

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Geociências**  
**Departamento de Geografia**

Wallace Magalhães Trindade

**LAGOAS MARGINAIS DO ALTO-MÉDIO CURSO DO RIO SÃO  
FRANCISCO: DINÂMICA HIDROGEOMORFOLÓGICA, GEOCRONOLOGIA  
E IMPACTOS AMBIENTAIS**

Belo Horizonte  
2016

Wallace Magalhães Trindade

**LAGOAS MARGINAIS DO ALTO-MÉDIO CURSO DO RIO SÃO  
FRANCISCO: DINÂMICA HIDROGEOMORFOLÓGICA, GEOCRONOLOGIA  
E IMPACTOS AMBIENTAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental

Linha de pesquisa: Geomorfologia e análise ambiental

Orientador: Prof. Dr. Antônio Pereira Magalhães Junior

Co-orientador: Adolf Heinrich Horn

Belo Horizonte  
2016

T833I Trindade, Wallace Magalhães.  
2016 Lagoas marginais do alto-médio curso do Rio São Francisco [manuscrito] : dinâmica hidrogeomorfológica, geocronologia e impactos ambientais / Wallace Magalhães Trindade. – 2016.  
144 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Antônio Pereira Magalhães Junior.  
Coorientador: Adolf Heinrich Horn.  
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2016.  
Área de concentração: Análise Ambiental.  
Bibliografia: f. 129-139.  
Inclui anexos.

1. Geomorfologia – Minas Gerais – Teses. 2. Bacias hidrográficas – Teses. 3. Sedimentos fluviais – Teses. 4. São Francisco, Rio, Vale – Teses. 5. Impacto ambiental – Teses. I. Magalhães Júnior, Antônio Pereira. II. Horn, Adolf Heinrich. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. IV. Título.

CDU: 551.4 (815.1)

Tese intitulada *Lagoas Marginais do Alto-Médio Curso do Rio São Francisco: Dinâmica Hidrogeomorfológica, Geocronologia e Impactos Ambientais*, de autoria do doutorando Wallace Magalhães Trindade, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da UFMG como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

**Área de Concentração:** Análise Ambiental

Aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Antônio Pereira Magalhães Júnior – IGC/UFMG  
Orientador

---

Prof. Dr. Adolf Heinrich Horn – IGC/UFMG  
Co-orientador

---

Profa. Dra. Vilma Lúcia Macagnan Carvalho – IGC/UFMG

---

Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira – IGC/UFMG

---

Prof. Dr. Hernando Baggio Filho – UFVJM

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Arimura Figueiredo – UNIMONTES

Belo Horizonte, 18 de agosto de 2016.

“A lama depositada  
incansavelmente no fundo dos  
lagos conta à ciência uma  
historia épica...”  
*Andrew S. Cohen, 2003, p. 03.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Antônio Pereira Magalhães Júnior e Adolf Heinrich Horn, pelas orientações, ensinamentos e paciência na condução dos trabalhos.

Às técnicas de Raios-X Juliana Oliveira (Departamento de Química) e Kácia Maria Monteiro (CPMTC-IGC), pelo trabalho realizado na análise e interpretação dos difratogramas.

Ao geógrafo Marcelo Alves Ferreira, pelo apoio logístico nos trabalhos de campo.

Ao técnico William Figueiredo, do Laboratório ICP-OES (CPMTC-IGC), pelas análises químicas.

À doutora Isabela Claret, pela ajuda na interpretação dos dados geoquímicos e cronológicos.

Ao Deutscher Akademischer Austauschdienst – DAAD, pela bolsa de pesquisa de curta duração na Universität Clausthal/Institut für Geologie und Paläontologie.

Ao Dr. Carl-Diedrich Sattler, da Universidade de Clausthal, pela competência, amizade e dedicação durante o estágio de curta duração.

Ao professor Dr. Hans-Jürgen Gursky, pela tutoria e orientações no estágio de curta duração na Universidade de Clausthal.

Ao companheiro Rodrigo Lemos, pela grande ajuda no processamento digital das imagens LANDSAT.

À Elizêne Ribeiro, pelo companheirismo nas campanhas de campo e pelas muitas contribuições no desenvolvimento do trabalho.

A todos os grandes amigos que firmemente me apoiaram com sua amizade e esmero, além de compreenderem os muitos momentos de ausência.

À Tatiana Bastos Guerra, companheira de todas as horas, pelo apoio incondicional.

