

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
Instituto de Geografia – IG  
Programa de Pós Graduação em Geografia

JOSÉ FERNANDO PINESE JÚNIOR

AVALIAÇÃO DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM O USO  
DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS NOS RESERVATÓRIOS DE  
CAÇU E BARRA DOS COQUEIROS - GO.

JOSÉ FERNANDO PINESE JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM O USO  
DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS NOS RESERVATÓRIOS DE  
CAÇU E BARRA DOS COQUEIROS - GO.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós Graduação em Geografia  
(Mestrado) da Universidade Federal de  
Uberlândia, como requisito para a obtenção do  
título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Geografia  
Linha de pesquisa Análise, Planejamento e  
Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

P651a Pinese Júnior, José Fernando, 1984-  
2014 Avaliação dos sedimentos em suspensão com o uso de imagens multiespectrais nos reservatórios de Caçu e Barra dos Coqueiros – GO. / José Fernando Pinese Júnior. - 2014.  
74 f. : il.

Orientador: Sílvio Carlos Rodrigues.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Geografia.  
Inclui bibliografia.

1. Geografia - Teses. 2. Sedimentos em suspensão - Teses. 3. Sedimentos fluviais - Teses. I. Rodrigues, Sílvio Carlos. II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

---

CDU: 910.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Programa de Pós-Graduação em Geografia



**JOSÉ FERNANDO PINESE JÚNIOR**

AVALIAÇÃO DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO COM USO DE  
IMAGENS MULTIESPECTRAIS NOS RESERVATÓRIOS DE CAÇU  
E BARRA DOS COQUEIROS - GO

Professor Dr. Sílvio Carlos Rodrigues - UFU

Professor Dr. Fabiano Antônio de Oliveira – UFPR

Professor Dr. Roberto Rosa – UFU

Data: 27/06 de 2014

Resultado: Aprovado

## AGRADECIMENTOS

Inicio meus agradecimentos por DEUS, já que Ele colocou pessoas tão especiais ao meu lado.

Agradeço imensamente à minha esposa Lísia que, de forma especial, sempre me conduziu pelo caminho correto. Todos os conselhos, consolações e ainda orientações sobre o assunto específico da dissertação sempre fizeram com que o resultado desta caminhada fosse melhor e ainda mais prazeroso. Agradeço sempre por este apoio essencial.

Aos meus pais, José Fernando e Elfrida, pelo exemplo de pesquisadores e professores que são, e trazendo ainda discussões, exaltadas ou não, sobre métodos e procedimentos. A eles que sempre me ensinaram a maneira honesta de lidar com as pessoas, muito obrigado.

Ao meu tio Mário Paulo, que sempre teve concelhos certeiros e um grande incentivo nas horas difíceis, já orientando meus passos sobre o caminho das pedras.

Ao meu sogro e sogra, José Wilson e Oneida, por me acolherem como um filho e por me apoiarem em todos os desafios.

Aos meus irmãos, Henrique e Olívia, pelo exemplo de profissionais e pelas discussões a respeito do caminho de um mestrado.

Aos meus cunhados Breno e Júnior e minha cunhada Renata por estarem sempre apoiando minhas ideias.

Ao meu orientador, Silvio Carlos, que além de um grande amigo, se tornou a confiança onde prevalecia a dúvida. Por sua maneira de lidar com as barreiras na pesquisa e torna-las a prova de que o obstáculo foi superado.

Ao meu amigo António Pedrosa, pela grande ajuda com ideias e questionamentos, sempre nos fazendo evoluir como pesquisadores.

Especialmente ao meu falecido amigo Ronaldo, que me ensinou princípios preciosos e que levarei para a vida toda.

Aos meus amigos Dênis, Iron, João Paulo e Pedro Ivo, que sempre tão perto me ajudaram com conselhos valiosos e com exemplos de atitudes, sempre em conversas exasperadas pela cerveja.

Às minhas amigas, Fernanda, Lílian e Nathalia, muito companheiras em momentos de diversão e sempre com palavras amigas.

Ao meu amigo Jean, pelo estímulo em evoluir, já que esteve sempre muito disposto nos difíceis trabalhos de campo com valiosíssimas ajudas e ainda pelas conversas e questionamentos sobre a pesquisa.

Aos amigos do LAGES desde meu ingresso em 2006, que me fizeram crescer como pesquisador e profissional.

A vocês, agradeço por cada contribuição nessa experiência prazerosa.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”. (Marcel Proust)

## RESUMO:

As grandes quantidades de sedimentos transportadas pelos cursos de água, provenientes da ação erosiva da água sobre o solo da bacia, provocam a degradação dos corpos d'água e prejuízos significativos à população, ao desenvolvimento socioeconômico e ao ambiente natural. Os processos de produção e deposição de sedimentos ao longo de uma bacia são fenômenos naturais, mas que têm seus efeitos potencializados pela influência do homem, por meio de desmatamentos desordenados, construções, mineração e manejo inadequado das atividades agrícolas. Durante a fase de transporte e deposição dos sedimentos em corpos hídricos há a mudança da coloração da água devido à concentração do material dissolvido ou em suspensão. A cor dos corpos d'água está diretamente ligada às suas propriedades ópticas inerentes, de absorção e espalhamento. Estas propriedades variam conforme a concentração, natureza e tipos de materiais dissolvidos e particulados presentes na água. O Índice da Diferença Normalizada de Água (Normalized Difference Water Index – NDWI) é um método desenvolvido por McFeeters (1996) com o intuito de delinear feições na água, como os Componentes Opticamente Ativos, e realçar a presença destes, sendo obtido por meio de processamentos em imagens digitais. O autor modificou a fórmula do NDVI invertendo as variáveis e usando a banda verde ao invés da banda vermelha, a fim de obter melhores resultados voltados à análise da água. Nesse sentido, o trabalho se apresenta no intuito de promover por meio de análises, descrições, mapeamentos e estudos sistematizados, a avaliação do método do NDWI da qualidade da água dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHEs) Caçu e Barra dos Coqueiros, no Rio Claro, localizadas na porção sudoeste do estado de Goiás, avaliando o método de determinação de sedimentos em suspensão em ambientes lênticos por meio de imagens multiespectrais. As análises dos índices de NDWI geraram informações visualmente coerentes, porém não foi possível encontrar um índice para correlações entre dados reais ou mesmo um valor de calibração para auxílio na determinação da concentração de sedimentos em suspensão. O método NDWI possibilita inspeções visuais das características de produção de sedimentos de um dado local, porém devem estar em uma mesma cena de uma mesma data para se tornarem comparáveis. É possível estabelecer apontamentos dos locais com maior aporte de sedimentos e avanço do fluxo. Nas análises estatísticas encontrou-se uma correlação baixa entre a concentração de sedimentos em suspensão obtidos de coletas de campo e os valores do processamento NDWI. A análise visual de mapas com os resultados do NDWI é válida para apontar áreas de interesse para coletas de campo, analisando padrões de comportamento dos sedimentos também em períodos de sazonalidade pluviométricas.

Palavras-chave: NDWI; Concentração de Sedimentos em Suspensão; Sedimentometria.

**ABSTRACT:**

Large amounts of sediment transported by rivers, coming from the erosive action of water on the basin soil, causing degradation of water bodies and significant damages to the population, to socioeconomic development and to the natural environment. The processes of sediment production and deposition along a watershed are natural phenomena, but its effects can be magnified by the man influence through the disordered deforestation, construction, mining and improper management of agricultural activities. During the sediments transport and deposition in water bodies there is a color change in the water due to the concentration of dissolved or suspended materials. The water bodies color is directly linked to their inherent optical properties of absorption and spreading. These properties change according to the concentration, nature and types of dissolved and particulate materials in the water. The Normalized Difference Water Index (NDWI) is a method developed by McFeeters (1996) with the purpose of delineates features in the water, such as Active Optical Components, highlighting their presence, and found by digital images processing. The author modified the NDVI formula reversing the variables and using the green band instead of the red band in order to obtain better results attentive on water analysis. In this sense, the work is presented in order to promote by analyzes, descriptions, maps and systematic studies, the assessment of water quality NDWI method in the reservoirs of Caçu and Barra dos Coqueiros Hydropower Plants (HPPs), in Claro river, located in the southwestern portion of Goiás state - Brazil, evaluating the determination of suspended sediments method in lentic environments by multispectral images. Analyses of NDWI indices produced visually coherent data, but could not find an index for correlations between real data or even a calibration value to help in the determination of suspended sediment concentration. The NDWI method enables visual inspection of sediment yield characteristics for a given location, but must be in the same scene from the same date to become comparable. It is possible to make notes of places with higher sediment production and flow spread. Is found in the statistical analysis a low correlation between the suspended sediments concentration obtained from field sampling and from values of NDWI processing. The visual analysis of maps with the NDWI results is valid to indicate regions of interest for field sampling, analyzing patterns of sediment behavior also in rainfall seasonality periods.

Keywords: NDWI; Suspended Sediment Concentration; Sedimentometry.

## SUMÁRIO

---

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	ÁREA DE ESTUDO.....	5
3.	OBJETIVOS:.....	13
3.1.	Gerais.....	13
3.2.	Específicos.....	13
4.	REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL .....	14
4.1.	Produção de Sedimentos .....	14
4.2.	Distribuição dos Sedimentos .....	18
4.3.	Radiação Eletromagnética .....	20
4.4.	Comportamento Espectral da Água .....	21
4.5.	Técnica do NDWI.....	23
4.6.	Tratamento Estatístico dos Dados .....	26
5.	METODOLOGIA .....	29
5.1.	Processamento do NDWI.....	29
5.2.	Coletas em Campo.....	31
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
8.	REFERÊNCIAS .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Bacia de Contribuição dos Reservatórios de Caçu e Barra dos Coqueiros.....	6
Figura 2: Precipitação Média na estação de Cachoeira Alta (Cód.: 01851000).....	7
Figura 3: Visão SW-NO da Serra da Cachoeira – UHE Barra dos Coqueiros.....	8
Figura 4: Seção esquemática do Vale do Rio Claro.....	8
Figura 5: Mapa Litológico da Bacia de Contribuição.....	10
Figura 6: Mapa Pedológico da Bacia de Contribuição.....	11
Figura 7: Distribuições de concentração na vertical para sedimentos em um curso d'água.....	19
Figura 8: Experiência de reflectância da água com argila em suspensão.....	22
Figura 9: Comportamento espectral dos alvos por banda utilizada.....	24
Figura 10: Histograma da Reflectância da banda IVP para delimitação das feições de água.....	25
Figura 11: Organograma de atividades.....	29
Figura 12: Localização dos pontos de coleta no reservatório da UHE Caçu.....	34
Figura 13: Localização dos pontos de coleta no reservatório da UHE Barra dos Coqueiros.....	35
Figura 14: Garrafa de Coleta (Pinese).....	36
Figura 15: Armazenamento das amostras coletadas.....	37
Figura 16: Processamento das amostras de sedimento em suspensão em laboratório.....	38
Figura 17: Processamento das amostras de sedimento em suspensão em laboratório.....	39
Figura 18: Sedimentos da água nas três campanhas.....	43
Figura 19: Relação entre dados de campo e valores do NDWI.....	45
Figura 20: Exemplo de erros influenciados por nuvens no lago da UHE Barra dos Coqueiros.....	48
Figura 21: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Caçu - 1 <sup>a</sup> campanha.....	50
Figura 22: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Caçu - 2 <sup>a</sup> campanha.....	51
Figura 23: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Caçu - 3 <sup>a</sup> campanha.....	52
Figura 24: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Barra dos Coqueiros - 1 <sup>a</sup> campanha.....	53
Figura 25: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Barra dos Coqueiros - 2 <sup>a</sup> campanha.....	54
Figura 26: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Barra dos Coqueiros - 3 <sup>a</sup> campanha.....	55

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1: Interpretação dos coeficientes de correlação e determinação de Pearson.....	26
Tabela 2: Interpretação dos coeficientes de correlação de Spearman.....	27
Tabela 3: Satélite IRS-P6, Sensor LISS-III.....	31
Tabela 4: Pontos de coleta <i>in situ</i> nos reservatórios.....	32
Tabela 5: Datas de campo e aquisição de imagens das UHEs Caçu e Barra dos Coqueiros. ....	33
Tabela 6: Valores aceitáveis de produção de sedimento. ....	40
Tabela 7: Valores do processamento NDWI e de Campo – UHE Caçu.....	41
Tabela 8: Valores do processamento NDWI e de Campo – UHE Barra dos Coqueiros. ....	42
Tabela 9: Valores de correlação entre o processamento do NDWI e coletas de campo.....	46
Tabela 10: Precipitação nos 10 dias que antecedem a coleta dos dados.....	49
Tabela 11: Determinação da Css pelo método tradicional (Método Simplificado de Colby). ....	57

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

---

Equação 1 .....	28
Equação 2 .....	30
Equação 3 .....	30

## 1. INTRODUÇÃO

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente modificam as condições naturais do curso d'água. As barragens geram, em relação ao aspecto sedimentológico, uma redução das velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carreados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podendo vir a inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (CARVALHO et al., 2000a).

Em médios e pequenos reservatórios o tempo de assoreamento total avaliado é de 20 a 30 anos, em que os depósitos na região do remanso já poderão prejudicar atividades como a de navegação. Além disso, depósitos finos nas margens podem criar condições de crescimento de plantas macrófitas que irão, certamente, se deslocar para perto da barragem e mergulhar pelos condutos, prejudicando a geração de energia (CARVALHO op. cit.).

Os processos de produção e deposição de sedimentos ao longo de uma bacia são fenômenos naturais, mas que têm seus efeitos potencializados pela influência do homem, por meio de desmatamentos desordenados, construções, mineração e manejo inadequado das atividades agrícolas (BICALHO, 2006).

A concentração de sedimentos em suspensão (Css) é um parâmetro importante para a biota de ecossistemas aquáticos (WETZEL, 2001 apud MONTANHER et al., 2013) e em muitos problemas de engenharia, como no assoreamento de reservatórios. Os sedimentos em suspensão são também indicadores da ação de processos geomorfológicos nas bacias de drenagem (MONTANHER et al., 2013).

Há prejuízos ambientais durante as várias fases deste processo de produção, transporte e

deposição de sedimentos: desde a erosão do solo ocorrido na fase da produção de sedimentos; o comprometimento da qualidade da água observado na fase de transporte, além do assoreamento de rios, levando à ocorrência de enchentes, e assoreamento de reservatórios, com a redução de sua vida útil, ocorridos na fase de deposição (BICALHO, 2006).

Durante a fase de transporte e deposição dos sedimentos em corpos hídricos há a mudança da coloração da água devido à concentração do material dissolvido ou em suspensão.

O uso de imagens de satélite em ambientes aquáticos se torna importante para verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água (JENSEN, 2000 apud RUDORFF et al., 2007).

A cor dos corpos d'água está diretamente ligada às suas propriedades ópticas inerentes, de absorção e espalhamento. Estas propriedades variam conforme a concentração, natureza e tipos de materiais dissolvidos e particulados presentes na água (MOLLERI et al., 2008). Estes materiais, denominados de Componentes Opticamente Ativos (COA) influenciam as propriedades ópticas dos corpos hídricos. A interação entre a luz solar e a água depende das proporções em que estes materiais estão presentes na mistura. A presença dos COA na coluna d'água é responsável pelas modificações em sua cor, pois estes absorvem ou espalham seletivamente a luz incidente. Isto torna a cor dos corpos d'água uma fonte de informações referente às suas propriedades químicas, físicas e biológicas ou ainda ao seu leito (KAMPEL e NOVO, 2005).

Em meados da década de 80, com o lançamento do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat 4 e posteriormente do Landsat 5, a resolução espacial mais refinada e o maior número de faixas espectrais exploradas deste sensor, tornaram possível obter resultados que

incluem não somente os mapeamentos temáticos como também a quantificação de parâmetros biofísicos mediante o uso dos dados radiométricos derivados das imagens de satélite e permitindo, portanto, a identificação de feições específicas existentes na superfície terrestre.

Abrem-se então novas possibilidades na aplicação de dados gerados a partir das técnicas de sensoriamento remoto, criando alternativas para o desenvolvimento e aplicação de outras técnicas, agora denominadas técnicas de geoprocessamento ou simplesmente geotecnologias.

O Índice da Diferença Normalizada de Água (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) é um método desenvolvido por McFeeters (1996) com o intuito de delinear feições na água, como os Componentes Opticamente Ativos, e realçar a presença destes, sendo obtido por meio de processamentos em imagens digitais.

Este método derivou do Índice da Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), que se baseia na assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia que mostra um evidente contraste entre a combinação das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. McFeeters (1996) modificou a fórmula do NDVI invertendo as variáveis e usando a banda verde ao invés da banda vermelha, a fim de obter melhores resultados voltados à análise da água. Sendo assim, no método do NDWI quanto maior for o contraste, maior será a concentração de sólidos em suspensão ou a profundidade na área imageada (FOERSTNOW e MENEZES, 2011).

A utilização da técnica de análise de imagens multiespectrais NDWI aliado às coletas de campo pode reduzir custos de amostragem sem prejuízos aos resultados, porém não deve ser realizada de forma independente pela necessidade da calibração de campo:

Devido aos altos custos operacionais normalmente associados à realização de monitoramentos sedimentométricos, existe a necessidade de avaliar possibilidades que tornem esse monitoramento mais simples, o que poderia ser

feito reduzindo o número de amostras a serem coletadas sem redução significativa da precisão do estudo (BICALHO, 2006, p. 02).

Nesse sentido, a dissertação se apresenta no intuito de promover por meio de análises, descrições, mapeamentos e estudos sistematizados, a avaliação do método do NDWI na determinação da qualidade da água dos reservatórios da Usina Hidrelétrica (UHE) Caçu e Barra dos Coqueiros, no Rio Claro, localizadas na porção sudoeste do estado de Goiás, avaliando o método de determinação de sedimentos em suspensão em ambientes lênticos por meio de imagens multiespectrais.

Esta pesquisa é fruto de um trabalho profissional como consultor ambiental de um monitoramento dos sedimentos em suspensão pelo método descrito tradicionalmente por Carvalho (1994). A partir deste trabalho pretendeu-se fazer a comparação da técnica tradicional de monitoramento dos sedimentos em suspensão em relação à técnica NDWI empregando o uso de imagens multiespectrais e técnicas de sensoriamento remoto.

