desta relação deu-se seguindo o itinerário apresentado a seguir.

Inicialmente foi realizada a análise da relação entre os dados de radiométrica do intervalo espectral de 400 a 900 μm com a verdade de campo para a implementação do correlograma e da derivada de primeira ordem com a qual também foi implementado o correlograma com a turbidez de campo em um intervalo espectral pré-definido, sequencialmente foi identificado por meio do correlograma da turbidez pela reflectância o comprimento de onda mais indicado para então aliando ao correlograma da derivada de primeira ordem definir um modelo matemático para a estimativa da turbidez.

O emprego da derivada de primeira ordem deu-se com o objetivo de identificar outras faixas do espectro que possam proporcionar informações relacionadas a turbidez e atenuar a interferência gerada pelo albedo. A técnica de análise da derivada tem como vantagem a capacidade de identificar picos de correlação com características menos sensíveis às variações intrínsecas ao meio que interferem nos dados de sensoriamento remoto na forma de constantes aditivas com características espectrais independentes ao longo do espectro. Para a análise dos dados foi optado pela utilização da derivada de primeira ordem, pois a segunda e terceira derivada, progressivamente, apresentam menor sensibilidade as variações espectrais (ODERMATT et. al, 2010; BARBOSA, 2019).

Com o objetivo de testar a correlação com base na razão de bandas foi utilizada a ferramenta Interactive Correlation Environment (ICE) que possibilita a implementação de gráficos de correlação bidimensionais coloridos para análise da colinearidade dos dados. A elaboração do gráfico de correlação bidimensional é uma técnica estatística que permite a quantificação da dependência (correlação) de uma variável dependente sobre as variáveis

independentes. A técnica é amplamente difundida para a estimativa de parâmetros biogeoquímicos como, por exemplo as concentrações de clorofila-a, ficocianina, salinidade do solo, turbidez, tipos de solo e nitrogênio foliar (OGASHAWARA et al, 2014).

Os processos estatísticos empregados foram aplicado de acordo com a natureza da distribuição do conjunto de dados podendo apresentar natureza paramétrica (normal) ou não paramétrica (não normal). Os testes de normalidade são empregados para verificar se a distribuição de probabilidade associada a um conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal, para tanto, a normalidade foi testada pelos métodos de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Ryan-Joiner.

A correlação também foi realizada levando em conta a normalidade dos dados, de forma que, dados paramétricos tiveram sua correlação realizada pelo método de Pearson e os dados não paramétrico pelo método de Spearman (GORDON, 1988; LOPES, 2013).

4. RESULTADOS

4.1.1. Turbidez

Os valores mínimos de turbidez na camada superficial apresentaram variação de 1,7 (11/08/16) a 12,6 NTU (11/06/17). No entanto, tal alteração não ocorreu de forma gradual e apresentam em sua maioria valores baixos. Os valores máximos de turbidez apresentaram considerável variação entre as missões de campo, com variação de 9,3 no dia 22/06/15 a 43 NTU em 11/06/17. A tabela 1 mostra dados de análise estatística exploratória da turbidez.

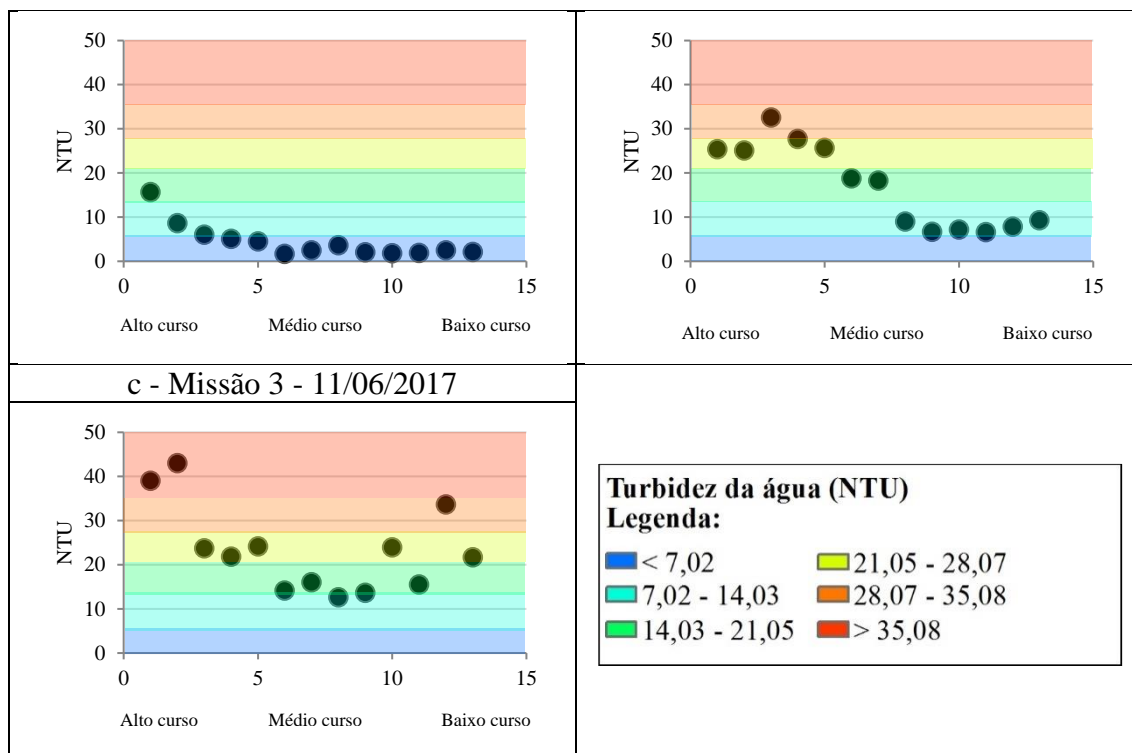
Tabela 1: Dados exploratórios da turbidez ao longo SFV.

Nº da Missão	Data	Mínimo	Máximo	amplitude	Média	Mediana	Desvio padrão	Coef. variação
1	11/08/2016	1,7	15,7	14,0	4,46	3,05	3,95	0,89
2	27/08/2016	6,6	32,6	26,0	16,94	18,3	9,54	0,56
3	11/06/2017	12,6	43	30,4	23,28	21,8	9,42	0,4
Geral		1,7	43		14,89	13,1	11,11	0,74

Com o objetivo de otimizar a análise dos dados de campo foram definidas classes de turbidez para a melhor visualização da distribuição da variável ao longo do curso do SFV, sendo geradas de acordo com a amplitude encontrada no conjunto de dados e apresentados na forma de gráficos com o valor de turbidez no eixo y e sua posição com relação ao curso no SFV no eixo x (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Turbidez superficial amostrada a campo ao longo do SFV.

a - Missão 1 - 11/08/2016	b - Missão 2 - 27/08/2016
---------------------------	---------------------------



A data de 11 de agosto de 2016 apresenta uma gradual redução na turbidez superficial de acordo com o sentido do fluxo da água, apresentando o valor mais alto no ponto 1 de 15,7 NTU e mais baixo no ponto 6 com 1,7 NTU decrescendo à medida que se aproxima da jusante.

As amostras de campo referentes a data de 27 de agosto de 2016 apresentam três situações distintas. A primeira, no alto curso, com turbidez superior a 25 NTU (amostras 1 a 5), outra situação, no baixo curso, estações amostrais de 8 a 13 com turbidez inferior a 10 NTU e uma terceira situação com valores intermediários em estações amostrais localizadas no setor de médio curso (amostras 6 e 7).

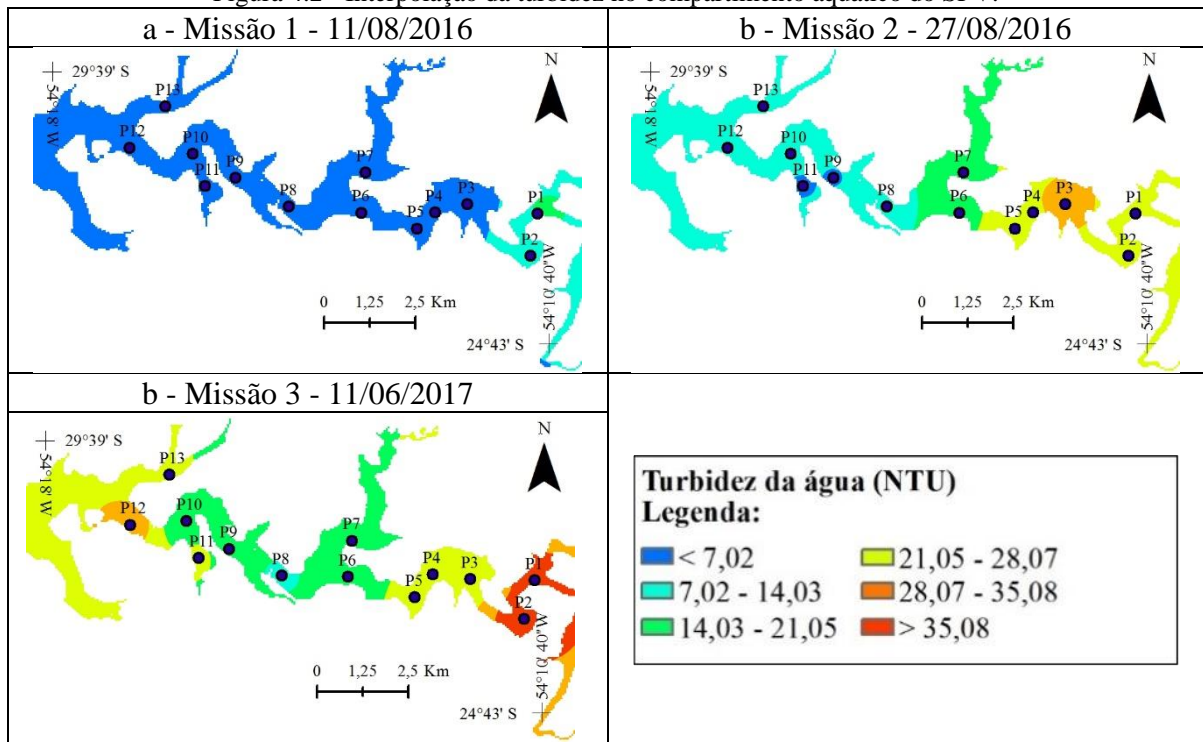
O levantamento realizado em 11 de junho de 2017, revela os menores valores turbidez no setor central do compartimento aquático do SFV. As estações 1 e 2 mostraram valores superiores a 40 NTU. Mas as estações amostrais localizadas no baixo curso também possuem turbidez elevadas quando comparada com a missão anterior. Esta missão pode estar refletindo a influência tanto da água oriunda do corpo principal do reservatório de Itaipu quanto da bacia hidrográfica do SFV.

Por meio da espacialização se fez visível o padrão da turbidez superficial ao longo do SFV, que apresentou o médio curso como a área com os valores mais baixos de turbidez. Tal observação implica na existência de fatores externos ao compartimento aquático do SFV contribuindo para o aumento da turbidez a jusante, como observado na missão 3 (11/06/2017). Tal missão apresentou o valor mais elevado registrado para turbidez durante todo o

levantamento, atingindo 43 NTU no ponto 2 (possivelmente ocasionada devido a precipitação antecedente para a data amostrada).

Com o intuito de retratar e espacializar a verdade de campo oriunda das amostras coletadas optou-se por empregar o método de interpolação do inverso do quadrado da distância (IDW) com a finalidade de proporcionar uma visualização de sua distribuição espacial no compartimento do SFV, gerando mapas que revelam a dinâmica em que o reservatório está inserido no intervalo de tempo proposto (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Interpolação da turbidez no compartimento aquático do SFV.