À família Trindade, meu porto seguro, que me apoiou em todos os momentos e, acima de tudo, soube compreender a dimensão pessoal, e profissional, desta etapa.

A todos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho, meu muito obrigado!

## RESUMO

Lagoas marginais são feições fluviais geradas nos sistemas cursos d'água-planícies de inundação e que tendem a acumular sedimentos, nutrientes e elementos contaminantes. Os sedimentos depositados nestas lagoas funcionam como registros das condições ambientais atuais e pretéritas. No Vale do Rio São Francisco, as lagoas marginais são feições características com grande importância ecológica. Entretanto, os aspectos geoquímicos e geomorfológicos destes ambientes são pouco estudados. O objetivo principal deste trabalho é analisar o papel das lagoas marginais como testemunhos hidrogeomorfológicos da dinâmica fluvial e dos impactos ambientais decorrentes das pressões antrópicas no alto-médio Rio São Francisco, buscando estabelecer correlações entre as concentrações de metais pesados e a intensificação dos usos e ocupação dos solos nos últimos 100 anos. Foram selecionadas seis lagoas marginais, extraído-se delas testemunhos sedimentares com auxílio de um amostrador desenvolvido nesta pesquisa. As técnicas e os procedimentos adotados na pesquisa envolveram a análise das fases mineralógicas por Difração de Raios-X, determinação da composição química total por Fluorescência de Raios-X, análise granulométrica por difração laser e pelo método da pipeta, além da determinação do conteúdo de matéria orgânica, datação dos sedimentos por  $^{210}\text{Pb}$  e quantificação dos metais pesados Ni, Cu, Pb e Zn por espectrometria de emissão ótica ICP-OES. A composição mineralógica dos sedimentos marcada pela ocorrência de quartzos, feldspatos e micas em todas as camadas sedimentares reflete a forte influência do arcabouço geológico regional, onde os arenitos arcoseanos da Formação Três Marias (Grupo Bambuí) representam a principal fonte de sedimentos. Os elementos maiores encontrados pela Fluorescência de Raios-X são concordantes com as fases minerais e indicam predominância dos elementos Si, Al, Fe, K e Ti. Já os elementos traços totais apresentaram comportamento e concentrações bastante variáveis com tendências de enriquecimento nas camadas sedimentares de topo, sendo indicativo de contribuições antropogênicas. Os resultados da granulometria laser indicaram uma estratigrafia dominada por sedimentos argilo-siltosos no topo dos testemunhos. No entanto, camadas arenosas intercaladas por sedimentos finos, formando contatos abruptos em profundidades superiores a 180 cm sugerem uma hidrodinâmica marcada por pulsos de inundações pretéritas que promoveram rompimentos dos diques marginais. Os resultados analíticos do  $^{210}\text{Pb}$  indicaram uma taxa de sedimentação de 0,2cm/ano, que permitiu avaliar o efeito das atividades antrópicas nos últimos 100 anos. O histórico de contaminação por metais na área de estudo abrangeu um período de 50 anos, entre 1965 e 2015. Neste período, observou-se que as atividades antropogênicas, principalmente as agrícolas, vêm contribuindo para a supressão da vegetação nativa e para o aumento do conteúdo de matéria orgânica, além de introduzirem concentrações crescentes de metais pesados nas lagoas marginais. Os dados geocronológicos e as concentrações de metais pesados indicaram que, nos últimos 50 anos, à medida que o cerrado foi substituído pelas monoculturas de eucaliptos, pinus, soja, café e outros cultivos, foram incorporadas aos sedimentos 76,60 toneladas de Cu, 227,97 de Pb e 474,14 de Zn.

Palavras-chave: Lagoas marginais, testemunhos hidrogeomorfológicos, sedimentos, pressões antrópicas.