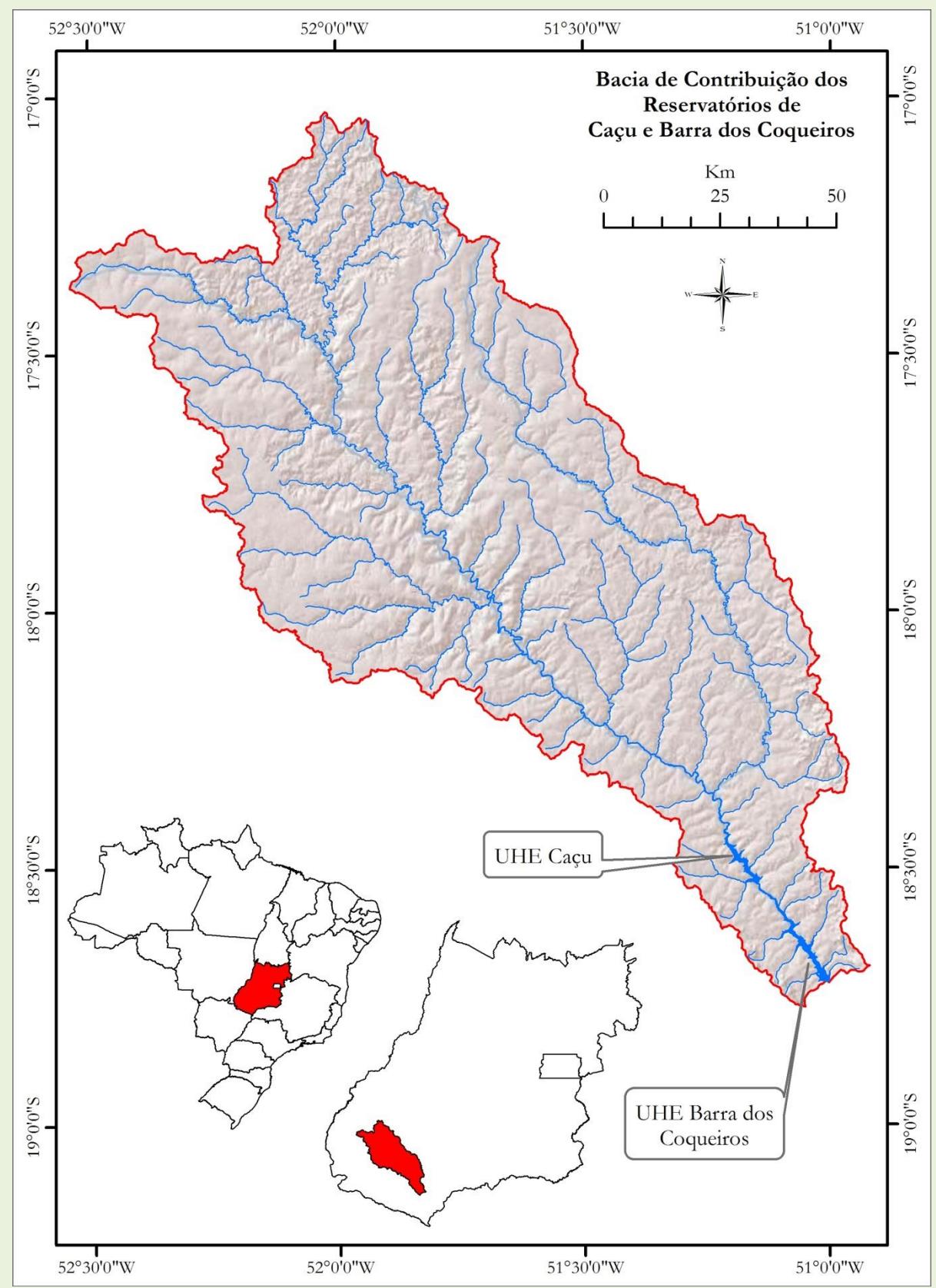
No contexto dos problemas ambientais relativos à produção de sedimentos, os recursos hídricos tornam-se importantes fatores a serem acompanhados no sentido de promover sua melhor preservação. Os intensos usos agropecuários somados às condições naturais e sensíveis da área tornam-na suscetível a contaminação dos mananciais por sedimentos. Por isso, a compreensão dos processos relativos à sedimentação em reservatórios artificiais é importante no que se refere à melhoria da qualidade dos recursos hídricos e controle de processos erosivos.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O reservatório da UHE Caçu tem área aproximada de 14,32 km<sup>2</sup> e o reservatório da UHE Barra dos Coqueiros tem área aproximada de 25,51 km<sup>2</sup>, situados no rio Claro entre os municípios de Caçu e Cachoeira Alta, no sudoeste do estado de Goiás (Figura 1). Os reservatórios estão inseridos na bacia hidrográfica do rio Claro, e apresenta relativa homogeneidade do ponto de vista climático, podendo ser classificado como tropical semiúmido. Apresenta variação sazonal com estações bem definidas. As características do clima permitem enquadrá-lo no tipo *Aw* da classificação de *Köppen*. A distribuição das chuvas e as temperaturas elevadas são responsáveis pela ocorrência de um período de deficiência seguido de outro com excesso de água no solo.

A sazonalidade de chuvas provoca também a sazonalidade na produção de sedimentos na bacia hidrográfica, já que todo o processo de produção e transporte de sedimentos está diretamente ligado à quantidade de chuvas.

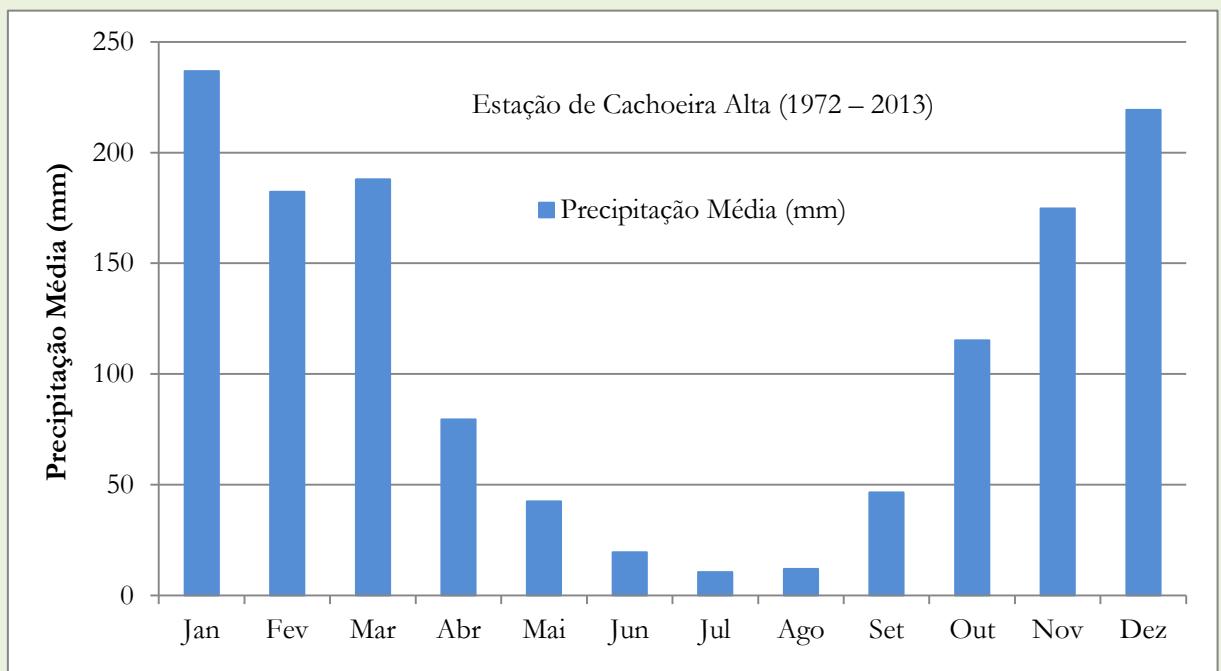
Figura 1: Bacia de Contribuição dos Reservatórios de Caçu e Barra dos Coqueiros.



Fonte: Do autor.

A região apresenta precipitação média em torno de 1.350 mm/ano, de acordo com análises sobre os dados de séries históricas de precipitação (Figura 2) (ANA, 2014).

Figura 2: Precipitação Média na estação de Cachoeira Alta (Cód.: 01851000).



Fonte: Dados de Séries Históricas de Chuva, de 1972-2013 - ANA, 2014. Org.: Do autor.

A área da bacia de contribuição das UHEs é representada por grandes chapadões, que exibem litologias sedimentares recentes, em relevos tabulares com interflúvios amplos que compõem uma superfície de cimento para sudeste, escoando nessa direção para o Rio Paranaíba (GOIÁS, 2006). Na região dos reservatórios de Caçu e Barra dos Coqueiros a drenagem é direcionada pelo entalhamento por entre a Serra Negra e a Serra da Cachoeira (Figura 3).

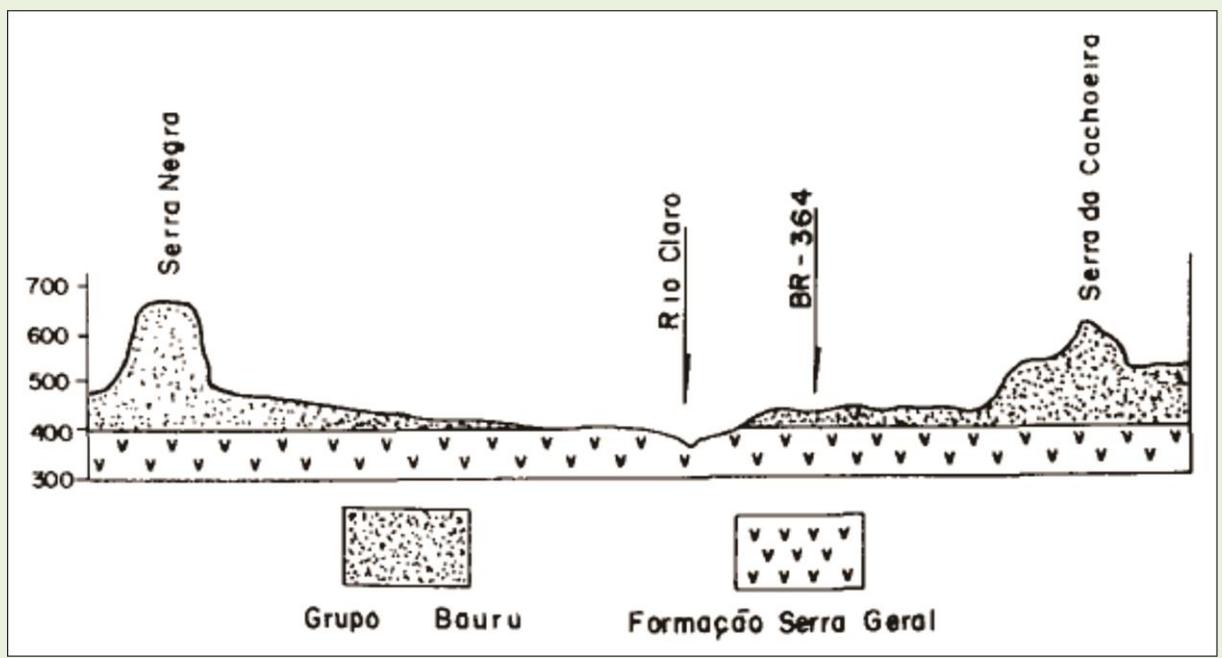
Figura 3: Visão SW-NO da Serra da Cachoeira – UHE Barra dos Coqueiros.



Fonte: Do autor.

O relevo torna-se entalhado e ondulado apenas nas áreas próximas ao Rio Claro, pois esta drenagem principal possibilitou uma maior dissecação e atingiu litologias mais antigas (Figura 4) (RADAMBRASIL, 1983).

Figura 4: Seção esquemática do Vale do Rio Claro.

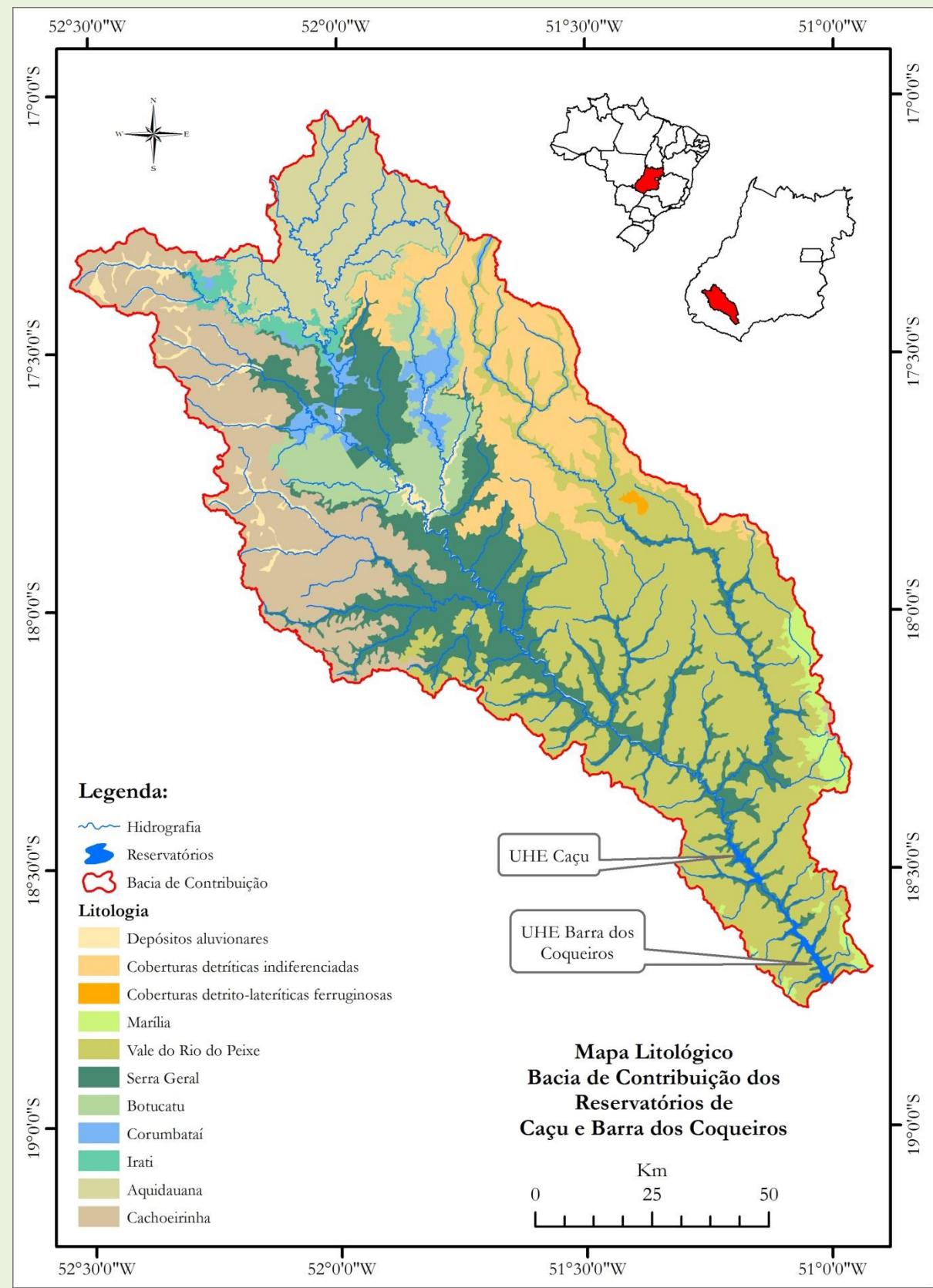


Fonte: Adaptado de Radambrasil, 1983.

De acordo com o levantamento do Serviço Geológico do Brasil (GEOBANK, 2012) em escala de 1:500.000 e descrições de Oliveira (2009), a bacia de contribuição está sobre Depósitos aluvionares, Coberturas detriticas indiferenciadas, Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, caracterizando as formações mais recentes. Os depósitos da Formação Marília, Formação Vale do Rio do Peixe, são os representantes do Grupo Bauru. Os basaltos da Formação Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu compõem o Grupo São Bento, e os sedimentos da Formação Corumbataí e Formação Iriti representam o Grupo Passa Dois. O pacote sedimentar da Formação Aquidauana é pertencente ao Grupo Itararé e os arenitos da Formação Cachoeirinha são sedimentos inconsolidados de idade terciária (Figura 5). Os reservatórios das UHEs Caçu e Barra dos Coqueiros estão sobrepostos aos basaltos da Formação Serra Geral.

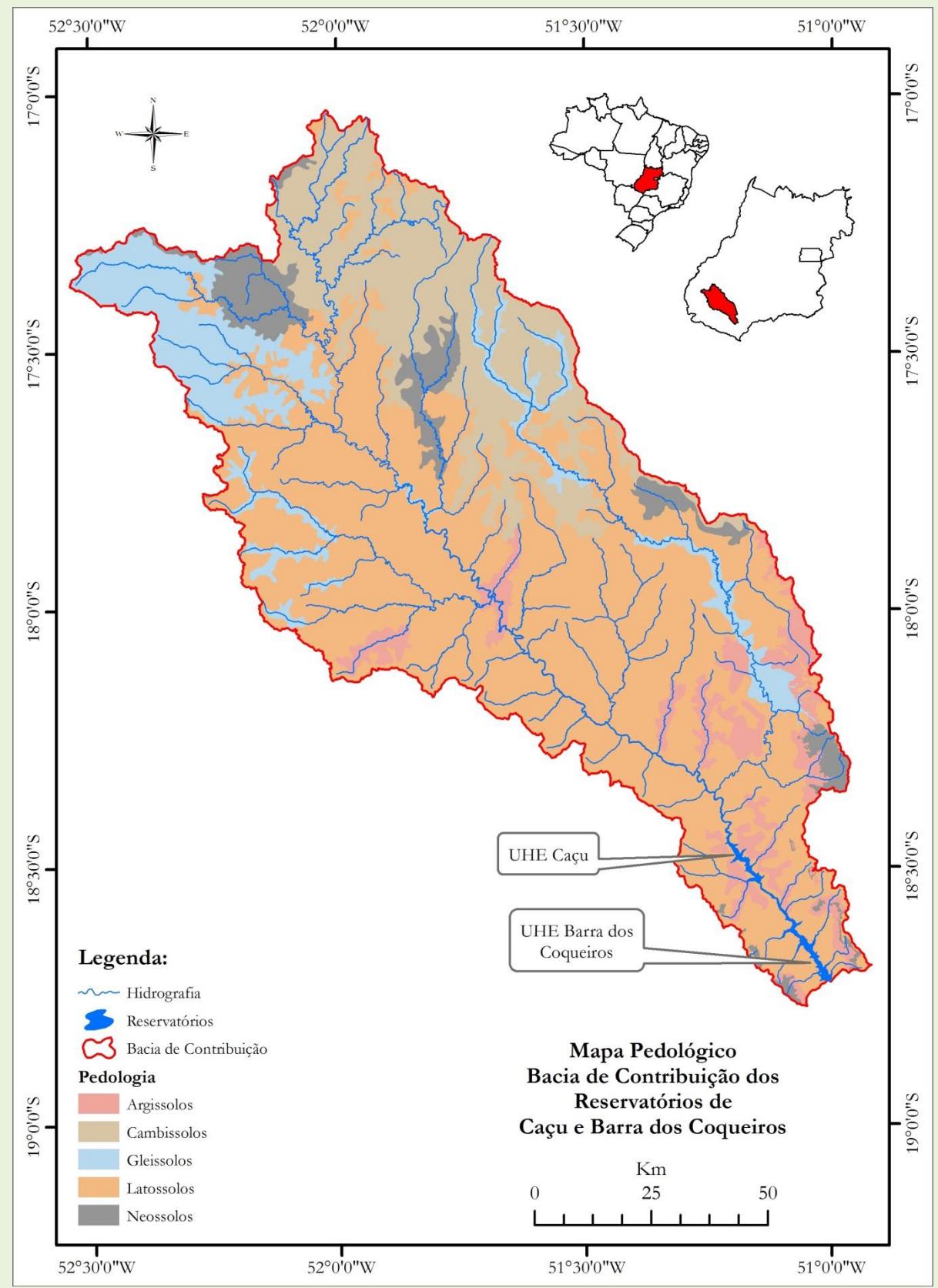
A partir de levantamentos baseados no Radambrasil (1983) em escala 1:1.000.000, e adequado à nova classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2006) é possível distinguir na área estudada as seguintes subordens de solos: Argissolos; Cambissolos; Gleissolos; Latossolos; Neossolos (Figura 6). Assim como na maior parte da bacia, os reservatórios das UHEs estão sobre Latossolos.