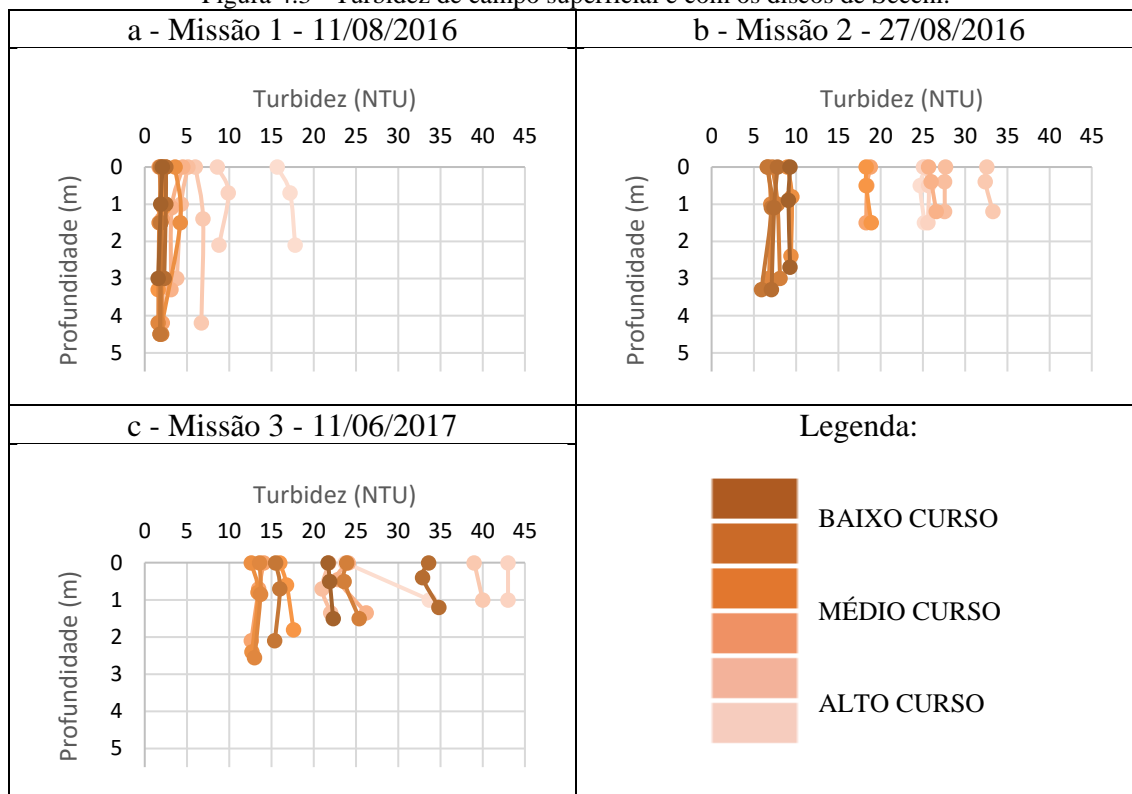
De forma geral a espacialização dos dados de campo revelou um contexto em que os valores de turbidez mais altos oscilam entre o baixo e alto curso e apresentam os valores mais baixos no médio curso, no entanto, é interessante ressaltar que as datas que tiveram os seus valores de turbidez altos no baixo curso também apresentaram uma média superior nas outras partes do compartimento.

4.1.1.1. Dados de Turbidez da Coluna D'água

Com objetivo de melhor caracterizar o contexto em que a coluna d'água está inserida quanto ao comportamento da turbidez foram coletadas amostrada da água em três profundidades distintas, subsuperfície, na profundidade do DS e três vezes a profundidade do DS. A Figura 4.4 mostra a variação da turbidez na coluna da água e permite observar que a

tendência é de diminuir em direção ao baixo curso e, em situações, de maior turbidez (Figura 4.3 c) ocorrer maior variação na coluna de água, frequentemente, aumenta a turbidez na maior profundidade. Este efeito pode estar relacionado com a dinâmica da entrada de água no compartimento aquático.

Figura 4.3 - Turbidez de campo superficial e com os discos de Secchi.



Em 11/08/2016 ocorreu valores mais elevados de turbidez no alto curso (pontos 1 e 2), os quais diminuíram gradualmente no sentido do fluxo da água. Diversas estações amostrais registraram transparência superior a 4 m.

No dia 27/08/2016 verificou-se baixa variação nos valores de turbidez com relação a profundidade, porém os dados apresentam estratificação formando 3 grupos de turbidez, um entre 5 e 10 NTU (baixo curso), outro próximo a 20 NTU, outro próximo a 25 NTU (médio curso) e por último superior a 30 NTU (alto curso).

Dia 11/06/2017 a amostragem foi comprometida devido à ausência de dados nas estações amostrais 1, 2 e 3. O restante das amostras indicou data com elevada turbidez, superiores a 10 NTU.

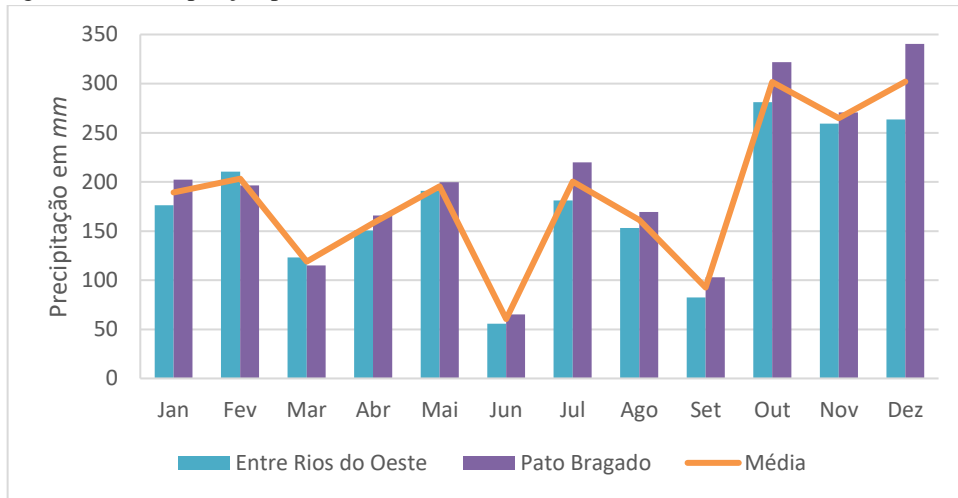
A partir do registro de turbidez dos dados da coluna da água no SFV foi possível traçar algumas considerações. Os valores de turbidez da água na profundidade de 3 DS apresentaram valores mais baixos a jusante e aumentando gradualmente a medida que se deslocavam em

direção a montante. Foi possível constatar que a turbidez apresentou valores altos a jusante, comportamento que não condiz com efeito da sedimentação da matéria em suspensão que teoricamente se intensifica ao longo do curso d'água, o que leva a crer que o SFV sofra influência do reservatório de Itaipu que pode contribuir com o aumento da turbidez do baixo curso na forma de um fluxo no sentido reservatório tributário.

4.1.2. Dados de Precipitação

Com o intuito de aprofundar o entendimento do comportamento da turbidez no reservatório foram adquiridos os dados de precipitação pluviométrica correspondente há os anos de 2015 a 2017 nos municípios de Entre Rios do Oeste e Pato Bragado respectivamente, disponibilizados pelo Instituto das Águas do Paraná, para a melhor caracterização das condições pluviométricas da região de estudo. Em posse dos dados de precipitação mensal da área de interesse foi implementando o gráfico das médias mensais referentes a cada estação de coleta em um intervalo amostral de 3 anos (Figura 4.4).

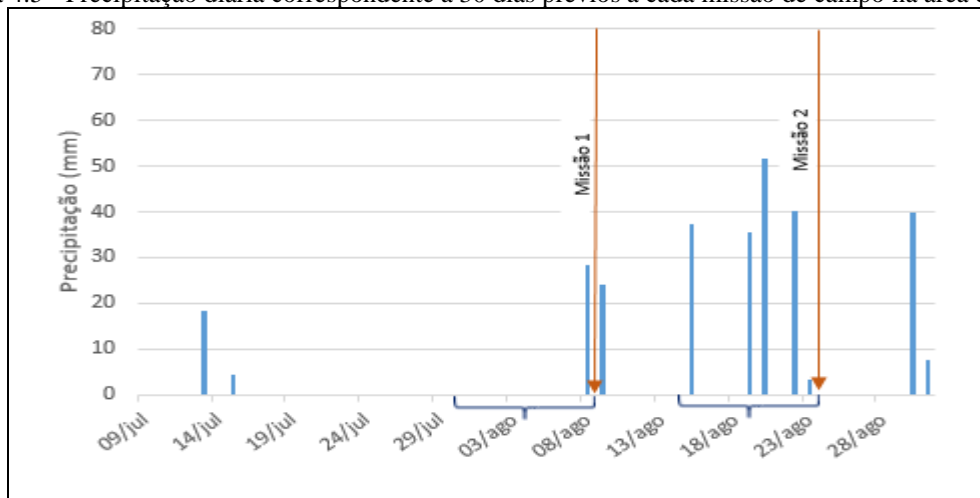
Figura 4.4 - Precipitação pluviométrica média da área do SVF no intervalo de 2015 a 2017.

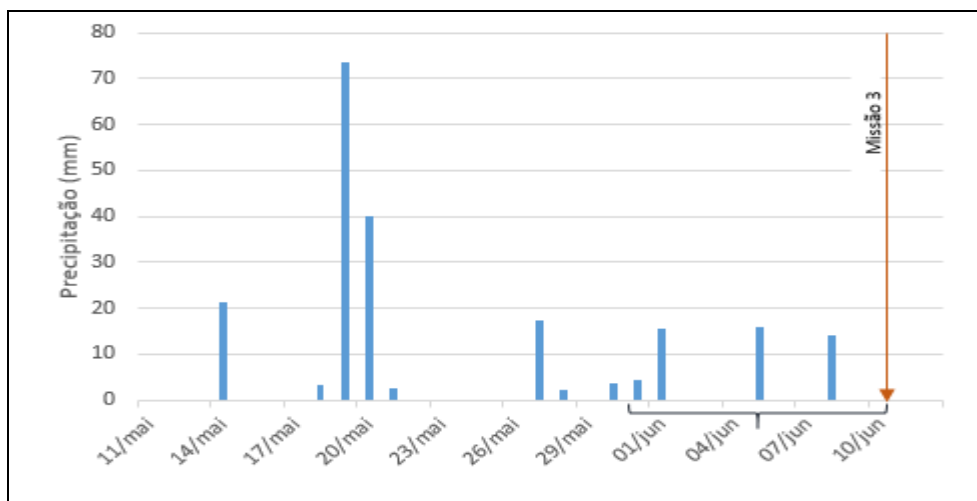


Com base nas informações obtidas pelo gráfico é possível inferir que a precipitação pluviométrica apresenta um padrão sazonal com índices de precipitação mais baixos nos meses de março, junho e setembro. No entanto, ao observar os dados individuais de precipitação mensal constatou-se que em julho ocorreu uma variação superior a 600 mm entre o ano de 2015 (614,6 mm) a 2017 (0 mm), o que atesta a irregularidade na precipitação ocorrida na região.

Observando os dados de precipitação diários no intervalo de 30 dias prévios a cada missão de campo (Figura 4.5) foi possível verificar que a primeira missão de campo apresentou um cenário de pouca chuva com uma precipitação de 28 mm no dia anterior ao levantamento de campo, a segunda missão de campo foi realizada em um intervalo de tempo de alta precipitação somando 158 mm nos 30 dias prévios a missão de campo e a terceira missão

Figura 4.5 - Precipitação diária correspondente a 30 dias prévios a cada missão de campo na área do SFV.

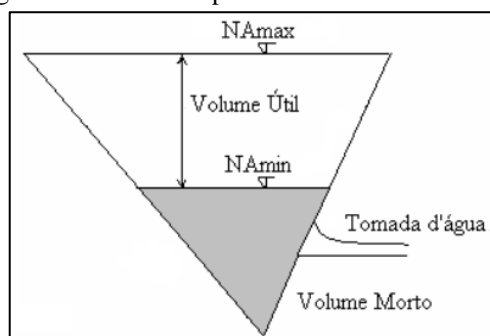




4.1.3. Cota do Reservatório de Itaipu

Uma das principais características de um reservatório é a variação de sua cota. De forma invariável é controlada pelo regime pluviométrico e pelas necessidades hidrelétricas que foram a razão de sua implementação em primeira instância, de forma que sua vazão ocorre visando a manutenção de sua cota operacional (Figura 4.6). No caso da ITAIPU a cota operacional é de 220 metros. No período de janeiro de 2012 a agosto de 2017 a variação da cota oscilou de 221,46 a 215,34 metros, devido aos altos índices de precipitação ou estiagens prolongadas.

Figura 4.6 - Volume operacional de um reservatório.