## ABSTRACT

Marginal lagoons are river systems features generated in flood-plains water courses and tend to accumulate sediments, nutrients and contaminants. Sediments deposited in these lagoons serve as records of current and past environmental conditions. In São Francisco River Valley, marginal lagoons are characteristic features with great ecological importance. However geochemical and geomorphological aspects of these environments are poorly studied. The main objective of this study was to analyze the role of marginal lagoons as hydro-geomorphologic evidence of fluvial dynamics and environmental impacts of anthropogenic pressures in the upper-middle São Francisco River, in order to establish correlations between the concentrations of heavy metals and the intensification of uses and occupation of the land in the last 100 years. Six marginal lagoons were selected where sediment cores were sampled with the aid of a sampler developed in this research. The techniques and procedures adopted involved the analysis of the mineralogical phases by X-Rays Diffraction, determination of chemical composition by X-Rays Fluorescence, particle size analysis by laser diffraction and the pipette method, in addition to determining the organic matter content, dating of sediments by  $^{210}\text{Pb}$  method and quantification of extractable heavy metals (Ni, Cu, Pb and Zn) by Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The mineralogical composition of sediments marked by quartz, feldspar and mica reflects the strong influence of regional geological framework where arkoses sandstones of the Três Marias Formation (Bambuú Group), are the main source of sediment. Major elements found in X-Ray fluorescence are consistent with the mineral phases, indicating the predominance of Si, Al, Fe, K and Ti. On the other side the trace elements showed a behavior and concentrations highly variable with tendencies of enrichment in surface layers, indicating anthropogenic contributions. The results of particle size laser analysis indicate a stratigraphy dominated by fine sediments at the top of the cores. However, the occurrence of sandy layers interleaved with fine sediments forming abrupt layers at depths greater than 180 cm are an indication of a hydrodynamic marked by pulses of past floods that promoted breaches of the levees. The results of  $^{210}\text{Pb}$  indicated a sedimentation rate of  $0.2 \text{ cm}\cdot\text{year}^{-1}$ , where it is possible to evaluate the effect of human activities over the past 100 years. The history of metal contamination in the study area covered a period of 50 years between 1965 and 2015. During this period, it was observed that anthropogenic activities, mainly agricultural practices, are contributing to the suppression of native vegetation and the input of organic matter, as well as increasing the concentrations of heavy metals in the sediments of the marginal lagoons. The geochronological data and the concentrations of heavy metals indicated that the last 50 years, as the savannah was replaced by monocultures of eucalyptus, *Pinus*, soy, coffee and other crops, an amount of 76.60 tons of Cu, 227.97 of Pb and 474.14 of Zn were incorporated into the sediments.

Key-words: Marginal Lagoons, hydro-geomorphologic sediment cores, anthropic pressure.



## ZUSAMMENFASSUNG

Altwässer sind fluviale Strukturen die sich meist in Überschwemmungsgebieten bilden und Sedimentmaterial zusammen mit Nähr- und Schadstoffen ansammeln. Dort gebildete Sedimente können als Register für aktuelle und frühere Umweltbedingungen dienen. Im Tal des São Francisco Flusses sind diese Altwässer von grosser ökologischer Bedeutung. Geochemische und geomorphologische sind diese Umgebungen wenig untersucht. Das Hauptziel dieser Arbeit ist Erforschung der hydro- geomorphologischen und dynamischen Rolle im Oberen São Francisco Flusssystem sowie der Ermittlung der anthropogenen Einflüsse auf dieses System. Dabei soll eine Relation zwischen Sedimentverteilung, seiner mineralogischer und chemischer Komposition und der menschlichen Aktivitäten und der Landnutzung der letzten 100 Jahre in Zeit und Raumverteilung erstellt werden. Für diesen Zweck wurden sechs Altwässer bestimmt, in deren sedimentären Zeugnissen diese Untersuchungen durchgeführt wurden. Es wurden die mineralogische Zusammensetzung durch DRX, die chemische Zusammensetzung durch ICP-OES, die Partikelgrößenverteilung durch Laserbeugung und Pipettierungs-Methode, der Gehalts an organischer Substanz sowie das Alter durch  $^{210}\text{Pb}$  bestimmt. Die mineralogische Zusammensetzung der Sedimente, mit ihrem hohen Anteil an Quarz, Feldspat und Glimmer, zeigt den starken Einfluss der regionalen Geologie, prinzipiell der feldpatreichen Sandsteine (Arkosen) der Três Marias Formation auf die Sedimentbildung. Folgende Ergebnisse können dargestellt werden: Die Hauptelementverteilung spiegelt die chemische Zusammensetzung und Variation der Sedimente wieder. Die Spurenelementverteilung in den Sedimentprofilen zeigt deutliche Konzentrationsschwankungen die mit Klimaänderungen, anthropogenen Einflüssen schwanken und generell zu jüngeren Schichten zunehmen. Die Korngrößenverteilung in den Profilen in Tiefen über 180cm zeigt im tieferen Bereich eine Impulsdynamik von verschiedenen Hochwasserständen welche mit Niedrigwasser abwechselten. Zur Oberfläche hinnehmen die Anteile von Feinmaterial (Ton-, Siltfraktion) zu. Dies lässt auf eine Beruhigung der Dynamik zu jüngeren Datierungen schließen, womöglich durch die einsetzende Flussregulierung end/oder Klimaänderungen.  $^{210}\text{Pb}$ -Datierungen deuten auf eine mittlere Sedimentierungsrate von  $0,2\text{cm}\cdot\text{y}^{-1}$  hin. Dies erlaubt die Festlegung der menschlichen Einflusses in den letzten hundert Jahren und eine Zuordnung der intensivsten Einbringung von Metallen und organischen Materialies in die Sedimente für die letzten 50 Jahre, zwischen 1965 und heute, auf der Größenordnung von  $\sim 77\text{t}$  Cu, Pb und Zn. Seit 1965 sind die anthropogenen Einflüsse, vor allem die Landwirtschaft (diffus) und Industrie (punktuell), für die permanente Zunahme von organischem Material und der steigenden Konzentrationen von Schwermetallen in den Sedimenten der Altwässer verantwortlich. Das lässt sich durch zeitliche Vergleiche zwischen Sedimentalter und Veränderungen der Bodennutzung und Industrialisierung belegen.