Figura 5: Mapa Litológico da Bacia de Contribuição



Fonte: Do autor.

Figura 6: Mapa Pedológico da Bacia de Contribuição



Fonte: Do autor.

Cabral et al. (2011) realizaram um mapeamento do uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Claro referente ao ano de 2010, e encontraram as seguintes proporções para as classes de Pastagem, Mata/Cerrado e Culturas: 65,01 % de áreas de pastagens; 21,9 % de áreas de mata/cerrado; e 4,18 % de áreas de culturas. Estudos realizados por Paula et al. (2012) mostram que a bacia hidrográfica do rio Claro tem predominância de áreas de pastagens, ocupando cerca de 75 % da área, seguido das áreas de mata e cerrado, representando cerca de 21 % da área. As áreas de cultura tem pequena representação na região, com cerca de 0,5 % de ocupação na bacia. Estudos deste tipo mostram que a bacia ainda tem uma baixa ocupação de áreas de plantio, áreas estas mais impactantes na geração de sedimentos.

A atividade pecuária é marcante na região desde a década de 1960 com maior intensidade na década de 1970, em que houve movimentos de substituição das pastagens naturais pelas pastagens plantadas (PAULA et al., 2012). É uma característica da região a pequena prática agrícola, porém que está crescendo com o advento das usinas sucroalcoleiras instaladas na área da bacia.

### **3. OBJETIVOS:**

#### **3.1. Gerais**

O objetivo desta dissertação é avaliar o método NDWI quanto à determinação das taxas de sedimentos em suspensão com validação das amostragens em campo, nos reservatórios das UHEs Caçu e Barra dos Coqueiros.

#### **3.2. Específicos**

- Avaliar o método NDWI quanto à determinação das taxas de sedimentos em suspensão;
- Avaliar e verificar a aplicação do método de forma conjunta às coletas de campo;
- Calibrar, com amostragem em campo, os valores remotamente encontrados;
- Identificar e mapear as áreas de sedimentação no reservatório;
- Gerar um índice de relação entre valores de NDWI e resultados de campo.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL

### 4.1. Produção de Sedimentos

A sedimentometria refere-se à medida da quantidade de sedimento em transporte pelos cursos d'água. Essa medida é feita por diversos métodos, diretos e indiretos, sendo isto uma função do tipo de equipamento de medida e dos outros procedimentos. A *carga sólida* medida se refere à areia, silte e argila transportada em relação ao fenômeno qualitativo do movimento do sedimento, enquanto a *descarga sólida* se refere à quantidade em movimento (CARVALHO et al., 2000b). Neste trabalho é adotada uma técnica indireta da determinação do sedimento transportado ou em suspensão por sensoriamento remoto, considerando somente a presença ou não do material no corpo hídrico.

Pesquisas relacionadas a assoreamento de reservatórios começaram a aparecer com regularidade na literatura internacional durante a década de 30, através dos trabalhos de Flock (1934), Grover e Howards (1938); Eakin (1939). No Brasil a partir de 1981 é que foi dada maior ênfase ao problema, através dos trabalhos desenvolvidos por Ponçano et al. (1981); Gimenez et al. (1981); Carlstron Filho et al. (1981) que apresentaram resultados de estudos desenvolvidos pelo IPT em convênio com a Eletrobrás, nos reservatórios de Capivari (PR), Passo Real e Ernestina (RS), onde apresentaram um método de análise de assoreamento de reservatórios.

De acordo com Carvalho (1994 e 2000), a sedimentação é um processo derivado do sedimento, abrangendo a erosão, transporte nos cursos d'água e deposição dos sedimentos, sendo comum referir-se à sedimentação somente aos aspectos de assoreamento de reservatórios, pois no estudo do processo de assoreamento, busca-se compreender os procedimentos existentes para a previsão da evolução do fenômeno ao longo dos anos, visando determinar a vida útil.

Em pequenos reservatórios hidrelétricos, por exemplo, há velocidade de corrente suficiente para que o sedimento em suspensão seja escoado com facilidade, não se depositando. No entanto, o sedimento grosso, como areias e também pedregulhos, é transportado no leito, não sendo escoado pelos condutos e vertedouro, contribuindo diretamente para o depósito no lago (CARVALHO et al., 2000b).

Durante a estação seca, a maior parte do sedimento em suspensão de um reservatório provém da erosão no canal, gerando sedimentos com maior granulometria. Na estação chuvosa, a erosão do solo das encostas causada pelo escoamento superficial gera um sedimento relativamente mais fino que é transportado até as margens do lago (XU, 2002).

Os sedimentos em grande quantidade nos reservatórios trazem diversas consequências negativas à vida aquática, favorece a perda de qualidade da água prejudicando dessa forma os aspectos qualitativos e quantitativos dos recursos hídricos.

As grandes quantidades de sedimentos transportadas pelos cursos de água, provenientes da ação erosiva da água sobre o solo da bacia, provocam a degradação dos corpos d'água e prejuízos significativos à população, ao desenvolvimento socioeconômico e ao ambiente natural.

Os sedimentos em suspensão presentes nos rios se originam, em maior parte, da erosão pluvial. O processo de erosão pluvial consiste em desagregação, transporte e deposição do material (ELLISON, 1947; FOSTER e MEYER, 1977 apud VOLK, 2006). A desagregação é a separação das partículas de solo, tanto pela ação de impacto das gotas, quanto pela ação cisalhante do escoamento originado da chuva. O transporte das partículas desagregadas também ocorre tanto pelo salpicamento gerado pelo impacto das gotas da chuva quanto pela enxurrada e em terrenos inclinados, a maior parte do transporte das partículas de solo desagregadas se dá pelo movimento da enxurrada. A deposição do material que foi desgastado e transportado representa a última

etapa e “ocorre quando a carga de sedimentos na enxurrada é maior do que sua capacidade de transporte” (VOLK, 2006, p. 05).

A erosão fluvial é aquela que se processa de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios, transportando e redistribuindo os sedimentos em suspensão e também o material das margens e do canal (CARVALHO, 2008; FERNANDEZ, 1990). Cunha (2012) aponta que os processos fluviais de erosão, transporte e deposição de sedimentos no leito alternam-se no decorrer do tempo e, espacialmente, são definidos pela distribuição da velocidade e da turbulência do fluxo dentro do canal, e, desta forma, a capacidade de erosão dos corpos hídricos depende da velocidade e turbulência, do volume e das partículas por elas transportadas em suspensão, saltação e rolamento.

É possível ainda analisar o movimento das ondas em um reservatório produzindo sedimentos em grande quantidade, conforme ressalta Carvalho et al. (2001). Estas ondas podem ser geradas pelo vento ou pelo movimento de embarcações. Enquanto nos mares, oceanos e grandes lagos as ondas geradas pelo vento são as que mais provocam erosões, tanto pela frequência com que atuam como pela energia que atingem, nos lagos menores e rios o movimento de embarcações, mesmo de pequeno porte podem assumir função erosiva de grande importância. As ondas geram o desprendimento das partículas que são imediatamente carreadas pela água (CARVALHO, 2001).

De forma antagônica à sua atuação em rios, a ação de ondas se torna mais importante do que o impacto da energia cinética das correntes sobre o fundo quando em reservatórios, dada a mudança da situação lótica (água corrente) para a lêntica (água parada) (CUNHA, 2012).

A erosão é um processo de perda de solo da crosta terrestre e pode ser ocasionado por agentes naturais ou antrópicos, tendo natureza física, química e/ou biológica. No entanto, os processos

erosivos ocorrem de forma diferenciada nos diversos domínios ambientais existentes na Terra (GUERRA, 1999). No domínio do Cerrado, domínio este que a área de estudo está inserida, a concentração de precipitações se dá de forma intensa, com chuvas concentradas durante aproximadamente seis meses, o que propicia uma alta concentração de energia no meio natural, facilitando o início e a continuidade dos processos erosivos. A grande concentração de energia liberada pelas chuvas, associada à ocupação humana pouco ordenada, a susceptibilidade dos solos ao processo erosivo, faz com que o Cerrado apresente uma grande quantidade desses processos nas mais variadas escalas (BACCARO, 1999).

Sob a análise sistêmica dos processos existentes no canal fluvial, principalmente do ponto de vista dos processos hidrossedimentológicos, é relevante mencionar:

Na ótica de um sistema, a capacidade de erosão de um rio, bem como o transporte e deposição de sedimentos, dependem, entre outros fatores, da vazão e da natureza das correntes fluviais, refletindo em uma condição estável (equilibrada) do canal fluvial. Qualquer modificação rompe com esta estabilidade, repercutindo de imediato nas condições de erosão, transporte e deposição, até chegar a uma nova condição de equilíbrio (CHRISTOFOLLETTI, 1980; SILVA et al., 2003). Desta forma, os processos de desgaste, transporte e deposição de um sistema fluvial variam no decorrer do tempo e são interdependentes no espaço, resultando não apenas das mudanças do fluxo, como também da carga existente. (COELHO, 2008, p. 18)

Neste caminho de análise, o estudo da dinâmica dos sedimentos em um ambiente represado traz à tona a discussão sobre a alteração de processos pela construção de barragens. Há a alteração do regime de sedimentos na parte a montante da barragem, onde o nível de base local é elevado, alterando a forma do canal e a capacidade de transporte sólido e gerando o assoreamento no encontro do canal principal e também dos afluentes com o reservatório.

Estudos realizados por Grimshaw e Lewin (1980) apud (CUNHA, 2012) em duas bacias hidrográficas semelhantes em tamanho e em características naturais, localizadas na Grã-Bretanha, mostraram, por meio das medições entre dois anos, que a carga de sedimentos foi reduzida em 90 % a jusante do rio represado. Este estudo mostra que estes sedimentos que normalmente

passavam pelo rio não seguem mais o seu caminho natural, sendo, portanto, depositados no reservatório.

#### **4.2. Distribuição dos Sedimentos**

Os sedimentos dissolvidos, em suspensão ou de fundo transportados por um curso d'água, são resultado das interações entre a massa líquida em movimento, a superfície do canal fluvial e os diferentes tipos de sedimentos transportados. A força da gravidade e a tensão de cisalhamento são duas das forças principais que atuam sobre a dinâmica fluvial e o transporte de sedimentos. (CHRISTOFOLETTI, 1981).

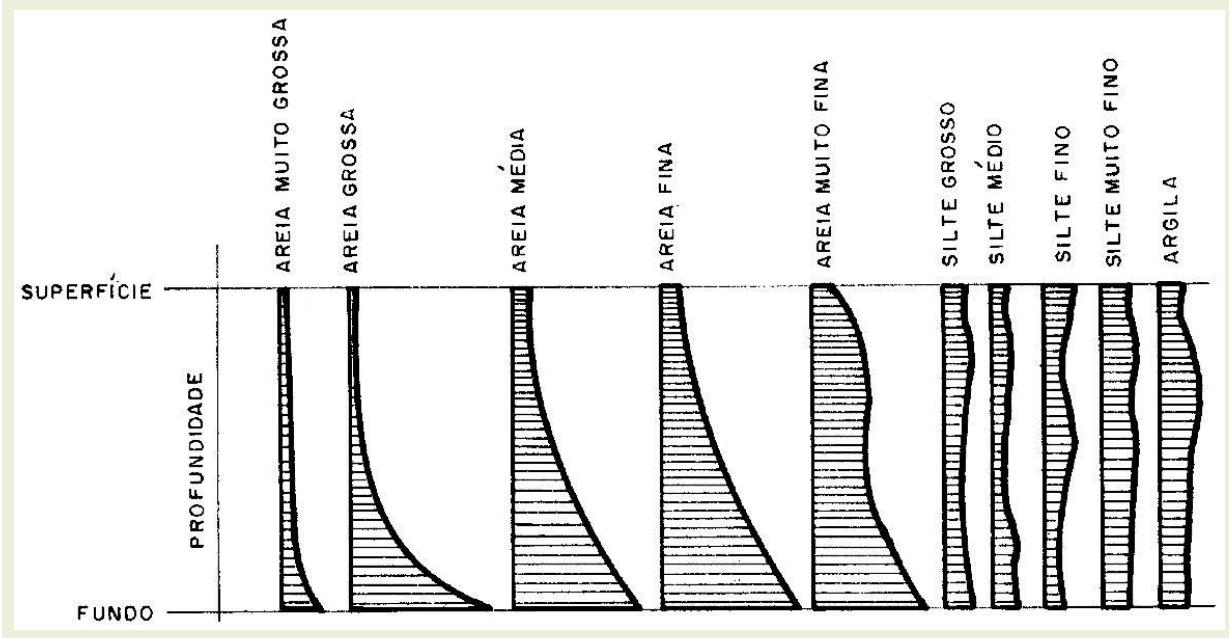
O deslocamento e o transporte de sedimentos dependem da forma, tamanho, peso da partícula e das forças exercidas pela ação do escoamento. Quando essas forças se reduzem até a condição de não poderem continuar a deslocar a partícula, ocorre o processo de deposição. Esses depósitos podem ser de pequeno, médio ou grandes volumes. Também podem ser transitórios ou permanentes, como o assoreamento. Um depósito de sedimento permanente sofre a ação do peso da água e de seu próprio peso, compactando-se. (CARVALHO, 2008).

O transporte de sedimentos em uma bacia varia muito desde as partes mais altas até as planícies, variação esta que depende da litologia, do tipo de solo, da cobertura vegetal, do regime de chuvas (CARVALHO op. cit.). No caso dos reservatórios ocorre o desaparecimento do regime de fluxo (ambiente lento), provocando a retenção no lago de material particulado produzido por toda a bacia.

O sedimento em suspensão está sujeito à ação do seu peso e, principalmente, à ação da velocidade da corrente na direção horizontal. Desta forma, ele está distribuído de forma mais concentrada perto do leito e menos concentrada na superfície. As partículas mais grossas dos sedimentos em suspensão, que são geralmente areias, representam uma variação crescente da

superfície para o fundo, e as partículas finas, como silte e argila, têm uma distribuição uniforme na vertical (CARVALHO, 1994). (Figura 7).

Figura 7: Distribuições de concentração na vertical para sedimentos em um curso d'água.



Fonte: Subcommittee on Sedimentation, 1963, apud Carvalho, 1994.

Sobre a distribuição e deposição dos sedimentos em reservatórios, Carvalho et al. (2000a, p. 11) ressaltam:

Sedimentos que se depositam pela influência do reservatório se estendem para montante e para jusante, não se distribuindo uniformemente mesmo dentro do lago. A deposição de montante se denomina **depósito do remanso** (*backwater deposit*), em referência ao fenômeno hidráulico, sendo também remontante à medida que aumentam os depósitos nessa área. As deposições de dentro do reservatório são chamadas de **delta** (*delta*), **depósito de margem** (*overbank*) e **depósito do leito** (*bottom-set deposit*). O delta se forma com sedimentos grossos, enquanto os depósitos do interior, com sedimentos mais finos (MAHMOOD, 1987). As enchentes produzem outro tipo de deposição, ocorrendo ao longo do curso d'água e do reservatório, formada por sedimentos finos e grossos e que é denominado **depósito de várzea** ou **depósito de planície de inundação** (CARVALHO et al., 2000a, p. 11).

Desta forma, é notório que estes depósitos causam diferentes impactos ou consequências. Os depósitos de remanso criam problemas de enchentes a montante. Os depósitos do interior do lago causam a redução da capacidade de armazenamento, onde a característica do delta é condicionada pela variação do nível d'água. Estes depósitos do delta reduzem gradualmente a capacidade útil do reservatório e, por outro lado, os depósitos do leito reduzem o volume morto. Os sedimentos que alcançam a barragem e passam pelo vertedouro e condutos, provocam abrasões nas estruturas das barragens (CARVALHO et al., 2000a).

#### **4.3. Radiação Eletromagnética**

A aquisição de imagens multiespectrais da superfície da Terra se torna possível por meio da tecnologia chamada sensoriamento remoto. Este termo se destina à técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Os antigos sistemas fotográficos eram equipados com um detector fotoquímico, e por isso o filme pancromático era sensível a toda a radiação visível indiscriminadamente. Com a evolução tecnológica, desenvolveram-se sistemas que permitiram separar a energia do espectro visível e do espectro infravermelho em várias regiões, e isto deu origem às imagens multiespectrais (NOVO, 2007).

Para que o sensor capte a imagem do objeto alvo, os sistemas do sensoriamento remoto obtêm a informação da radiação eletromagnética (REM), que é a forma de energia capaz de se transportar pelo espaço. Esta radiação eletromagnética é convertida em uma imagem, possibilitando análises e interpretações (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Para explicar sobre a radiação eletromagnética, Meneses e Almeida (2012, p. 04) afirmam que:

A explicação do que é a radiação eletromagnética (REM) começa com o entendimento da dualidade do comportamento da sua natureza: *onda* e *energia*. Isso quer dizer que a REM que se propaga pelo espaço vazio, como a luz solar, é, ao mesmo tempo, uma forma de onda e uma forma de energia. Esse conceito de dualidade é extremamente importante para o sensoriamento remoto, pois sempre que alguém estiver analisando qualquer tipo de imagem de sensoriamento remoto, a coexistência da radiação eletromagnética na forma de onda e na forma de energia deverá ser considerada para que se possa explicar tudo o que se observa nas imagens com referência às características dos objetos. A dualidade do comportamento da radiação eletromagnética, onda e energia, é formulada pelos modelos denominados de ondulatório (onda) e corpuscular (energia). (MENESSES e ALMEIDA, 2012, p. 04).

