



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**THAYSLAN RENATO ANCHIÊTA DE CARVALHO**

**CARACTERIZAÇÃO DE SEDIMENTO DE RESERVATÓRIOS POR ESPECTROSCOPIA  
COMO SUPORTE PARA PRÁTICA DE REUSO DO SEDIMENTO EM REGIÃO  
SEMIÁRIDA**

**FORTALEZA**

**2020**

THAYSLAN RENATO ANCHIÊTA DE CARVALHO

CARACTERIZAÇÃO DE SEDIMENTO DE RESERVATÓRIOS POR ESPECTROSCOPIA COMO  
SUPORTE PARA PRÁTICA DE REUSO DO SEDIMENTO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C329c Carvalho, Thayslan Renato Anchiêta de.  
Caracterização de sedimento de reservatórios por espectroscopia como suporte para prática de reuso do sedimento em região semiárida / Thayslan Renato Anchiêta de Carvalho. – 2020.  
57 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros..

1. Reuso de sedimento. 2. Reservatório de superfície. 3. Espectroscopia. 4. Mínimos quadrados parciais. 5. Semiárido. I. Título.

CDD 630

---

THAYSLAN RENATO ANCHIÊTA DE CARVALHO

CARACTERIZAÇÃO DE SEDIMENTO DE RESERVATÓRIOS POR ESPECTROSCOPIA COMO  
SUPORTE PARA PRÁTICA DE REUSO DO SEDIMENTO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido.

Aprovada em: 27/11/2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Wellington Batista Lopes  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

---

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

À minha mãe Edinalva.

À Minha Irmã Thaís e sobrinhos Joaquim e  
Laura.

À Minha Avó Eva (In memoriam).

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho tornou-se possível somente devido ao apoio de pessoas importantes, às quais manifesto meus mais sinceros agradecimentos:

A minha mãe, Edinalva por não medir esforços para que esse momento tão importante pra mim tornasse realidade. A toda a família pelos pelo apoio nos momentos difíceis, que me proporcionaram momentos de alegria, distração e entretenimento.

A minha irmã Thaís pelo apoio e incentivo que serviu como suporte para não fraquejar durante essa caminhada.

Ao grande professor Pedro Medeiros, pela oportunidade de trabalharmos juntos, incentivo, ensinamentos, que me ajudaram a crescer pessoalmente e profissionalmente, os quais levarei e repassarei para frente. Agradeço também pela grandiosa orientação que foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação e Engenharia Agrícola, José Carlos, Alexandre Gomes, Adunias Teixeira, Fernando Lopes, Marcus Bezerra, Claudivan Feitosa, George Mamede por contribuir de forma significativa compartilhando seus conhecimentos.

Aos amigos e amigas que contribuíram nos trabalhos de campo e laboratorial Tatiane Pinheiro, Brenda Braga, David Campelo, Acrísio Feitosa, Eurileny, Paulilo.

Aos meus amigos e amigas que fiz durante o curso: Christine Farias, Tatiane Pinheiro, Branda Braga, Willame, Emanuel, José Brasil, Jacques, Juarez Jr., Luiz Felipe, Pedro Victor, Glauber Pontes, Beatriz Abreu, por estarem sempre presente durante o curso, proporcionando momentos de descontração.

Aos servidores e servidoras da UFC, Ivna Magalhães, Ana Maria (Aninha) Maurício pela atenção e estarem sempre à disposição para bom funcionamento do Departamento de Engenharia Agrícola – DENA.

A Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A erosão do solo pela água produz sedimentos para reservatórios superficiais, reduzindo sua capacidade de armazenamento, alterando sua geometria e degradando a qualidade da água. A reutilização de sedimentos, ou seja, a fertilização de solos agrícolas com o sedimento enriquecido em nutrientes dos reservatórios, foi proposta como uma estratégia de recuperação. Neste estudo, caracterizamos o sedimento assoreado em reservatórios na região semiárida densamente represada do Brasil por espectroscopia VIS-NIR-SWIR e avaliamos o efeito da resolução espectral e escala espacial na precisão de nitrogênio, fósforo, potássio, carbono, matéria orgânica e modelos de previsão de argila. O sedimento foi amostrado em dez reservatórios e realizadas análises físico-químicas laboratoriais e leituras espectrais. As regressões de mínimos quadrados parciais tiveram desempenho satisfatório a muito bom na previsão de argila, matéria orgânica e carbono em escalas espaciais de micro (reservatórios < 0,1 km<sup>2</sup>) a grande (bacias hidrográficas de 100 a 10.000 km<sup>2</sup>). Os modelos de nitrogênio, potássio e fósforo foram mais instáveis e apresentaram desempenho insatisfatório em algumas situações. Na escala macro (bacias > 10.000 km<sup>2</sup>), os modelos para todos os atributos do sedimento apresentaram desempenho insatisfatório, exceto para a argila. O aumento da resolução espectral em até 10 nm degrada apenas ligeiramente o desempenho dos modelos, indicando o potencial de caracterização do sedimento a partir de dados espectrais capturados em resoluções mais baixas, como por sensores de satélite hiperspectrais. Ao reduzir as dispendiosas e demoradas análises laboratoriais, o método ajuda a promover o reaproveitamento de sedimentos como prática de conservação do solo e da água.

**Palavras-chave:** reuso de sedimento; espectroscopia; mínimos quadrados parciais; reservatórios de superfície; semiárido; Brasil.

## ABSTRACT

Soil erosion by water yields sediment to surface reservoirs, reducing their storage capacities, changing their geometry and degrading water quality. Sediment reuse, i.e. fertilization of agricultural soils with the nutrient-enriched sediment from reservoirs, has been proposed as a recovery strategy. In this study, we characterize the sediment silted in reservoirs in the densely dammed semiarid region of Brazil by VIS-NIR-SWIR spectroscopy and assess the effect of spectral resolution and spatial scale on the accuracy of nitrogen, phosphorus, potassium, carbon, organic matter and clay prediction models. Sediment was sampled in ten reservoirs, and physical and chemical laboratory analyses were performed, as well as spectral readings. Partial least square regressions performed satisfactorily to very well in the prediction of clay, organic matter and carbon at spatial scales from micro (reservoirs  $< 0.1 \text{ km}^2$ ) to large (catchments from 100 to  $10,000 \text{ km}^2$ ). Models for nitrogen, potassium and phosphorus were more unstable and performed unsatisfactorily in some situations. At the macro scale (basins  $> 10,000 \text{ km}^2$ ), models for all the sediment attributes performed unsatisfactorily, except for clay. Coarsening spectral resolution by up to 10 nm degrades only slightly the models' performance, indicating the potential of characterizing sediment from spectral data captured at lower resolutions, such as by hyperspectral satellite sensors. By reducing the costly and time-consuming laboratory analyses, the method helps to promote the sediment reuse as a practice of soil and water conservation.

**Keywords:** sediment reuse; spectroscopy; partial least squares; surface reservoirs; semiarid; Brazil.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Área de estudo, região semiárida do nordeste brasileiro.....	26
Figura 2 -	Localização dos reservatórios estudados e pontos de coleta de sedimento na bacia hidrográfica do Benguê.....	28
Figura 3 -	Localização dos reservatórios estudados e pontos de coleta de sedimento na bacia hidrográfica do Fogareiro. ....	29
Figura 4 -	Localização do reservatório em estudo e pontos de coleta de sedimento na bacia hidrográfica de pentecoste.....	30
Figura 5 -	Remoção de serrapilheira e amostragem de sedimentos nos reservatórios vazios.....	30
Figura 6 -	Espectros das amostras de sedimentos da bacia do Benguê.....	31
Figura 7 -	Espectros das amostras de sedimentos na bacia do Fogareiro.....	32
Figura 8 -	Espectros das amostras de sedimentos na bacia do Pentecoste.....	36
Figura 9 -	Resultados da validação cruzada (leave-one-out) de modelos para reservatórios individuais na escala micro (reservatórios <math><0,10 \text{ km}^2</math>): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila.....	38
Figura 10 -	Resultados de calibração (cal) e validação (val) de modelos para reservatórios individuais em pequena escala (reservatórios de 0,1 a 10 $\text{km}^2$ ): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila.....	39
Figura 11 -	Resultados de calibração (cal) e validação (val) de modelos para reservatórios individuais na média escala (reservatórios de 0,1 a 10 $\text{km}^2$ ): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila.....	40
Figura 12 -	Resultados de calibração (cal) e validação (val) de modelos para bacias individuais em grande escala (bacias de 100 a 10.000 $\text{km}^2$ : Benguê - BGC, Fogareiro - FGC e Pentecoste - PTC): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C)	45

	Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila.....	
Figura 13 -	Resultados de calibração e validação de modelos para macro escala (> 10.000 km <sup>2</sup> ): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila.....	46
Figura 14 -	Influência da escala espacial na precisão dos modelos de regressão para estimar atributos de sedimentos.....	47
Figura 15 -	Influência da resolução espectral na precisão de modelos de regressão para estimativa de atributos de sedimentos nas bacias de Benguê (A), Fogareiro (B) e Pentecoste (C).....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Relação de algumas pesquisas utilizando espectroscopia VIS-NIR para predição das propriedades de solo e sedimento.....	27
Tabela 2 -	Escalas espaciais utilizadas para obter modelos de regressão entre atributos físico-químicos do sedimento e dados espectrais.....	26
Tabela 3 -	Estatísticas de atributos de sedimentos para as três bacias hidrográficas do estudo.....	26
Tabela 4 -	Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia nos reservatórios da microescala (reservatórios <0,10 km <sup>2</sup> ).....	33
Tabela 5 -	Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia em pequena escala (reservatórios de 0,10 a 10 km <sup>2</sup> ) .....	38
Tabela 6 -	Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia na meso-escala (reservatórios de 10 a 100 km <sup>2</sup> ) .....	41
Tabela 7 -	Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia em larga escala (captações de 100 a 10.000 km <sup>2</sup> ).....	41
Tabela 8 -	Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos da espectroscopia em escala macro (> 10.000 km <sup>2</sup> ).....	42

## LISTA DE SIGLAS

BGC	Bacia Hidrográfica do Benguê
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program
FEVC	Fazenda Experimental Vale do Curu
FGC	Bacia Hidrográfica do Fogareiro
LEMA	Laboratório de Eletrônica e Mecanização
NDBI	Índice de Bandas por Diferença Normalizada
NF	Número de Fatores
NIR	Near Infrared
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe
PSLR	Mínimos Quadrados Parciais
PTC	Bacia Hidrográfica de Pentecoste
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio
SWIR	Short Wavelength Infrared
UFC	Universidade Federal do Ceará
VIS	Visível

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Hipóteses.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Bacia Hidrográfica do Benguê (BGC).....</b>	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Bacia Hidrográfica do Fogareiro (FGC).....</b>	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>Bacia Hidrográfica de Pentecoste (PTC).....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Amostragem de sedimento.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Análises físico-químicas do sedimento.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise espectral do sedimento.....</b>	<b>28</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia.....</b>	<b>28</b>
<b>4.5</b>	<b>Influência da escala espacial e resolução espectral na precisão da caracterização de sedimentos por espectroscopia.....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização físico-química do sedimento.....</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>Desempenho de modelos para caracterização de sedimentos por espectroscopia.....</b>	<b>34</b>
<b>5.3</b>	<b>Influência da escala espacial na estimativa de atributos de sedimentos.....</b>	<b>48</b>
<b>5.4</b>	<b>Influência da resolução espectral na estimativa de atributos de sedimentos.....</b>	<b>50</b>
<b>5.5</b>	<b>Identificação de bandas espectrais importantes para estimar atributos do sedimento.....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual em que se encontra a sociedade global há uma forte discussão sobre os impactos das ações humana e as consequências que essas ações têm trazido para os ecossistemas. É inevitável que haja uma preocupação em buscar maneiras de minimizar esses impactos, pois se sabe que muitos prejuízos causados pela ação humana são sobre recurso naturais.

Quando falamos de recursos naturais podemos destacar alguns, por exemplo, água, solo, vegetação, petróleo etc. recursos esses que se encontram disponíveis das mais diversas formas na Terra. Ao olharmos para esses recursos é importante observar a interação com ambiente que este se encontra, pois a depender sua localização na Terra estes recursos podem ser mais ou menos propenso a degradação pelas ações humanas, por exemplo, o clima é um fator importante que deve ser levado em consideração para disponibilidade, utilização e conservação e recuperação desses recursos.

No Brasil os climas predominantes são tropical, subtropical e semiárido. O clima semiárido predomina em sua maioria na região Nordeste, nesta região dois recursos naturais são de grande importância para planejamento e organização da população que ali habitam, esses recursos são água e solo.

A escassez em hídrica em algum período ano é um elemento que requer estratégias de armazenamento para que a população possa dispor desse recurso em épocas desfavoráveis, isso exige que políticas públicas sejam adotadas para este fim e historicamente a região Nordeste tem políticas baseada na escassez hídrica.

Já os solos que compõem a região semiárida do Nordeste brasileiro são, de maneira geral, solos rasos com baixo teor de matéria orgânica e baixa retenção de umidade, essas características inerentes ao solo quando associada a chuvas de alta intensidade e falta de cobertura vegetal resultado do uso e ocupação do solo desordenado potencializa a suscetibilidade ao processo de erosão hídrica.

Esses dois recursos (água e solo) naturais associados a outras características do ambiente formam as unidades de paisagem que por muitos motivos e inclusive pela falta de programas de proteção ambiental específicos, torna comum a presença de unidades de paisagem com algum grau de degradação, com intensidade de baixa a severa.

Diante dessa problemática, busca-se medidas mitigadoras que permitam amenizar e melhorar o uso dos recursos água e solo. Com o advento da tecnologia, mais especificamente o sensoriamento remoto, é possível obter grande número de informações da superfície terrestre. Atualmente o uso de imagens oriundas da satélites auxiliam no monitoramento de solo e

superfícies aquáticas possibilitando obtenção de informações que otimize a gestão desses recursos.

Neste contexto, essa pesquisa aborda uma perspectiva de estudo que permita a utilização de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas para monitoramento de sedimentos de reservatórios como forma de buscar alternativas para reuso do sedimento para recompor camadas de solo perdidas pelo processo de erosão hídrica, melhorar a produtividade agrícola e melhorar a qualidade da água.

### **1.1. Objetivo geral**

Assim sendo, o objetivo geral dessa pesquisa é utilizar espectroscopia VIS-NIR-SWIR para estimar atributos do sedimento de reservatórios em região semiárida do nordeste brasileiro.

Para isso foram tratados os seguintes objetivos específicos:

### **1.2. Objetivos específicos**

i) caracterizar o sedimento depositado em reservatórios, usando espectroscopia VIS-NIR-SWIR.

ii) avaliar o efeito da escala espacial na precisão dos modelos de predição de atributos de sedimentos.

iii) avaliar a influência da resolução espectral no desempenho do modelo para estimar os atributos do sedimento.

As questões científicas levantadas no âmbito desta pesquisa são descritas abaixo, respectivamente aos objetivos traçados acima.

i) É possível a utilização de técnicas de espectroscopia VIS-NIR-SWIR para caracterizar e estimar atributos do sedimento depositado no fundo de reservatórios no semiárido brasileiro?

ii) A precisão dos modelos para estimar atributos do sedimento pode ser influenciada com aumento ou diminuição da escala espacial?

iii) A resolução espectral é um fator que influencia na estimativa de atributos do sedimento a partir de espectroscopia?

Em relação as três perguntas anteriores, apresentam-se as seguintes hipóteses:

### **1.3. Hipóteses**

i) A utilização de espectroscopia VIS-NIR-SWIR e/ou imagens provenientes de satélites para caracterizar sedimento de reservatórios em região semiárida é possível, haja vista que muitos reservatórios secam periodicamente devido ao período seco, tornando o sedimento assoreado possível de ser coletado mais facilmente e analisado por espectroscopia ou imageado por um sensor em orbital.

ii) Devido a heterogeneidade de solos que dão origem ao sedimento dos reservatórios a escala espacial tem importante influencia na estimativa de atributos do sedimento a partir de espectroscopia VIS-NIR-SWIR.

iii) Utilizar resolução espectral mais grosseira é um fator que tem pouca influência na precisão de modelos para estimar atributos do sedimento, haja vista que imagens de satélites com resolução mais grosseiras apresentaram bom desempenho para estimar atributos do solo.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A região semiárida brasileira é constituída diversas de unidades de paisagens constituídas por diferentes características de solo, relevo, clima, vegetação e recursos hídricos (ALVES et al., 2009; CALIXTO JÚNIOR; DRUMOND, 2011; MAIA, 2012). Por muitos motivos e inclusive pela falta de programas de proteção ambiental específicos, a região apresenta mais de 20 milhões de hectares com algum grau de degradação das unidades, com intensidade de baixa a severa (MEDEIROS et al., 2011). Olhando para a unidade de paisagem solo a região semiárida, de maneira geral, apresenta solos rasos com baixo teor de matéria orgânica, baixa retenção de umidade etc., essas características inerentes ao solo quando associada a chuvas de alta intensidade característica dessa região e a falta de cobertura vegetal resultado do uso e ocupação do solo desordenado potencializa a suscetibilidade ao processo de erosão hídrica.