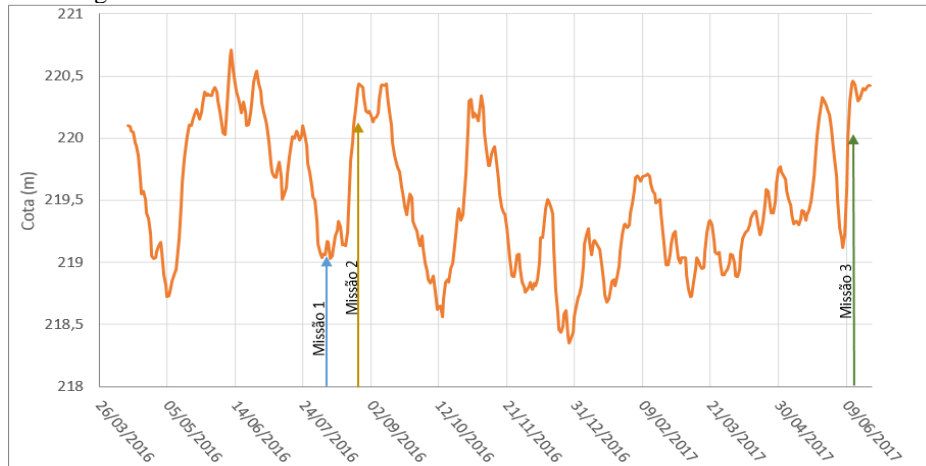
Fonte: Lopes et. al.

Tais valores de cota estão associados a eventos extremos de cheias e secas, com variação de 6 metros entre os extremos. Devido as dimensões do reservatório de ITAIPU esta diferença de cota corresponde a um grande volume de água o que tem impacto direto no metabolismo do sistema aquático. O volume do reservatório na cota de operação é de 29.000.000.000 m³ (ANA, 2009).

Com a finalidade de acompanhar o contexto apresentado pela cota ao longo do SFV foram adquiridos dados de cota referentes ao reservatório de ITAIPU para o intervalo de 26 de março 2016 até 15 de junho de 2017. Este período foi definido para realizar a análise de

precipitação pluviométrica em período anterior a amostragem de campo. A Figura 4.7 mostra a variação da cota do reservatório para o período de estudo com indicação dos dias de coleta de dados.

Figura 4.7 - Cota do reservatório de ITAIPU durante o intervalo de estudo.

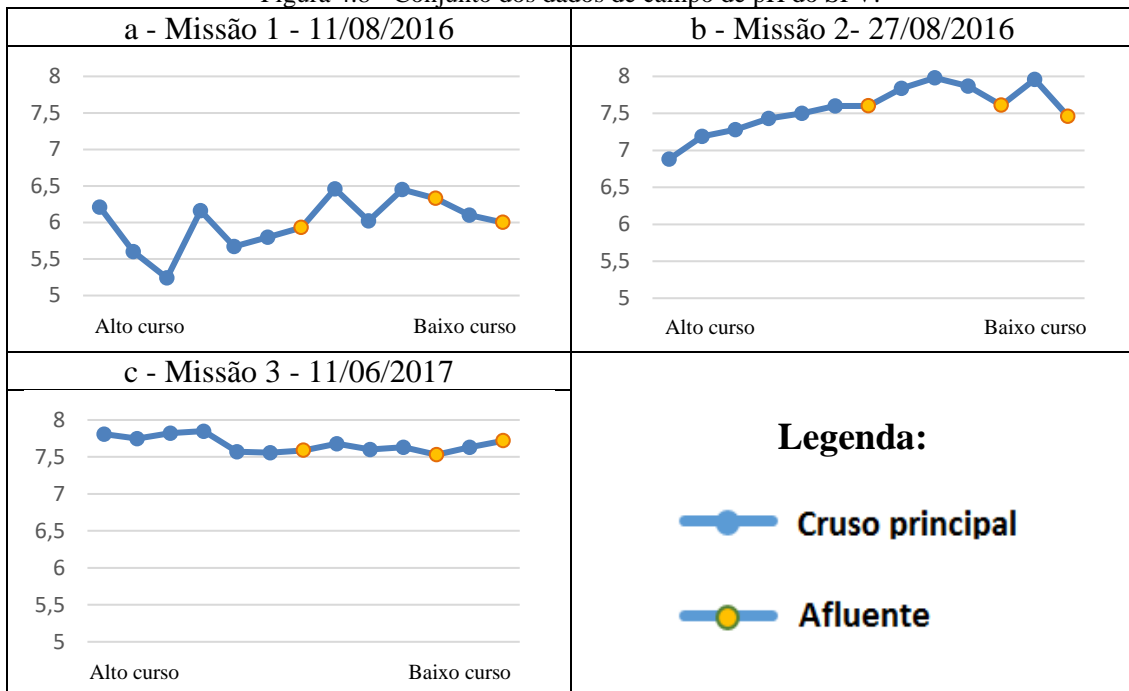


O aumento da cota do reservatório está diretamente relacionado ao regime pluviométrico em sua área de captação, que além de aumentar a cota do reservatório tem o papel de transportar nutrientes para o compartimento aquático. Embora tal processo seja natural ele é afetado por diversas variáveis que podem influenciar o equilíbrio dinâmico do meio acarretando na degradação do ambiente aquático e por consequência o ecossistema presente. Esta situação pode proporcionar impactos direto no nível trófico do compartimento do SFV.

4.1.4. Análise dos Dados de Campo de pH

Os dados de campo referentes ao potencial hidrológico da água obtidos por meio da sonda multiparâmetro U-53 Horiba no sentido de alto para baixo curso. Os dados foram analisados por data de coleta e posição no reservatório, de forma que, os pontos coletados no curso principal do SFV foram sinalizados em azul e os pontos amostrados em áreas periféricas em amarelo. Desta forma foi possível analisar os dados de forma mais homogênea e representativa (Figura 4.8).

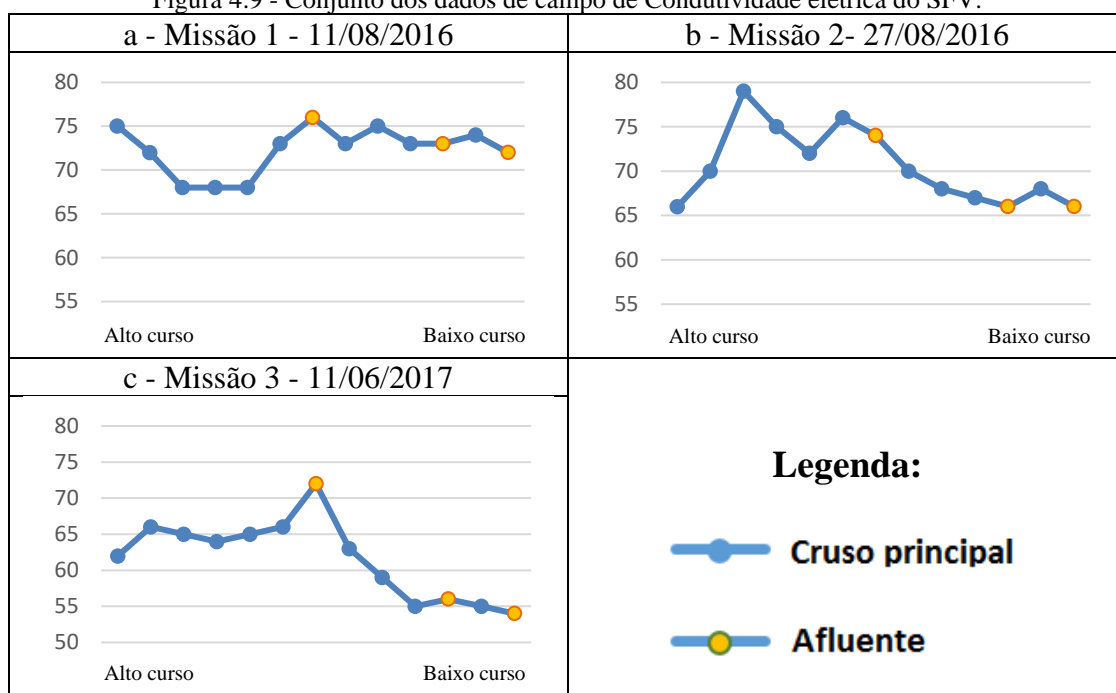
Figura 4.8 - Conjunto dos dados de campo de pH do SFV.



4.1.5. Análise dos Dados de Campo de Condutividade Elétrica

A análise dos dados de condutividade elétrica foi implementada seguindo a mesma metodologia utilizada para o pH, com a estratificação dos pontos localizados em regiões periféricas ao curso principal do SFV. A condutividade elétrica oscilou entre 55 e 80 uS/cm considerando-se as três missões de campo. Em duas missões (Figura 4.9 b e 4.9 c) o setor do baixo curso foi menor do o restante do compartimento. A maior variação ocorreu no alto curso.

Figura 4.9 - Conjunto dos dados de campo de Condutividade elétrica do SFV.



4.1.6. Dados Provenientes de Sensoriamento Remoto

4.1.6.1. Dados Provenientes de Plataformas de Satélite

A aquisição de imagens orbitais do satélite Landsat 8, o sensor Operational Land Imager (OLI) foi realizada com o auxílio do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS), em reflectância, órbita/ponto 224/77 e efeito atmosférico e geométricos previamente corrigidos.

A tabela 2 apresenta as datas de cada missão de campo, a qualidade das imagens de satélite (adquiridas em data concomitante a missão de campo) e o número de amostras realizadas e em cada trabalho de campo.

Tabela 2: Missões de campo e qualidade das imagens de satélite utilizadas.

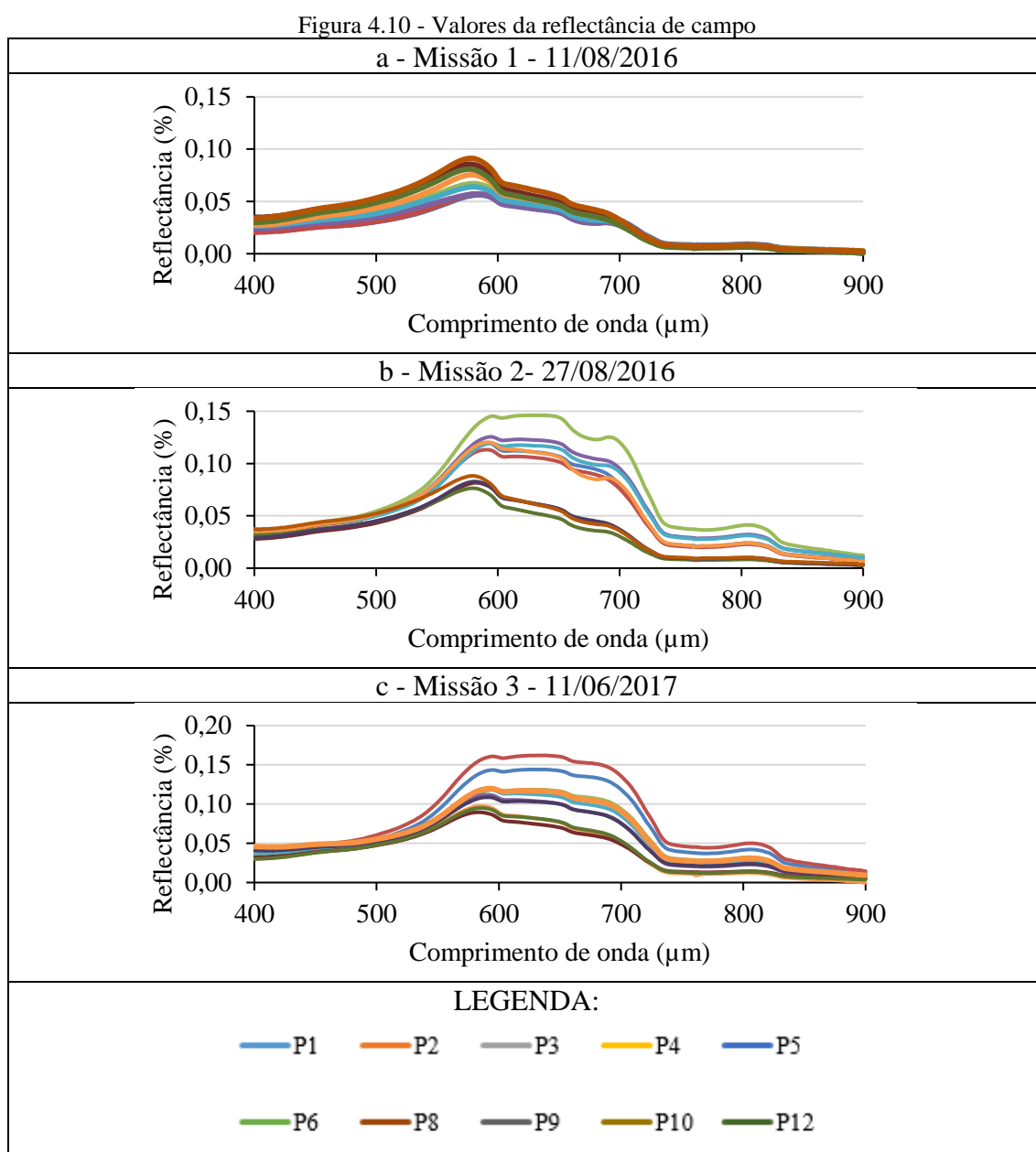
Missão de campo	Data	Qualidade das Imagens de satélite	Radiometria de campo
1	11/08/2016	BOA	13
2	27/08/2016	BOA	13
3	11/06/2017	BOA	13

As imagens de satélite utilizadas para análises dos dados de reflectância foram as oriundas do sensor OLI/Landsat 8. As bandas espectrais utilizadas deste sensor foram as da banda 2 (azul) até a banda 7 (SWIR 2). Os dados orbitais foram submetidos a análise observando-se as correlações banda a banda e a razão de bandas. Procedimentos desta natureza

são adotados por HAN e RUNDQUIST (1997), MORENO-MADRINAN et al. (2010), LE et al. (2011).