As imagens de sensoriamento remoto são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma matriz. Cada elemento desta matriz tem sua localização definida com um sistema de coordenadas do tipo coluna e linha, representados por *x* e *y* respectivamente, de forma geograficamente identificada. O nome dado a estes elementos é *pixel*, onde cada um destes corresponde sempre a uma área com as mesmas dimensões na superfície terrestre (SILVA, 2014).

#### 4.4. Comportamento Espectral da Água

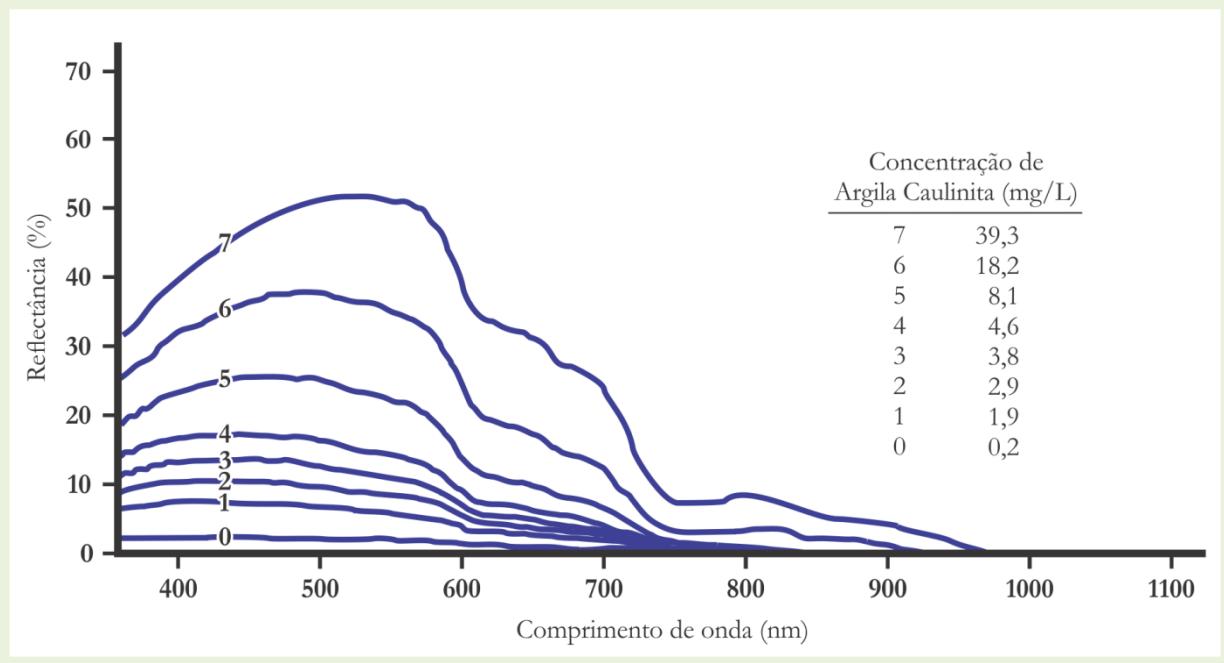
A cor da água e a quantidade de sólidos em suspensão tem forte participação no comportamento espectral da água. A transparência da água varia de alguns centímetros a dezenas de metros. Esta região da coluna d'água chama-se zona eufórica, varia com a capacidade da água em atenuar a radiação subaquática e corresponde à profundidade onde a intensidade da radiação solar equivale a 1% daquela que atinge a superfície (ESTEVES, 1998 apud FERREIRA e PEREIRA FILHO, 2009).

A maior parte do fluxo incidente sobre a água pura não é refletido, como ocorre no solo e na vegetação, mas sim absorvido ou transmitido. Nos comprimentos de onda do visível, pouca luz é absorvida, uma pequena quantidade é refletida e a maior parte é transmitida. Já no espectro do

infravermelho próximo grande parte da luz é absorvida, ou seja, sua resposta espectral para os corpos d'água é quase nula (LIMA et al., 2005 apud FERREIRA e PEREIRA FILHO, 2009).

Em uma experiência realizada por Richardson e LeDrew (2006) avaliou a argila em suspensão e seus efeitos na reflectância. Foi conduzido um aumento na concentração de Argila Caulinita – *Kaolin Clay* – em sete graus diferentes a partir de água pura. A reflectância aumentou de forma gradual, com a intensidade de reflectância acima de 500 nanômetros (nm) inversamente correlacionada ao padrão do espectro de absorção de água (Figura 8).

Figura 8: Experiência de reflectância da água com argila em suspensão.



Fonte: Adaptado de Richardson e LeDrew, 2006.

A experiência realizada por Richardson e LeDrew (2006) aponta que a média dos picos de reflectância estão entre 500 e 600 nm (banda verde), reportando muitos sedimentos na água, e a forte absorção da água está entre 750 e 850 nm (banda do infravermelho próximo). Os autores concluem ainda que a reflectância do infravermelho próximo mais considerável foi encontrado nas cargas mais elevadas de argila.

A água tem como característica a baixa reflectância, pois a maior parte da energia luminosa incidente é transmitida, absorvida e dispersada pelo corpo. Em geral, o espectro da radiação refletida pela água ocupa a faixa de comprimentos de onda entre 400 e 900 nm, o que equivale à faixa do visível e o infravermelho próximo. Corpos d'água mais puros são mais evidentes por apresentarem baixa reflectância, principalmente nas faixas de comprimento de onda correspondentes ao infravermelho próximo. A presença de sedimentos na água provoca uma reflectância mais intensa, porém ainda reduzida pelos efeitos de absorção, transmissão e dispersão da radiação incidente na água. Isso significa que águas com elevado grau de concentração de sedimentos em suspensão apresentarão reflectâncias maiores que águas puras e menores que regiões de solos para uma mesma faixa espectral. (POLIDORIO et al., 2004)

#### 4.5. Técnica do NDWI

Pesquisas realizadas por McFeeters (1996) e outros trabalhos baseados na proposta deste autor, como os de Gao (1996), Xu (2005; 2006) mostram que o Índice da Diferença Normalizada de Água (NDWI) é um método destinado a delinear as feições de águas abertas e reforçar a sua presença por meio de imagens digitais. O NDWI utiliza a reflexão da radiação do espectro infravermelho-próximo - IVP (*near-infrared - NIR*) e de luz verde visível para reforçar a presença de feições de água enquanto elimina a presença de solo e vegetação terrestre.

De acordo com a proposta de McFeeters (1996, p. 1429), estes comprimentos de onda foram escolhidos para:

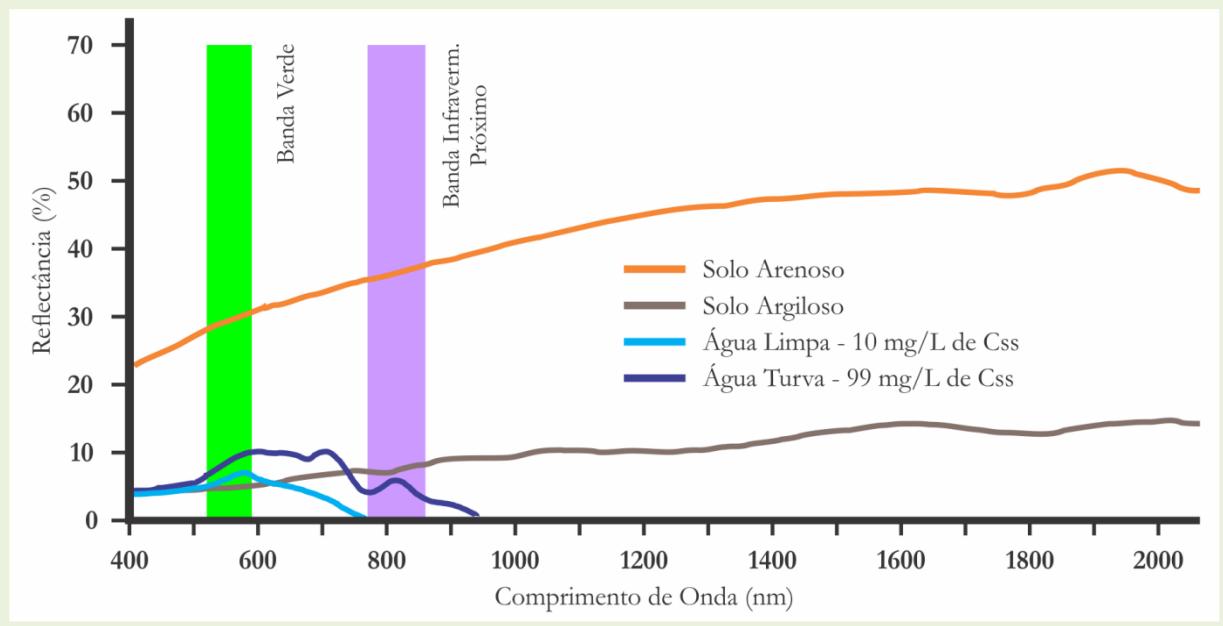
(1) maximizar a reflectância típica de corpos hídricos usando o comprimento de onda da luz verde; (2) minimizar a baixa reflectância do IVP pela água; e (3) tirar proveito da alta reflectância do IVP pela vegetação e pelo solo. (McFEETERS, 1996, p. 1429)

Por algum tempo foi utilizado o método de uma única banda, geralmente utilizando a radiação refletida do espectro infravermelho próximo (WORK e GILMER 1976, WHITE 1978,

RUNDQUIST et al., 1987 apud McFEETERS, 1996). Este procedimento tem sido utilizado devido à forte absorção do IVP pela água e forte reflexão pela vegetação e solo seco, mostrando superfícies vegetadas como sendo brancas, enquanto as superfícies de água aparecem escuras e posteriormente separadas por um limite entre terra e água. No entanto, a seleção subjetiva do valor limite pode conduzir a uma sobre ou subestimação da área de águas, que são por vezes misturadas ao ruído de sombras. O método multibanda aproveita as diferenças do comprimento refletido de cada banda envolvida (XU, 2006).

Analizando-se o gráfico do comprimento de onda em relação à reflectância dos alvos, tem-se que os valores de reflectância da banda verde para feições de solo são menores em comparação aos valores da banda IVP, e esta relação se inverte quando o alvo são corpos hídricos (Figura 9).

Figura 9: Comportamento espectral dos alvos por banda utilizada.



Fonte: Adaptado de Ferreira e Pereira Filho, 2009.

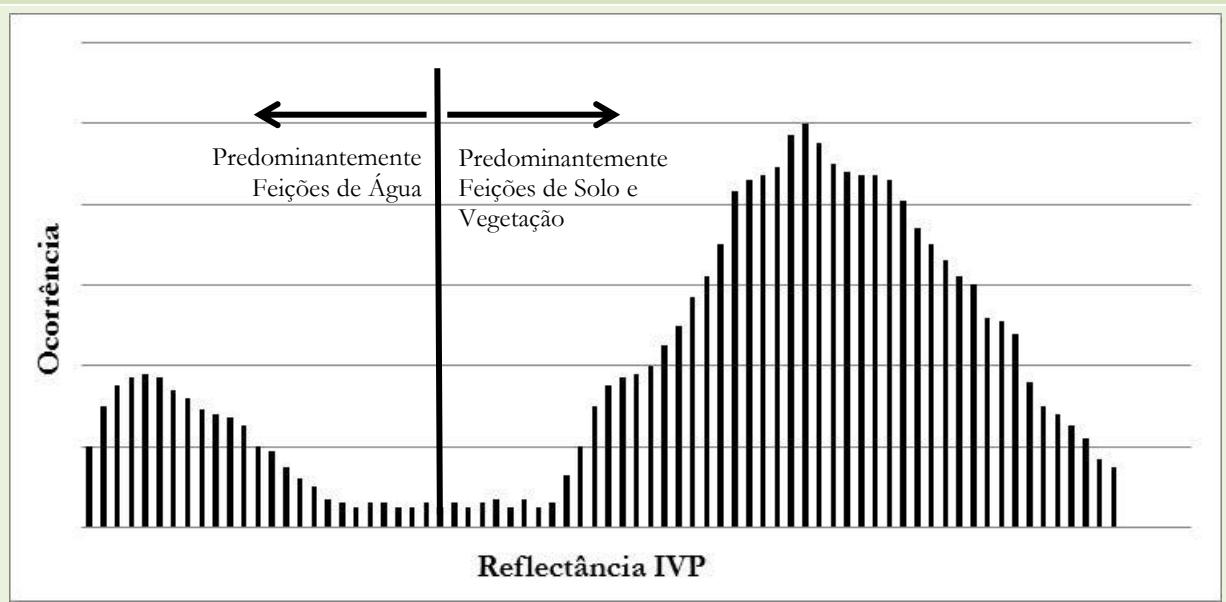
Dada esta diferença inversamente proporcional entre a reflectância dos alvos, entende-se que se o valor obtido do processamento do NDWI for negativo prevalece o solo em relação à água, e se

for positivo, prevalece a água em relação ao solo (McFEETERS, 1996; XU, 2006). Quanto mais positivamente diferente de zero for o pixel obtido, maior é a pureza da água e menor será, portanto, a Concentração de Sedimentos em Suspensão (Css).

Como resultado da aplicação do NDWI, as feições de água têm valores positivos e, consequentemente, são reforçadas, enquanto as feições de vegetação e de solo geralmente tem valor zero ou negativo e assim são suprimidas das análises (XU, 2006).

A distribuição da frequência da reflectância relacionada à ocorrência de valores de reflectância do IVP refletido é usada para delimitar feições de água (Figura 10). Este método adota que a ocorrência dos baixos valores da reflectância estão associados à presença de água devido à baixa reflexão da banda IVP pela água, e altos valores de reflectância estão associadas às feições do solo e de vegetação, devido à sua elevada reflexão da banda IVP (McFEETERS, 1996).

Figura 10: Histograma da Reflectância da banda IVP para delimitação das feições de água.



Fonte: Adaptado de McFeeters (1996).

Outros estudos com NDWI recentes também foram realizados com o uso de imagens Landsat ETM+ de resolução de 30 metros (JACKSON et al., 2004; WALTHALL et al., 2004), onde normalmente são realizadas medições de calibração tornando válidas as relações derivadas fora da região estudada. Na verdade, uma alta resolução espacial é desejável de modo a evitar a mistura dos sinais de reflectância originários de diferentes tipos de alvos, mas os satélites operacionais de alta resolução tem baixa frequência temporal e, portanto, inapropriado para a programação das medições de calibração dos parâmetros (HOU Borg et al., 2007).

#### 4.6. Tratamento Estatístico dos Dados

Para avaliar estatisticamente o desempenho das técnicas e suas interações, calcularam-se indicadores estatísticos comparando-se os valores encontrados por cálculos e os medidos. Os indicadores estatísticos utilizados nessa avaliação foram: coeficiente de correlação ( $r$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e correlação de postos de Spearman ( $\rho$ ).

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita, mas inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis (LOPES et al., 2014) (Tabela 1).

Tabela 1: Interpretação dos coeficientes de correlação e determinação de Pearson.

Escala de Pearson		
Fraca	Moderada	Forte
$0,00 \leq r \leq 0,50$	$0,50 \leq r \leq 0,90$	$0,90 \leq r \leq 1,00$
$0,00 \leq R^2 \leq 0,25$	$0,25 \leq R^2 \leq 0,81$	$0,81 \leq R^2 \leq 1,00$

Fonte: Adaptado de Lopes et al., 2014.

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. O coeficiente de determinação,  $R^2$ , é a porcentagem da variação da variável dependente explicada pela variável independente (LOPES et al., 2014) (Tabela 1).

O outro coeficiente de correlação utilizado, o de Spearman, realiza uma transformação de postos, e por isso pode ser utilizado nas situações em que a relação entre os pares de dados não é linear. O coeficiente de correlação de postos de Spearman, denominado pela letra grega “ $\rho$ ” (rho), é uma medida de correlação não paramétrica, ou seja, avalia uma função monótona arbitrária que pode ser a descrição da relação entre duas variáveis, sem fazer nenhuma suposição sobre a distribuição de frequências das variáveis (ZAR, 1998).

Os resultados da correlação de Spearman, tanto positivos quanto negativos, podem ser interpretados da seguinte maneira (Tabela 2):

Tabela 2: Interpretação dos coeficientes de correlação de Spearman.

Valor de $\rho$ (positivos ou negativos)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação Muito Fraca
0,20 a 0,39	Correlação Fraca
0,40 a 0,69	Correlação Moderada
0,70 a 0,89	Correlação Forte
0,90 a 1,00	Correlação Muito Forte

Fonte: Adaptado de Shimakura, 2014

Ao contrário do coeficiente de correlação de Pearson, não requer a suposição que a relação entre as variáveis é linear, nem requer que as variáveis sejam medidas em intervalo de classe; pode ser usado para as variáveis medidas no nível ordinal. O coeficiente de correlação de Spearman é menos sensível do que o de Pearson a valores muito distantes do esperado.

O valor de “ $\rho$ ” é obtido por meio da seguinte equação (Equação 1):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{(n^3 - n)}$$

Equação 1

Onde:

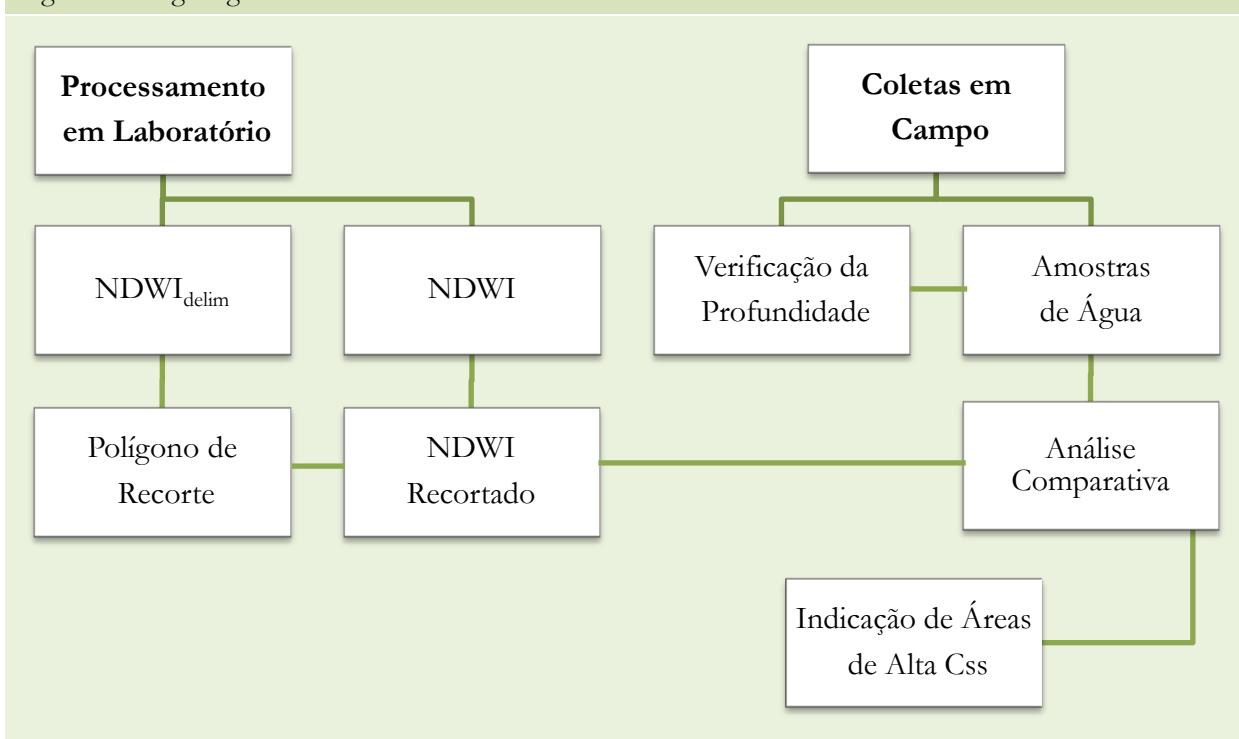
$d_i$  é a diferença entre cada posto de valor correspondentes de x e y; e

$n$  é o número dos pares de valores.