O solo é um componente chave do sistema da Terra, participa diretamente do ciclo hidrológico, processos erosivos, geoquímicos, biológicos e ecológicos, além de ser uma fonte de bens, serviços e recursos para a humanidade (BREVIK et al., 2015; DECOCK et al., 2015). No entanto, há uma acelerada degradação do solo, consequência do aumento da demanda mundial por alimentos, fibras, combustíveis (TESFAYE et al., 2015; OLLOBARREN et al., 2016). Dessa forma, a busca por aumento da produtividade e a expansão de novas áreas para cultivo aumenta a pressão sobre a terra e os ecossistemas frágeis, causando grande impacto nos processos hidrológicos e erosão hídrica do solo (MERTEN; MINELLA, 2013; WOHL et al., 2012). A erosão hídrica é um complexo processo natural de desagregação, transporte e sedimentação das partículas do solo pela ação da água, ocorre principalmente quando escoamento superficial arrasta partículas do solo destacadas pelo impacto das gotas de chuva, podendo formar canais claramente definidos, tais como sulcos, ravinas ou voçorocas (HAGEN et al., 2007).

O sedimento produzido pelo processo erosivo é exportado para os sistemas fluviais, uma parte significativa é depositada em reservatórios e a outra parte chega aos oceanos, segundo Araújo et al. (2006) a deposição de sedimento causa redução de aproximadamente 20% da capacidade de armazenamento em reservatórios a cada década na região semiárida do Brasil. A deposição de sedimentos em reservatórios pode contribuir para problemas como eutrofização, já que o sedimento contém certa quantidade de nutrientes que favorece o aumento da taxa de produtividade do ecossistema e redução do nível de oxigênio dissolvido, além disso o aporte de sedimentos tem impacto na redução da capacidade de armazenamento e mudança

da geometria do reservatório tornando-o mais raso e mais susceptível a evaporação (ARAÚJO et al., 2006; FIGUEIREDO et al., 2007).

Soluções para este tipo de problema são necessárias para minimizar os impactos causados, a primeira solução possível seria adoção de práticas preventivas fazendo uso conservacionista e sustentável do solo, reduzindo a perda de solo pelo processo erosivo, porém este tipo de ação ainda é pouco praticada em países como o Brasil com grande extensão territorial que dificulta a fiscalização e monitoramento do uso inadequado do solo. Quando olhamos para o problema concretizado, eutrofização e assoreamento do reservatório, a solução seria retirar o sedimento do reservatório e reutilizar para outros fins, ação que reduziria o aporte de nutrientes e aumentaria o volume de armazenamento do reservatório (MEDEIROS et al., 2015; BRAGA et al., 2017).

A prática de reuso de sedimento assoreado de reservatórios pode ser uma alternativa, por exemplo, Brils et al. (2014) relataram sobre a potencialidade de reuso de sedimento nos países baixos na Europa e ressalta a importância reutilização de sedimento em grande escala como uma prática que retoma ao conceito de economia circular, considerando o sedimento como um recurso e não como um resíduo. Há alguns estudos em todo o mundo a respeito do reuso de sedimento assoreado para diversos fins, por exemplo, Capra et al. (2015) relataram sobre o reuso de sedimento dragado para a reposição de camadas de solos e perceberam que a adição de sedimento dragado teve efeito benéfico significativo nas propriedades físico-químicas de solos degradados pela erosão e conseqüentemente maior produção total de matéria seca nas plantas. Sigua et al. (2004) observaram aumento na produção de biomassa de quando fizeram reuso de sedimento dragado, Braga et al. (2017) observaram que a adição de sedimentos no cultivo de girassol proporcionou melhorias no teor relativo de clorofila e massas secas total quando comparadas às plantas que crescem em substrato contendo areia ou areia e composto orgânico. Outros estudos enfatizam o efeito positivo do reuso de sedimento como um recurso (por exemplo, YOZZO et al., 2004; SIGUA, 2009; JUNAKOVA; BALINTOVA, 2012; MATTEI et al., 2017). Embora existam estudos sobre o potencial de reuso de sedimento, ainda é uma ideia recente que não se estabeleceu, e o modo econômico atual ainda dá preferência a recursos provenientes de outras fontes (BRILIS et al., 2014). Dessa forma a realização de pesquisas sobre caracterização das propriedades do sedimento torna-se necessária para obter informações sobre seu potencial e dar robustez a ideia de reuso, de modo que esta prática possa se concretizar no sistema de produção agrícola.

A caracterização e análise do sedimento podem ser feitas utilizando algumas metodologias como a análise físico-química em laboratório, que demanda muito tempo,

necessita de trabalho intensivo além de elevados custos. Atualmente com avanço da tecnologia a espectroscopia visível e infravermelho próximo (VIS-NIR) se mostra como uma alternativa para análise indireta das propriedades do sedimento ou solo, tendo a vantagem de ser menos onerosa, mais rápida e eficiente para análise de grande quantidade de amostras. Além disso a espectroscopia VIS-NIR pode facilitar a repetibilidade e reprodutibilidade em diferentes escalas de tempo e espaço (DEMATTE et al., 2004; VISCARRA ROSSEL et al., 2006; GOMEZ et al., 2008; LU et al., 2013; BROSINSKY et al., 2014; FRANCESCHINI et al., 2015 COZZOLINO, 2016; LUDWIG et al., 2017).

Pesquisas recentes vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo buscando estabelecer correlações entre a espectroscopia VIS-NIR e propriedades do sedimento ou solo, na Tabela 1 podemos observar uma breve relação de algumas dessas pesquisas.

Tabela 1. Relação de algumas pesquisas utilizando espectroscopia VIS-NIR para predição das propriedades de solo e sedimento.

<b>Autor</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Faixa espectral (nm)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Local</b>
Vågen et al. (2006)	CO <sup>1</sup>	350–2500	0,92	Madagascar
Viscarra Rossel et al. (2006)	CO	350–2500	0,60	Austrália
Mouazen et al. (2007)	CO	306–1710	0,74	Bélgica
Zornoza et al. (2008)	CO	1000–2400	0,98	Espanha
Terhoeven-Urselmans et al. (2008)	CO	400–2500	0,94	Alemanha
Morgan et al. (2009)	CO	400–2500	0,76	EUA
Morgan et al. (2009)	CO	400–2500	0,69	EUA
Viscarra Rossel et al. (2010)	CO	350–2500	0,82	Austrália
Kuang; Mouazen (2011)	CO	350–2500	0,83	Europa
Vohland et al. (2011)	CO	400–2500	0,89	Alemanha
Fidêncio et al. (2002)	MO <sup>2</sup>	1000–2500	0,77	Brasil
Daniel et al. (2003)	MO	400–1100	0,86	Tailândia
Udelhoven et al. (2003)	MO	400–2500	0,60	Alemanha
He et al. (2007)	MO	350–2500	0,87	China
Christy (2008)	MO	920–1718	0,80	EUA
Tian et al. (2013)	MO	350–2500	0,91	China
Iznaga et al. (2014)	MO	400–1700	0,92	Cuba
Baharom et al. (2015)	MO	310–1700	0,83	Japão
Nawar et al. (2016)	MO	350–2500	0,75	Egito
Zornoza et al. (2008)	N <sup>3</sup> total	1000–2400	0,95	Espanha
Wetterlind et al. (2010)	N total	430–2500	0,85	Suécia
Kuang et al. (2011)	N total	350–2500	0,50	Europa
Abdi et al. (2012)	N total	400–2500	0,79	Canadá
Shi et al. (2012)	N total	350–2500	0,58	China
Schirrmann et al. (2013)	N total	1100–2300	0,69	Alemanha
Gras et al. (2014)	N total	350–2500	0,89	França
Ji et al. (2014)	N total	350–2500	0,87	China
Baharom et al. (2015)	N total	310–1700	0,85	Japão
Morellos et al. (2016)	N total	370–2150	0,73	Alemanha
Daniel et al. (2003)	P <sup>4</sup> total	400–1100	0,81	Tailândia
Udelhoven et al. (2003)	P total	400–2500	0,54	Alemanha

Bogrekci; Lee (2005)	P total	175–2550	0,92	EUA
Abdi et al. (2012)	P total	400–2500	0,75	Canadá
Bikindou et al. (2012)	P total	1100–2500	0,62	Congo
Cozzolino et al. (2013)	P total	350–1850	0,69	Austrália
Heinze et al. (2013)	P total	400–2500	0,94	Alemanha
Hu (2013)	P total	350–2500	0,65	EUA
Schirrmann et al. (2013)	P total	1100–2300	0,35	Alemanha
Wang et al. (2015)	P total	780–2500	0,56	China
Daniel et al. (2003)	K <sup>5</sup> total	400–1100	0,80	Tailândia
Udelhoven et al. (2003)	K total	400–2500	0,85	Alemanha
Cozzolino et al. (2013)	K total	350–1850	0,70	Austrália
Schirrmann et al. (2013)	K total	1100–2300	0,55	Alemanha
Wang et al. (2015)	K total	780–2500	0,54	China
Iznaga et al. (2014)	K disponível	400–1700	0,61	Cuba
Ji et al. (2014)	K disponível	350–2500	0,14	China

<sup>1</sup>CO – Carbono orgânico; <sup>2</sup>MO – Matéria orgânica; <sup>3</sup>N – Nitrogênio; <sup>4</sup>P – Fósforo; <sup>5</sup>K – potássio.

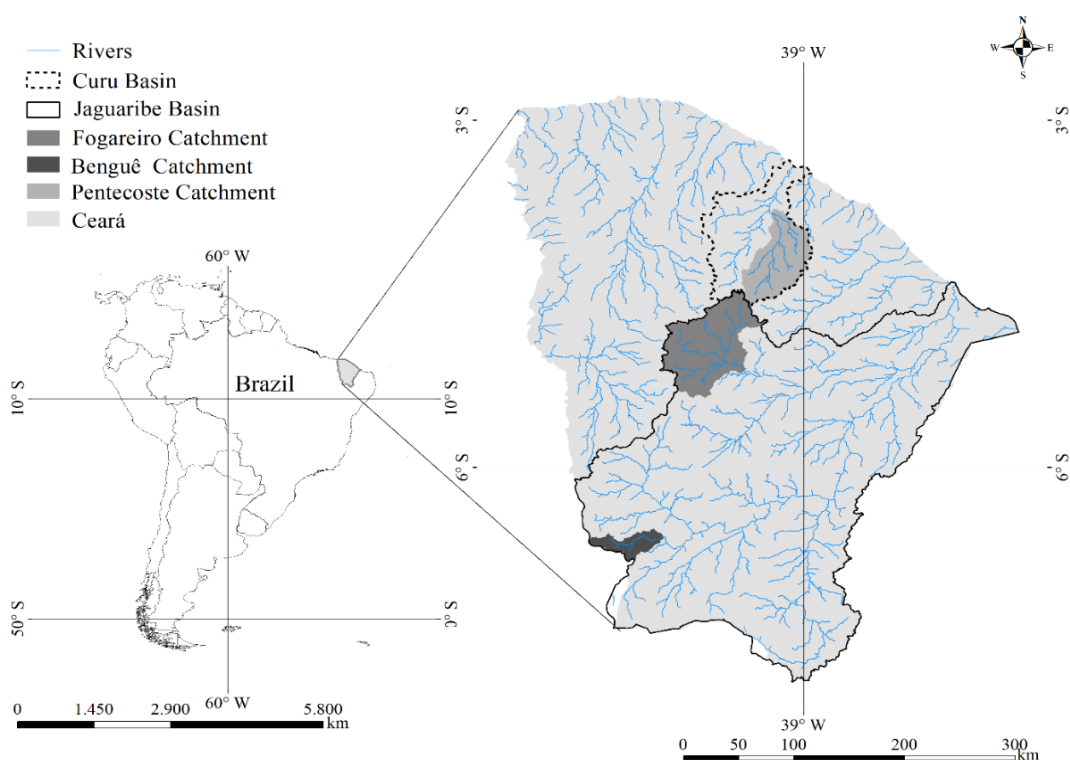
O uso da espectroscopia VIS-NIR é um passo para confirmação da utilização de imagens de satélites para avaliação das propriedades do sedimento, visto que o estabelecer fortes correlações a partir de calibração e validação em nível terrestre (espectroscopia VIS-NIR) pode ser suporte para ampliação das predições utilizando imagem de satélites (nível orbital). A possibilidade de predição das propriedades do solo a partir de espectroscopia VIS-NIR e também por imagens de satélite foi constatada por Gomez et al. (2008), assim a caracterização de sedimento por espectroscopia VIS-NIR e imagens satelitais também pode se tornar viável. A possibilidade da utilização de imagens de satélites região semiárida para analisar as propriedades do sedimento pode ser viável devido a dinâmica de cheia e seca dos reservatórios, os reservatórios de pequeno e médio porte secam com frequência no período seco, tornando acessível o sedimento acumulado, aumentando a chance de ser imageado periodicamente por satélites e/ou coletados e analisado por espectroscopia VIS-NIR, e conseqüentemente ser reutilizado quando comprovada sua eficácia para adubação de plantas ou reconstituição das camadas do solo removida pelo processo erosivo.

Dessa forma a utilização de espectroscopia VIS-NIR para a caracterização de sedimento assoreado de reservatórios parece promissor na região semiárida do Brasil, para constatar esse potencial se faz necessário coleta de sedimento (dados de campo), avaliação físico-química, estabelecer correlações e gerar modelos de regressão para estimar as propriedades do sedimento.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado na região semiárida do Brasil, Estado do Ceará, englobando dez reservatórios superficiais de diversos tamanhos (áreas variando de 0,02 a 37 km<sup>2</sup>) distribuídos em três bacias hidrográficas (Benguê, Fogareiro e Pentecoste, com aproximadamente 1.000, 5.100 e 3.200 km<sup>2</sup>, respectivamente) nas bacias do Jaguaribe (74.000 km<sup>2</sup>) e Curu (8.500 km<sup>2</sup>), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Área de estudo, região semiárida do nordeste brasileiro



Fonte: Elaborada pelo autor.

O clima da região é semiárido, com potencial de evaporação anual variando de aproximadamente 1.800 mm na região litorânea até 3.000 mm no interior. A precipitação média anual apresenta um padrão de gradiente inverso, variando de cerca de 1.100 a 550 mm, concentrado em uma estação chuvosa bem definida, que gera de seis a nove meses por ano de déficit hídrico atmosférico (INMET, 2018).

Além disso, solos rasos (geralmente < 1 m de profundidade) formados sobre embasamento cristalino tornam os rios intermitentes e promovem o baixo potencial hidrogeológico da região, o que levou à construção de barragens para abastecimento de água. A rede de reservatórios, com densidade média da ordem de um reservatório por 8 km<sup>2</sup>, impacta os recursos hídricos gerais (de Araújo e Medeiros, 2013), e é particularmente importante na retenção de sedimentos (Medeiros et al., 2014, Mamede et al., 2018). O acúmulo de sedimentos

e dos nutrientes adsorvidos nos reservatórios resulta em um efeito na qualidade da água, conforme descrito por Medeiros e Sivapalan (2020), afetando negativamente a disponibilidade hídrica em termos de quantidade (assoreamento do reservatório) e qualidade (eutrofização). Nesse contexto, o reaproveitamento de sedimentos tem sido proposto para fertilização do solo (Braga et al., 2019), contribuindo também para a recuperação da qualidade da água (Lira et al., 2020).

A ampla gama de reservatórios e bacia hidrográficas avaliadas neste estudo possibilitou uma análise do potencial de caracterização de sedimentos por espectroscopia VIS-NIR-SWIR em micro (<0,1 km<sup>2</sup>), pequena (0,1-10 km<sup>2</sup>), meso (10-100 km<sup>2</sup>), grandes (100-10.000 km<sup>2</sup>) e macro (> 10.000 km<sup>2</sup>) escalas espaciais. Na Tabela 2 observa-se os reservatórios e bacias hidrográficas utilizados em cada uma das escalas espaciais analisadas, e uma descrição de cada área é apresentada a seguir.

Tabela 2 – Escalas espaciais utilizadas para obter modelos de regressão entre atributos físico-químicos do sedimento e dados espectrais

<b>Escala</b>	<b>Reservatório/Bacia hidrográfica</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>n<sup>1</sup></b>
Micro	Araras <sup>2</sup>	0,02	5
	Açude III <sup>2</sup>	0,02	5
	Escola <sup>4</sup>	0,03	10
	Boqueirão <sup>2</sup>	0,03	12
Pequena	São Nicolau <sup>3</sup>	0,42	20
	São Joaquim <sup>3</sup>	1,20	20
	Benguê <sup>2</sup>	2,23	6
	Marengo <sup>3</sup>	3,39	20
Média	Fogareiro <sup>3</sup>	20,46	20
	Pentecoste <sup>4</sup>	36,88	20
Grande	Benguê	964	28
	Pentecoste	3.238	30
	Fogareiro	5.106	80
Macro	Bacias do Jaguaribe e Curu	82.500	138

<sup>1</sup>Número de amostras de sedimento; Reservatórios localizados na bacia hidrográfica do Benguê<sup>2</sup>, Fogareiro<sup>3</sup> e Pentecoste<sup>4</sup>.