4.1.6.2. Dados Provenientes de Espectroradiometria de Campo

As medidas reflectância de campo foi realizada no intervalo espectral de 400 a 900 μm . Cada amostra de reflectância foi obtida a partir da média de dez leituras conforme trabalhos realizados por Lopes et al. (2014). A figura 4.10 apresenta a reflectância das treze estações amostrais referentes as três missões de campo.



Observa-se que a primeira missão apresenta menores albedos e os espectros são mais homogêneos em relação as estações amostrais. As missões seguintes apresentaram maior heterogeneidade dos espectros com muitas amostras com intensa reflectância na faixa do vermelho do espectro eletromagnético.

4.2. Análise dos Resultados

4.2.1. Relação da Turbidez Com a Chuva e a Cota

A análise do regime pluviométrico representa um importante fator de interferência na coluna d'água e está intrinsecamente relacionada com a variação da cota no reservatório, que devido a sua dimensão tem uma contribuição expressiva no contexto do SFV em relação a turbidez da água.

Conforme a Figura 4.6 observou-se que houve forte relação entre a chuva e turbidez. A missão de campo do dia 11 de agosto de 2016 apresentou média de turbidez de 4,46 NTU (Tabela 4.1) com chuva acumulada nos dois meses antecedentes de 123,55 mm enquanto que a precipitação pluviométrica entre os dias 11 e 27 de agosto foi mais intensa com valor acumulado de 155,5 mm. Este quadro proporcionou aumento da turbidez para 16,94 NTU.

A terceira missão (11 de junho de 2017) o efeito da chuva sobre a turbidez foi ainda mais intenso. A turbidez média daquela missão de campo foi de 23,28 NTU como consequência de 398 mm chuva nos meses de abril e maio daquele ano.

Este cenário esteve relacionado com a cota altimétrica do nível da água no SFV. A missão 1 foi realizada na menor cota, de aproximadamente 219 metros. Portanto, esteve relacionada com o período de dois meses antecedente com menor precipitação pluviométrica em relação aos trabalhos de campo realizados. A chuva ocorrida entre as duas primeiras missões (123,55 mm) foi suficiente para alterar a cota para mais de 220 m. O período chuvoso anterior a terceira missão (398 mm) também proporcionou cota elevada do SFV, acima de 220 m.

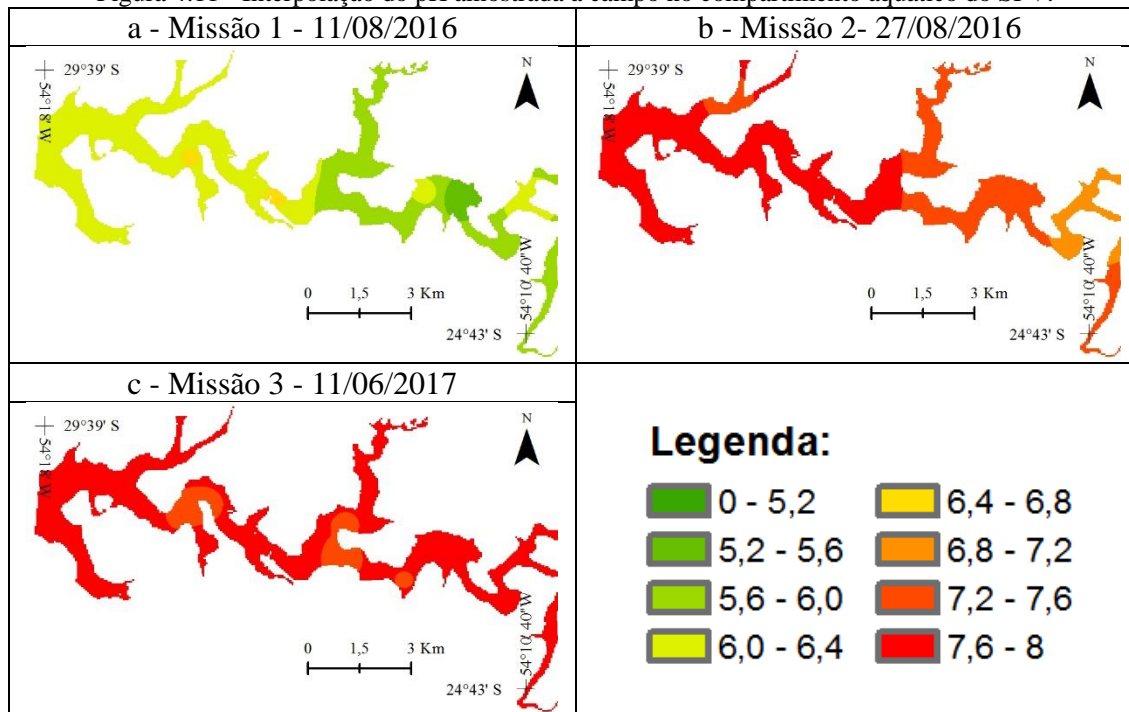
4.2.2. Análise da Espacialidade das Variáveis

4.2.2.1. pH

Os dados de campo referentes ao potencial hidrogeniônico apresentaram um contexto semelhante a turbidez. O pH da missão 1 também foi menor em relação as demais missões

(Figura 4.12 a). A terceira missão foi a que apresentou maiores valores de pH (Figura 4.12 c). A espacialidade do pH das missões de campo pode ser verificada na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Interpolação do pH amostrada a campo no compartimento aquático do SFV.

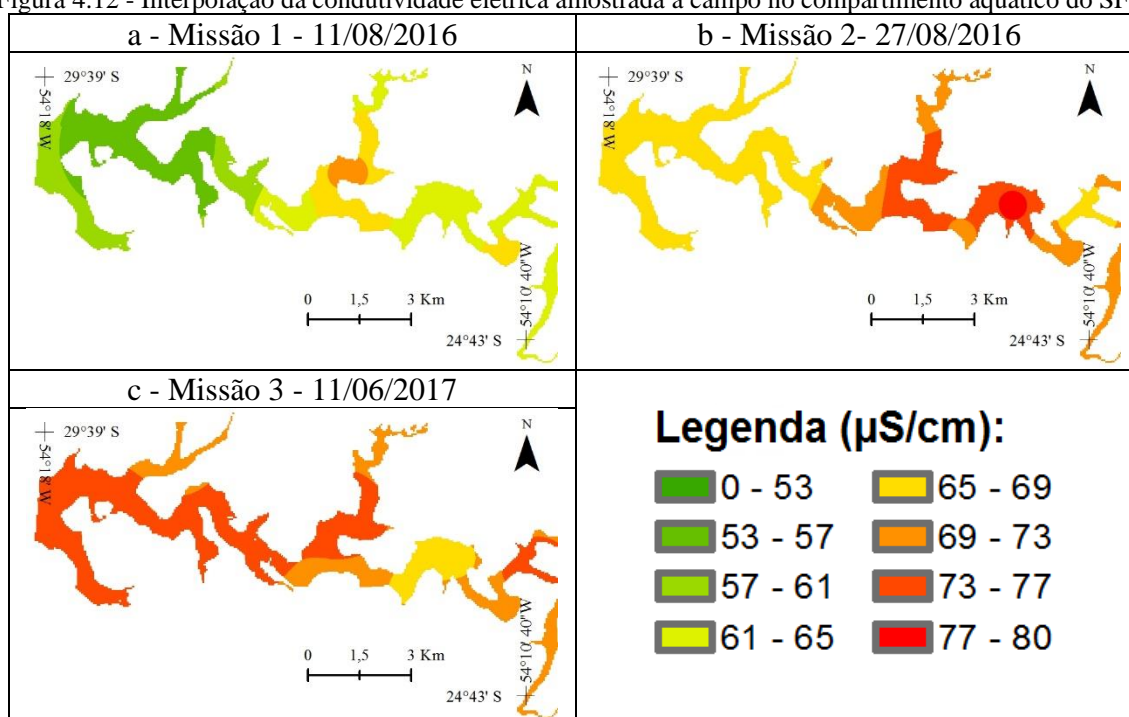


A correlação entre turbidez e pH não foi significativa. Os dados de pH não apresentaram normalidade o que tornou necessário que sua correlação fosse realizada pelo método de Spearman, não paramétrico, (KOWALCZYK, 2004). A correlação não obteve um valor expressivo (0,224) o que demonstra inexistência de uma relação entre estas variáveis.

4.2.2.1. Condutividade Elétrica

A espacialização dos dados de campo referentes a condutividade elétrica se deu seguindo a mesma metodologia aplicada para a interpolação do pH. A condutividade elétrica também reflete a situação da turbidez. De forma geral houve aumento de seu valor entre a primeira e última missão de campo. Observa-se que houve aumento da variável no sentido do fluxo da água no SFV com maiores valores no alto curso.

Figura 4.12 - Interpolação da condutividade elétrica amostrada a campo no compartimento aquático do SFV.



A condutividade elétrica apresentou um comportamento semelhante ao pH, no aspecto da normalidade dos dados, mas sua correlação com a turbidez foi inversamente proporcional (-0,441) e também não significativa.

4.2.3.1. Análise da Reflectância de Campo

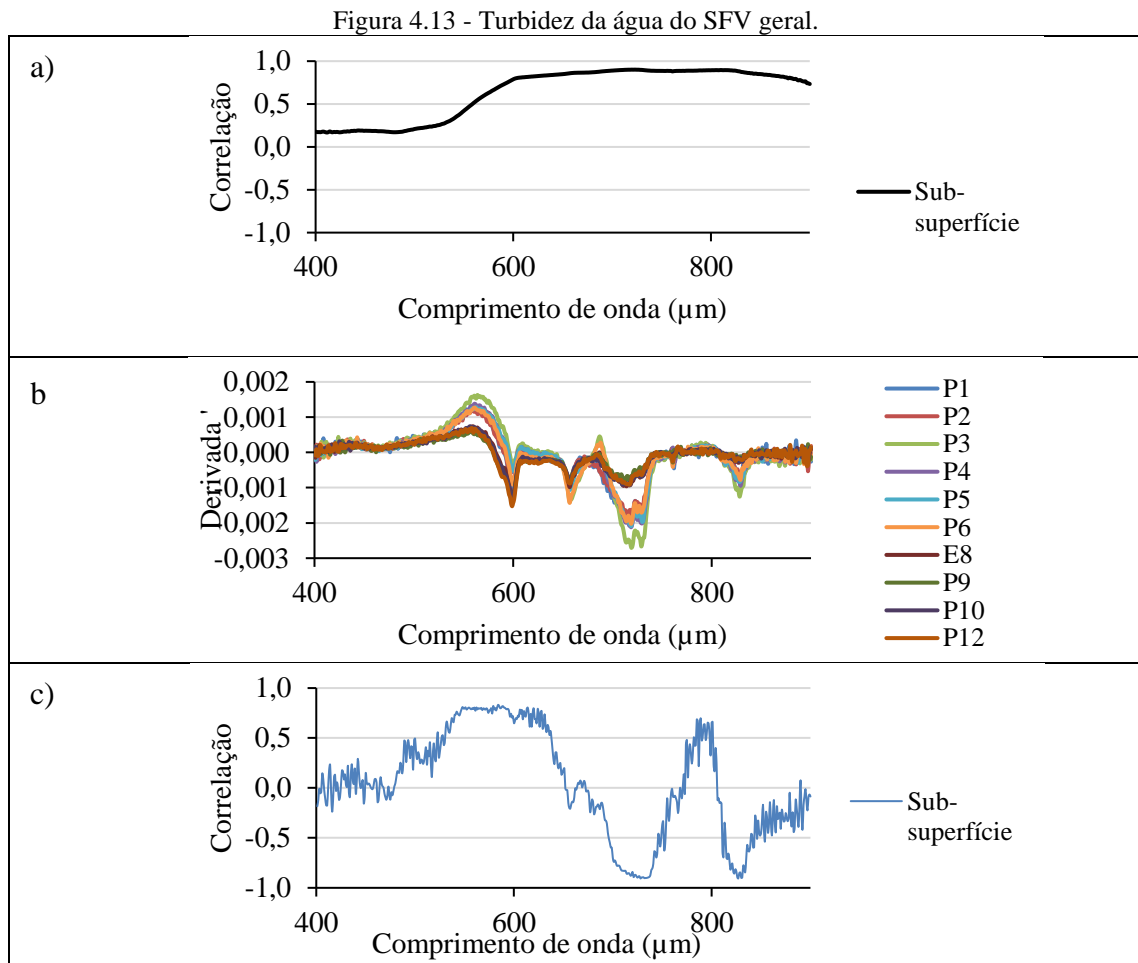
A missão de campo referente ao dia 11 de agosto de 2016 apresentou maior correlação entre os três trabalhos de campo. A melhor correlação (0,84) foi identificada no comprimento de onda de 727 μm . Em relação a derivada a melhor correlação (0,92) foi em 579 μm . Quanto a razão de bandas foi verificada que a melhor correlação (0,93) foi obtida entre os comprimentos de onda de 848/482 μm .