## 5. METODOLOGIA

A determinação dos sedimentos em suspensão por meio de imagens multiespectrais teve duas etapas de execução: processamento em laboratório e coletas em campo (Figura 11). Além disso, as coletas de campo devem ser próximas às datas de obtenção das imagens para avaliação e calibração mais precisa dos dados.

Figura 11: Organograma de atividades.



Fonte: Do autor.

### 5.1. Processamento do NDWI

A obtenção dos valores georreferenciados de sedimentos em suspensão e a profundidade do reservatório será determinada pelo Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI).

Entretanto, antes do cálculo do NDWI, utiliza-se o NDWI modificado ( $NDWI_{delim}$ ), para delimitar a área do reservatório, tornando a análise restrita apenas ao corpo aquático. Isto permitiu eliminar a mistura de informações presente nos pixels de borda. A delimitação é realizada por meio de (Equação 2):

$$NDWI_{delim} = \frac{NIR - G}{NIR + G}$$

Equação 2

Onde:

G é o valor digital do pixel correspondente à faixa verde do espectro visível; e  
NIR é o valor digital do pixel correspondente à faixa do infravermelho próximo.

Desta forma, os resultados obtidos por este cálculo se tornam mais discrepantes e facilitam a delimitação do pixel sem influência de borda. Esta delimitação permitirá fazer o recorte do cálculo ordinário do NDWI.

O NDWI faz uso do sinal refletido nas regiões do infravermelho próximo e do verde visível para realçar a presença de tais feições enquanto elimina a influência do solo e vegetação terrestre (McFEETERS, 1996). O índice é calculado por (Equação 3):

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$$

Equação 3

Como resultado, características da água têm valores positivos e, portanto, são reforçadas, enquanto a vegetação e solo geralmente têm valores nulos ou negativos e, portanto, são suprimidas (McFEETERS, 1996).

As imagens utilizadas são obtidas por meio do satélite Resourcesat IRS-P6 de 23,5 metros de resolução espacial, com o uso da banda 2 (verde – 0,52-0,59 μm) e banda 4 (infravermelho próximo – 0,77-0,86 μm) (Tabela 3). As bandas verde e infravermelho próximo foram utilizadas no processamento de dados do reservatório, utilizando o software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2008) aliado à outras técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

Tabela 3: Satélite IRS-P6, Sensor LISS-III.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada
LISS III (Linear Imaging Self-Scanner).  Satélite IRS-P6 (RESOURCESAT-1)	VERDE	0.52-0.59 μm	23,5 m	24 dias	141 km
	VERMELHO	0.62-0.68 μm			
	INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0.77-0.86 μm			
	INFRAVERMELHO MÉDIO	1.55-1.70 μm			

Fonte: INPE, 2013.

Os dados obtidos a partir das imagens devem ser calibrados pelos resultados obtidos em campo, pelas amostras de sedimentos e profundidade do local. Assim, uma etapa importante da aplicação desse método consistiu em selecionar corretamente os pontos de calibração, em que serão coletadas amostras de água e profundidade, utilizando como base áreas críticas observadas no processamento de laboratório.

## 5.2. Coletas em Campo

Para a escolha dos 14 pontos de amostragem, 07 em cada lago, foi feita uma análise dos afluentes dos reservatórios. Esta análise baseou-se em deduzir quais dos afluentes tem maior contribuição de sedimentos para cada reservatório e isto foi feito utilizando a percepção relacionada às características morfológicas do canal, como: entalhamento; área de drenagem; densidade e;

comprimento. Este conjunto de fatores permitiu escolher 6 afluentes e o canal principal do rio represado, totalizando 7 pontos em cada um dos reservatórios.

Desta forma, os pontos de monitoramento foram posicionados dentro da área do reservatório, ou seja, em ambiente lêntico, cada um próximo ao encontro com o afluente selecionado anteriormente (Tabela 4, Figura 12 e Figura 13):

Tabela 4: Pontos de coleta *in situ* nos reservatórios.

UHE Barra dos Coqueiros			UHE Caçu		
Pontos	Coord. X	Coord. Y	Pontos	Coord. X	Coord. Y
BCQ-P1 Rio Claro - Remanso	485915	7948928	CAÇ-P1 Salto do Marianinho	476472	7964633
BCQ-P2 Córrego da Sucuri	489624	7939529	CAÇ-P2 Córrego Furnas	478718	7955402
BCQ-P3 Córrego dos Coqueiros (Margem direita)	492846	7936865	CAÇ-P3 Córrego Caçu	481719	7951024
BCQ-P4 Córrego da Guariroba	497987	7931194	CAÇ-P4 Córrego Retiro	481854	7950943
BCQ-P5 Córrego da Pontezinha	493242	7942254	CAÇ-P5 Córrego do Caju	481286	7957961
BCQ-P6 Córrego da Matriz	496275	7938711	CAÇ-P6 Córrego dos Paulas	482949	7954623
BCQ-P7 Córrego dos Coqueiros (Margem esquerda)	499099	7933380	CAÇ-P7 Córrego Fundo	484271	7952414

Fonte: Do autor – Sistema de coordenadas UTM – 22K.

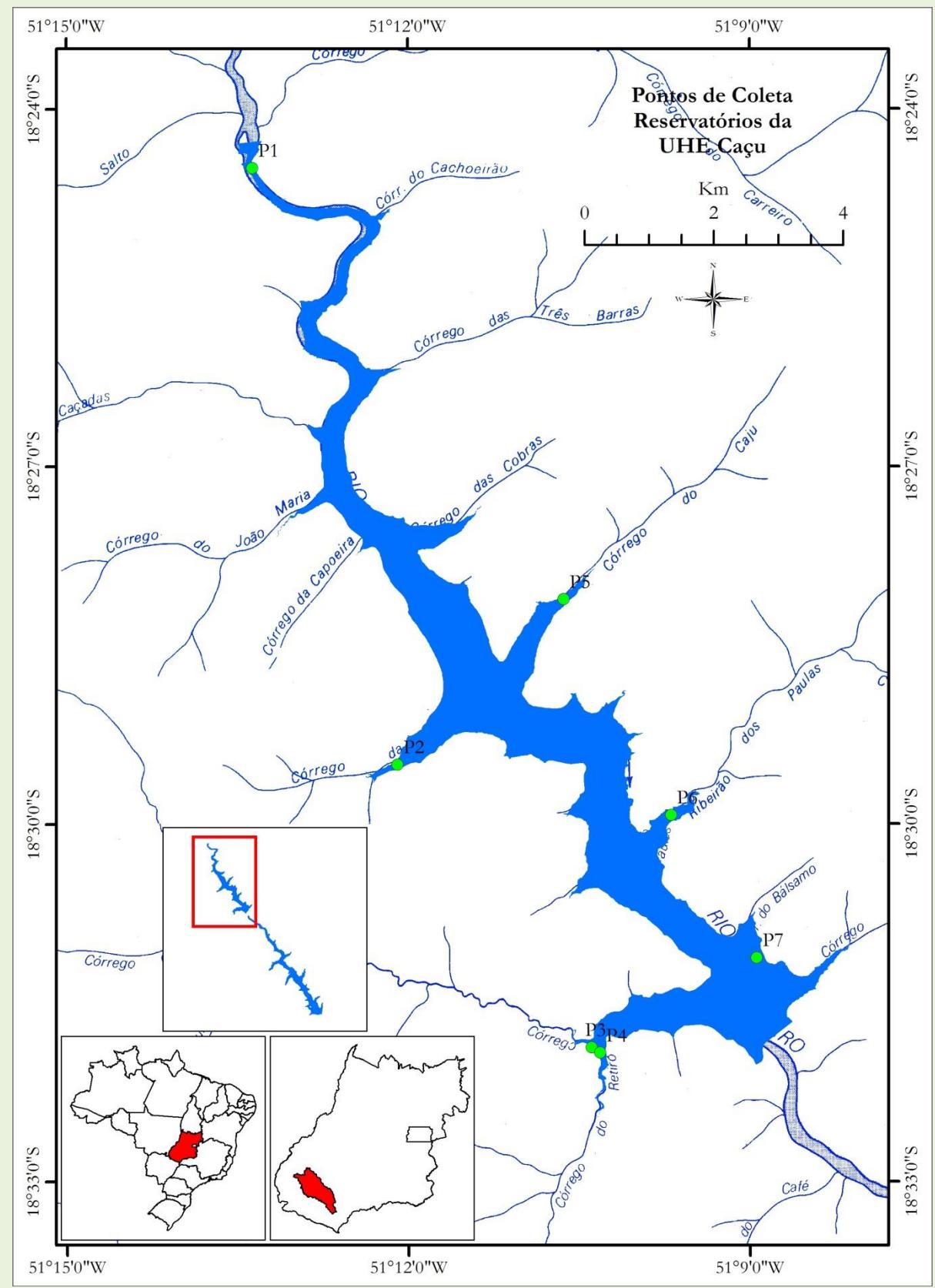
Foram realizadas 4 campanhas de campo para a coleta de material. Entretanto uma campanha realizada em março de 2013 teve de ser descartada devido à presença excessiva de nuvens na área de interesse e, portanto, serão abordados os dados de 3 campanhas de campo com suas respectivas imagens de satélite Tabela 5: Datas de campo e aquisição de imagens das UHEs Caçu e Barra dos Coqueiros. (Tabela 5):

Tabela 5: Datas de campo e aquisição de imagens das UHEs Caçu e Barra dos Coqueiros.

Campanhas de Campo	Datas de Campo	Datas das Imagens
1ª Campanha	03/09/2012	05/09/2012
2ª Campanha	20/12/2012	03/01/2013
3ª Campanha	19/06/2013	20/06/2013
<b>Campanha Descartada</b>	10/03/2013	X

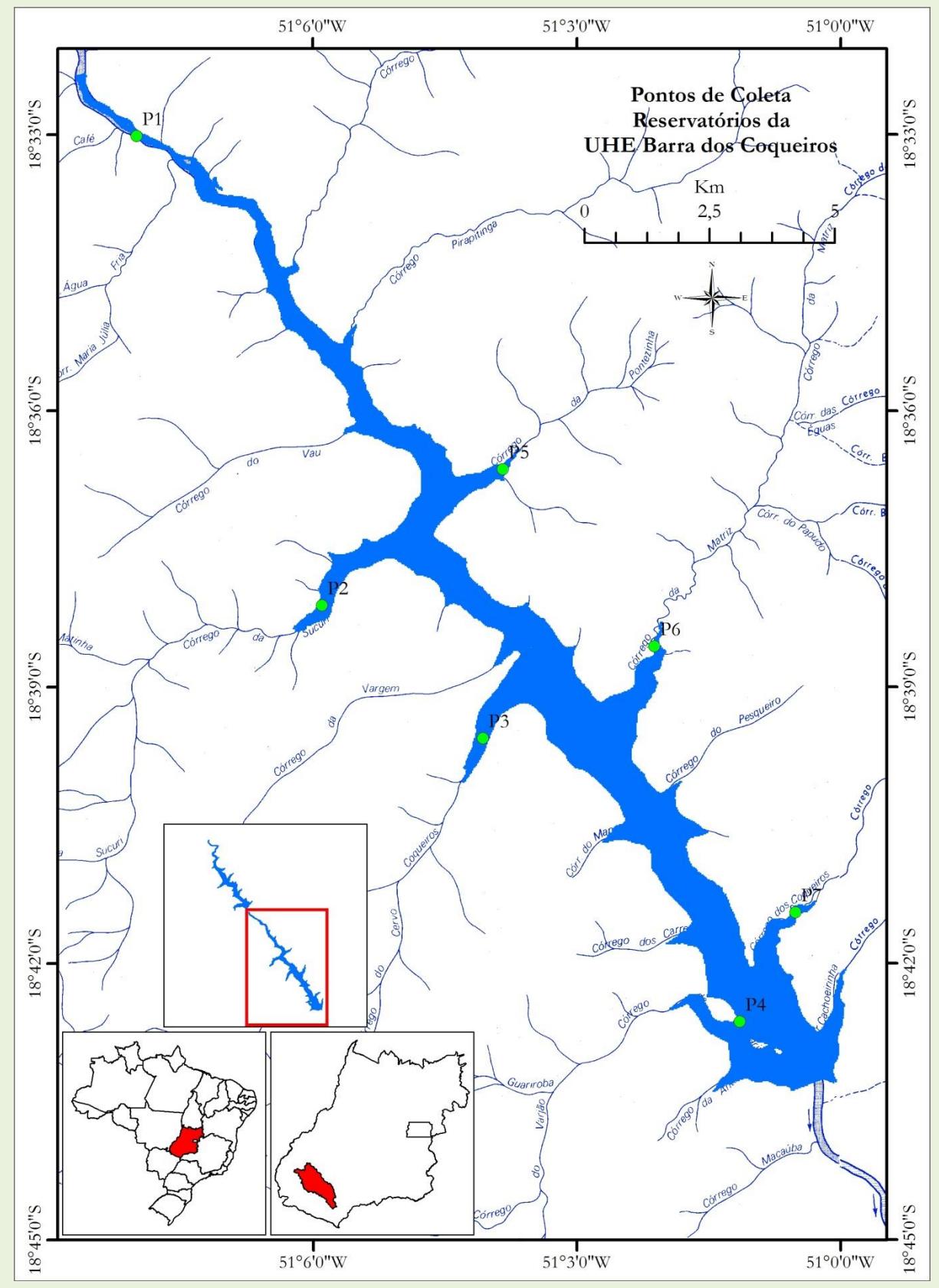
Fonte: Do autor

Figura 12: Localização dos pontos de coleta no reservatório da UHE Caçu.



Fonte: Do autor.

Figura 13: Localização dos pontos de coleta no reservatório da UHE Barra dos Coqueiros.

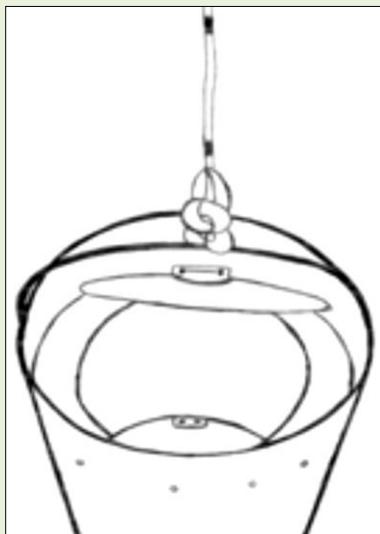


Fonte: Do autor.

Nestes pontos foram coletadas a profundidade e amostras de água para a determinação de sedimentos em suspensão. A verificação *in situ* da profundidade é realizada com o auxílio de corda milimetrada e peso para descida vertical e consequente constatação da medida.

Para a determinação dos sedimentos em suspensão foram coletadas amostras de água com a garrafa Pinese (Figura 14), que é um coletor instantâneo que possibilita a obtenção de material em diferentes profundidades.

Figura 14: Garrafa de Coleta (Pinese).



Fonte: Do autor

Em cada ponto foi coletada uma amostra próxima ao meio das duas margens do canal do afluente em questão, sempre a 60 % da profundidade local como orientado por Carvalho (1994) (Figura 15). A profundidade do local era, portanto medida para a realização da coleta da amostra de água a 60 % desta profundidade.

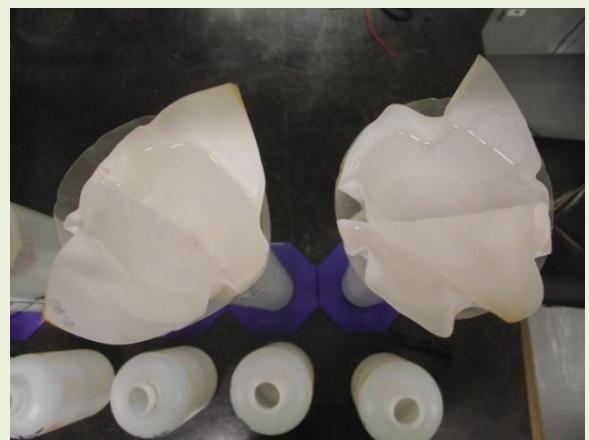
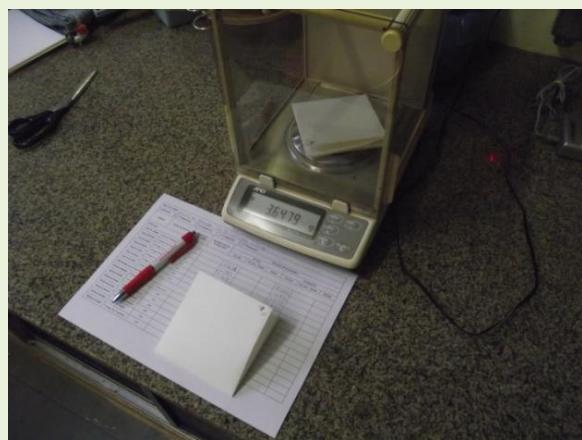
Figura 15: Armazenamento das amostras coletadas.



Fonte: Do autor

As amostras foram armazenadas em recipientes de 1 litro e encaminhadas para análise no Laboratório de Geomorfologia e Erosão dos Solos – LAGES-UFU. Posteriormente, o material foi despejado em papel filtro qualitativo (80 g/m<sup>2</sup>), previamente pesado. Realizada a filtragem, é retirada a umidade do papel filtro na estufa, que é pesado novamente. Assim, desprezando o peso do filtro foi possível obter a quantidade (mg/L) de sedimento para cada amostra de água (Figura 16 e Figura 17).

Figura 16: Processamento das amostras de sedimento em suspensão em laboratório.



Fonte: Do autor.

Figura 17: Processamento das amostras de sedimento em suspensão em laboratório.



Fonte: Do autor.