As bacias estudadas foram definidas com base nos seguintes critérios:

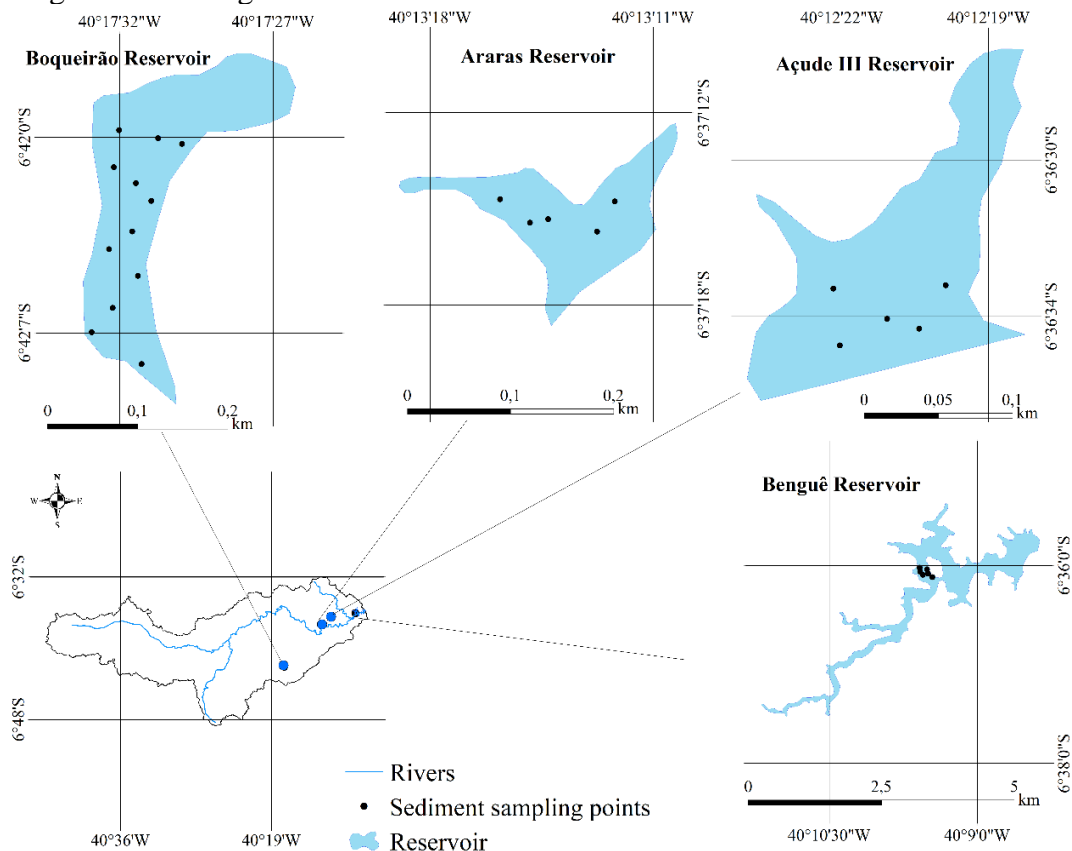
- Variabilidade em termos de tipo de solo e regime hidrológico, que controlam as características e fluxos dos sedimentos;
- Existência de reservatórios estratégicos nas saídas das bacias, monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará - COGERH, que fornece dados secundários sobre variabilidade hidrológica;

- Pesquisas científicas realizadas pelos autores nas regiões nas últimas décadas, que contribuem para o conhecimento prévio.

### 3.1. Bacia Hidrográfica do Benguê (BGC)

A bacia hidrográfica do Benguê (BGC) drena uma área de 964 km<sup>2</sup> nas cabeceiras da Bacia do Jaguaribe, com 560 mm de precipitação média anual produzindo escoamento de 47 mm (coeficiente de escoamento de 8%) (Ceará, 2009). Os tipos de solo predominantes são luvisolos e neossolos, mas encontra-se também latossolos profundos nas bordas (EMBRAPA, 2011). A bacia é controlada pelo reservatório Benguê na sua saída, com capacidade de armazenamento de 19,6 hm<sup>3</sup> e área inundada de 3,5 km<sup>2</sup>. Além do reservatório de Benguê, foram estudados três pequenos reservatórios com áreas alagadas de 0,02 a 0,03 km<sup>2</sup>: Boqueirão, monitorado para variáveis hidrológicas e sedimentológicas desde 2003 (de Figueiredo et al., 2016), Araras e Açude III. A Figura 2 apresenta a localização dos reservatórios estudados e os respectivos pontos de amostragem de sedimentos na bacia hidrográfica de Benguê.

Figura 2 – Localização dos reservatórios estudados e pontos de coleta de sedimento na bacia hidrográfica do Benguê

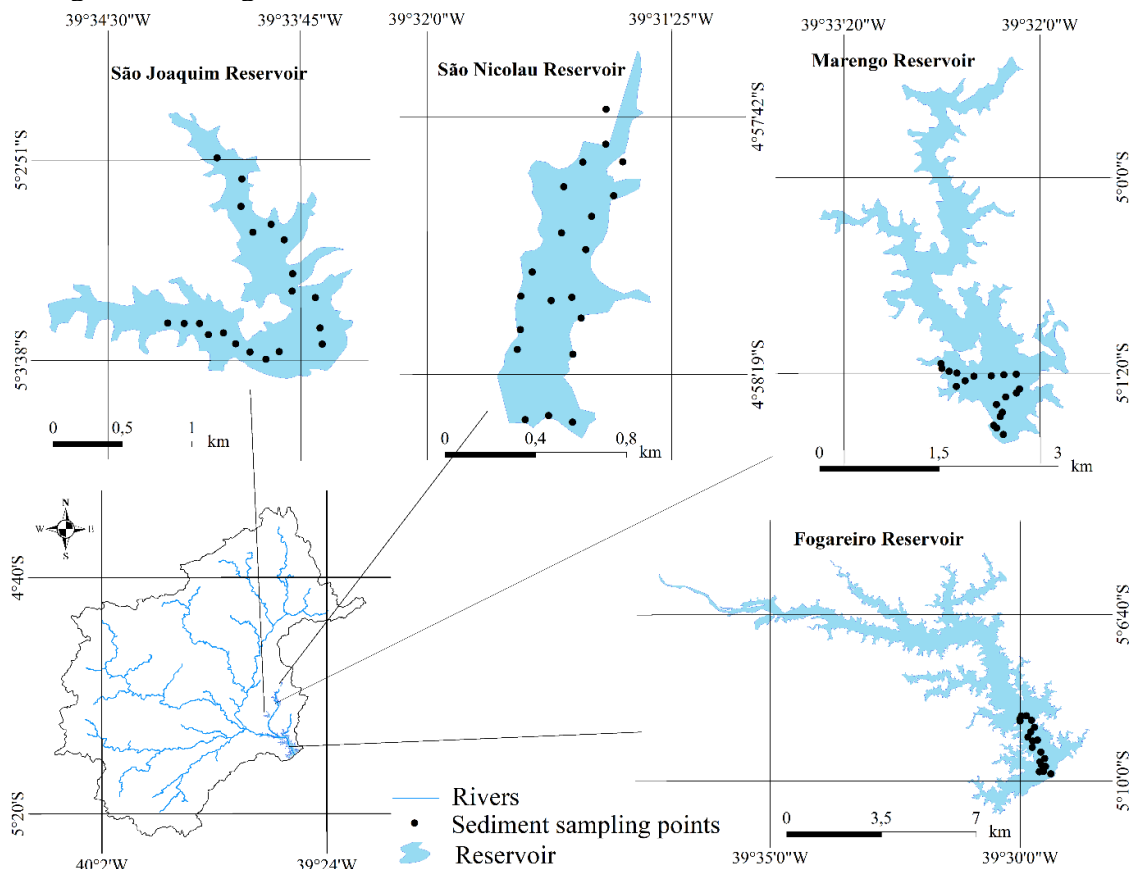


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2. Bacia Hidrográfica do Fogareiro (FGC)

Assim como Benguê, a bacia do Fogareiro (FGC) está localizada na Bacia do Jaguaribe, com área de aproximadamente 5.106 km<sup>2</sup> com predominância de neossolos, mas também de luvisolos e argissolos (EMBRAPA, 2011). A precipitação média anual é de 680 mm e o escoamento superficial é de 58 mm, o que corresponde a 8% do coeficiente de escoamento. Quatro reservatórios foram estudados na bacia hidrográfica: Fogareiro, Marengo, São Joaquim e São Nicolau, com capacidades de armazenamento de 118,0, 15,3, 5,0 e 0,9 hm<sup>3</sup>, e áreas alagadas de 20,5, 3,4, 1,2 e 0,4 km<sup>2</sup>, respectivamente. Estudos têm sido realizados na bacia do Fogareiro para caracterização de reservatórios superficiais (Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2018), bem como a viabilidade da prática de reúso de sedimentos (Braga et al., 2019). A Figura 3 apresenta a localização dos reservatórios estudados e os respectivos pontos de amostragem de sedimentos na bacia do Fogareiro.

Figura 3 – Localização dos reservatórios estudados e pontos de coleta de sedimento na bacia hidrográfica do Fogareiro.



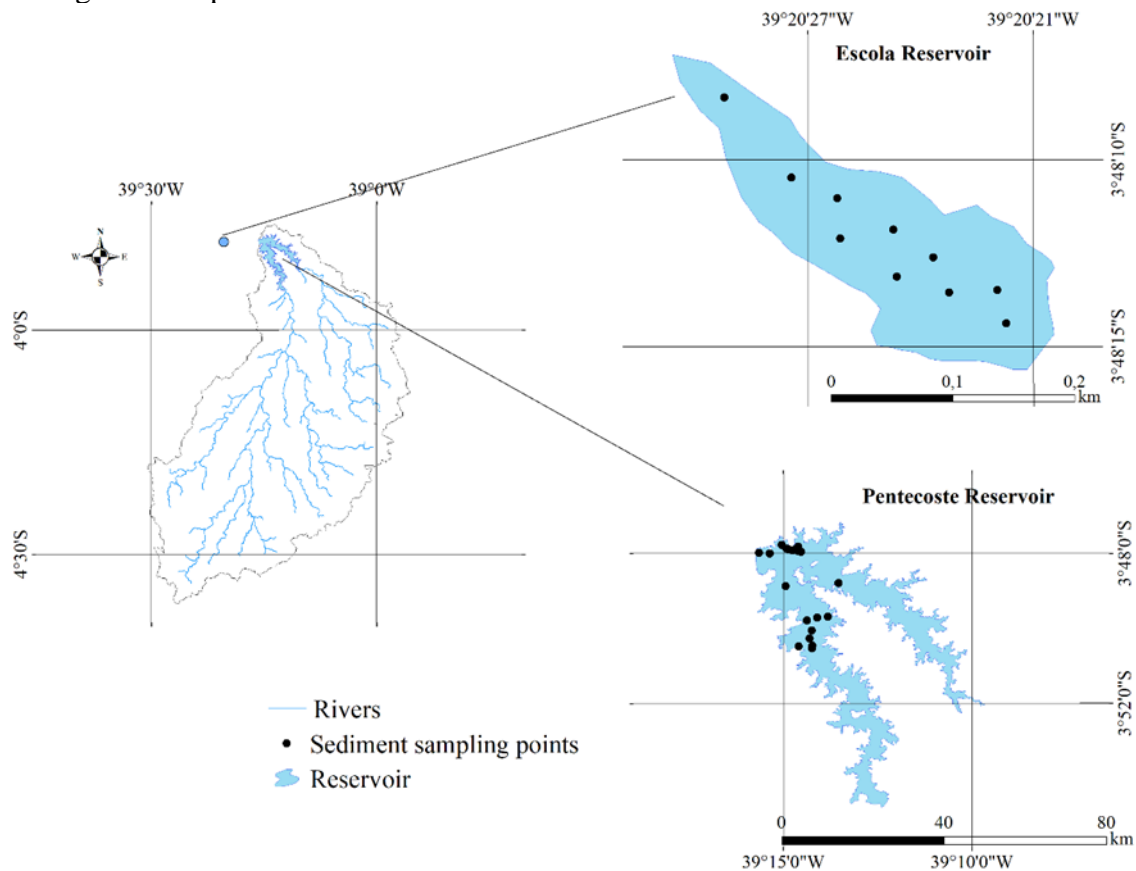
Fonte: Elaborada pelo autor.



### 3.3. Bacia Hidrográfica de Pentecoste (PTC)

A bacia hidrográfica do Pentecoste (PTC) está localizada na Bacia do Curu e se estende por uma área de 3.238 km<sup>2</sup>. A média anual de chuva e escoamento é de 750 e 126 mm, respectivamente, correspondendo a um coeficiente de escoamento de 17% (Ceará, 2009). A maior parte da área é coberta por luvisolos, mas são observadas também manchas de planossolos (EMBRAPA, 2011). Nessa bacia foram selecionados dois reservatórios para amostragem de sedimentos: o reservatório Pentecoste, localizado na saída da bacia, com capacidade de armazenamento de 360 hm<sup>3</sup> e área alagada de 57 km<sup>2</sup>, e o reservatório Escola, localizado na Fazenda Experimental Vale do Curu (FEVC), com capacidade de armazenamento de aproximadamente 0,05 hm<sup>3</sup> e área alagada de 0,03 km<sup>2</sup>, monitorada desde 2015 (SILVEIRA E MAMEDE, submetido) (Figura 4).

Figura 4 – Localização do reservatório em estudo e pontos de coleta de sedimento na bacia hidrográfica de pentecoste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo compreende cinco etapas: 1) amostragem de sedimentos nos reservatórios estudados; 2) análises laboratoriais físico-químicas; 3) análises espectrais; 4) correlação de propriedades físico-químicas e espectrais para a elaboração de modelos de caracterização de sedimentos de reservatórios por espectroscopia de refletância difusa; e 5) avaliação do efeito da escala espacial e resolução espectral no desempenho dos modelos.

### **4.1. Amostragem de sedimento**

A amostragem de sedimentos foi realizada em reservatórios vazios no período de novembro de 2016 a fevereiro de 2017. Pequenos reservatórios secam periodicamente na região de estudo devido às altas taxas de evaporação, enquanto reservatórios de médio e grande porte retêm água por períodos mais longos. Porém, devido a uma seca de longa duração (2012 a 2017), foi possível obter amostras de sedimentos também de reservatórios estratégicos maiores. A amostragem de sedimentos dos leitos dos reservatórios foi precedida pela limpeza da superfície para a retirada de serrapilheira (Figura 5). Em cada ponto de amostragem, uma área de aproximadamente 0,5 m de diâmetro foi delimitada e aproximadamente 2 kg de sedimento da camada superior (~ 2 cm) foram coletados por amostragem. O número de amostras variou de acordo com o tamanho do reservatório, sendo vinte amostras o máximo para os maiores reservatórios (ver Tabela 2), totalizando 138 nos dez reservatórios estudados.

As amostras de sedimento foram secas ao ar, desagregadas, homogeneizadas e peneiradas a 2 mm, e posteriormente enviadas aos laboratórios físico-químicos e espectrais para as respectivas análises, conforme descrito a seguir.

Figura 5 - Remoção de serrapilheira e amostragem de sedimentos nos reservatórios vazios



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2. Análises físico-químicas do sedimento

As análises físico-químicas do sedimento foram realizadas no Laboratório de Solos e Água da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os atributos químicos Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Carbono ©, bem como o teor de matéria orgânica e a granulometria foram analisados de acordo com os métodos recomendados no Manual de Métodos de Análise de Solo da Pesquisa Agropecuária Brasileira Corporação (EMBRAPA, 2017):

- Nitrogênio: método Kjeldahl, no qual o N é convertido em sulfato de amônio por oxidação, e a amônia liberada é determinada por acidimetria;
- Fósforo: formação do complexo azul fósforo-molibdico após redução do molibdato com ácido ascórbico e determinação do fósforo assimilável por espectrofotometria de absorção molecular;
- Potássio: extração com solução diluída de ácido clorídrico e posterior determinação do potássio trocável por espectrofotometria de chama;

- Carbono orgânico: oxidação da matéria orgânica por via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico. O excesso de dicromato após a oxidação é titulado com uma solução padrão de sulfato de amônio ferroso;
- Matéria orgânica: calculada a partir do teor de carbono orgânico, admitindo uma fração fixa de carbono (58%) na matéria orgânica.
- Argila: quantificada pelo método da pipeta, com agitação e suspensão das frações silte e argila em solução dispersante, e quantificação da fração suspensa após sedimentação.

### **4.3. Análise espectral do sedimento**

Para as análises espectrais, as amostras de sedimento foram secas ao ar e colocadas em recipientes plásticos cilíndricos pretos com 6 cm de diâmetro e 4 cm de profundidade, totalizando um volume de 113,1 cm<sup>3</sup>. As leituras foram realizadas no Laboratório de Eletrônica e Mecanização (LEMA) da UFC, em uma sala escura e sem superfícies reflexivas. Um espectrorradiômetro cobrindo a faixa espectral entre 350 nm e 2.500 nm (ASD FieldSpec®3 Hi-Res) foi utilizado com uma única fonte de luz artificial (lâmpada de halogênio) orientada para a amostra com um ângulo zenital de 45 ° e distância de 71 cm. A distância entre o sensor e a amostra era de um terço do diâmetro do recipiente, para evitar influência das bordas nas leituras. Cada espectro foi obtido a partir de 30 repetições, e três espectros foram medidos para cada amostra com rotação de 120 ° entre as leituras. Três otimizações e medidas de referência de branco foram realizadas durante as análises, a primeira antes das leituras espectrais e as duas últimas quando o equipamento indicava saturação.

A leitura espectral compreende a faixa entre 350 nm e 2.500 nm com resolução espectral de 1 nm. No entanto, as faixas inicial (350 nm a 399 nm) e final (2.401 nm a 2.500 nm) foram removidas devido ao ruído, e a faixa entre 400 nm e 2.400 nm foi considerada para a posterior análise dos atributos do sedimento por espectroscopia.

### **4.4. Modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia**

Estabelecer correlações entre solo/sedimento físico-químico e dados de refletância é um desafio devido ao grande número de combinações possíveis. Atualmente, a regressão parcial dos mínimos quadrados - PLSR (ver Wold et al. 2001) é uma técnica amplamente utilizada e bem-sucedida para estimar as características do alvo a partir de dados espectrais (e.g. Gomez et al., 2008; Lu et al. 2013; Ludwig et al., 2017, Viscarra-Rossel, 2008). O algoritmo

PLSR seleciona fatores ortogonais que maximizam a covariância entre as variáveis preditoras X (dados espectrais) e a variável resposta Y (atributo de sedimento, neste caso). O PLSR decompõe as variáveis X e Y e encontra novos componentes (escores), chamados de variáveis latentes, que são ortogonais. As regressões são calculadas entre esses novos componentes das variáveis X e Y (Moreira, 2015).