A segunda missão de campo referente ao dia 27 de agosto de 2016 mostrou resultados melhores do que a primeira em relação aos três procedimentos utilizados. As correlações foram de 0,99; 0,98 e 0,98, respectivamente com o espectro de reflectância no comprimento de onda de 676 μm , com a primeira derivada no comprimento de onda de 624 e com razão das bandas 689/658 μm .

A terceira missão também apresentou altas correlações entre turbidez e reflectância. Registrou-se correlação de 0,96; 0,98 e 0,93, respectivamente para o comprimento de onda 646 μm , para a primeira derivada no comprimento de onda de 715 μm e para a razão de 824/487 μm .

Ao analisar o conjunto dos dados de todas as missões de campo foi possível constatar os bons resultados registrados. A correlação da turbidez com a reflectância foi de 0,96 no comprimento de onda 686 μm (Figura 4.13a), com a derivada foi de 0,95 (4.13c) no comprimento de onda de 613 μm em relação a razão de bandas (505/682 μm) foi de 0,91.

O uso adicional da derivada e da razão de bandas não agregou aumento nas correlações visto que o uso com a reflectância apresentou ótimo resultado. Por outro lado, mostrou outros comprimentos de ondas que são potenciais bons para serem utilizados para avaliar a turbidez com dados hiperespectrais.



a) correlograma entre reflectância e a turbidez da água na subsuperfície; b) derivada de primeira ordem; c) correlograma entre a derivada e turbidez na subsuperfície.

4.2.3.2. Reflectância de Satélite

A análise dos dados provenientes de sensores orbitais seguiu a metodologia empregada com os dados do espectro de campo. Entretanto, em função da natureza multiespectral da resolução das imagens de satélite não foi realizada a derivada de primeira ordem, somente a correlação entre turbidez com reflectância em cada banda do satélite e com a razão de bandas.

Procedimentos desta natureza são adotados por MORENO-MADRINAN et al. (2010) e BONANSEA et al. (2015).

Considerando-se cada missão de campo foi observado altos valores de correlação. As correlações foram para as missões 1, 2 e 3 foram 0,88; 0,94 e 0,93 respectivamente para as bandas 5, 4 e 4. Para o conjunto de todas as missões de campo a melhor banda correlacionada com a turbidez foi a 4 com correlação de 0.93.

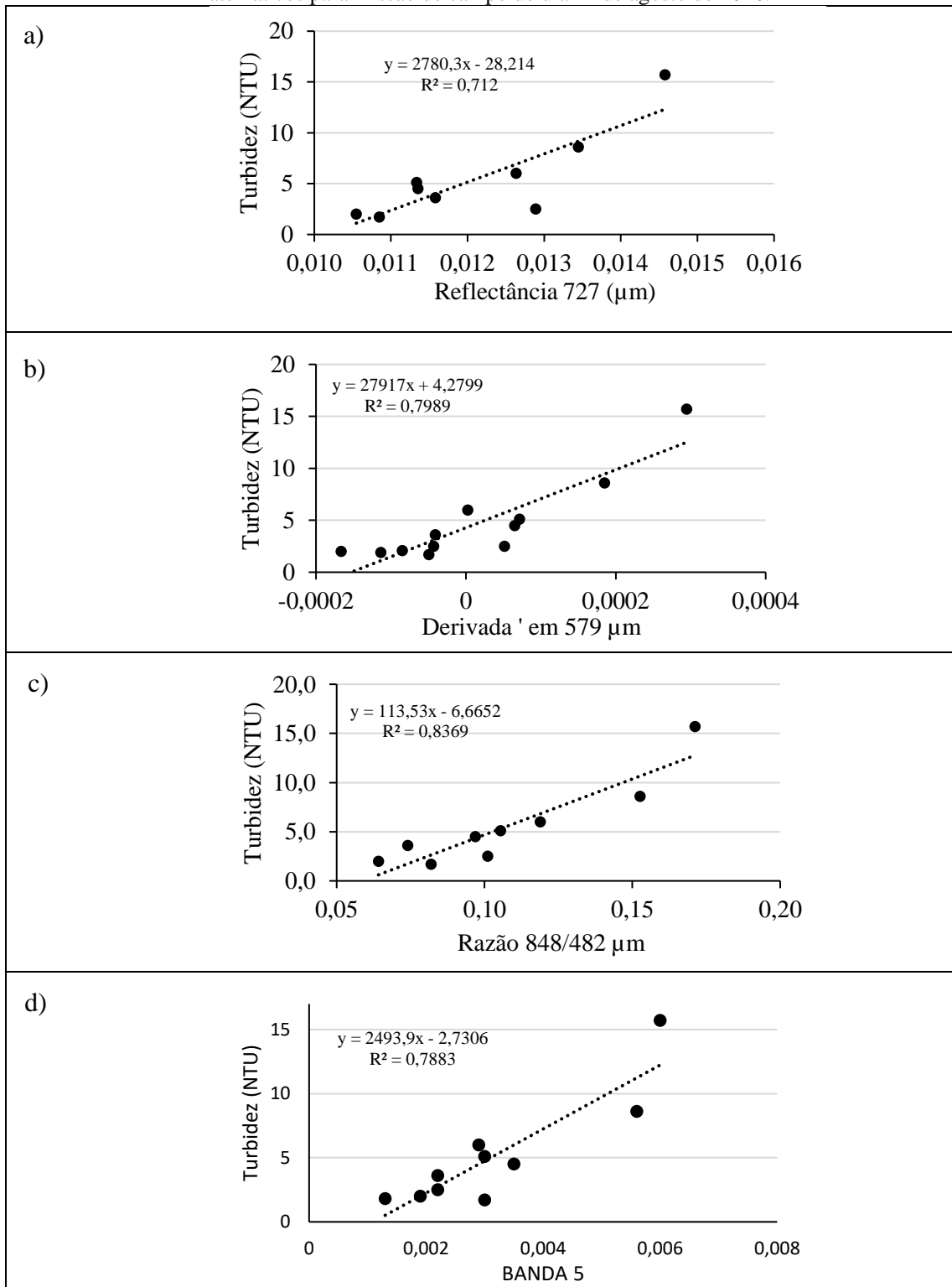
A abordagem de razão de bandas também mostrou correlações elevadas. A missão um foi 0,92 para a razão 4/2, a missão dois a correlação foi de 0,98 com a razão das bandas 4/3 e na última missão, com a mesma razão do segundo trabalho de campo, foi de 0,92. O uso de todos os trabalhos de campo produziu correlação significativa a partir da razão de bandas 4/3 com valor de 0,89.

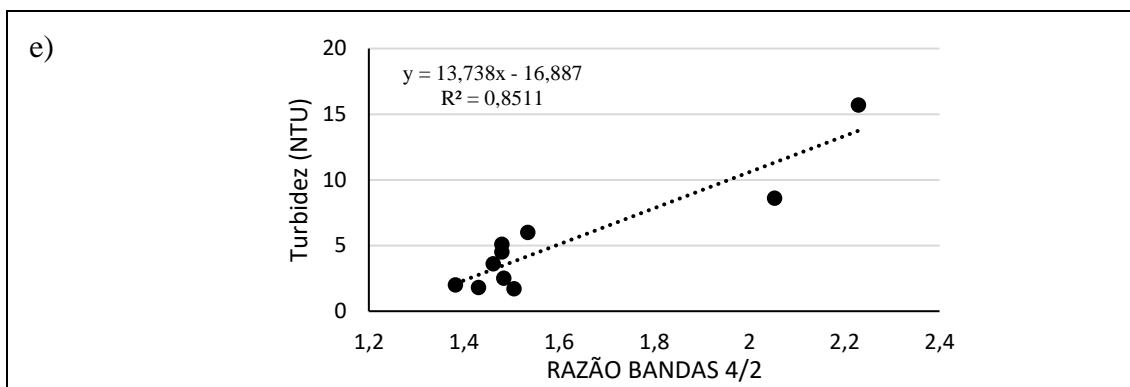
4.2.3.3. Estimativa e Modelagem

Com a finalidade de avaliar estatisticamente o desempenho dos modelos, o conjunto de amostras foi submetida a testes de comparação entre o estimado e observado mediante os seguintes indicadores: coeficiente de correlação (r) Pearson (nos casos em que os dados apresentaram normalidade) e Spearman (para dados não paramétricos), coeficiente de determinação (R^2), e raiz do erro médio quadrático (REM_Q).

A dispersão dos dados foi avaliada para se observar a distribuição dos dados. Tanto para os dados de reflectância de campo quanto os oriundos de imagens de satélite, não foi observado a existência de um agrupamento dos dados que pudessem comprometer os resultados obtidos. Em relação a missão de campo 1 a Figura 4.14 mostra a dispersão dos dados considerando-se a turbidez em relação a reflectância em 727 μm , a derivada em 579 μm , a razão dos canais 848/482, em relação a banda 5 do sensor OLI e a razão das bandas 4/2 do sensor OLI.

Figura 4.14 - Dispersão da reflectância de campo e satélite e da turbidez da água com seus respectivos modelos matemáticos para missão de campo do dia 11 de agosto de 2016.