Para a avaliação da descarga sólida afluente ao reservatório foram utilizadas as seguintes variáveis para analisar os dados: tempo (segundos), vazão ( $m^3/s$ ) – dados fornecidos pela empresa operadora das UHEs – e média da concentração total do canal de sedimentos (mg/L). O produto destas três variáveis resulta na descarga sólida total (Qst) de sedimentos em suspensão em toneladas ao dia, obtida pelo método simplificado de Colby (1957) através da seguinte equação:

$$Qst = 0,0864 * Q * C$$

Onde:

Qst = descarga sólida total, em t/dia;

Q = descarga líquida ou vazão, em m<sup>3</sup>/s;

C = concentração de sólidos em suspensão, em mg/L;

0,0864 = fator de transformação de unidades.

A produção de sedimentos em altas concentrações é prejudicial para os reservatórios de usinas hidrelétricas, podendo afetá-los com depósitos indesejáveis. Segundo critérios internacionais, podem-se considerar os seguintes valores como indicação para estudos (CARVALHO et al., 2000a) (Tabela 6).

Tabela 6: Valores aceitáveis de produção de sedimento.

Níveis de Sedimentos	Produção de sedimentos	
	ton	km <sup>2</sup> * ano
<b>Baixo</b>		< 35
<b>Moderado</b>		70 a 175
<b>Alto</b>		> 175

Fonte: Carvalho et al., 2000a.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do processamento do NDWI foram selecionados nos valores entre o intervalo de 0 a 1. Os baixos valores encontrados do NDWI são produzidos pela baixa penetração da luz na água, ou seja, representam a presença de sedimentos em suspensão. Valores elevados indicam que há menor presença de sedimentos em suspensão e assim a luz pode penetrar mais na água do reservatório.

Em razão de ser uma análise normalizada, o processamento do NDWI, gera valores que, depois de selecionados para a análise de sedimentos em corpos d'água, variam de 0 a 1. Este fato torna estes resultados coerentes e comparáveis apenas quando se utiliza dados de uma única cena, não permitindo que duas ou mais cenas ou datas das imagens sejam analisadas em conjunto.

Os dados obtidos pelo processamento do NDWI e pelas coletas em campo são apresentados de forma bruta nas tabelas a seguir (Tabela 7 e Tabela 8).

Tabela 7: Valores do processamento NDWI e de Campo – UHE Caçú.

Pontos Analisados	UHE Caçú					
	Imagen 05/09/2012 NDWI	1ª Campanha 03/09/2012 Css (mg/L)	Imagen 03/01/2013 NDWI	2ª Campanha 20/12/2012 Css (mg/L)	Imagen 20/06/2013 NDWI	3ª Campanha 19/06/2013 Css (mg/L)
<b>P1</b>	0,401869	10,60	0,398693	118,40	0,538462	32,10
<b>P2</b>	0,428571	0,70	0,448276	94,90	0,493976	14,60
<b>P3</b>	0,433962	1,20	0,451327	100,90	0,538462	21,40
<b>P4</b>	0,456311	12,80	0,460870	128,50	0,544304	9,40
<b>P5</b>	0,401709	10,80	0,435897	140,70	0,538462	18,70
<b>P6</b>	0,416667	13,80	0,473684	136,90	0,546667	14,00
<b>P7</b>	0,488889	0,90	0,495495	161,70	0,512821	7,80

Fonte: Do autor

Tabela 8: Valores do processamento NDWI e de Campo – UHE Barra dos Coqueiros.

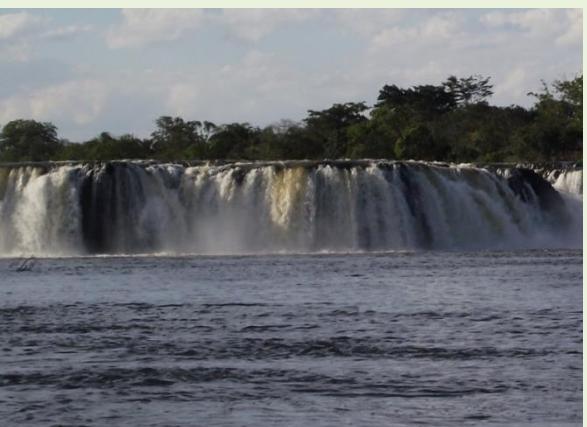
Pontos Analisados	UHE Barra dos Coqueiros					
	Imagen 05/09/2012 NDWI	1ª Campanha 03/09/2012 Css (mg/L)	Imagen 03/01/2013 NDWI	2ª Campanha 20/12/2012 Css (mg/L)	Imagen 20/06/2013 NDWI	3ª Campanha 19/06/2013 Css (mg/L)
<b>P1</b>	0,411765	14,50	0,453125	159,10	0,456522	23,10
<b>P2</b>	0,433962	17,10	0,405405	151,30	0,461538	13,10
<b>P3</b>	0,450980	30,50	0,481481	148,30	0,471264	14,40
<b>P4</b>	0,456311	35,40	0,504587	154,90	0,532468	13,50
<b>P5</b>	0,428571	5,60	0,464286	151,30	0,480519	13,40
<b>P6</b>	0,434343	10,60	0,464286	160,20	0,512821	18,20
<b>P7</b>	0,461538	13,90	0,452991	164,80	0,500000	4,00

Fonte: Do autor.

É possível verificar, mesmo por uma análise visual, que os dados não têm uma correlação esperada, ou seja, para os valores que se obtiveram altos índices de NDWI esperavam-se baixos valores de concentração de sedimentos em suspensão nas análises de campo, ou baixos índices NDWI exigem altas concentrações de sedimentos em campo. Nenhum destes anseios foi verificado nas análises par a par ou em análises de correlações.

Comparações visuais dos sedimentos em suspensão nas campanhas mostram coerência nos dados de campo pela coloração da água em ambos os reservatórios (Figura 18).

Figura 18: Sedimentos da água nas três campanhas.

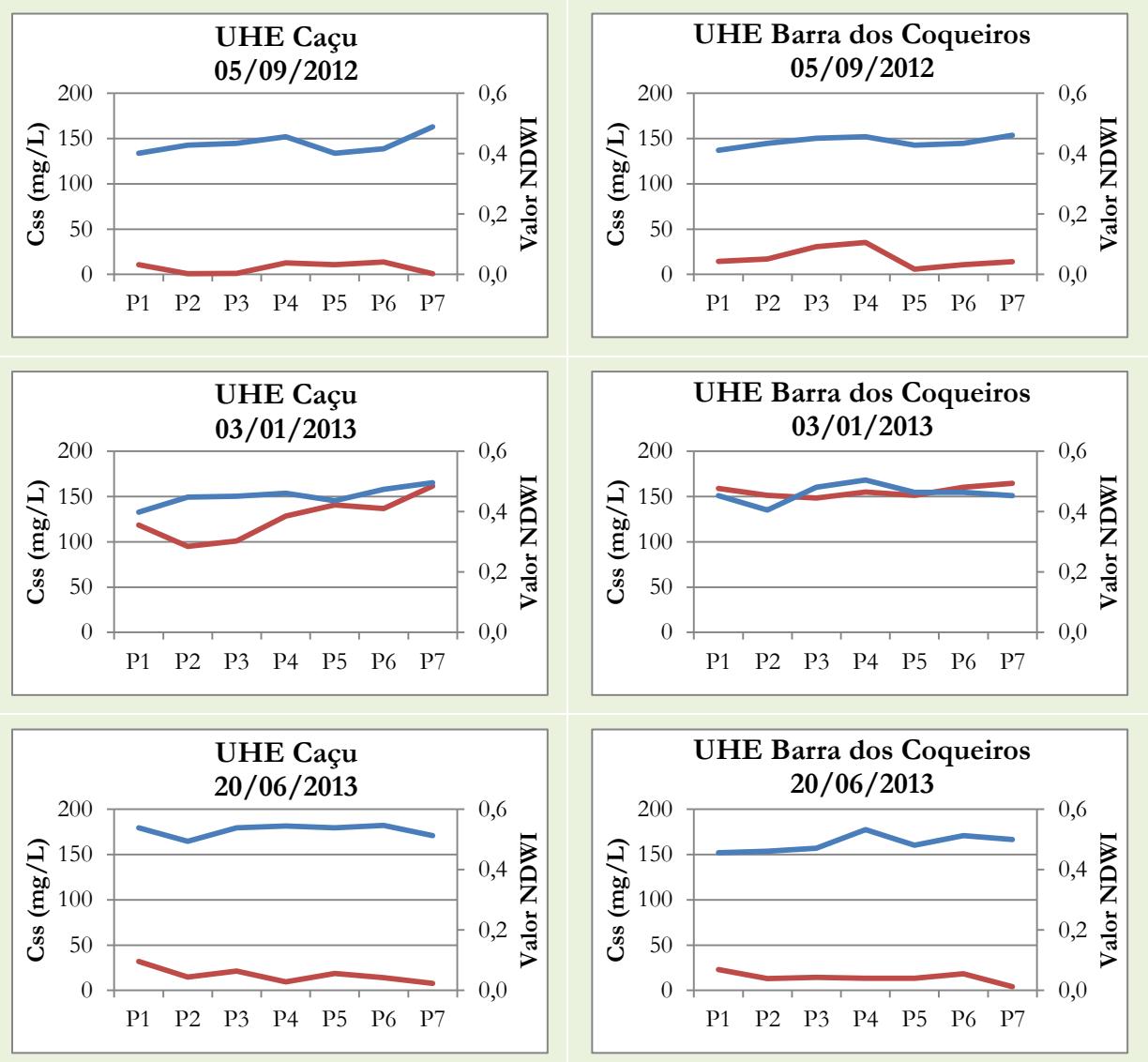
UHE Caçu	UHE Barra dos Coqueiros
	
1 <sup>a</sup> Campanha	1 <sup>a</sup> Campanha
	
2 <sup>a</sup> Campanha	2 <sup>a</sup> Campanha
	
3 <sup>a</sup> Campanha	3 <sup>a</sup> Campanha

Fonte: Do autor.

Esta diferença que também deveria ser proporcional nos resultados NDWI, ou seja, as datas de imagens do satélite que tem certamente mais sedimentos deveriam apresentar valores de NDWI mais distribuídos. Esta amplitude e distribuição dos valores entre as datas não é notado nos dados do processamento, pois se tratam de dados normalizados e impossibilitam assim a comparação entre os valores de datas diferentes.

Na tentativa de obter melhor visualização do comportamento dos dados e suas interações, foram criados os gráficos de cada data de coleta nos pontos em função da Css obtida em campo e dos índices NDWI (Figura 19).

Figura 19: Relação entre dados de campo e valores do NDWI.



Fonte: Do autor.

Legenda: — Valores de Campo — Valores do NDWI.

A seguir estão descritas as correlações encontradas para os pares de análises (Tabela 9).

Tabela 9: Valores de correlação entre o processamento do NDWI e coletas de campo.

Referência	UHE	Correlações			UHE	Correlações		
		Spearman	Pearson	R <sup>2</sup>		Spearman	Pearson	R <sup>2</sup>
1 <sup>a</sup> Campanha	CAÇ	-0,321	-0,463	0,215	BCQ	0,357	0,548	0,300
2 <sup>a</sup> Campanha	CAÇ	0,464	0,496	0,246	BCQ	-0,286	-0,038	0,001
3 <sup>a</sup> Campanha	CAÇ	0,036	0,275	0,076	BCQ	-0,179	-0,309	0,095

Fonte: Do autor.

Considerando que os dados analisados são inversamente proporcionais, o resultado desejado é que as correlações sejam negativas, ou seja, quando o valor do NDWI está alto a Css deve ser baixa. Sendo assim, as comparações que tiveram melhores correlações são a 1<sup>a</sup> campanha da UHE Caçu e a 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> campanhas da UHE Barra dos Coqueiros. Mesmo assim, todas as correlações negativas são fracas ou muito fracas.

Estes resultados são atribuídos em grande parte à complexidade ótica dos cursos d'água, já que na banda do IVP sofrem influência de outras variáveis como materiais orgânicos (fitoplâncton e zooplâncton) turbidez, condutividade elétrica e transparência.

Resultados positivos foram encontrados para comparações entre dados estimados e medidos a partir de leitor de mão para radiância espectral do sistema aquático e imediata coleta de amostras (LOPES et al., 2014). Este trabalho buscava verificar a correlação entre dados de campo e os valores de radiância espectral de cada imagem separadamente.

Mohanty et al. (2001) também testaram correlações entre dados de sensoriamento remoto e coletas de campo para determinar turbidez de corpos hídricos. Os autores aplicaram a técnica de razão de bandas não normalizada e fizeram uma correlação entre os valores encontrados independentemente da ligação com o local georreferenciado, ou seja, avaliaram os resultados máximos, médios e mínimos de forma independente aos seus respectivos valores em campo. Desta forma foi possível estabelecer um índice para estimar o grau de turbidez da água. Esta

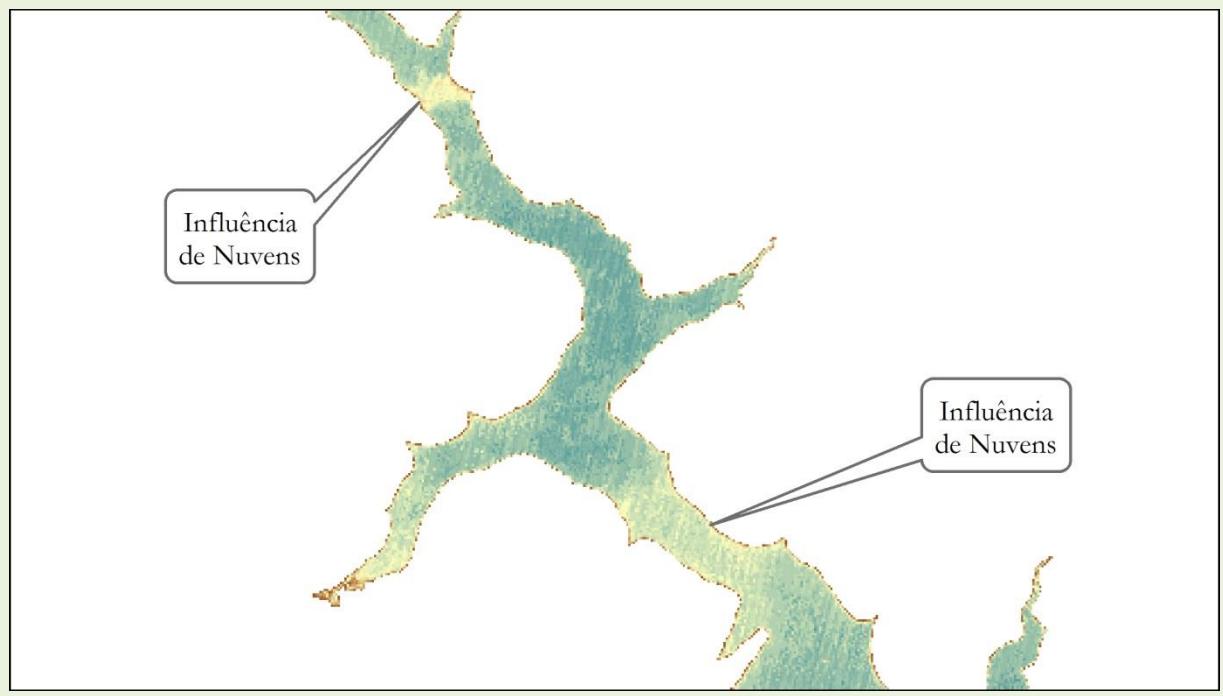
técnica ignora a referência geográfica dos valores e por isso não traz resultados relevantes à distribuição dos sedimentos no reservatório, representando apenas valores médios gerais para um corpo hídrico.

Na tentativa de aumentar a coerência dos dados foi realizada a calibração radiométrica com a intenção de remover as interferências nas imagens de satélites provocadas pelo espalhamento das ondas eletromagnéticas. Esta tentativa gerou resultados de correlação similares aos realizados sem a correção radiométrica e, por isso, optou-se por não detalhar este procedimento.

A respeito da sincronização entre coletas de campo e a data da aquisição da imagem pelo satélite é notório dizer que esta tarefa demanda um criterioso planejamento, pois o campo é agendado em função da passagem do satélite pelo local, porém, somente quando a imagem fica disponível para os usuários é que se torna possível verificar a presença ou não cobertura de nuvens na área de interesse. As datas do imageamento do satélite Resourcesat IRS-P6 utilizado neste trabalho, com resolução temporal de 24 dias, orientou a programação das coletas em campo e mesmo assim, outra campanha realizada em março de 2013 foi desprezada pela grande cobertura de nuvens na data de interesse.

Mesmo com a preocupação de coincidir as datas, não foi possível obter as imagens das datas em que foram realizados os trabalhos de campo, devido à questão do recobrimento de nuvens na área estudada, principalmente no período chuvoso da região, o que dificulta e até impossibilita o processamento (Figura 20).

Figura 20: Exemplo de erros influenciados por nuvens no lago da UHE Barra dos Coqueiros.



Fonte: Do autor.

Os dados de precipitação dos 10 dias anteriores a cada aquisição de informações, analisado tanto para as datas de obtenção das imagens multiespectrais quanto para os dados de campo, mostram o regime de chuvas que pode ter influenciado nos resultados, considerando a chuva como agente fundamental no transporte de sedimentos aos reservatórios (Tabela 10). Não houve uma precipitação considerável ao ponto de influenciar de forma decisória uma data de análise em detrimento de outra.