Em nosso estudo, usamos o PLSR para estimar os conteúdos de N, P, K, C, matéria orgânica e argila a partir de dados espectrais. Antes da aplicação do PLSR, técnicas de pré-processamento foram aplicadas para melhorar a robustez dos modelos: para normalização espectral, a transformada de variância normal padrão - SNV (Barnes et al., 1989) foi usada para remover a interferência devido ao espalhamento de luz. Para suavização espectral, um filtro Savitzky-Golay (Savitzky e Golay, 1964) foi aplicado.

Os modelos de regressão foram desenvolvidos individualmente para cada uma das escalas espaciais apresentadas na Tabela 2, utilizando 50% dos dados para calibração e os 50% restantes para validação. A separação de dados para calibração e validação tentou cobrir toda a gama de valores de atributos para ambos os procedimentos. No entanto, como as amostras individuais podem impactar amplamente nos resultados do modelo, os valores discrepantes foram removidos. O reservatório de Benguê de pequena escala não foi avaliado individualmente devido ao número limitado de amostras (6 amostras de sedimentos), mas os dados obtidos neste reservatório foram usados em escalas maiores da bacia do Benguê (grande escala) e das bacias do Jaguaribe e Curu (escala macro). Na microescala, em que menos de 20 pontos de amostragem de sedimento estavam disponíveis por reservatório, foi realizado o procedimento de validação cruzada leave-one-out.

O desempenho dos modelos de regressão foi avaliado com o coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe - NSE, segundo o qual o modelo pode ser considerado muito bom ( $0,75 < NSE \leq 1,00$ ), bom ( $0,65 < NSE \leq 0,75$ ), satisfatório ( $0,50 < NSE \leq 0,65$ ) ou insatisfatório ( $NSE \leq 0,50$ ) (Moriasi et al., 2009). Outras medidas de desempenho do modelo também foram calculadas: coeficiente de determinação -  $R^2$ , coeficiente de determinação ajustado -  $R^2_{adj}$  e raiz do erro quadrático médio - RMSE.

O pré-processamento, calibração e validação dos dados, bem como os coeficientes estatísticos de eficiência, foram obtidos utilizando o software ParLes versão 3.1 fornecido por Viscarra-Rossel (2008).

#### 4.5. Influência da escala espacial e resolução espectral na precisão da caracterização de sedimentos por espectroscopia

Para analisar a influência da resolução espectral na precisão da estimativa de atributos de sedimentos a partir de dados espectroscópicos, as curvas espectrais originais de resolução de 1 nm (2.001 bandas espectrais) fornecidas pelo instrumento foram reamostradas para resolução de 3, 5 e 10 nm, resultando em 677, 400 e 200 bandas, respectivamente.

Para simplificar, em comparação com a abordagem PLSR anterior, os índices de banda de diferença normalizados (NDBI) foram calculados (Equação 1) em um ambiente Matlab (Moreira, 2014), no qual cada banda espectral foi combinada com as outras para compor o índice. Essa abordagem baseada em índices foi previamente adotada na região de estudo, por exemplo, para a estimativa das características da vegetação (Almeida et al., 2019).

$$NDBI = \frac{\rho_i - \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \quad (1)$$

Onde  $\rho_i$  e  $\rho_j$  são valores de refletância de quaisquer duas bandas espectrais.

Para cada uma das resoluções espectrais acima mencionadas, foi selecionado o NDBI de maior correlação com cada atributo do sedimento, estimado a partir das análises físico-químicas. Os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram usados como uma medida da qualidade do ajuste.

Por meio do NDBI também foi possível identificar as bandas de melhor correlação com a concentração de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Carbono, Matéria Orgânica e Argila, para escolher a combinação com maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Para avaliar a influência da escala espacial nas estimativas, foram utilizadas curvas de resolução de 1 nm. Os dados físico-químicos dos pontos de amostragem de sedimentos foram agrupados em escalas espaciais variando de micro ( $<0,1 \text{ km}^2$ ) a macro ( $> 10.000 \text{ km}^2$ ), conforme Tabela 2. Novamente, os NDBIs foram calculados para cada conjunto de dados, e o NDBI apresentando a maior correlação com cada atributo de sedimento foi selecionada. O  $R^2$  foi calculado para todas as combinações de atributos de sedimentos e escalas espaciais, permitindo interpretar como a correlação evolui.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Caracterização físico-química do sedimento**

As propriedades dos sedimentos nos dez reservatórios estudados estão resumidas na Tabela 3, a partir da qual a variação dentro e entre os reservatórios pode ser observada. A maior variação entre os reservatórios foi observada no teor de P: São Nicolau apresenta teores muito elevados até uma média de 82 mg / kg e um máximo de 289 mg/kg, enquanto o conteúdo médio em Benguê é de 7 mg / kg, chegando a tão baixo quanto 2 mg /kg. N, K, C e matéria orgânica tendem a ser menos variáveis entre os reservatórios estudados, com valores médios variando de 1,3 e 1,9 g/kg, 0,8 e 2,0 cmolc/kg, 15,3 e 19,0 g/kg, e 23,1 e 32,8 g/kg, respectivamente. Quanto aos teores de argila apresentaram grande variação, sendo os maiores valores no reservatório do Pentecoste: média de 528 g/kg e máximo de 744 g/kg.

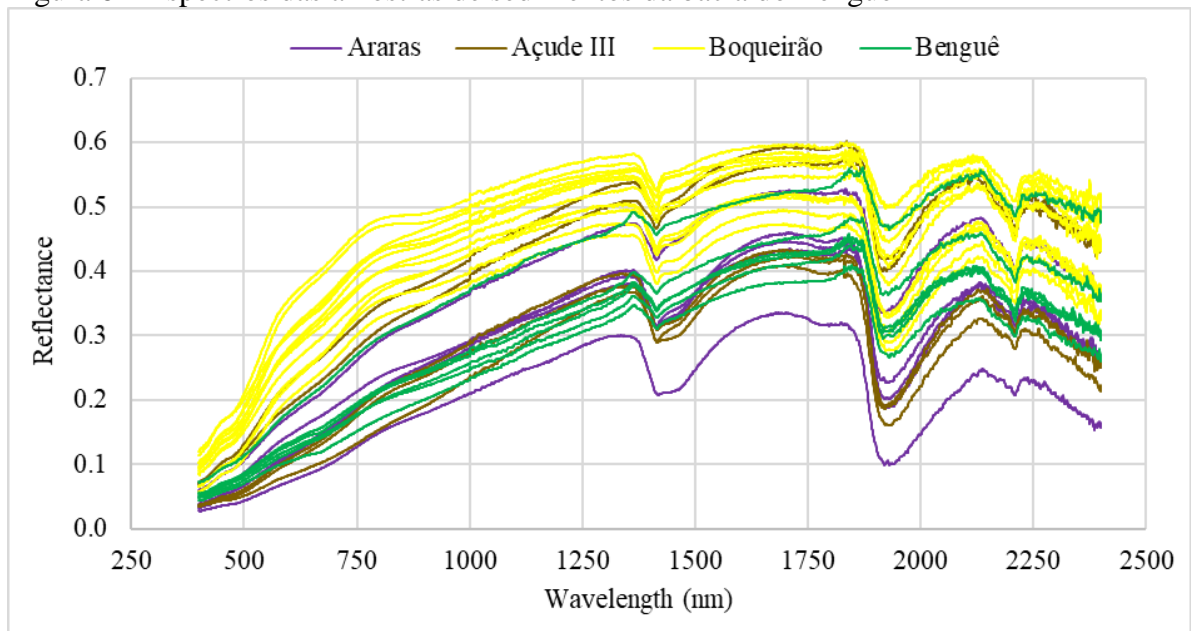
Tabela 3. Estatísticas de atributos de sedimentos para as três bacias hidrográficas do estudo

Bacia hidrográfica	Reserv	Scale		N (g/kg)	P (mg/kg)	K (cmol/kg)	C (g/kg)	Org. matter (g/kg)	Clay (g/kg)
Bengué (BGC)	Araras	Micro	Média	1.6	45.6	1.6	16.1	27.7	350
			SD	0.4	56.8	0.4	4.2	7.2	138
			Min	0.9	14.0	1.0	9.2	15.9	112
			Max	1.9	147.0	2.0	20.3	35.1	473
			Distorção	-1.9	2.2	-1.9	-1.4	-1.4	-1.8
	Açude III	Micro	Média	1.8	16.4	1.6	17.8	30.7	337
			SD	0.9	7.5	0.7	9.3	16.1	103
			Min	0.3	8.0	0.8	2.8	4.8	190
			Max	2.5	28.0	2.3	27.2	47.0	447
			Distorção	-1.6	0.9	-0.4	-1.2	-1.2	-0.6
	Bengué	Pequena	Média	1.8	7.3	0.8	17.9	30.8	273
			SD	0.8	6.5	0.4	7.9	13.5	161
			Min	0.4	2.0	0.2	4.4	7.6	36
			Max	2.6	19.0	1.2	24.2	41.8	445
			Distorção	-1.3	1.4	-0.5	-1.3	-1.3	-0.8
	Boqueirão	Micro	Média	1.5	14.9	1.3	15.3	26.5	344
			SD	0.4	3.6	0.5	3.6	6.3	78
			Min	1.2	9.0	0.7	11.4	19.7	225
			Max	2.1	22.0	2.4	22.7	39.2	431
			Distorção	0.6	0.2	0.7	0.9	0.8	-0.4
Fogareiro (FGC)	Fogareiro	Média	Média	1.9	22.0	1.2	19.0	32.8	474
			SD	0.5	8.3	0.6	5.0	8.6	171
			Min	0.8	9.0	0.4	7.1	12.3	66
			Max	2.6	52.0	3.6	24.4	42.0	665
			Distorção	-0.8	2.5	2.7	-1.2	-1.2	-1.3
	Marengo	Pequena	Média	1.3	10.9	1.6	13.4	23.1	273
			SD	0.7	4.8	1.3	6.2	10.7	251
			Min	0.3	4.0	0.3	3.5	6.1	10
			Max	2.5	20.0	4.9	23.4	40.3	704
			Distorção	0.2	0.1	1.1	0.2	0.2	0.6
	São Joaquim	Pequena	Média	1.8	26.2	2.0	18.5	31.9	368
			SD	0.7	12.9	0.9	5.9	10.2	172
			Min	0.5	10.0	0.7	5.8	10.0	34
			Max	2.7	62.0	4.3	24.8	42.8	668
			Distorção	-0.8	1.5	0.6	-1.0	-1.0	-0.3
	São Nicolau	Pequena	Média	1.7	81.9	0.9	17.0	29.0	269
			SD	0.7	68.7	0.6	7.5	12.6	124
			Min	0.4	17.0	0.2	4.3	7.3	130
			Max	2.5	289.0	2.9	29.6	45.9	563
			Distorção	-0.3	2.0	1.9	-0.1	-0.3	1.1
Pentecoste (PTC)	Escola	Micro	Média	1.7	15.7	1.7	16.6	28.7	249
			SD	0.9	6.3	0.8	8.4	14.5	165
			Min	0.5	7.0	0.5	5.0	8.6	37
			Max	2.5	27.0	2.9	26.0	44.9	541
			Distorção	-0.6	0.3	-0.3	-0.5	-0.5	0.3
	Pentecoste	Média	Média	1.6	10.3	1.8	15.7	27.1	528
			SD	0.6	4.3	0.8	5.4	9.3	221
			Min	0.2	5.0	0.4	2.6	4.5	11
			Max	2.4	22.0	3.9	23.5	40.6	744
			Distorção	-0.6	1.7	0.6	-0.6	-0.6	-1.2



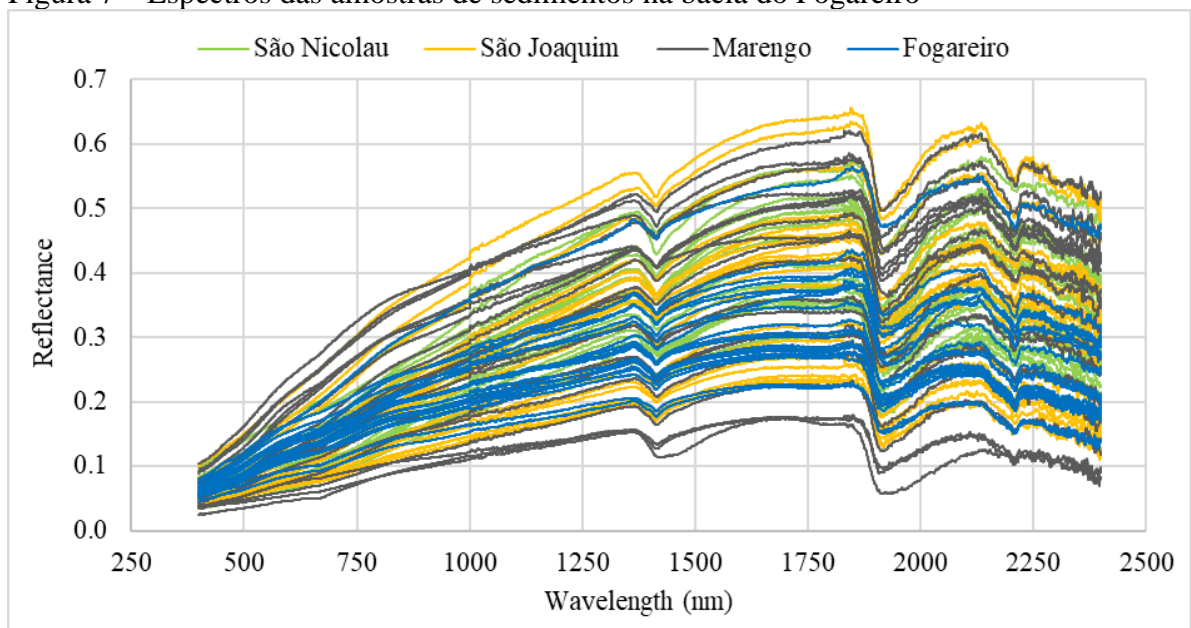
Os espectros do sedimento em todos os pontos de amostragem são apresentados nas Figuras 6 (bacia do Benguê), 7 (bacia do Fogareiro) e 8 (bacia do Pentecoste). Nenhum contraste visual expressivo pode ser notado entre as diferentes bacias, mas grandes diferenças podem ser observadas em termos de faixa de refletância dentro de um único reservatório (faixa estreita para o reservatório do Boqueirão – Figura 6 – e ampla faixa para o reservatório de Marengo – Figura 7, por exemplo).

Figura 6 – Espectros das amostras de sedimentos da bacia do Benguê



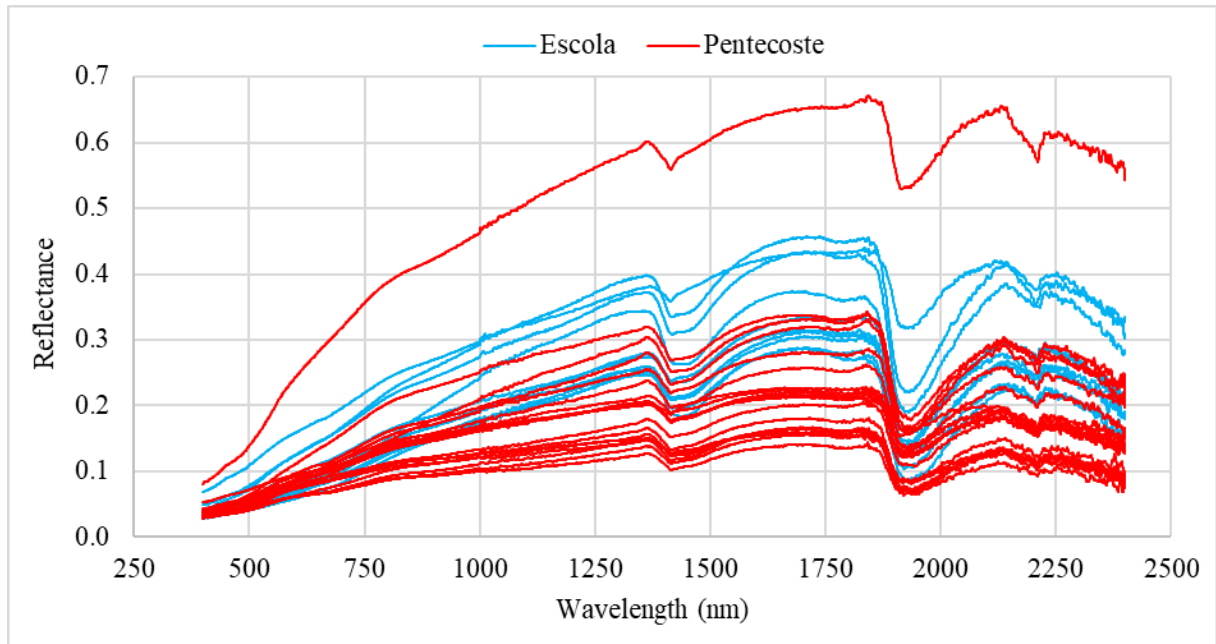
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Espectros das amostras de sedimentos na bacia do Fogareiro



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 8 - Espectros das amostras de sedimentos na bacia do Pentecoste