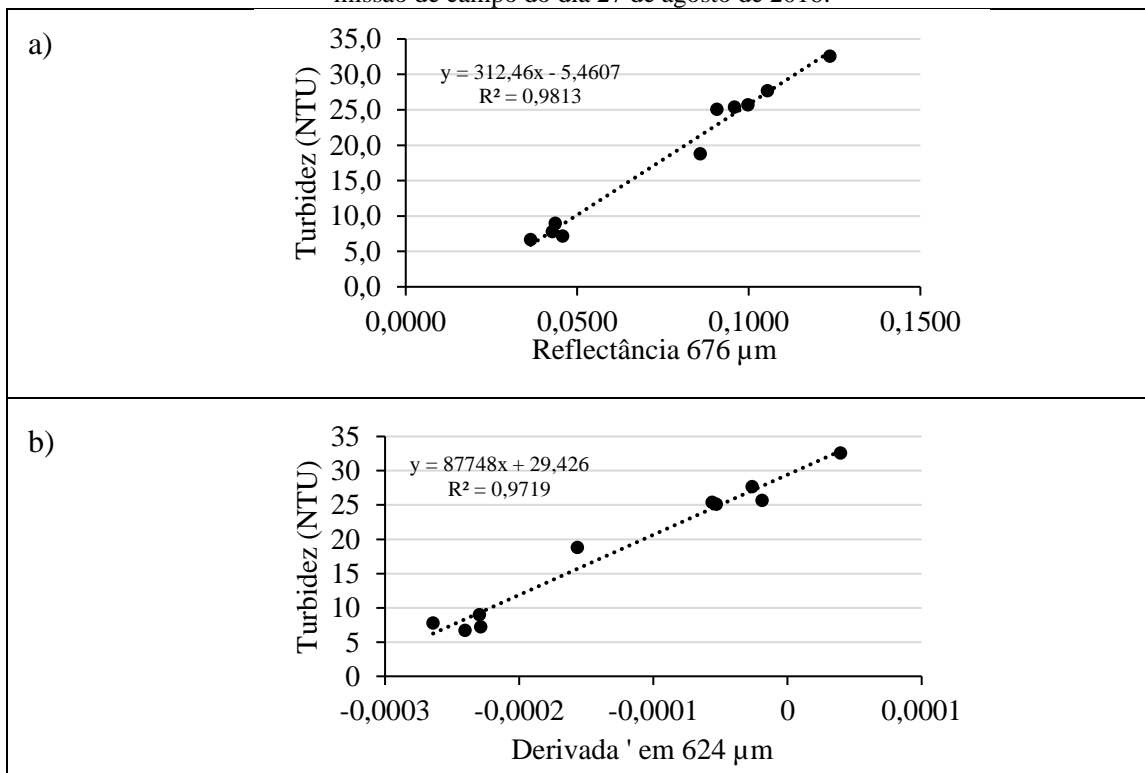


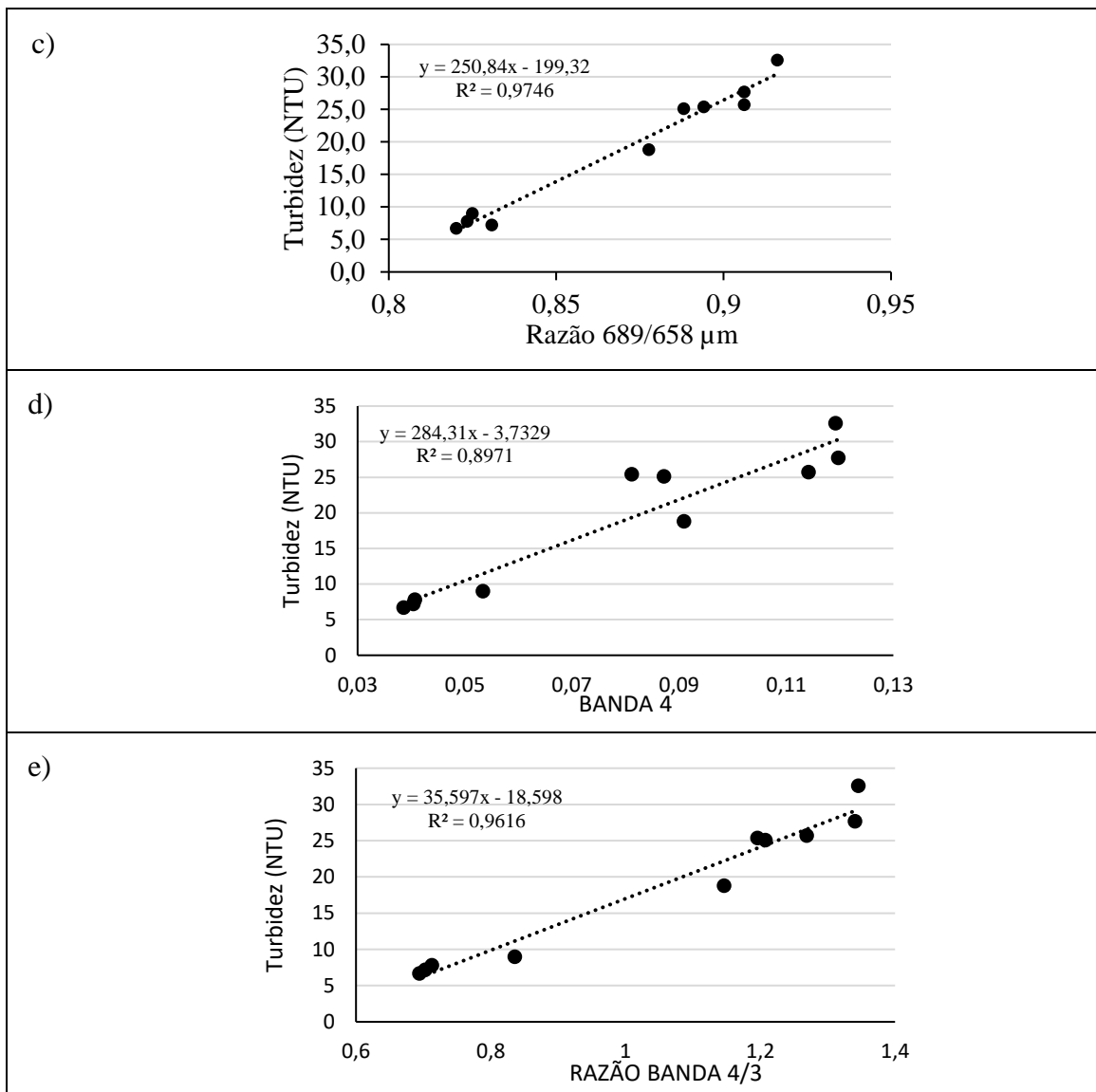


a) dispersão entre reflectância em 523 μm e a turbidez; b) dispersão entre a derivada de primeira ordem em 579 μm e a turbidez; c) dispersão entre reflectância e turbidez em função da razão entre 848/482 μm ; d) dispersão entre reflectância do sensor OLI banda 5 com a turbidez; e) dispersão entre a razão das bandas 4/2 e a turbidez.

A missão de campo realizada no dia 27 de agosto de 2016 apresentou correlação significativa em todos os métodos empregados. A Figura 4.15 ilustra os resultados de dispersão encontrado para a missão dois em relação correlação no comprimento de onda 676 μm , com a primeira derivada em 634, com razão dos canais 689/658 μm , com a banda 4 e razão das bandas 4/3.

Figura 4.15 - Dispersão turbidez com dados campo e satélite com seus respectivos modelos matemáticos para missão de campo do dia 27 de agosto de 2016.

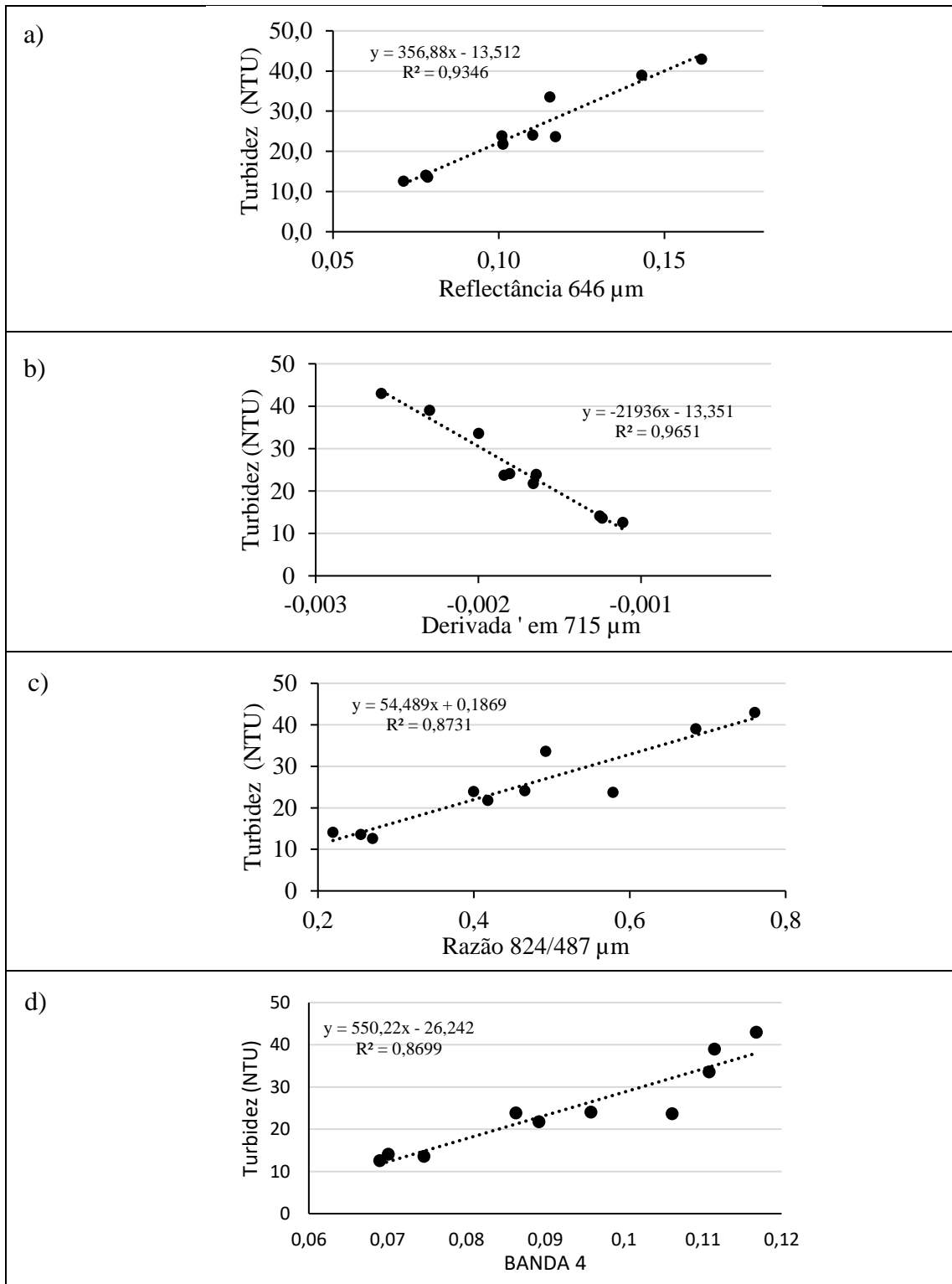


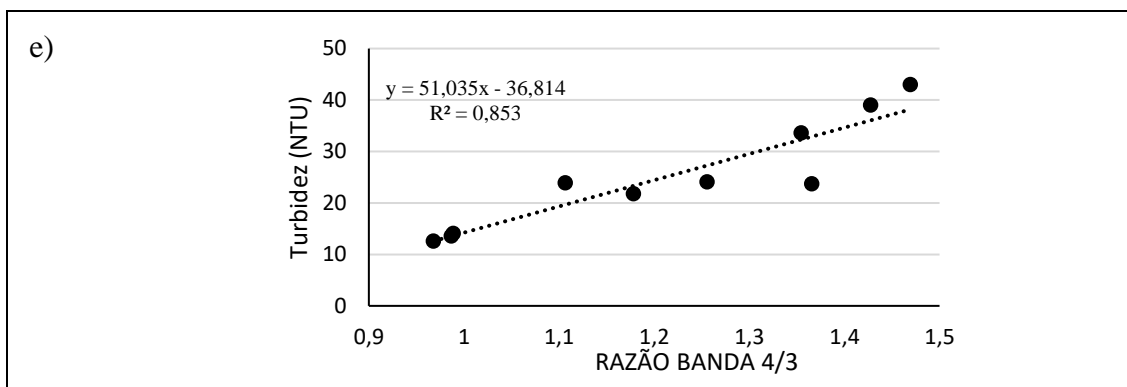


a) dispersão entre reflectância em 676 μm e a turbidez; b) dispersão entre a derivada de primeira ordem em 624 μm e a turbidez; c) dispersão entre reflectância e turbidez em função da razão entre 689/658 μm; d) dispersão entre reflectância do sensor OLI banda 4 com a turbidez; e) dispersão entre a razão das bandas 4/3 e a turbidez.

A terceira missão de campo realizada em 11 de junho de 2017 teve sua melhor correlação identificada na derivada de primeira ordem no comprimento de onda de 715 μm, o que produziu correlação de 0,96 (Figura 4.16)

Figura 4.16 - Dispersão da reflectância de campo e satélite e da turbidez da água com seus respectivos modelos matemáticos para missão de campo do dia 11 de junho de 2017.