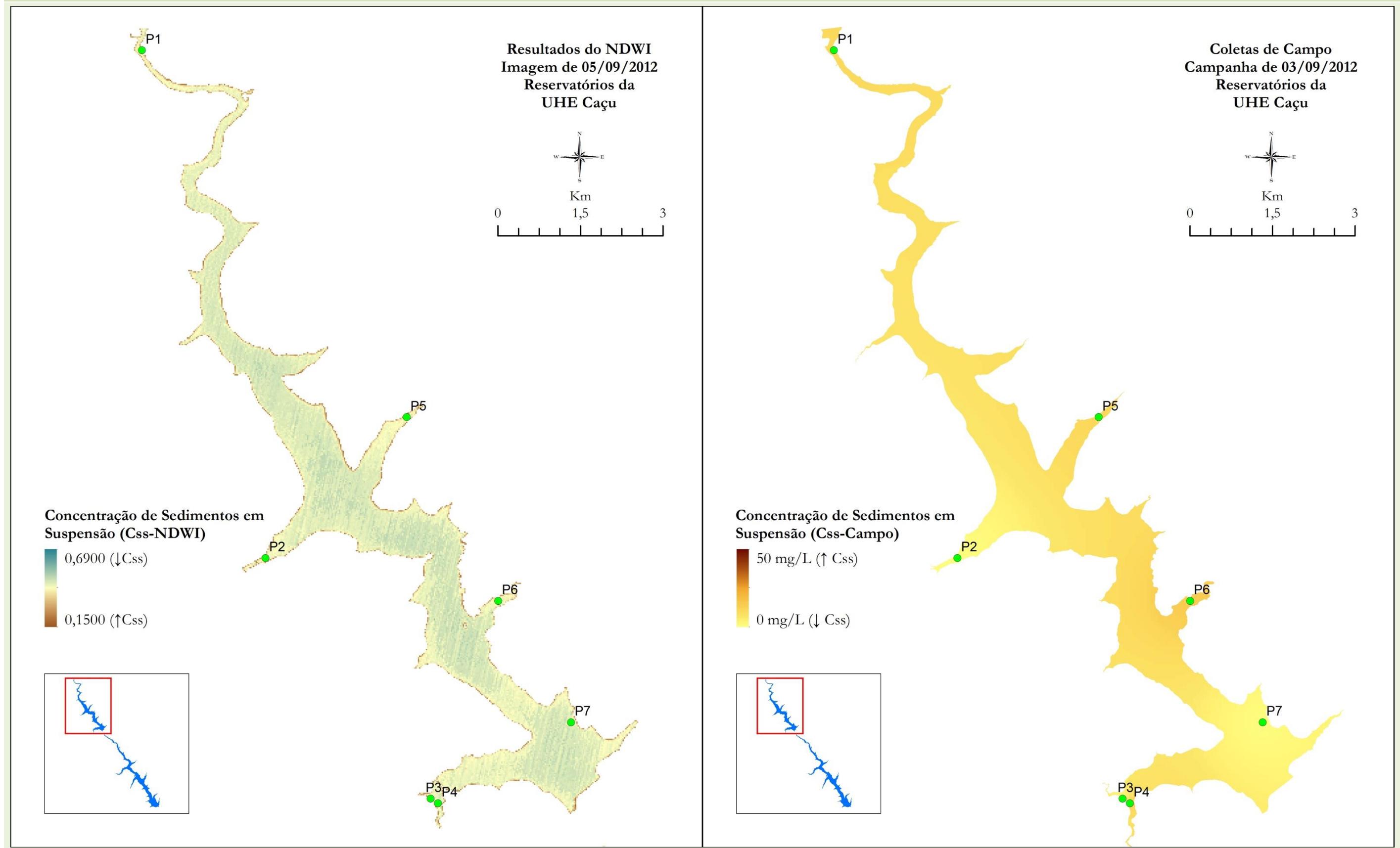
Tabela 10: Precipitação nos 10 dias que antecedem a coleta dos dados.

		Precipitação (mm)									
		1 dia antes	2 dias antes	3 dias antes	4 dias antes	5 dias antes	6 dias antes	7 dias antes	8 dias antes	9 dias antes	10 dias antes
Data Imagens	1 <sup>a</sup> Camp.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2 <sup>a</sup> Camp.	0,00	<b>34,00</b>	0,00	0,00	0,00	<b>13,50</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	3 <sup>a</sup> Camp.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Data Campo	1 <sup>a</sup> Camp.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2 <sup>a</sup> Camp.	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>84,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3 <sup>a</sup> Camp.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Dados de Séries Históricas de Chuva, entre 2012-2013 - ANA, 2014. Org.: Do autor.

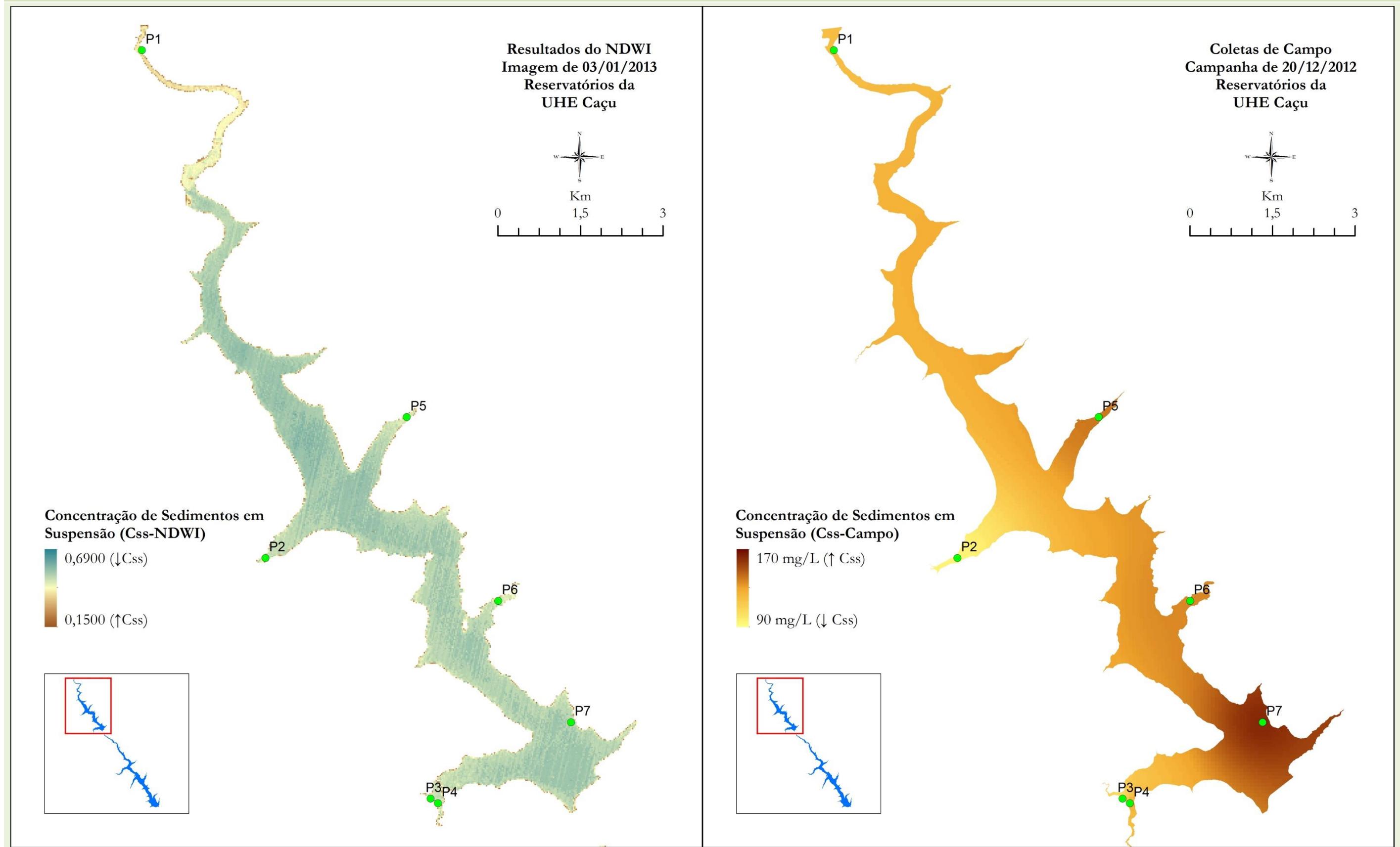
Para a comparação dos dados provenientes da técnica do NDWI com os dados de amostras de campo, foram elaborados mapas divididos por campanha (Figura 21 a Figura 26).

Figura 21: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Caçu - 1<sup>a</sup> campanha.



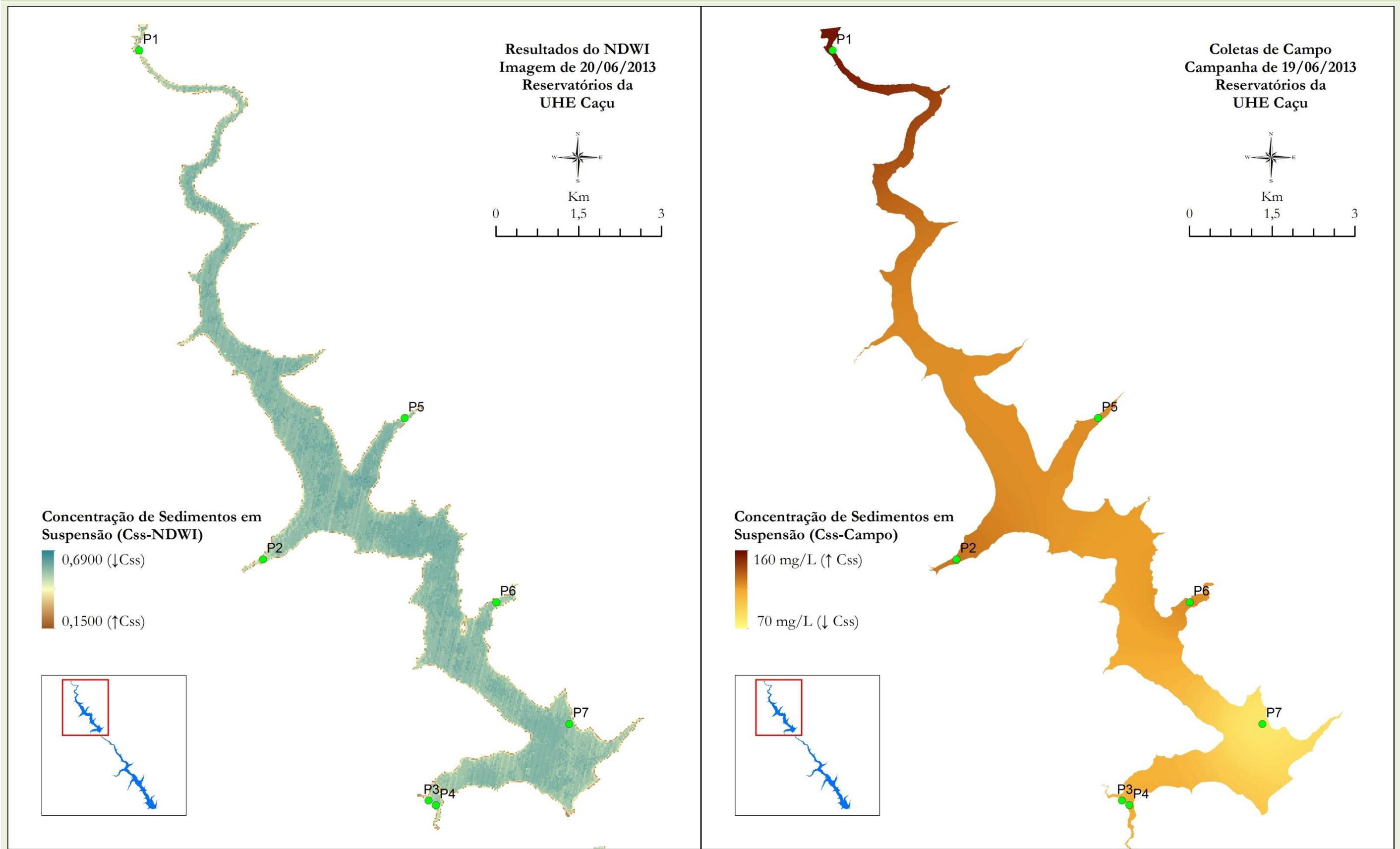
Fonte: Do autor.

Figura 22: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Caçu - 2<sup>a</sup> campanha.



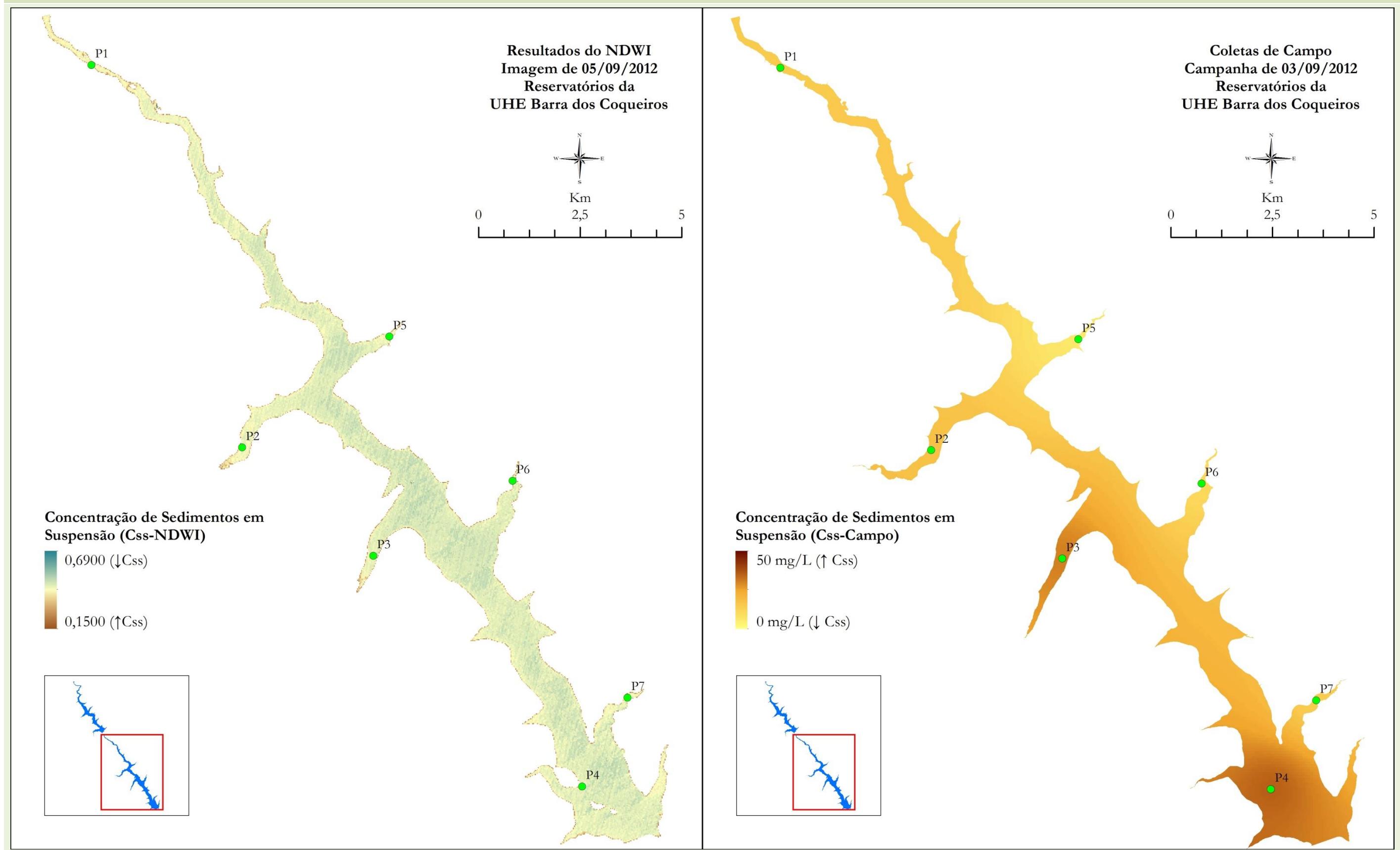
Fonte: Do autor.

Figura 23: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Caçu - 3<sup>a</sup> campanha.



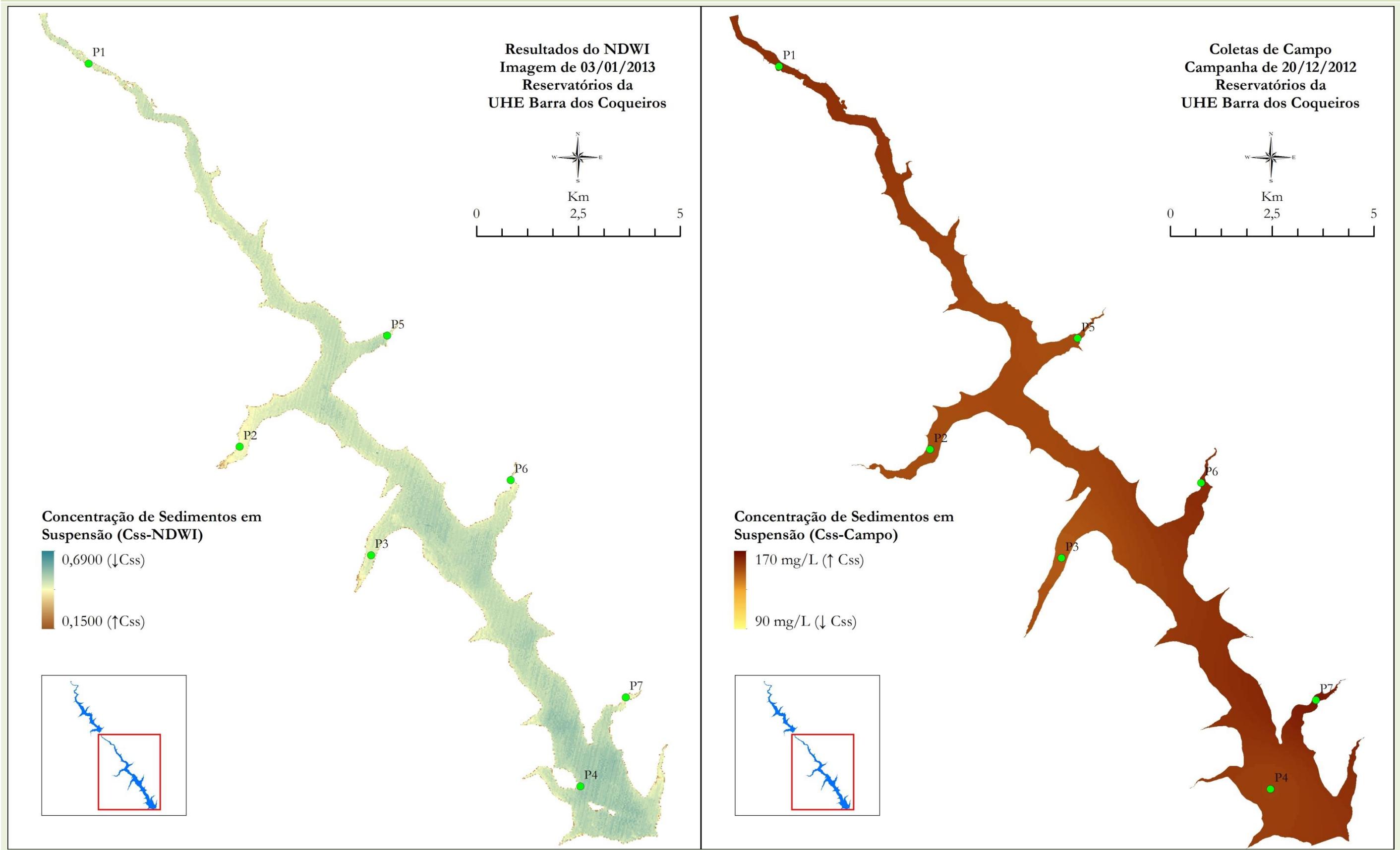
Fonte: Do autor.

Figura 24: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Barra dos Coqueiros - 1<sup>a</sup> campanha.