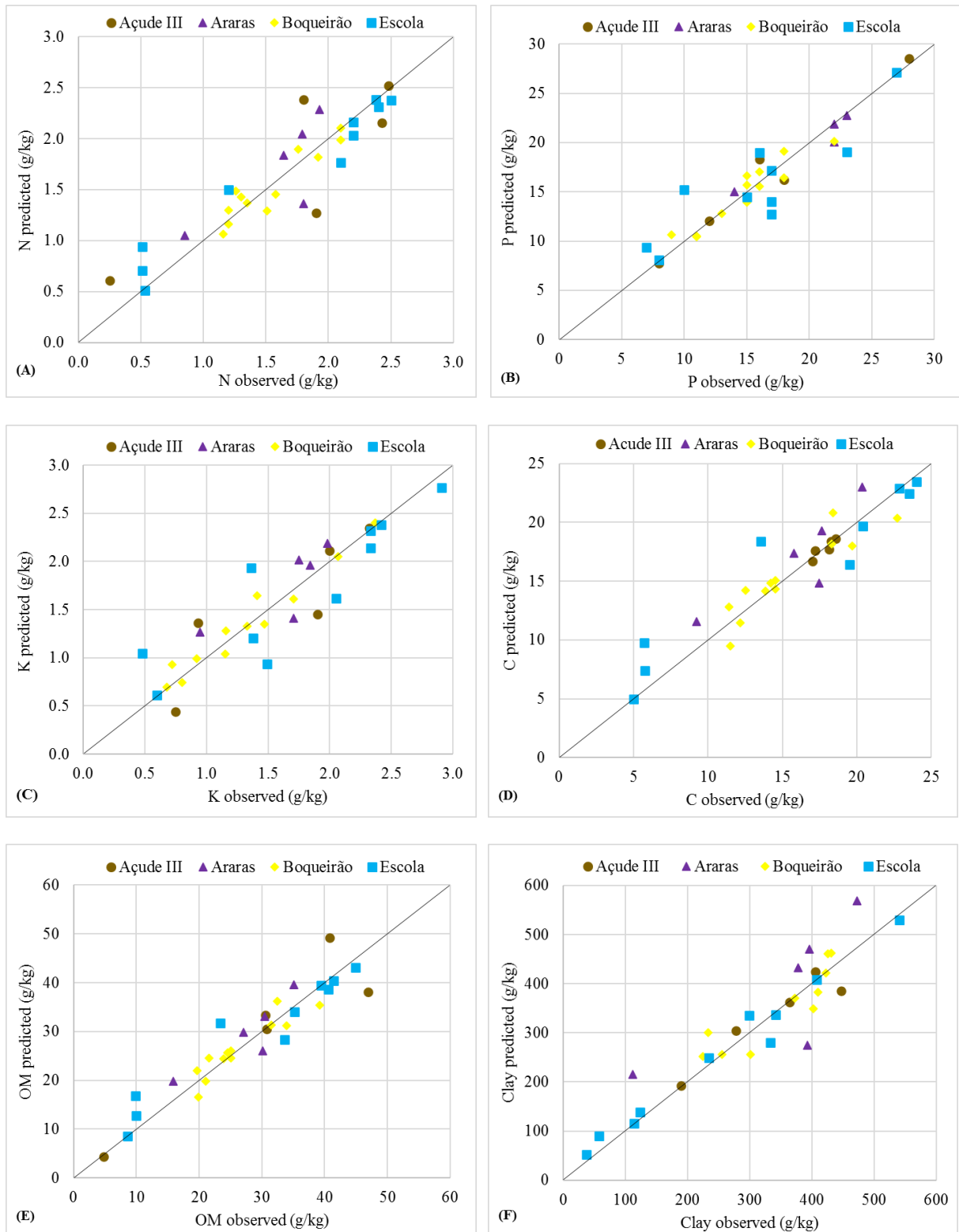
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.2. Desempenho de modelos para caracterização de sedimentos por espectroscopia

*Micro escala (reservatórios < 0,10 km<sup>2</sup>)*

O desempenho dos modelos para caracterização de sedimentos por espectroscopia em reservatórios de microescala (<0,10 km<sup>2</sup>) usando regressões de mínimos quadrados parciais é apresentado na Figura 9 e na Tabela 4, que mostram os resultados da validação cruzada para N, P, K, C, matéria orgânica e argila.

Figura 9 - Resultados da validação cruzada (leave-one-out) de modelos para reservatórios individuais na escala micro (reservatórios <math><0,10\text{ km}^2</math>): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em geral, os modelos de regressão para estimar N, P, K, C, matéria orgânica e argila apresentaram desempenhos bons a muito bons nos reservatórios em microescala (<0,10 km<sup>2</sup>), com algumas exceções como N e argila no reservatório de Araras (NSE <0,5).

A matéria orgânica foi o atributo do sedimento para o qual os modelos apresentaram melhor desempenho para os reservatórios em microescala, com NSE na faixa de 0,85 a 0,94, seguido de P (NSE de 0,76 a 0,96). Os modelos para C e K variaram de desempenho satisfatório a muito bom (NSE de 0,65 a 0,91 e de 0,51 a 0,95, respectivamente), enquanto para argila e N, os modelos foram classificados como bom e muito bom na maioria dos casos, mas tiveram desempenho insatisfatório para o reservatório Araras.

Tabela 4. Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia nos reservatórios da microescala (reservatórios <0,10 km<sup>2</sup>)

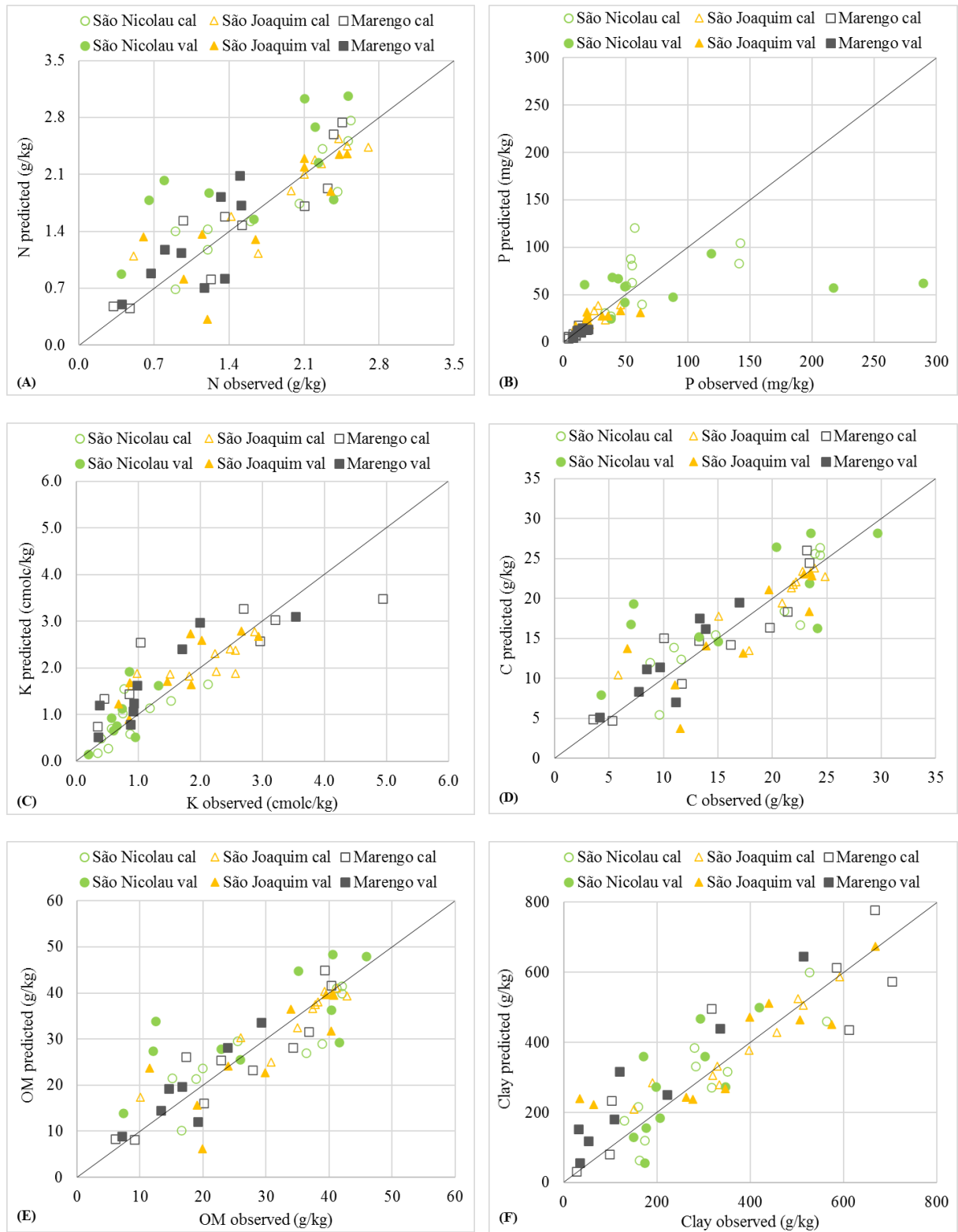
Reservatório	Atributo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE	NF <sup>1</sup>
Açude III	N	0.72	0.62	0.43	0.71	2
	P	0.97	0.95	1.33	0.96	2
	K	0.78	0.71	0.32	0.74	2
	C	0.78	0.71	0.32	0.74	2
	MO	0.86	0.81	5.62	0.85	3
	Argila	0.89	0.86	31.11	0.89	3
Araras	N	0.62	0.49	0.30	0.38	3
	P	0.94	0.90	1.11	0.91	2
	K	0.66	0.55	0.25	0.51	3
	C	0.77	0.69	2.21	0.65	3
	MO	0.79	0.72	3.67	0.94	3
	Argila	0.63	0.50	91.98	0.45	3
Boqueirão	N	0.86	0.85	0.13	0.86	8
	P	0.89	0.88	1.16	0.89	8
	K	0.95	0.95	0.12	0.95	9
	C	0.83	0.81	1.43	0.83	7
	MO	0.85	0.84	2.31	0.85	7
	Argila	0.80	0.78	34.50	0.79	7
Escola	N	0.95	0.94	0.22	0.93	7
	P	0.76	0.73	2.91	0.76	7
	K	0.79	0.77	0.35	0.79	7
	C	0.93	0.92	2.35	0.91	7
	MO	0.93	0.92	4.05	0.91	7
	Argila	0.98	0.98	24.65	0.98	7

<sup>1</sup> NF – número de fatores nos modelos PLSR.

*Pequena escala (reservatórios de 0,10 a 10 km<sup>2</sup>).*

Os resultados da calibração e validação do modelo para caracterização de sedimentos nos reservatórios de pequena escala (0,10 - 10 km<sup>2</sup>) são apresentados na Figura 10, enquanto o desempenho dos modelos é apresentado na Tabela 5. O reservatório de Benguê de pequena escala não foi avaliado nesta análise devido ao número limitado de amostras (6 amostras de sedimentos).

Figura 10 – Resultados de calibração (cal) e validação (val) de modelos para reservatórios individuais em pequena escala (reservatórios de 0,1 a 10 km<sup>2</sup>): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila



Fonte: Elaborada pelo autor.

No processo de calibração, os modelos de regressão apresentaram desempenho muito bom para N, C, matéria orgânica e argila, enquanto para K o modelo foi satisfatório e para P foi insatisfatório nos reservatórios de pequena escala. Para a etapa de validação na mesma escala espacial, os modelos apresentaram pior desempenho, com resultados de satisfatório a bom apenas para argila, enquanto os demais atributos caíram na faixa de insatisfatório a satisfatório.

O desempenho do modelo para argila foi muito bom (NSE de 0,76 a 0,90) e satisfatório a bom (NSE de 0,55 a 0,73) para calibração e validação, respectivamente, seguido pelos modelos para matéria orgânica e C, que apresentaram resultados semelhantes: desempenho muito bom (NSE de 0,74 a 0,85 e de 0,78 a 0,85, respectivamente) para calibração e em torno do limite de insatisfatório a satisfatório (NSE de 0,40 a 0,61 e de 0,43 a 0,55, respectivamente) para validação.

Os modelos de N (NSE de 0,79 a 0,82) e K (NSE de 0,51 a 0,67) variaram de satisfatório a muito bom no estágio de calibração, mas o desempenho caiu para insatisfatório na maioria dos reservatórios durante a validação. É importante notar que em alguns casos específicos (N para o reservatório de Marengo e K para o reservatório de São Nicolau) o NSE é inferior a 0, o que significa que esses modelos apresentam desempenho pior do que simplesmente adotar o valor médio do respectivo atributo nessas situações. P foi o atributo do sedimento com pior desempenho dos modelos, com NSE variando de 0,18 a 0,52 na etapa de calibração e de -0,14 a 0,40 na validação.

Tabela 5. Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia em pequena escala (reservatórios de 0,10 a 10 km<sup>2</sup>)

Reservatório	Atributo	Calibração					Validação			
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE	NF <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE
São Nicolau	N	0.81	0.78	0.28	0.80	6	0.51	0.45	0.69	0.45
	P	0.26	0.17	33.82	0.18	8	0.04	-0.08	90.95	-0.14
	K	0.61	0.56	0.34	0.59	2	0.40	0.31	0.44	-1.29
	C	0.80	0.78	2.95	0.78	4	0.54	0.49	6.20	0.43
	OM	0.75	0.72	5.53	0.74	3	0.55	0.49	10.45	0.40
	Clay	0.79	0.76	70.91	0.76	3	0.54	0.48	56.63	0.63
São Joaquim	N	0.80	0.77	0.28	0.79	7	0.65	0.60	0.42	0.57
	P	0.57	0.51	6.26	0.52	6	0.45	0.38	12.41	0.32
	K	0.58	0.52	0.49	0.51	7	0.38	0.30	0.88	0.38
	C	0.82	0.80	2.33	0.81	7	0.65	0.60	3.99	0.55
	Om	0.87	0.86	3.58	0.85	7	0.64	0.60	6.94	0.54
	Clay	0.91	0.90	42.14	0.90	7	0.75	0.72	101.45	0.73
Marengo	N	0.83	0.81	0.32	0.82	3	0.66	0.62	0.70	-1.38
	P	0.54	0.48	3.24	0.49	4	0.54	0.44	2.85	0.40
	K	0.76	0.73	0.88	0.67	7	0.79	0.76	0.57	0.63
	C	0.86	0.84	2.63	0.85	5	0.79	0.76	2.69	0.49
	OM	0.84	0.82	4.77	0.83	3	0.79	0.75	4.18	0.61
	Clay	0.81	0.78	117.63	0.80	2	0.92	0.90	107.56	0.55

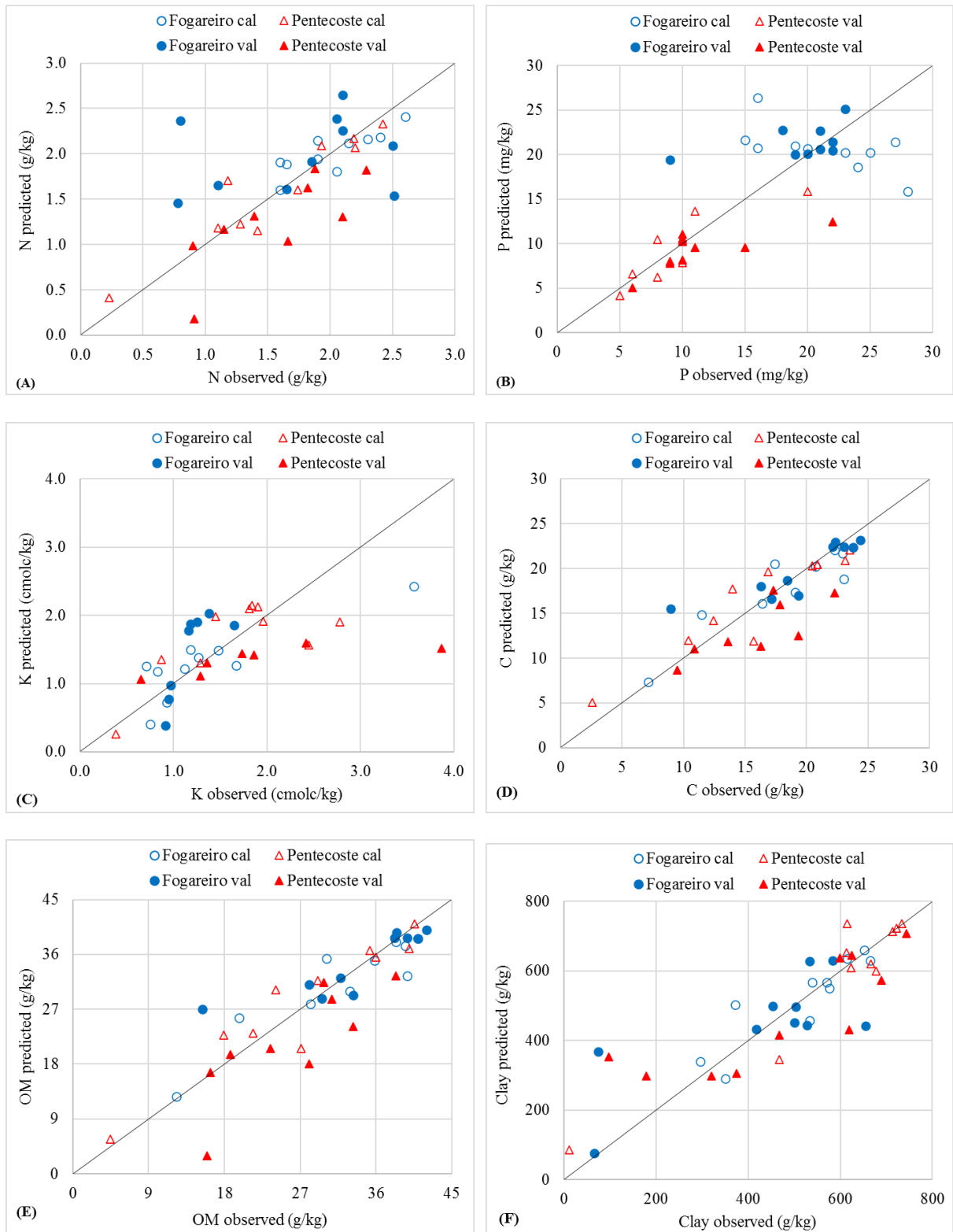
<sup>1</sup> NF – número de fatores nos modelos PLSR.