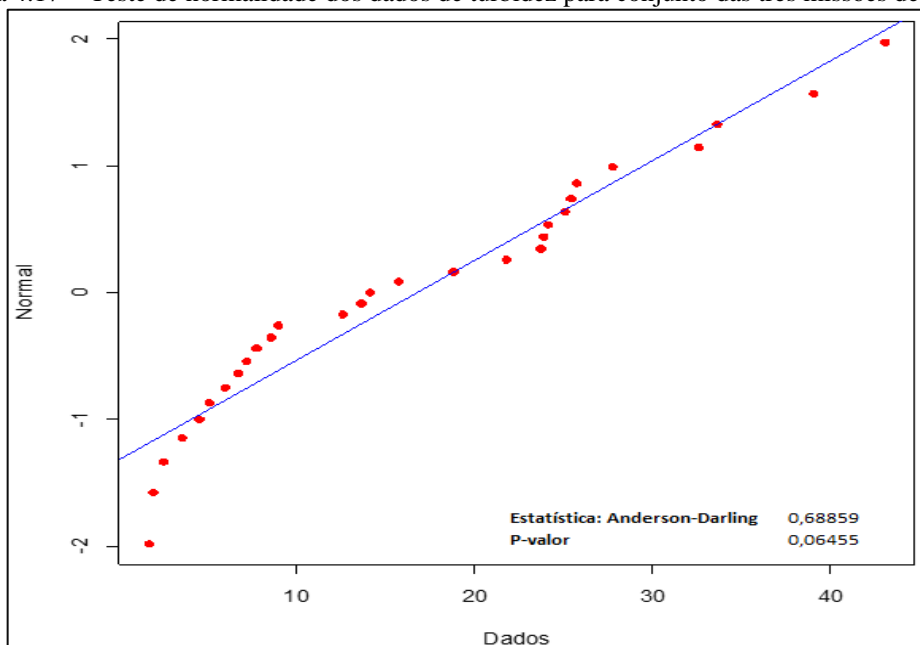




- a) dispersão entre reflectância em 646 μm e a turbidez; b) dispersão entre a derivada de primeira ordem em 715 μm e a turbidez; c) dispersão entre reflectância e turbidez em função da razão entre 824/487 μm ; d) dispersão entre reflectância do sensor OLI banda 4 com a turbidez; e) dispersão entre a razão das bandas 4/3 e a turbidez.

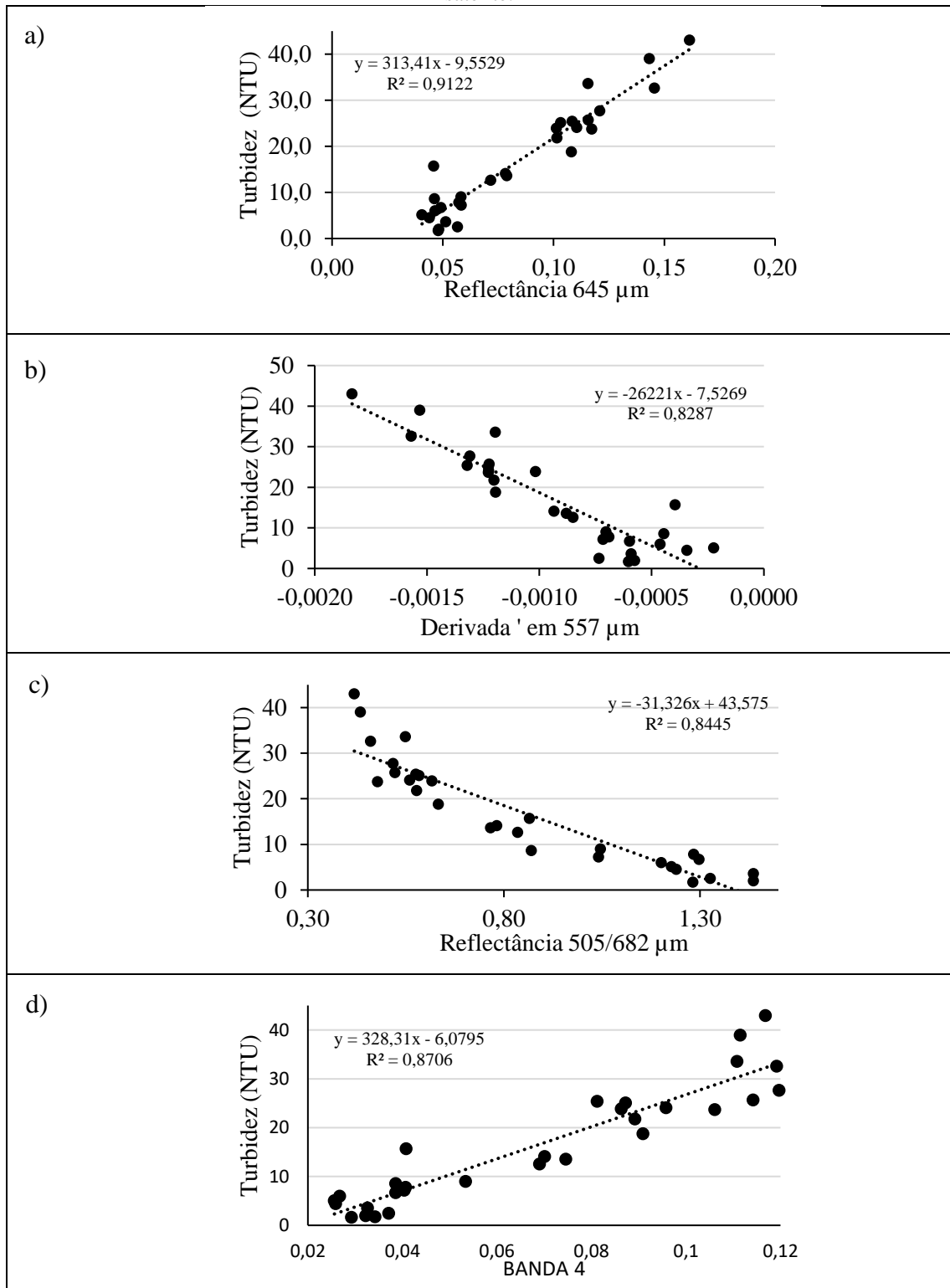
Para a interpretação do conjunto dos dados de campo foi analisada a normalidade dos dados pelos métodos de Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov. Dos testes empregados o único a apresentar resultado normal foi o de Anderson-Darling. O teste identificou que os dados da turbidez foram normais com p-valor de 0,064. A Figura 4.17 mostra o resultado do teste de normalidade na qual pode-se observar que os dados estão distribuídos próximo a linha de referência.

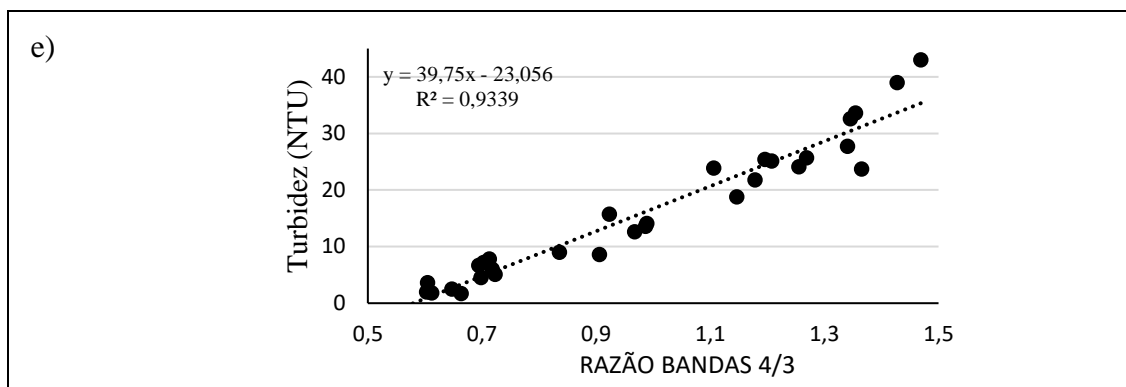
Figura 4.17 - Teste de normalidade dos dados de turbidez para conjunto das três missões de campo.



O conjunto das missões de campo apresentou ampla correlação entre turbidez e reflectância da água. A Figura 4.18 mostra a dispersão dos dados de turbidez com as reflectâncias oriundas de campo e de satélite. Observa-se que em todas as situações não houve formação de grupos de dados isolados e apresenta distribuição próximo a linha de tendência.

Figura 4.18 - Dispersão dos dados de turbidez em relação a reflectância da água obtidas em campo e oriunda de satélite.

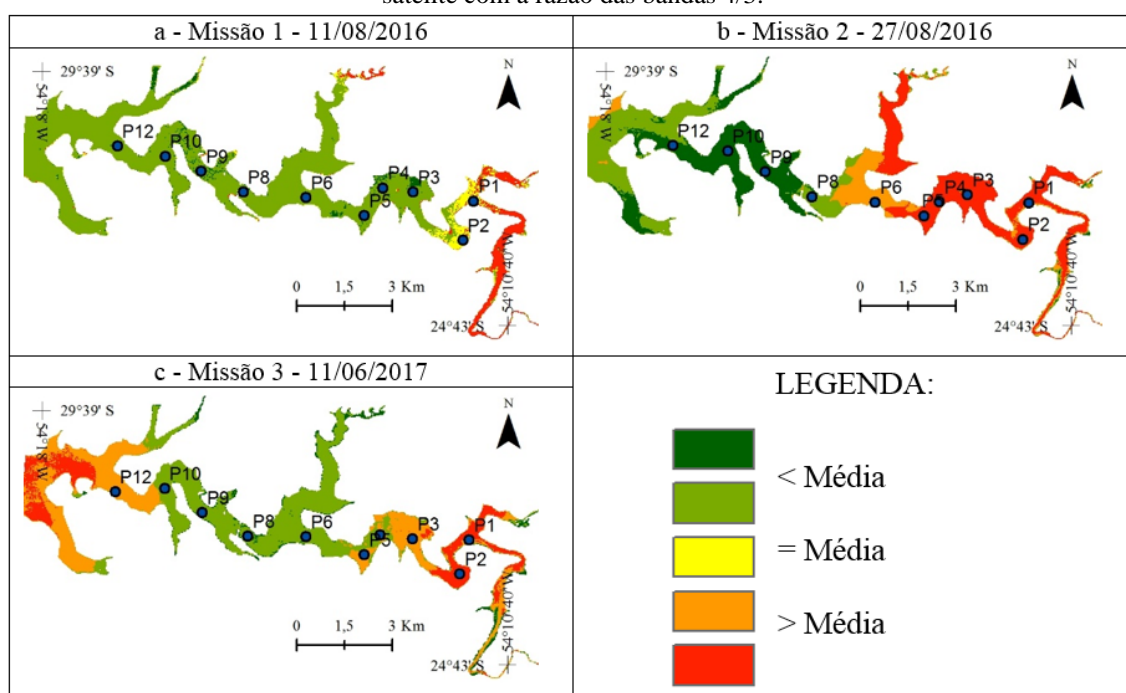




a) dispersão entre reflectância em 645 μm e a turbidez; b) dispersão entre a derivada de primeira ordem em 557 μm e a turbidez; c) dispersão entre reflectância e turbidez em função da razão entre 505/682 μm ; d) dispersão entre reflectância do sensor OLI banda 4 com a turbidez; e) dispersão entre a razão das bandas 4/3 e a turbidez.

A equação da reta ($y = 39,75x - 23,056$) referente a regressão do conjunto dos dados de campo com a imagem permite identificar a turbidez a partir da razão da banda 4/3 (Figura 4.19). Embora a Figura 4.19 represente a turbidez nas classes média, abaixo da média e acima da média pode-se verificar que há equivalência entre esta situação com a registrada na Figura 4.2 que mostra os resultados de campo. Os resultados obtidos pelo satélite mostram, de modo geral, que na primeira missão ocorreu dados menores turbidez (abaixo da média) e que na terceira ocorreu turbidez acima da média com correspondência aos maiores valores encontrados no campo naquela missão. Ainda foi possível verificar que no alto curso foram registrados maiores valores de turbidez tanto no campo quanto no estimado por satélite.

Figura 4.19 - Distribuição espacial da turbidez obtida a partir do modelo matemático aplicado na imagem de satélite com a razão das bandas 4/3.



5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados foi possível verificar que existe correlação significativa entre os dados de reflectância obtidos em campo e a turbidez no compartimento aquático do SFV com o coeficiente de determinação de 0,93. Considerando-se as missões de campo com análises individuais houve situações com maiores e menores correlações, porém, houve uma das missões que apresentou 0,98. Considerando-se os produtos oriundos de imagens de satélite (OLI) a melhor correlação foi de 0,93 entre a turbidez e a banda 4.