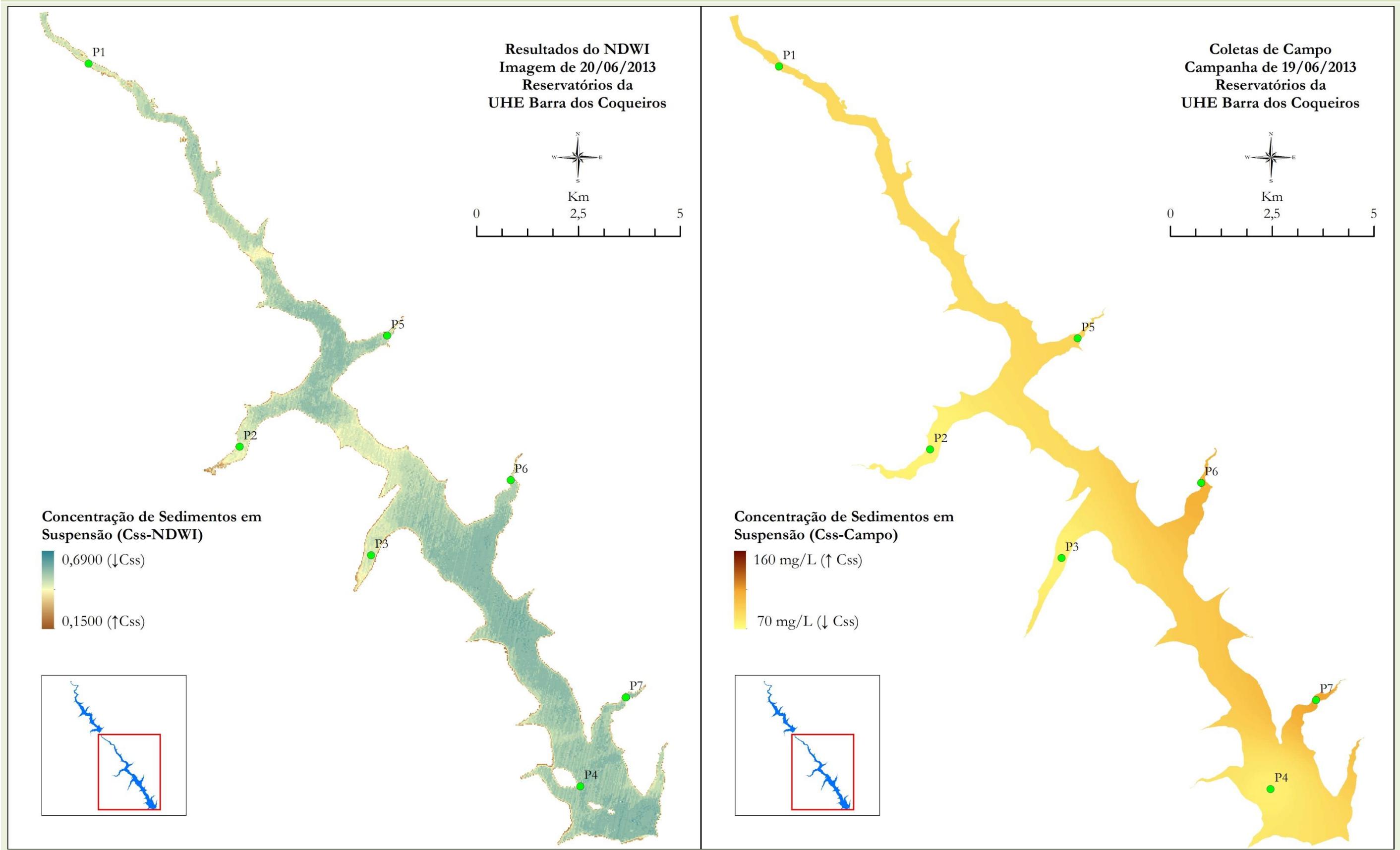
Fonte: Do autor.

Figura 25: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Barra dos Coqueiros - 2<sup>a</sup> campanha.



Fonte: Do autor.

Figura 26: Resultado do NDWI e análises de campo. UHE Barra dos Coqueiros - 3<sup>a</sup> campanha.



Fonte: Do autor.

As análises sobre índices de NDWI apresentam resultado coerente com o que se observa na natureza, onde as margens apresentam maior concentração de sedimentos, e também os afluentes dos córregos tem o carreamento de sedimentos denunciado pela alta reflectância no espectro do verde visível.

Análises visuais sobre os mapas de resultados NDWI das usinas apontam que o reservatório da UHE Caçu apresenta sempre valores de sedimentos elevados principalmente no P1, no encontro do rio Claro com o reservatório, e nas proximidades do ponto P5, mostrando alta taxa de carreamento de sedimento pelo Córrego do Caju. Na UHE Barra dos Coqueiros também as proximidades do P1 apresentam maior presença de sedimentos em suspensão, seguidos pelas regiões do P2 e P3, representados respectivamente pelo Córrego da Sucuri e Córrego Coqueiros (Margem direita).

Outra verificação visual eficaz do resultado NDWI é relativa à distribuição dos sedimentos nos reservatórios comparados às épocas de seca e de chuva. Na estação seca, os resultados apontam uma concentração de sedimentos maior nos afluentes, pois eles trazem efetivamente o material em suspensão. Já nos períodos de chuva é possível verificar que os afluentes continuam carreando sedimentos ao reservatório, porém, há também a produção de sedimentos do escoamento superficial das vertentes do reservatório, contribuindo assim para uma distribuição de material elevada, entretanto uniforme em todo o reservatório.

Analizando-se exclusivamente os valores do processamento NDWI, ressalta-se que a primeira campanha, tanto no reservatório de Caçu quanto em Barra dos Coqueiros, apresenta resultado indicando altas concentrações de sedimentos, ou seja, baixo índice NDWI. Entretanto, esta informação está errada, uma vez que nesta época do ano as águas estão indiscutivelmente limpas. Os resultados de NDWI das campanhas não podem ser comparados entre si devido à

normalização dos dados, já que quando comparados uns com os outros não mais tem seus valores originais de reflectância, mas sim um resultado matemático ajustado em uma nova escala.

O cálculo de concentração de sedimentos em suspensão pela metodologia tradicional descrita – método simplificado de Colby, 1957 – apresenta os seguintes resultados (Tabela 11):

Tabela 11: Determinação da Css pelo método tradicional (Método Simplificado de Colby).

Descarga Sólida Total (Qst – t/dia) UHE Caçu					
Data	Css Média (mg/L)	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)	Descarga Média Diária (t/dia)	Descarga Média no Mês (t/mês)	Css (t/km <sup>2</sup> *ano)
03/09/2012	7,26	108,07	67,79	2.101,44	2,04
20/12/2012	126,00	169,78	1.848,29	55.448,79	55,69
19/06/2013	16,86	183,79	267,73	8.031,83	8,07
Descarga Sólida Total (Qst – t/dia) UHE Barra dos Coqueiros					
Data	Css Média (mg/L)	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)	Descarga Média Diária (t/dia)	Descarga Média no Mês (t/mês)	Css (t/km <sup>2</sup> *ano)
03/09/2012	18,23	100,04	157,57	4.884,68	4,55
20/12/2012	155,70	167,71	2.256,12	67.683,46	65,20
19/06/2013	14,24	186,88	229,93	6.897,76	6,64

Fonte: Do autor.

O método tradicional de determinação da Css para os reservatórios foi capaz de originar resultados plausíveis. De acordo com os padrões aceitáveis de produção de sedimento propostos por Carvalho et al. (2000a) a 1<sup>a</sup> e a 3<sup>a</sup> campanhas apresentaram níveis “baixos” de produção, enquanto a 2<sup>a</sup> campanha apresentou níveis “moderados” para a produção de sedimentos. Não somente os números relativos à vazão do curso d’água, mas também os índices pluviométricos do período explicam a discrepância da elevada descarga sólida na segunda campanha em relação às demais.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises dos índices de NDWI geraram informações visualmente coerentes, porém não foi possível encontrar um índice para correlações entre dados reais ou mesmo um valor de calibração para auxílio na determinação da concentração de sedimentos em suspensão. Para tanto, é necessário reavaliar o método de determinação da  $C_{ss}$  por meio do NDWI para imagens de datas diferentes e ainda rever a possibilidade de criar comparações entre dados processados e dados reais, coletados em campo.

Combinar a data das coletas em campo e a data da aquisição da imagem pelo satélite é uma tarefa que demandou planejamento e mesmo considerando a resolução temporal do satélite o trabalho fica, muitas vezes, suscetível às condições climáticas, colocando as análises em risco pela presença de nuvens.

A tentativa de gerar um índice de calibração entre os dados obtidos em campo e os dados processados pelo método do NDWI fracassou. Esta falha foi gerada principalmente pela natureza dos cálculos utilizados pelo método, que impossibilitam qualquer comparação com outros dados já que são dados normalizados.

O método NDWI possibilita inspeções visuais das características de produção de sedimentos de um dado local, porém devem estar em uma mesma cena de uma mesma data para se tornarem comparáveis. É possível estabelecer apontamentos dos locais com maior aporte de sedimentos e avanço do fluxo. A aplicação da técnica de delimitar os corpos d'água é válida para eliminar a interferência das bordas em inspeções visuais e na delimitação mais precisa dos corpos hídricos.

A tentativa de gerar um índice que tornasse possível relacionar um valor obtido das imagens multiespectrais do processamento do NDWI em relação aos resultados de campo falhou também em virtude da normalização dos dados pelo método, criando, portanto uma escala de distribuição diferente do resultado real obtido em campo e assim cria índices sempre independentes para cada valor obtido.

Os mapas apresentando os resultados do NDWI permitem uma boa interpretação dos locais onde há a chegada de sedimentos por meio de um afluente ou até mesmo apontando locais de acumulo de sedimentos em suspensão ao longo dos corpos hídricos. A análise visual de mapas com os resultados do NDWI é válida para apontar áreas de interesse para coletas de campo, analisando padrões de comportamento dos sedimentos.

Comparações dos resultados processados entre períodos secos e chuvosos mostram características relevantes ao entendimento dos processos e para possíveis ações de manejo corretivas ao reservatório. Em períodos secos o sedimento chega ao reservatório quase exclusivamente pelos afluentes e pelo rio principal, enquanto em períodos chuvosos este sedimento chega ainda pelas vertentes sob a forma de escoamento superficial, distribuindo mais material em suspensão por toda a borda do lago neste período.

## 8. REFERÊNCIAS

- ANA. **Agência Nacional de Águas.** Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: fev. de 2014.
- BACCARO, C.A.D. Processos erosivos no Domínio do Cerrado. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (org.). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações.** 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 195-227p. 1999.
- BICALHO, C.C. Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto. **Dissertação** (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2006. 123p.
- CABRAL, J.B.P.; ROCHA, I.R.; NOGUEIRA, P.F.; PAULA, M.R.; SILVA, H.F.F; BRAGA, C.C.; ROCHA, H.M.; LOPES, R.M.; SANTOS, F.F. Análise Geoambiental dos afluentes da UHE Barra dos Coqueiros - GO. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos.** 2011.
- CARLSTRON FILHO, C.; GIMENEZ, A.F.; PIRES NETO, A.G.; PRADINI, L.F.; MELO, M.S.; FULFARO, V.J.; PONÇANO, W.L. Metodologia para estudo de assoreamento de reservatórios (II) Reservatório de Passo Real e Ernestina (RS). In: **Anais...** CBGE, 3, Itapema (SC), São Paulo, ABGE, v2. 143-162p. 1981.
- CARVALHO, J.C.; LIMA, M.C.; MORTARI, D. Considerações sobre Prevenção e Controle de Voçorocas. In: **Anais...** 7º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia. ABMS/ABGE. 2001.
- CARVALHO, N.O. Assoreamento de reservatórios – consequências e mitigação dos efeitos. In: **Anais...** IV Encontro Nacional de engenharia de Sedimentos. Santa Maria-RS. CD-ROM. 1-22p. 2000.
- \_\_\_\_\_. **Hidrossedimentologia Prática.** CPRM e ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, RJ. 384p. 1994.
- CARVALHO, N.O; FILIZOLA JÚNIOR, N.P; SANTOS, P.M.C; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios.** Brasília: ANEEL. 2000a. 140p.
- \_\_\_\_\_. **Guia de práticas sedimentométricas.** Brasília: ANEEL. 2000b. 154p.
- COLBY, B.R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Transactions American Geophysical Union**, 38(5). 708-717p. 1957.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial.** São Paulo : Edgar Blucher, 1981.
- CUNHA, S.B. Geomorfologia Fluvial. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (org). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 11. ed., Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. 474p. 2012.

EAKIN, H.M. Silting of reservoirs, revised by BROW, C.B. **Dept Agriculture Tech Bulletin** (524). 90-167p. 1939.

EMBRAPA **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Sistema brasileiro de classificação de solo. Rio de Janeiro, Embrapa solos, 2006. 306p.

ESRI. **ArcGIS**. Mapping and Spatial Analysis. Versão 9.2, ArcGIS Desktop, 2008.

FERREIRA, A.B.; PEREIRA FILHO, W. Avaliação da reflectância espectral de corpos d'água em Santa Maria-RS por meio de espectrorradiometria de campo. **Geoambiente On-line**, n. 13, 1-14p. 2009.

FERNANDEZ, O.V.Q. Mudanças no canal fluvial do rio Paraná e processos de erosão nas margens; Região de Porto Rico-PR. **Dissertação** (Mestrado) - UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Naturais. Rio Claro, p.85. 1990.

FIOCK, L.R. Records of silt carried by the Rio Grande and its accumulation in Elephant Butte reservoir. **American Geophys. Union Trans.** v15. 468-473p. 1934.

FOERSTNOW, L.P.; MENEZES, J.T. Aplicabilidade de imagens de satélite utilizando NDWI na determinação da batimetria da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC. **Anais...** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. SBSR-INPE, Curitiba, 2011.

GAO, B.C. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sens. Environ.** 58 (3), 257-266p. 1996.

GEOBANK. **Banco de dados do Serviço Geológico do Brasil**. CPRM. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: < <http://geobank.sa.cprm.gov.br/> >. Acesso em: jan. 2012.

GIMENEZ, A.F.; CARLSTRON FILHO, C.; CARNEIRO, C.D.R.; STEIN, D.P.; PRADINI, L.F.; MELO, M.S.; FULFARO, V.J.; PONÇANO, W.L. Metodologia de estudo de assoreamento de reservatórios (I) Reservatório de Capivari (PR). In: **Anais...** CBGE, 3, Itapema (SC), São Paulo, ABGE, v2. 205-224p. 1981.

GOIÁS. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Secretaria de Indústria de Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. Goiânia, 128p. 2006.

GUERRA, A.J.T. **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. 1ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p. 1999.

\_\_\_\_\_. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T; SILVA, A.S; BOTELHO, R.G.M. (org). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2 ed., 17-55p. 2005.

GROVER, H.G.; HOWARDS, C.S. The passage of turbid water through lake mead. **Trans ASCE**. 103. 720p-736p. 1938.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>. Acesso em: agosto de 2013.

- HOUBORG, R.; SOEGAARD, H.; BOEGH, E. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. **Remote Sensing of Environment** 106, 39–58p. 2007.
- JACKSON, T.J.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; et al. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, 92, 475-482p. 2004.
- KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: **Oceanografia por Satélites**. São Paulo: Oficina de Textos, 179-196p. 2005.
- LOPES, F.B.; BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; 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, (Suplemento), p.S13–S19, 2014.
- MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, 1425-1432p. 1996.
- MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UnB/CNPq, v.1. 2012.
- MOHANTY, P.K.; PAL, S.R. IRS data utilization for estimation of turbidity level in Chilka lagoon, east coast of India. In: **22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing**. Singapore. 2001.
- MOLLERI, G.S.F.; NOVO, E.M.L.M.; KAMPEL, M. Aplicação da técnica de modelo linear de mistura espectral para o mapeamento da pluma do Rio Amazonas. **Geografia**, Rio Claro, v.33, n.2, 331-349p. 2008.
- MONTANHER, O.C.; NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.C.F. Modelos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas via sensoriamento remoto. **Anais...** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, Brasil, INPE, 5848-5855p. 2013
- NBR, ABNT. 6023. Informação e documentação - Referências–Elaboração. **Rio de Janeiro**, 2002.
- NBR, ABNT. 14724. Informação e documentação - Trabalhos Acadêmicos–Apresentação, 2005.
- NOVO, E.M.L.M. Monitoramento de Quantidade e Qualidade da Água e Sensoriamento Remoto. **Anais...** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo. 2007.
- OLIVEIRA, L.A. O Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs. **Tese** (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 209p. 2009.
- PAULA, M.R.; CABRAL, J.B.P.; MARTINS, A.P. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento na caracterização do uso da terra da Bacia Hidrográfica da UHE Caçu – GO. **Revista Geonorte**, Ed. Esp., v4, 1482 – 1490p. 2012.

POLIDORIO, A.M.; IMAI, N.N.; TOMMASELLI, A.M.G. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. In: **Anais...** I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, I SIMGEO. Recife. 2004.

PONÇANO, W.L.; GIMENES, A.F.; LEITE, A.A.G.; CARLSTRON FILHO, C; PRADINI, F.L.; MELO, M.S. Metodologia para estudo de assoreamento de reservatório (III): roteiro para estudo de reservatórios no sul e sudeste brasileiro. In: **Anais...** CBGE, 3, Itapema (SC), São Paulo, ABGE, v2. 331-353p. 1981.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**. Rio de Janeiro, Folha SE 22. Goiânia, vol. 31, 1983.

RICHARDSON, L.L.; LEDREW, E.F. **Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes**: science and management applications. Springer, Netherlands. 324 p. 2006.

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

SHIMAKURA, S.E. **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003>>. Acesso em: Mar. 2014.

SILVA, H.R. **Características das Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNESP, FEIS. Disponível em: [http://www.agr.feis.unesp.br/hrsilva/SERE\\_CAP\\_14/Aula\\_25\\_03\\_04\\_Imagem%20\\_sere.htm](http://www.agr.feis.unesp.br/hrsilva/SERE_CAP_14/Aula_25_03_04_Imagem%20_sere.htm). Acesso em: 26 jan. 2014.

VOLK, L.B.S. Condições físicas da camada superficial do solo resultantes do seu manejo e indicadores de qualidade para redução da erosão hídrica e do escoamento superficial. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. (149 p.) Setembro, 2006.

XU, H. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index. **Journal of Remote Sensing**, China, 2005.

\_\_\_\_\_. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensing imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n. 14, 3025-3033p. 2006.

XU, J. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow river basin, China. **Catena**, 49, 289-307p. 2002.

WALTHALL, C; DULANEY, W.; ANDERSON, M.; NORMAN, J.; FANG, H.; LIANG, S. A comparison of empirical and neural network approaches for estimating corn and soybean leaf area index from Landsat ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, 92, 465–474p. 2004.

ZAR, J.H. Spearman rank correlation. **Encyclopedia of Biostatistics**, 1998.