*Média escala (reservatórios de 10 a 100 km<sup>2</sup>)*

O desempenho dos modelos na estimativa de atributos de sedimentos na média escala nas etapas de calibração e validação é apresentado na Figura 11 e na Tabela 6.



Figura 11 – Resultados de calibração (cal) e validação (val) de modelos para reservatórios individuais na média escala (reservatórios de 0,1 a 10 km<sup>2</sup>): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma que as escalas espaciais menores, os modelos de estimativa de atributos de sedimentos na média escala apresentaram melhores desempenhos para matéria

orgânica, argila e C, com NSE variando de 0,84 a 0,89, de 0,79 a 0,89 e de 0,83 a 0,85, respectivamente, no estágio de calibração. Para validação, o NSE variou de 0,66 a 0,71, 0,58 a 0,68 e 0,52 a 0,72 para os mesmos atributos. Portanto, os modelos de regressão tiveram um desempenho muito bom para esses atributos durante a calibração, e de satisfatório a bom durante a validação.

Para N, os modelos tiveram desempenho de bom a muito bom (NSE de 0,66 a 0,88), enquanto os modelos de K tiveram desempenho satisfatório (NSE de 0,49 a 0,66) na etapa de calibração. Para ambos os atributos, os modelos apresentaram desempenho insatisfatório na etapa de validação, com NSE variando de -3,74 a 0,52. O modelo para P teve um desempenho mais instável, variando de insatisfatório a bom durante a calibração (NSE de -1,04 a 0,73), mas insatisfatório para ambos os reservatórios na fase de validação (NSE de 0,22 a 0,32). Observe que a concentração de P era muito diferente nos dois reservatórios de média escala, o que pode ter contribuído para a ampla gama de desempenhos do modelo para este atributo.

Tabela 6. Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia na meso-escala (reservatórios de 10 a 100 km<sup>2</sup>)

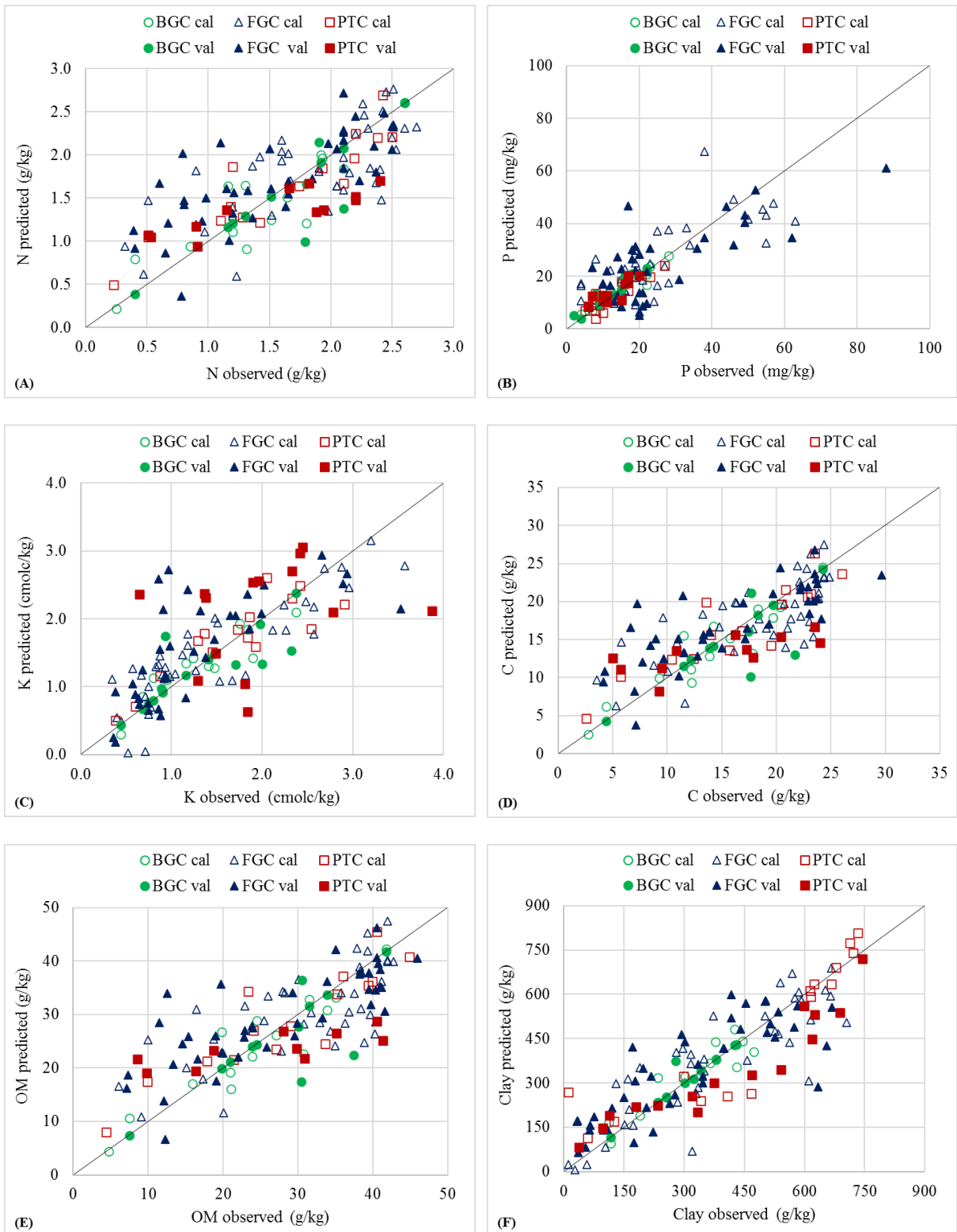
Reservatório	Atributo	Calibração					Validação			
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE	NF <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE
Fogareiro	N	0.69	0.65	0.19	0.66	6	0.59	0.52	0.37	0.39
	P	0.42	0.35	6.45	-1.04	1	0.11	-0.04	1.85	0.32
	K	0.71	0.67	0.47	0.66	4	0.63	0.56	0.51	-3.74
	C	0.84	0.83	2.12	0.83	6	0.78	0.75	2.36	0.72
	OM	0.85	0.83	3.64	0.84	6	0.77	0.74	4.15	0.71
	Clay	0.80	0.77	56.29	0.79	3	0.58	0.53	123.95	0.58
Pentecoste	N	0.89	0.87	0.22	0.88	4	0.60	0.54	0.45	0.12
	P	0.74	0.70	2.02	0.73	6	0.58	0.51	4.03	0.22
	K	0.50	0.44	0.48	0.49	3	0.60	0.52	0.41	0.53
	C	0.87	0.85	2.35	0.85	5	0.62	0.56	3.58	0.52
	OM	0.89	0.88	3.56	0.89	5	0.66	0.61	3.88	0.66
	Clay	0.89	0.88	66.77	0.89	4	0.70	0.66	118.18	0.68

<sup>1</sup> NF – número de fatores nos modelos PLSR.

*Grande escala (região hidrográfica 100 a 10.000 km<sup>2</sup>)*

A Figura 12 ilustra os resultados da caracterização do sedimento por espectroscopia na grande escala, que compreende as amostras de sedimento de todos os reservatórios de cada uma das bacias de Benguê, Fogareiro e Pentecoste. O desempenho dos modelos é mostrado na Tabela 7.

Figura 12 – Resultados de calibração (cal) e validação (val) de modelos para bacias individuais em grande escala (bacias de 100 a 10.000 km<sup>2</sup>: Benguê - BGC, Fogareiro - FGC e Pentecoste - PTC): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na etapa de calibração na grande escala, os modelos para argila tiveram um desempenho muito bom, com NSE de 0,74 a 0,85, enquanto os modelos para P (NSE de 0,56 a

0,89), matéria orgânica (NSE de 0,53 a 0,86), C (NSE de 0,53 a 0,86) de 0,52 a 0,86) e N (NSE de 0,50 a 0,82) tiveram desempenho na faixa de satisfatório a muito bom. Para validação, o modelo para argila variou de bom a muito bom, o modelo para P foi satisfatório e os demais variaram de insatisfatório a satisfatório.

K foi o atributo do sedimento para o qual o pior desempenho foi alcançado: insatisfatório (NSE de 0,12 a 0,44) durante a calibração e insatisfatório a satisfatório (NSE de -0,49 a 0,63) para validação.

Tabela 7. Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos por espectroscopia para a grande escala (captações de 100 a 10.000 km<sup>2</sup>)

Bacia hidrográfica	Atributo	Calibração					Validação			
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE	NF <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE
BGC	N	0.79	0.77	0.29	0.82	11	0.74	0.71	0.32	0.66
	P	0.89	0.88	2.30	0.89	10	0.88	0.87	2.61	0.61
	K	0.84	0.83	0.21	0.84	10	0.65	0.62	0.37	0.63
	C	0.87	0.86	2.14	0.86	11	0.63	0.59	3.49	0.52
	OM	0.87	0.86	3.68	0.89	11	0.63	0.59	6.02	0.74
	Clay	0.85	0.84	45.08	0.85	9	0.90	0.89	30.47	0.89
FGC	N	0.51	0.50	0.45	0.50	4	0.58	0.57	0.46	0.51
	P	0.57	0.56	10.69	0.56	7	0.52	0.51	12.13	0.51
	K	0.75	0.75	0.44	0.75	19	0.50	0.49	0.65	0.28
	C	0.53	0.51	4.12	0.52	4	0.61	0.60	4.30	0.59
	OM	0.53	0.51	7.09	0.52	11	0.61	0.60	7.49	0.58
	Clay	0.74	0.74	102.62	0.74	5	0.67	0.66	115.68	0.64
PTC	N	0.82	0.81	0.30	0.81	11	0.70	0.67	0.49	0.44
	P	0.78	0.77	2.87	0.78	3	0.75	0.73	2.74	0.67
	K	0.74	0.72	0.37	0.74	10	0.05	-0.03	0.93	-0.49
	C	0.81	0.79	2.92	0.80	11	0.53	0.48	5.22	0.35
	OM	0.81	0.79	5.02	0.80	11	0.62	0.57	9.42	0.31
	Clay	0.83	0.81	102.88	0.82	4	0.88	0.87	103.46	0.79

<sup>1</sup> NF – número de fatores nos modelos PLSR.

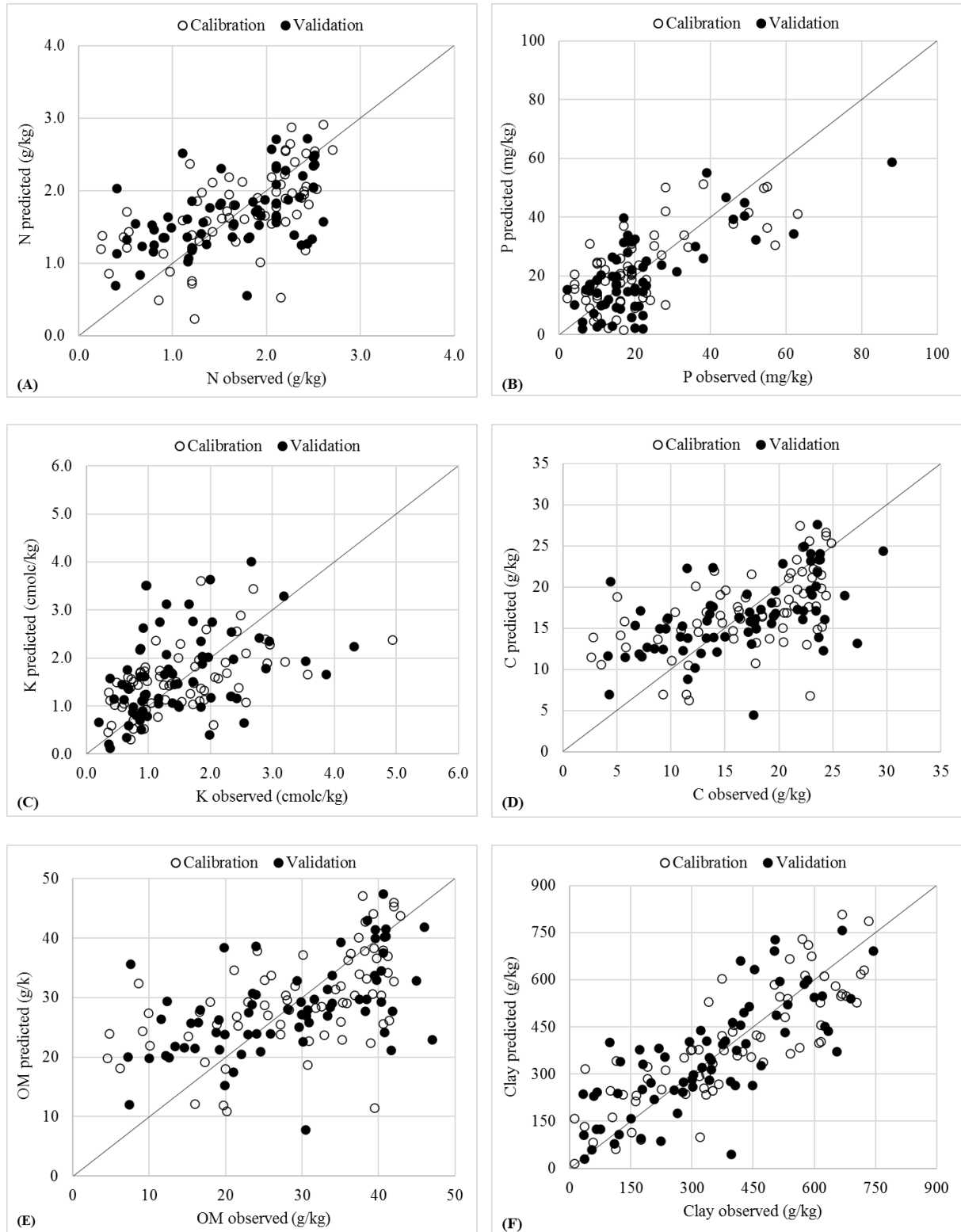
#### Macro escala ( > 10.000 km<sup>2</sup>)

Na macro escala que compreende todas as amostras de sedimentos das bacias do Jaguaribe e Curu (área total de 82.500 km<sup>2</sup>), observou-se alta dispersão dos atributos de sedimentos observados versus previstos (Figura 13).

Nessa escala espacial, o desempenho do modelo para argila foi bom e satisfatório nas etapas de calibração e validação, respectivamente. Os modelos para todos os demais

atributos apresentaram desempenho insatisfatório, tanto nas etapas de calibração quanto na validação (Tabela 8).

Figura 13 – Resultados de calibração e validação de modelos para macro escala (> 10.000 km<sup>2</sup>): (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Carbono, (E) Matéria orgânica, (F) Argila



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8. Desempenho dos modelos de caracterização de sedimentos da espectroscopia em escala macro ( $> 10.000 \text{ km}^2$ )

Bacia hidrográfica	Atributo	Calibração					Validação			
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE	NF <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	RMSE	NSE
Bacias hidrográficas do Jaguaribe e Curu	N	0.34	0.33	0.56	0.01	8	0.27	0.26	0.56	0.22
	P	0.48	0.47	10.97	0.40	11	0.51	0.50	11.18	0.41
	K	0.31	0.30	0.77	0.25	12	0.14	0.13	0.99	-0.28
	C	0.30	0.29	5.39	0.25	7	0.29	0.28	5.46	0.27
	OM	0.30	0.29	9.29	0.24	7	0.29	0.28	9.34	0.26
	Clay	0.71	0.70	112.77	0.70	7	0.59	0.58	124.86	0.55

<sup>1</sup> NF – número de fatores nos modelos PLSR.

Em resumo, os modelos para argila, matéria orgânica e C tiveram desempenho bom a muito bom ( $NSE > 0,65$ ) em escalas espaciais de micro (reservatórios  $< 0,1 \text{ km}^2$ ) a grande (bacias de 100 a  $10.000 \text{ km}^2$ ) na fase de calibração. Na fase de validação, o desempenho dos modelos degradou-se ligeiramente, mas ainda era satisfatório. Os modelos para N e K nas mesmas escalas tiveram desempenho satisfatório a muito bom para calibração, mas foram insatisfatórios no procedimento de validação. O modelo P foi o mais instável, variando de bom a muito bom nas escalas micro e grande, mas com desempenho insatisfatório na escala pequena durante a calibração. Para validação, o modelo foi insatisfatório nas escalas pequena e meso, mas satisfatório na escala grande. Na escala macro, os modelos para todos os atributos do sedimento apresentaram desempenho insatisfatório nas etapas de calibração e validação, exceto para argila, que foi bom e satisfatório, respectivamente.

Para reservatórios da microescala até regiões hidrográficas menores que  $10.000 \text{ km}^2$ , o desempenho dos modelos para estimar atributos de sedimentos por espectroscopia variam mais entre áreas individuais do que entre escalas espaciais. O desempenho geral nessas escalas espaciais se beneficia das áreas relativamente pequenas, que tendem a apresentar fatores mais homogêneos controlando as características dos sedimentos e as condições de transporte: tipo de solo, uso do solo e regime hidrológico. Descobertas semelhantes foram relatadas por outros autores investigando atributos do solo com dados espectrais. Por exemplo, Morellos et al. (2016) encontraram boas estimativas de N e C ( $R^2 > 0,70$ ) para áreas pequenas ( $\sim 0,30 \text{ km}^2$ ), e Franceschini et al. (2015) também encontraram bom desempenho do modelo para estimar a matéria orgânica, K e argila em pequenas áreas ( $\sim 0,02 \text{ km}^2$ ) usando PLSR.