Stichworte: Altwässer, geomorphologische Entwicklung, Sedimente, anthropogene Belastungen.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Testemunho sedimentar mostrando a organização cronológica das camadas de sedimentos e as ações antrópicas ao longo do tempo .....	17
Figura 2 – Distribuição e circulação do <i>fallout</i> entre os hemisférios Norte e Sul.....	31
Figura 3 – Série de decaimento do $^{238}\text{U}$ demonstrando os isótopos-filhos e os modos de decaimento.....	32
Figura 4 – Série de decaimento do $^{226}\text{Ra}$ até o $^{210}\text{Pb}$ .....	33
Figura 5 – Ciclo hidrogeoquímico do $^{210}\text{Pb}$ .....	34
Figura 6 – Curva exponencial do $^{210}\text{Pb}$ demonstrando a relação atividade-profundidade .....	35
Figura 7 – Esquema de obtenção das taxas de sedimentação de acordo com o modelo CRS.....	37
Figura 8 – Regiões fisiográficas e localização da área de estudo no contexto da bacia hidrográfica do Rio São Francisco .....	39
Figura 9 – Localização das lagoas marginais na região de Pirapora. Em destaque, as lagoas marginais selecionadas para amostragem .....	41
Figura 10 – Linha do tempo das principais atividades antrópicas desenvolvidas na área de estudo.....	42
Figura 11 – Evolução da população rural e urbana dos municípios envolvidos na pesquisa .....	43
Figura 12 – Classificação multitemporal de Imagens LANDSAT 5 e 8 de 1985 e 2015 mostrando a redução do cerrado na área de estudo .....	44
Figura 13 – Classificação multitemporal de Imagens LANDSAT 8 de 2015 mostrando o uso e ocupação da área de estudo .....	45
Figura 14 – Uso e ocupação do solo no entorno da Lagoa Palestina .....	46
Figura 15 – Uso e ocupação do solo no entorno das lagoas Atoleiro, Atlântica e Formoso.....	47
Figura 16 – Uso e ocupação do solo no entorno da Lagoa do Guim.....	48
Figura 17 – Uso e ocupação do solo no entorno da Lagoa do Pontal.....	49
Figura 18 – Mapa geológico simplificado da área de estudo. As lagoas marginais estão inseridas no domínio dos depósitos aluvionares antigos .....	51
Figura 19 – Modelo Digital de Elevação e os remanescentes das superfícies de aplainamento. Superfície Sul-americana .....	53
Figura 20 – Níveis concrecionários que bordejam os remanescentes da Superfície Sul-americana na área de estudo .....	54
Figura 21 – Chapadão dos Gerais; remanescente da Superfície Sul-americana.....	55
Figura 22 – Morro do Trinchet, remanescente da Superfície Sul-americana I.....	56
Figura 23 – Depressão Sanfranciscana atualmente ocupada por pastagens e agricultura irrigada; ao fundo, remanescente da Superfície Sul-americana com plantio de eucalipto .....	57
Figura 24 – Fluxograma das técnicas e procedimentos adotados na pesquisa .....	58