O processo de identificação dos comprimentos de onda de melhor correlação com a turbidez por meio do emprego da análise da reflectância, derivada e razão apresentou desempenho diferenciado para cada abordagem de análise dos espectros. Em algumas situações o melhor resultado foi com a própria reflectância, em outras com a derivada e em outras com a razão de bandas.

Ao analisar os dados de pH e condutividade verificou-se que sua relação com a turbidez é baixa com correlações de 0,22 e -0,44 respectivamente. Embora a correlação destas variáveis com a turbidez não seja forte ainda é possível visualizar que a relação entre o pH e turbidez é positiva (quanto maior os valores de turbidez maior será o pH) e a relação da condutividade com a turbidez é negativa (quanto maior os valores de turbidez menor será os valores de condutividade).

Os dados oriundos da precipitação pluviométrica e cota retrataram que a precipitação aliada ao aumento do nível do reservatório acarreta no acréscimo da turbidez de forma substancial e períodos caracterizados por baixa precipitação e progressiva queda na cota proporciona menores valores de turbidez ao longo do SFV. Tal fenômeno está diretamente relacionado com a precipitação pluviométrica que tem o papel de carrear matéria orgânica e inorgânica da bacia de captação para o compartimento aquático.

6. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Portal da Qualidade das Águas. **ANA - Agência Nacional de Águas**, 2009:<<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx> >. Acessado em: 08 Nov 2018.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 22th ed. Washington. 2012.

BARBOSA, C. C. F; NOVO, E. M. L. M; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos**. Publicado pelo LabISA\INPE. 1^a ed. São José, dos Campos. 2019. p.31.

BOLLMANN, H. A; CARNEIRO, C.; PERGORINI, E. S. **Qualidade da Água e Dinâmica de Nutrientes**. In: ANDREOLI, C.V; CARNEIRO, C. Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados. Curitiba: Gráfica Capital, LTDA, 2005.

BONANSEA, M. et al. Using multi-temporal Landsat imagery and linear mixed models for assessing water quality parameters in Ríó Tercero reservoir (Argentina). **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 28–41, 2015.

BRANCO, S. M. & ROCHA, A. A. **Poluição, proteção e usos múltiplos de represas**. São Paulo: Edgard Blücher, CETESB, 1977.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Ed Curso de pós-graduação em ciências geodésicas, Curitiba, PR. 2003.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo: significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo: CETESB, 2009. 44 p. (**série relatórios**). Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/variaveis.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2018.

CHEN, Z.; CURRAN, P. J.; HANSON, J. D. Derivative refractance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**, v. 40, p.67-77, 1992.

CONCEIÇÃO, R. M; GUIMARÃES, A. P. M; RIBEIRO, J. L; CARVALHO, A. V; NERES, J. C. I; CERQUEIRA, F. B. Avaliação do pH, turbidez e análise microbiológica da água do córrego guará velho em guará, estado do Tocantins. **Revista desafios**. v. 04, n. 04, 2017.

DAVIES-COLLEY, R. J. SMITH, D. G. Turbidity suspended sediment, and water clarity: a review. **Jornal of the American waters resources Association**. v. 37, 2007.

DALL'OLMO, G., & Gitelson, A. A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: Experimental results. **Applied Optics**. 2006.

DONOHUE, I.; GARCIA MOLINOS, J. Impacts of increased sediment loads on the ecology of lakes. **Biol.Rev**. 2009.

EPA. **EPA Guidance Manual: Turbidity Provisions**. United States Environmental Protection Agency, Viçosa, abril 1999. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acessado em: 08 Nov.2018.

EPA. **EPA Drinking Water Advice Note Advice**. United States Environmental Protection Agency, Note No. 5: Turbidity in Drinking Water Version 1. 2009. Disponível em: <<http://www.epa.ie/pubs/advice/drinkingwater/Advice%20Note%20No5.pdf> > Acessado em: 10 Nov. 2019.

ESTEVES, A. F. M. Caracterização do sedimento de 17 represas do Estado de São Paulo com base no teor de feopigmentos, carbono e nitrogênio orgânico. **Ci. E Cult**. 5:669-674, 1982.

ESTEVES, A. F. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FERREIRA, A. C.; ROCHA, L. C.; FIGUEIREDO, M. do A. Análise do índice de qualidade de água na bacia do Córrego do Rio Acima, São João Del-Rei/MG. **Rev. Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 03, n. 15, p. 94-105, 2015.

GIATTI, L. L.; CUTOLO, S. A. Acesso à água para consumo humano e aspectos de saúde pública na Amazônia Legal. **Rev. Ambiente & Sociedade**, v. 15, n 1, 93-109, 2012.

GITELSON, A. A.; GAO, B.; LI, R.; BERDNIKOV, S.; SAPRYGIN, V. **Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean - the Azov Sea case study**. *Environmental Research Letters*. v.6, p.1-7, 2011.

GORDON, H. R; BROWN, O. B; EVANS, R. H; BROWN, J. W; SMITH, R. C.; BAKER, K. S. ; CLARK, D. K. "A semi-analytic radiance model of ocean color". **Geophys**. 1988

GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B; **Geomorfologia e Meio Ambiente**, Ed. Bertrand Rio de Janeiro. Brasil, 1996.

HAACK, B; GUPTILL, S. C; HOLZ, R. K; JAMPOLER, S. M; JENSEN, J. R. and R. A. WELCH. **Urban Analysis and Planning, Manual of Photographic Interpretation**, Bethesda: ASP&RS, 517-553.1997.

HAN, L.; RUNDQUIST, D. C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir. **Remote Sensing of Environment**, 62, 1997, p. 253.

HERMES, L. C. SILVA, A. S. Avaliação da Qualidade da água: **manual prático**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. p.55.

HENLEY, W.F.; PATTERSON, M.A.; NEVES, R.J.; LEMLY, A.D. Effects of Sedimentation and Turbidity on Lotic Food Webs: A Concise Review for Natural Resource Managers. **Reviews in Fisheries Science**. 2000.

HORIBA U-53 **Instruction Manual**. Disponível em:
<<https://www.manualslib.com/manual/1398769/Horiba-U-51.html?page=3#manual>>.
Acesso em: 09 abr. 2019.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em:
<<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 3 fev.
2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapas**, 2016. Disponível
em: <[http://mapas.ibge.gov.br/basesreferenciais/basescartograficas/malhas-
digitais.html](http://mapas.ibge.gov.br/basesreferenciais/basescartograficas/malhas-digitais.html)>. Acesso em: 12 Ago. 2019.

KIRK, J.T.O. Effects of suspensoids (turbidity) on penetration of solar radiation in aquatic
ecosystems. **Hydrobiologia** 1985.

KOWALCZYK, T.; PLESZCZYNSKA, E.; RULAND, F. **Grade Models and Methods for
Data Analysis: With Applications for the Analysis of Data Populations**, 2004.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos
terrestre**. 2º edição ed. São José dos Campos: Parêntese: Epiphâneo, J. N., 2009.

LAMPARELLI, M. C. Grau de Trofia em Corpos D'água do Estado de São Paulo: Avaliação
dos métodos de monitoramento. 2004. **Tese (Doutorado)** - Instituto de Biociências da
Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LE, C. et al. Remote estimation of chlorophyll a in optically complex waters based on optical
classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 725–737, 2011.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. The Potential for Remote
Sensing of Loess Soils Suspended in Surface Waters. **Journal of the American Water
Resources Association**. v.33, p.111-117, 1997.

LOPES, F. B.; Barbosa, C. C. F.; Novo, E. M. L.; Andrade, E. M.; Chaves, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13 – 19, 2014.

LOPES, F. B.; SALES, A. G. C.; CHAVES, L. C. G.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M. Modelos para estimativas de sedimentos em suspensão e da condutividade elétrica da água usando dados de sensoriamento remoto. **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA**, 42, 2013. Anais. Fortaleza: SBEA, 2013. p.10.

LOPES, J. E. G; SANTOS, R. C. P. **Capacidade de reservatórios**. 1ª edição. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Hidráulica e Sanitária. São Paulo. 2002.

LORENZZETTI, J. A. O conceito de sensoriamento remoto. In: **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Blucher, 2015

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Orgs.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.14.

MILTON, J. S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1992. p.526.

MINEROPAR. **Atlas geológico do estado do paraná**. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>>. Acesso em: 09 de ago 2019.

MOBLEY, C. D. Light and water: radiative transfer in natural waters. San Diego: **Academic Press**, 1994.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005.

MORENO, M. M.J; AL-HAMDAN, M. Z; RICKMAN, D. L; MULLER, K. F. E. Using the Surface Reflectance MODIS Terra Product to Estimate Turbidity in Tampa Bay, Florida. **Remote Sensing**, v. 2, n. 12. 2010.

NITSCHKE, P. R; CARAMORI, P. H; RICCE, W. S; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do estado do paraná. Instituto Agronômico do Paraná, 2019.**

ODERMATT, D.; GIARDINO, C.; HEEGE, T. Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-Regional in perialpine lakes. **Remote Sensing of Environment**. 2010.

OLIVEIRA, V. D. M. et al. **Avalia es Físicas, Químicas e Biológicas da Microb cia do Córrego Modeneis em Limeira - SP**. Engenharia Ambiental, Espirito Santo do Pinhal, v. 5, n. 1, p. 86-96, jan/abr 2008.

OGASHAWARA, I.; CURTARELLI, M. P; SOUZA, A. F.; AUGUSTO-SILVA, P. B.; ALCANTARA, E. H.; STECH, J. L. Interactive Correlation Environment (ICE) - a statistical web tool for data collinearity analysis. **Remote Sensing**.2014.

PEREIRA FILHO, W. ET AL. Utiliza o de sensores remotos para avaliar o  ndice de estado tr fico da água, em uma área piloto na margem esquerda do reservatório da hidrelétrica de Itaipu. **Relatório técnico**. 2019.

PEREIRA FILHO, W. ET AL. Influência de reservatórios em cascata nos dados de Reflectância e de limnologia – Reservatório de Passo Real e Dona Francisca, Rio Jacuí – RS. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 14, Natal, 2009. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.16.19/doc/48134819.pdf>>. Acesso em 11 jun. 2019.

PEREIRA FILHO, W; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Influência das condi es do tempo em espectros de reflectância da  gua. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 12, 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 415-422. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

QUEIROZ, M. M. F.; IOST, C.; GOMES, S. D.; VILAS BOAS, M. A. Influência do uso do solo na qualidade da água de uma microbacia hidrográfica rural. **Rev. Verde de Agroecologia e desenvolvimento sustentável**. Vol.5, n. 4, p. 200 – 210, 2010.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S.; FILHO, W. P. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v.37, p.279-290, 2007.

SCHOWENGERDT, R. A. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. **Academic Press**, 1983.

SILVA, ANA ELISA PEREIRA. et al. **Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. Acta Amazonica** [online]. vol.38, n.4, pp. 733-742, 2008. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/aa/v38n4/v38n4a17.pdf>> Acesso em 12 dez. 2018

SILVA, A. P. S.; DIAS, H. C. T.; BASTOS, R. K. X.; SILVA E. Qualidade da água do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Peti, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.33, p.1063-1069, 2009.

SIQUEIRA, G.W.; APRILE, F.; MIGUÉIS, A.M. Diagnóstico da qualidade da água do rio Parauapebas (Pará – Brasil). **Rev. Acta Amazonica**. v. 42, n. 3, p. 413 – 422, 2012.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY. Chapter 2 – **Lakes: Total Suspended Solids and Turbidity in Lakes**. In **A Citizen's Guide to Understanding and Monitoring Lakes and Streams**. 1991. Disponível em: <<http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/plants/management/joymanual/turbidity.html>> Acesso em 10 Nov. 2019

WELCOMME .R.L. **Physical and Chemical Processes: Hydrology. In FAO: River Fisheries.** Fisheries and aquaculture department. 1985. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/003/t0537e/T0537E02.htm>> Acesso em 12 Nov. 2019.

WETZEL, R.G. **Limnology: Lake and river ecosystems.** 3 ed. Estados unidos: Elsevier. p. 1006. 2001.

YU, G; WEI, Y; MATSUSHIDA, B. LI, R; OYAMA, Y; FUKUSHIMA, T. Remote Estimation of Chlorophyll-a in Inland Waters by a NIR-Red-Based Algorithm: Validation in Asian Lakes. **Remote sensing.** 2014.