Para as escalas grande e macro (regiões hidrográficas  $> 100 \text{ km}^2$ ), superestimação de valores mais baixos e subestimação de valores mais altos são observados para C e matéria orgânica. Ward et al. (2019) relataram um efeito semelhante para as previsões de carbono

orgânico do solo e explicaram que isso é causado pela distribuição do COS e mudanças na relação entre COS e espectros para valores COS mais elevados. Em nosso estudo, das 60 amostras de dados (combinação de seis propriedades de sedimentos em dez reservatórios), 45% são altamente distorcidos ( $|distorção| \geq 1$ ), 32% são moderadamente distorcidos ( $0.5 \leq |distorção| < 1$ ) e apenas 23% são aproximadamente simétricos ( $|distorção| < 0.5$ ).

Considerando que os modelos para estimar atributos de sedimentos a partir de dados espectrais parecem confiáveis e potencialmente replicáveis em áreas de até 10.000 km<sup>2</sup> na região de estudo, a aplicação em extensões maiores em uma base regional é um desafio. Na macro escala, que abrange duas grandes bacias (Jaguaribe, com 74 mil km<sup>2</sup> e Curu, com 8.500 km<sup>2</sup>), não foi possível calibrar satisfatoriamente os modelos, o que indica uma limitação do método.

Xu et al. (2018) relataram que o desempenho dos modelos para estimar os atributos do solo ou sedimento depende muito da variabilidade do conjunto de dados. Devido às diferenças nos materiais de origem, os sedimentos podem ter características físicas e químicas diferentes, afetando a resposta espectral. Métodos para separar o conjunto de dados de acordo com similaridade físico-química e / ou espectral (Ward et al., 2019), como a análise de cluster, podem ajudar a melhorar a robustez do modelo.

A caracterização indireta de sedimentos de leitos de reservatórios apoia a prática de reutilização de sedimentos como fertilizante, reduzindo a necessidade de análises laboratoriais caras e demoradas. O bom desempenho geral dos modelos para prever o teor de argila é crucial, pois a argila é uma das principais características físicas que controlam o fluxo e a retenção de água no solo, impactando o crescimento e a produtividade da cultura, especialmente em ambientes secos. No entanto, o desempenho inferior do modelo para N, P e K na fase de validação deste estudo, especialmente em escalas espaciais maiores, sugere que a espectroscopia não deve ser o único método para estimar o teor de nutrientes em sedimentos, mas sim complementar as análises laboratoriais. As melhorias podem ser alcançadas com a revisão da abordagem, por exemplo, aplicando transformações de dados anteriores e / ou análises de agrupamento, conforme proposto por Ward et al. (2019), ou adaptando o modelo (PLSR).

### **5.3. Influência da escala espacial na estimativa de atributos de sedimentos**

A escala espacial é uma característica importante a ser considerada ao propor modelos de regressão para caracterização de sedimentos, uma vez que em escalas maiores é

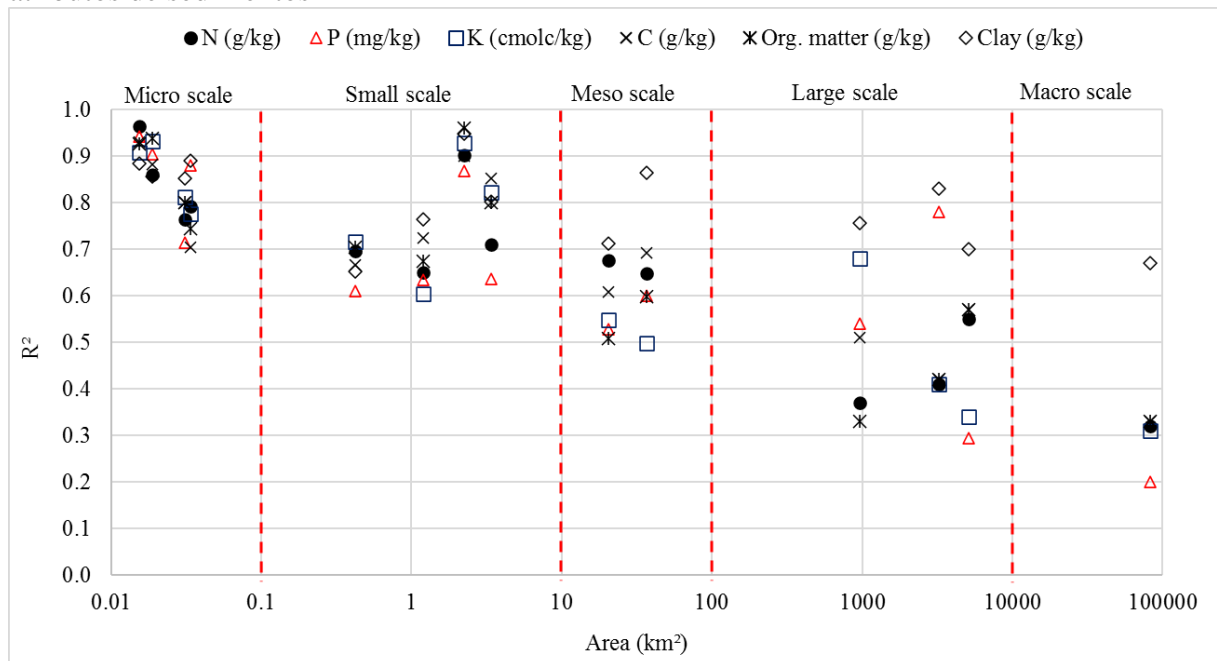


esperada maior heterogeneidade dos fatores que controlam a composição do sedimento (tipos de solo, uso do solo, condições de transporte de sedimentos). A Figura 14 apresenta os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das correlações entre os atributos do sedimento e os NDBIs, de acordo com as escalas espaciais definidas na Tabela 1.

A partir do gráfico, pode-se retratar que um aumento na escala espacial dos reservatórios e da agregação de dados de vários reservatórios piora as correlações, indicando que modelos em larga escala tendem a ser menos precisos. Isso é particularmente notável para o P (para o qual a redução do  $R^2$  é alta, de 0,9 para 0,2 nas escalas micro e macro, respectivamente) e os demais nutrientes, enquanto para o teor de argila, os modelos tendem a ser mais estáveis, com  $R^2$  caindo de 0,9 para aproximadamente 0,7 na mesma faixa de escalas espaciais.

A partir Figura 14, três faixas de  $R^2$  podem ser identificadas de acordo com a escala: para áreas abaixo de  $0,10 \text{ km}^2$ , o  $R^2$  tende a ser maior e menos variável ( $0,70 < R^2 < 0,96$ ); para áreas entre  $0,10$  e  $100 \text{ km}^2$ , observa-se diminuição do  $R^2$  e maior variabilidade ( $0,50 < R^2 < 0,96$ ); para as bacias hidrográficas de Benguê, Pentecoste e Fogareiro ( $100 - 10.000 \text{ km}^2$ ), assim como a macro escala ( $> 10.000 \text{ km}^2$ ), há uma forte tendência de degradação da precisão dos modelos de regressão, com  $R^2$  tão baixo quanto 0,20.

Figura 14 – Influência da escala espacial na precisão dos modelos de regressão para estimar atributos de sedimentos



Fonte: Elaborada pelo autor.

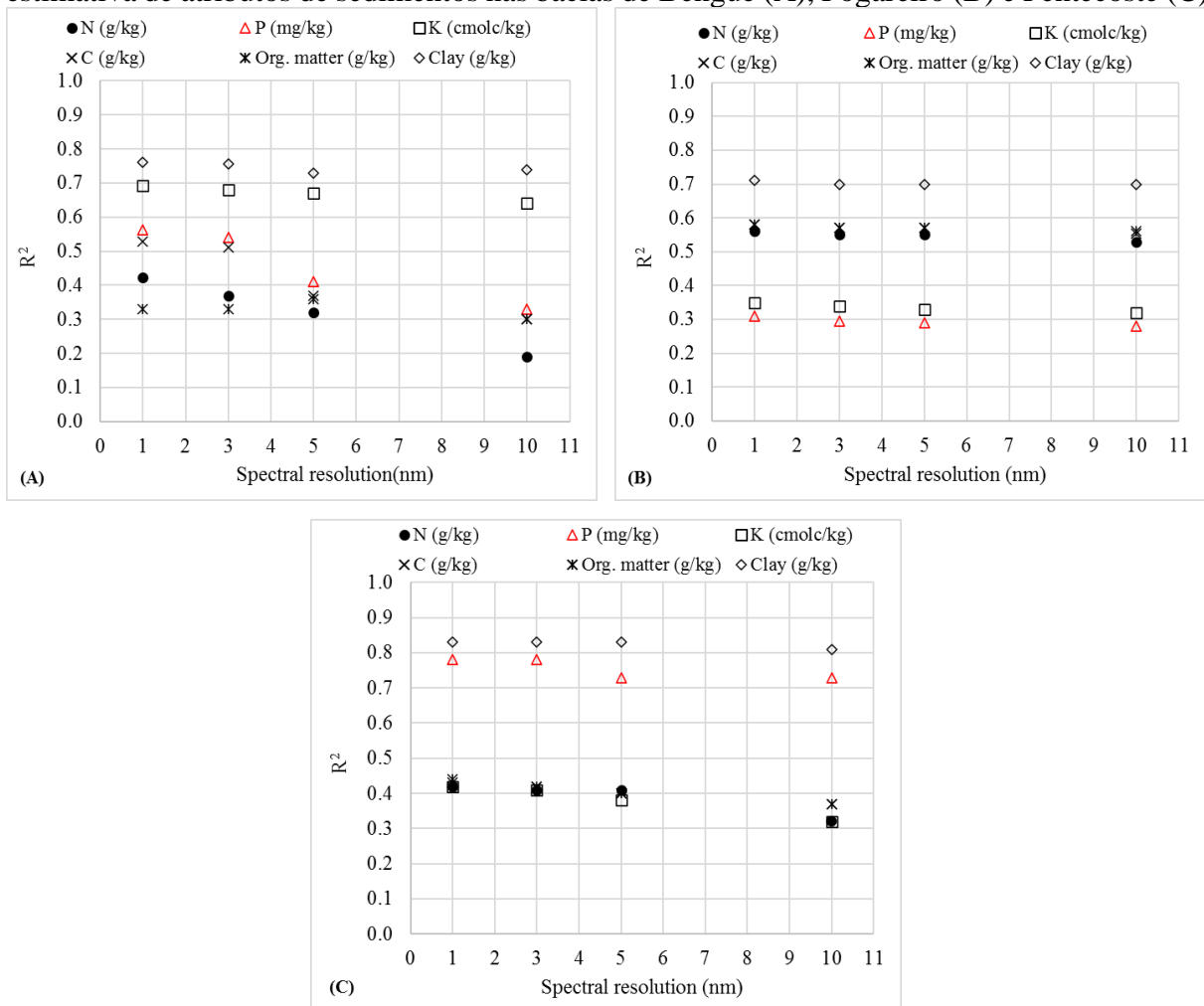
Este resultado mostra o papel da escala espacial na estimativa dos atributos do sedimento: sedimentos gerados em áreas maiores tendem a apresentar maior heterogeneidade (Silva et al., 2018), dificultando sua caracterização a partir da espectroscopia VIS-NIR-SWIR e reduzindo o desempenho dos modelos de previsão. Este achado sugere que áreas homogêneas sejam estabelecidas, para as quais os modelos possam ser transferidos de um reservatório para outro sem a (re) calibração exigindo dados laboratoriais físico-químicos. Por exemplo, Ward et al. (2019) demonstrou que o agrupamento espectral pode melhorar o desempenho do modelo de carbono orgânico do solo em comparação com um modelo de referência que foi calibrado em todo o banco de dados sem agrupamento. Além disso, o estabelecimento de bibliotecas de solo e sedimento, como a Biblioteca Espectral de Solos Brasileiros - BSSL (Demattê et al., 2019b), tem se mostrado potencialmente capaz de melhorar a capacidade de prever os atributos em várias escalas espaciais por meio da identificação de padrões de assinaturas espectrais.

#### **5.4. Influência da resolução espectral na estimativa de atributos de sedimentos**

Ao diminuir a resolução espectral para intervalos de 10 nm, foi possível avaliar sua influência na estimativa dos atributos do sedimento. A Figura 15 apresenta os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das correlações entre os atributos do sedimento e os NDBIs, por bacia.

Geralmente, muito pouco impacto é observado nas correlações entre as características físico-químicas e espectrais quando a resolução espectral é reduzida de intervalos de 1 a 3 nm. Deste ponto até intervalos de 5 nm, observa-se uma maior redução do  $R^2$ , principalmente para P e C na bacia do Benguê. Ao diminuir ainda mais a resolução espectral para intervalos de 10 nm, as correlações são mantidas no mesmo nível, com pouca influência da resolução espectral na estimativa de atributos do sedimento. Isso é particularmente importante ao analisar dados que são originalmente capturados em resoluções espectrais mais baixas, como por sensores de satélite hiperespectrais, uma vez que o aumento da resolução espectral não produz muita degradação do desempenho dos modelos.

Figura 15 – Influência da resolução espectral na precisão de modelos de regressão para estimativa de atributos de sedimentos nas bacias de Benguê (A), Fogareiro (B) e Pentecoste (C)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Resultados semelhantes foram encontrados por Knadel et al. (2013), que testou a influência de diferentes resoluções espectrais até 8 nm para estimar a argila do solo e o carbono orgânico (SOC) e descobriram que a resolução espectral mais baixa não afetou o desempenho do modelo. Adeline et al. (2017) relataram em seu estudo que, para estimar os atributos do solo, uma redução da resolução espectral causou uma ligeira diminuição no desempenho de previsão do modelo. Peng et al. (2014) realizaram reamostragem espectral entre 2 e 10 nm em dados espectrais VIS NIR para estimar o SOC e descobriram que, em geral, havia pouca variação na precisão dos modelos. Yang et al. (2012) observaram que os modelos de calibração para estimar o N e C do solo são insensíveis à redução da resolução espectral, e os modelos com resolução mais grosseira (por exemplo, 100 nm) apresentaram precisão muito semelhante àqueles com resolução de 1 nm.

A modelagem baseada em espectroscopia, como neste estudo, ajuda a construir o conhecimento necessário para o uso de imagens de satélite hiperespectrais para caracterização

de solos e sedimentos (Viscarra Rossel et al., 2006). Por exemplo, demonstramos que a previsibilidade do modelo é apenas ligeiramente afetada pelo engrossamento da resolução espectral até 10 nm, que está na faixa da distância de amostragem espectral planejada para o satélite hiperespectral EnMAP (6,5 nm no VNIR e 10 nm no SWIR) (GUANTER et al. 2015). Conforme argumentado por Braga et al. (2019), abordagens de sensoriamento remoto baseadas em satélite podem ajudar não só a identificar a disponibilidade de nutrientes nos sedimentos, mas também em áreas com déficit de nutrientes nos solos, possibilitando uma otimização do balanço de nutrientes nas bacias. No entanto, o grande tamanho do pixel das missões de satélite hiperespectrais atuais e planejadas, a limitação da camada superficial do solo, bem como a cobertura do solo e sedimentos pode ser um desafio.

### **5.5. Identificação de bandas espectrais importantes para estimar atributos do sedimento**

A partir do índice de bandas por diferença normalizadas (NDBI) foi possível identificar algumas bandas importantes para a estimativa de alguns atributos. Para Nitrogênio as bandas 1926 nm e 2385 nm foram as bandas que apresentaram melhor desempenho com  $R^2$  de 0,86. Para a estimativa de Fósforo as bandas 450 nm e 468 nm foram as bandas mais importantes com  $R^2$  de 0,90. As bandas que melhor estimaram potássio foram 1530 nm e 1866 nm com  $R^2$  de 0,92. As bandas mais importantes para estimar MO foram 1872 nm e 2151 nm com  $R^2$  de 0,93. Para estimar Carbono as bandas 1908 nm e 1950 nm foram as que melhor estimaram com  $R^2$  de 0,88. Já para argila as bandas 1488 nm e 2118 nm foram as que apresentaram melhor desempenho com  $R^2$  de 0,88.

Xu et al., (2018) analisaram bandas importantes para prever atributos do solo e encontraram que bandas próximo a 1900 nm e 2200 nm são importantes para estimativa de Nitrogênio, para matéria orgânica as bandas mais importantes estão na faixa entre 1700 nm e 2050 nm, as faixas de comprimentos de onda encontradas pelos autores supracitados então na mesma faixa encontrada neste estudo, isso propõe que essas faixas de comprimento de onda sejam usadas para estimar MO e N. Xu et al., (2018) também sugerem que comprimentos de onda entre 560 nm e 760 nm são importantes para estimar Fósforo, neste estudo as bandas importantes para estimar fósforo foram 450 nm e 468 nm, indicando que faixas no visível pode ser melhor correlacionada com Fósforo no sedimento, Lu et al. (2013) também encontraram bandas importante na faixa do visível para estimar fósforo, mais especificamente as bandas 569 nm e 600 nm.

## 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O uso da espectroscopia VIS-NIR-SWIR para estimar atributos físico-químicos de sedimentos na região semiárida do Brasil tem se mostrado uma abordagem promissora para a caracterização de sedimentos assoreados em reservatórios de água superficial.

Os modelos de regressão de mínimos quadrados parciais tiveram desempenho satisfatório a muito bom na previsão de argila, matéria orgânica e C em escalas espaciais de micro (reservatórios <0,1 km<sup>2</sup>) a grande (bacias hidrográficas de 100 a 10.000 km<sup>2</sup>). Os modelos para N e K apresentaram resultado semelhante na etapa de calibração, mas apresentaram desempenho insatisfatório no procedimento de validação, e o modelo para predição de P foi muito instável. Na escala macro, ou seja, áreas maiores que 10.000 km<sup>2</sup>, os modelos para todos os atributos do sedimento tiveram desempenho insatisfatório, exceto para a argila, que variou de satisfatório a bom. Tais achados indicam que o desempenho do modelo é afetado pela heterogeneidade dos fatores que controlam as características do sedimento e as condições de transporte (tipo de solo, uso do solo e regime hidrológico), que tendem a ser maiores em extensões maiores. Portanto, os modelos tendem a ser mais precisos quando aplicados em escalas pequenas.

O aumento da resolução espectral na faixa de 1 a 10 nm reduziu o desempenho dos modelos apenas ligeiramente, não afetando a capacidade geral de estimar os atributos do sedimento. Esta conclusão destaca a importância dos estudos baseados em campo para estimar os atributos do sedimento a partir da espectroscopia VIS-NIR-SWIR, como um passo em direção à aplicação de imagens de satélite hiperespectral para caracterizar o sedimento dos leitos dos reservatórios de superfície. A resolução espectral de satélites como o EnMAP está na faixa testada por nós neste estudo, mas alguns obstáculos ainda prevalecem, como a necessidade de exposição de sedimentos durante a passagem do satélite, o que implica reservatórios vazios sem lixo cobrindo o leito.

Em geral, a caracterização indireta de sedimentos baseada em espectroscopia apóia a prática de reutilização de sedimentos como fertilizantes, reduzindo as análises laboratoriais dispendiosas e demoradas. O bom desempenho na estimativa da argila é fundamental, pois é uma característica fundamental no controle do fluxo e retenção de água no solo. Porém, desempenhos mais baixos para N, P e K sugerem que o método proposto necessita ser aprimorado e aplicado de forma complementar às análises laboratoriais, visto que são nutrientes fundamentais para a fertilização do solo.

## REFERÊNCIAS

- ADELIN, K. R. M., GOMEZ, C., GORRETTA, N., ROGER, J. M. Predictive ability of soil properties to spectral degradation from laboratory Vis-NIR spectroscopy data. **Geoderma**. v. 288, p. 143-153, 2017.
- ALMEIDA, C. L., CARVALHO, T. R. A., DE ARAÚJO, J. C. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 279, 107705, 2019.
- BARNES, R.J., DHANOA, M.S., LISTER, S.J. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. **Applied Spectroscopy**. v. 43(5), p. 772-777, 1989.
- BRAGA, B. B., NUNES JÚNIOR, F. H., BARBOSA, R. M., BRITO, P. O. B., MARTINS, K., MEDEIROS, P. H. A., GONDIM, F. A. Biomass production and antioxidative enzyme activities of sunflower plants growing in substrates containing sediment from a tropical reservoir. **Journal of Agricultural Science**. v. 9, p. 95-106, 2017.
- BRAGA, B. B., CARVALHO, T. R. A., BROSINSKY, A., FOERSTER, S., MEDEIROS, P. H. A. From waste to resource: Cost-benefit analysis of reservoir sediment reuse for soil fertilization in a semiarid catchment. **Science of the Total Environment**. v. 670, p.158-169, 2019.
- BREVIK, E.C., CERDÀ, A., MATAIX-SOLERA, J., PEREG, L., QUINTON, J.N., SIX, J., VAN OOST, K. The interdisciplinary nature of soil. **Soil**. v. 1, p. 117-129, 2015.
- BRILS, J., DE BOER, P., MULDER, J., DE BOER, E. Reuse of dredged material as a way to tackle societal challenges. **Journal of Soils and Sediments**. v.14(9), p.1638-1641, 2014.
- CALIXTO JÚNIOR, J. T., DRUMOND, M. A. Estudo comparativo da estrutura fitossociológica de dois fragmentos de Caatinga em níveis diferentes de conservação. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v.34, p. 80, 2014
- CAPRA, G. F., GRILLI, E., MACCI, C., VACCA, S., MASCIANDARO, G., CECCANTI, B., BONDI, G., DURAS, M. G., DESSENA, M. A., MARRAS, G., GAVIANO, C., BUONDONNO, A. Lake-dredged material (LDM) in pedotechnique for the restoration of Mediterranean soils affected by erosion/entisolization processes. **Journal of Soils and Sediments**. v. 15, p. 32-46, 2015
- CEARÁ (2009) Cadernos Regionais do Pacto das Águas. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Eudoro Walter de Santana (Coord.). Fortaleza: INESP.
- COELHO, C. F., HEIM, B., FOERSTER, S., BROSINSKY, A., DE ARAÚJO, J.C. In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the Brazilian Semiarid Region. **Water**. v. 9, p. 91, 2017.

COZZOLINO, D. Near infrared spectroscopy as a tool to monitor contaminants in soil, sediments and water - State of the art, advantages and pitfalls. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**. v. 9, p. 1-7. 2016.

DE ARAÚJO, J. C., GUENTNER, A., BRONSTERT, A. (2006) Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**. v. 51(1), p. 157-170, 2016.

DE ARAÚJO, J.C., MEDEIROS, P. H. A. Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments. **Australian Journal of Water Resources**. v. 17, p. 87-100, 2013.

DE FIGUEIREDO, J.V., DE ARAÚJO, J.C., MEDEIROS, P.H.A., COSTA, A.C. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**. v. 30, p. 2390-2400, 2016.

DECOCK, C., LEE, J., NECPALOVA, M., PEREIRA, E.I.P., TENDALL, D.M., SIX, J. Mitigating N<sub>2</sub>O emissions from soil: from patching leaks to transformative action. **Soil**, v. 1, p. 687-694, 2015.

DEMATTE, J. A. M., DOTTO, A. C., BEDIN, L. G., SAYÃO, V. M., SOUZA, A. B. E. Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. **Geoderma**. v. 337, p. 111-121, 2019.

DEMATTE, J.A.M., DOTTO, A.C., PAIVA, A.F.S., SATO, M.V., DALMOLIN, R.S.D., DE ARAÚJO, M.S.B., DA SILVA, E.B., NANNI, M.R., TEN CATEN, A., NORONHA, N.C., LACERDA, M.P.C., ARAÚJO FILHO, J.C., RIZZO, R., BELLINASSO, H., FRANCELINO, M.R., SCHAEFER, C.E.G.R., VICENTE, L.E., DOS SANTOS, U.J., DE SÁ BARRETTO SAMPAIO, E.V., MENEZES, R.S.C., DE SOUZA, J.J.L.L., ABRAHÃO, W.A.P., COELHO, R.M., GREGO, C.R., LANI, J.L., FERNANDES, A.R., GONÇALVES, D.A.M., SILVA, S.H.G., DE MENEZES, M.D., CURI, N., COUTO, E.G., DOS ANJOS, L.H.C., CEDDIA, M.B., PINHEIRO, E.F.M., GRUNWALD, S., VASQUES, G.M., MARQUES JÚNIOR, J., DA SILVA, A.J., DE VASCONCELOS BARRETO, M.C., NÓBREGA, G.N., DA SILVA, M.Z., DE SOUZA, S.F., VALLADARES, G.S., VIANA, J.H.M., DA SILVA TERRA, F., HORÁK-TERRA, I., FIORIO, P.R., DA SILVA, R.C., FRADE JÚNIOR, E.F., LIMA, R.H.C., FILIPPINI ALBA, J.M., DE SOUZA JUNIOR, V.S., MENDONÇA SANTOS BREFIN, M.L., RUIVO, M.L.P., FERREIRA, T.O., BRAIT, M.A., CAETANO, N.R., BRINGHENTI, I., SOUSA MENDES, W., SAFANELLI, J.L., GUIMARÃES, C.C.B., POPPIEL, R.R., BARROS E SOUZA, A., QUESADA, C.A., ZARATE DO COUTO, H.T. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma**. v. 354, p. 113793, 2019.

EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2011.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa dos Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2017.

FONSECA, R., BARRIGA, F. J. A. S., FYFE, W. S. (1998) Reversing desertification by using dam reservoir sediments as agriculture soils. **Episodes**. v. 21, p. 218-224, 1998.

FRANCESCHINI, M. H. D., DEMATTÊ, J. A. M., DA SILVA TERRA, F., VICENTE, L. E., BARTHOLOMEUS, H., DE SOUZA FILHO, C. R. Prediction of soil properties using imaging spectroscopy: Considering fractional vegetation cover to improve accuracy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 38, p. 358-370, 2016.

GOMEZ, C., VISCARRA ROSSEL, R.A., MCBRATNEY, A.B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. **Geoderma**. v. 146(3-4), p. 403-411, 2008.

GUANTER, L., KAUFMANN, H., SEGL, K., FOERSTER, S., ROGAß, C., CHABRILLAT, S., KÜSTER, T., HOLLSTEIN, A., ROSSNER, G., CHLEBEK, C., STRAIF, C., FISCHER, S., SCHRADER, S., STORCH, T., HEIDEN, U., MUELLER, A., BACHMANN, M., MÜHLE, H., MÜLLER, R., HABERMEYER, M., OHNDORF, A., HILL, J., BUDDENBAUM, H., HOSTERT, P., VAN DER LINDEN, S., LEITÃO, P. J., RABE, A., DOERFFER, R., KRASEMANN, H., XI, H., MAUSER, W., HANK, T., LOCHERER, M., RAST, M., STAENZ, K., SANG, B.: The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. **Remote Sensing**. v. 7, p. 8830-8857, 2015.

HU, X. Y. Application of visible/near-infrared spectra in modeling of soil total phosphorus. **Pedosphere**, v. 23(4), p. 417-421, (2013)

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010**. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília - DF, Brasil 2018.

JUNAKOV, N.; BALINTOV, M. Assessment of nutrient concentration in reservoir bottom sediments. **Procedia Engineering**. v. 42, p. 165-170, 2012.

KNADEL, M., STENBERG, B., DENG, F., THOMSEN, A., GREVE, M. Comparing predictive abilities of three visible-near infrared spectrophotometers for soil organic carbon and clay determination. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. v. 21, p. 67-80, 2013.

KUANG, B., MOUAZEN, A.M., Calibration of visible and near infrared spectroscopy for soil analysis at the field scale on three European farms. **European Journal of Soil Science**. v. 62, p. 629-636, 2011.

LIRA, C.C.S, MEDEIROS, P.H.A., LIMA NETO, I.E. Modelling the impact of sediment management on the trophic state of a tropical reservoir with high water storage variations. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. v.92(1), p.20181169, 2020.

LU, P., WANG, L., NIU, Z., LI, L., ZHANG, W. Prediction of soil properties using laboratory VIS-NIR spectroscopy and Hyperion imagery. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 132, p. 26-33, 2013.

LUDWIG, B., VORMSTEIN, S., NIEBUHR J., HEINZE S.M., BERND, VOHLAND, M. Estimation accuracies of near infrared spectroscopy for general soil properties and enzyme activities for two forest sites along three transects. **Geoderma**, v. 288, p. 37-46, 2017.



- MATTEI, P., PASTORELLI, R., RAMI, G., MOCALI, S., GIAGNONI, L., GONNELLI, C., RENELLA, G. Evaluation of dredged sediment co-composted with green waste as plant growing media assessed by eco-toxicological tests, plant growth and microbial community structure. **Journal of Hazardous Materials**, v. 333, p. 144-153, 2017.
- MAMEDE G. L., GUENTNER A., MEDEIROS P. H. A., DE ARAÚJO J. C., BRONSTERT A. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 23(12), p. 05018020-1, 2018.
- MEDEIROS, P.H.A., DE ARAÚJO, J.C., MAMEDE, G.L., CREUTZFELDT, B., GUENTNER, A., BRONSTERT, A. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, 1938-1948. 2014.
- MEDEIROS, P. H. A., SIVAPALAN M. From hard-path to soft-path solutions: slow-fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment, **Hydrological Sciences Journal**. v. 65:11, p. 1803-1814, 2020.
- MOREIRA, L. C. J. **Uso do sensoriamento remoto para avaliar o processo de salinização no perímetro irrigado de Morada Nova - CE**. 2014. Tese (doutorado em engenharia agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- MOREIRA, L.C.J., TEIXEIRA, A.S., GALVÃO, L.S. Potential of multispectral and hyperspectral data to detect saline-exposed soils in Brazil. **GIScience and Remote Sensing**. v. 52, p. 1-21, 2015
- MORELLOS, A., PANTAZI, X.E., MOSHOU, D., ALEXANDRIDIS, T., WHETTON, R., TZIOTZIOS, G., WIEBENSOHN, J., BILL, R., MOUAZEN, A.M. (2016) Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. **Biosystems Engineering**. v. 152, p. 104-116, 2016.
- MORGAN, C.L.S., WAISER, T.H., BROWN, D.J., HALLMARK, C.T. Simulated in situ characterization of soil organic and inorganic carbon with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**. v. 151, p. 249-256, 2009.
- MOURA, D.S., LIMA NETO, I.E., CLEMENTE, A., OLIVEIRA, S., PESTANA, C.J., MELO, M.A., CAPELO NETO. J. Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. **Chemosphere**. v. 246, p. 125686, 2020.
- NAWAR, S., MOUAZEN, A.M. Predictive performance of mobile vis-near infrared spectroscopy for key soil properties at different geographical scales by using spiking and data mining techniques. **Catena**, v.151, p.118-129, 2017.
- OLLOBARREN, P., CAPRA, A., GELSOMINO, A., SPADA, C.L. Effects of ephemeral gully erosion on soil degradation in a cultivated area in Sicily (Italy). **Catena**. v. 145, p.334-345, 2016.
- PENG, X., SHI, T., SONG, A., CHEN, Y., GAO, W. (2014) Estimating soil organic carbon using VIS/NIR spectroscopy with SVMR and SPA methods. **Remote Sensing**. v. 6(4), p. 2699-2717, 2014.

SANTOS, J. C. N., ANDRADE, E. M., MEDEIROS, P. H. A., GUERREIRO, M. J. S., PALÁCIO, H.A.Q., ARAÚJO NETO, J.R. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. **Revista Ciência Agronômica**. v. 48(2), p. 251-260, 2017.

SAVITZKY, A., GOLAY, M. J. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, 36, 1627-1639, 1964.

SIGUA G.C., HOLTKAMP M.L., COLEMAN S.W. Assessing the efficacy of lake-dredged materials from Lake Panasoffkee, Florida: Implication to environment and agriculture. Part 1 – Soil and Environmental Quality Aspect. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 11, p. 321-326, 2004.

SIGUA, G. C. Recycling biosolids and lake-dredged materials to pasture-based animal agriculture: alternative nutrient sources for forage productivity and sustainability. A review. **Agronomy for Sustainable Development**. v. 11(6), p. 143-160, 2009.

SILVA, E. M. R., MEDEIROS, P. DE ARAÚJO, J. C. Applicability of fingerprinting for identification of sediment sources in a mesoscale semiarid catchment. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 38(4), p. 553-562, 2018.

SILVEIRA, P. R.; MAMEDE, G. L. (submetido). Avaliação da aplicação de modelos de desprendimento em bacia experimental do semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**.

TESFAYE, M. A., BRAVO-OVIEDO, A., BRAVO, F., KIDANE, B., BEKELE, K., SERTSE, D., Selection of tree species and soil management for simultaneous fuelwood production and soil rehabilitation in the Ethiopian central highlands. **Land Degradation and Development**. v. 26, p. 665-679, 2015.

VÅGEN, T. G., SHEPHERD, K. D., WALSH, M. G. Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**. v. 133, p. 281-294, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J., SKJEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**. v. 131(1-2), p. 59-75, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R.A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 90(1), p. 72-83, 2008.

WANG, Y.B., HUANG, T.Y., LIU, J., LIN, Z.D., LI, S.H., WANG, R.J., GE, Y.J. Soil pH value, organic matter and macronutrients contents prediction using optical diffuse reflectance spectroscopy. **Computers and Electronics in Agriculture**, 111, 69-77, 2015.

WARD, K.J., CHABRILLAT, S., NEUMANN, C. FOERSTER S. A remote sensing adapted approach for soil organic carbon prediction based on the spectrally clustered LUCAS soil database. **Geoderma**, v. 353, p. 297-307, 2019.

WOHL, E., BARROS, A., BRUNSELL, N., CHAPPELL, N.A., COE, M., GIAMBELLUCA, T., GOLDSMITH, S., HARMON, R., HENDRICKX, J.M.H., JUVIK, J., MCDONNELL, J., OGDEN, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. **Nature Climate Change**. v. 2, p. 655-662, 2012.

WOLD, S., SJÖSTRÖM, M., ERIKSSON, L. (2001). PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. v. 58(2), p. 109-130 2001.

XU, S., ZHAO, Y., WANG, M., SHI, X. Comparison of multivariate methods for estimating selected soil properties from intact soil cores of paddy fields by Vis–NIR spectroscopy. **Geoderma**. v. 310, p. 29-43, 2018.

YANG, H., KUANG, B., MOUAZEN, A. M. Quantitative analysis of soil nitrogen and carbon at a farm scale using visible and near infrared spectroscopy coupled with wavelength reduction. **European Journal of Soil Science**, 63, 410-420. 2012.

ZHANG, S., FOERSTER, S., MEDEIROS, P., DE ARAÚJO, J. C., MOTAGH, M., WASKE, B. Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data. **Science of the Total Environment**. v. 571, p. 575-593, 2016.

ZHANG, S., WASKE, B., DE ARAÚJO, J. C., MEDEIROS, P.H.A., FOERSTER, S. (2018) Effective water surface mapping in macrophyte-covered reservoirs in NE Brazil based on TerraSAR-X time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 69, 41-55, 2018.