Figura 25 – Identificação de lagoas marginais na região de Pirapora. A figura mostra a comparação entre as Bandas 5 e 3 do LANDSAT 5 .....	60
Figura 26 – Distribuição espacial das lagoas marginais no perfil longitudinal do Rio São Francisco.....	62
Figura 27 – a) Conjunto amostrador montado na lagoa do Pontal; b) hastes bipartidas com testemunho.....	63
Figura 28 – Conjunto amostrador sendo testado em um dique marginal da Lagoa do Pontal.....	64
Figura 29 – Camadas sedimentares de textura arenosa e silto-argilosa coletada na Lagoa do Pontal.....	65
Figura 30 – Visada das lagoas marginais selecionadas: a) Lagoa do Guim; b) Lagoa do Pontal.....	72
Figura 31 – Distribuição e classificação granulométrica dos sedimentos das lagoas marginais do Guim e do Pontal .....	74
Figura 32 – Contatos abruptos entre camadas de sedimentos finos e arenosos encontrados no testemunho sedimentar recuperado da Lagoa do Pontal .....	76
Figura 33 – Sequência de diques marginais na Lagoa do Pontal .....	78
Figura 34 – Composição mineralógica e granulometria dos sedimentos das lagoas do Guim e do Pontal .....	80
Figura 35 – Concentração e distribuição dos óxidos dos elementos maiores e a relação químico-estratigráfica das lagoas do Guim e do Pontal .....	83
Figura 36 – Distribuição e concentração de metais pesados (mg/kg) na Lagoa do Guim .....	89
Figura 37 – Distribuição e concentração de metais pesados (mg/kg) na Lagoa do Pontal .....	90
Figura 38 – Matriz de Coeficiente de Correlação – Frações granulométricas e metais pesados .....	91
Figura 39 – Lagoas marginais selecionadas e o contexto hidrográfico regional.....	94
Figura 40 – Perfis verticais mostrando a granulometria e textura dos sedimentos nas lagoas marginais .....	97
Figura 41 – Distribuição vertical dos valores de matéria orgânica e composição textural dos sedimentos nas lagoas marginais .....	100
Figura 42 – Relação entre matéria orgânica e frações granulométricas .....	101
Figura 43 – Concentração e distribuição vertical de Cr nas lagoas marginais.....	103
Figura 44 – Concentração e distribuição vertical de Ni nas lagoas marginais.....	104
Figura 45 – Concentração e distribuição vertical de Cu nas lagoas marginais .....	106
Figura 46 – Concentração e distribuição vertical de Pb nas lagoas marginais.....	107
Figura 47 – Concentração e distribuição vertical de Zn nas lagoas marginais.....	108
Figura 48 – Classificação multitemporal de imagens LANDSAT 5 e 8 de 1985 e 2015 mostrando a substituição do cerrado na área de estudo.....	111
Figura 49 – Método analítico utilizado para determinar a atividade de $^{210}\text{Pb}$ .....	113
Figura 50 – Relação da atividade do $^{210}\text{Pb}$ total e em excesso e taxa de sedimentação.....	114
Figura 51 – Testemunho sedimentar e atividades antrópicas desenvolvidas entre 1915 e 2015 na área de estudo.....	116

Figura 52 – Evolução temporal do conteúdo de matéria orgânica nas lagoas marginais .....	117
Figura 53 – Evolução temporal das concentrações de níquel nas lagoas marginais selecionadas .....	118
Figura 54 – Evolução temporal das concentrações de cobre nas lagoas marginais selecionadas .....	119
Figura 55 – Evolução temporal das concentrações de chumbo nas lagoas marginais selecionadas .....	120
Figura 56 – Evolução temporal das concentrações de zinco nas lagoas marginais selecionadas .....	121
Figura 57 – Evolução das concentrações de Cu, Pb e Zn nas lagoas marginais .....	123
Figura 58 – Fluxos de metais pesados Cu, Pb e Zn para lagoas marginais entre 1965 e 2015 .....	125

## LISTA DE TABELAS E QUADRO

Tabela 1 – Principais minerais de Urânio e Tório .....	27
Tabela 2 – Concentrações médias de $^{40}\text{K}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{238}\text{U}$ em rochas e solos.....	28
Tabela 3 – Série de decaimento do Urânio-238 .....	29
Tabela 4 – Radionuclídeos cosmogênicos mais utilizados em datação de superfícies ..	30
Tabela 5 – Descrição e localização das lagoas marginais selecionadas .....	61
Tabela 6 – Taxas de sedimentação em ambientes costeiros brasileiros utilizando o $^{210}\text{Pb}$ .....	70
Tabela 7 – Distribuição das frações granulométricas (%) da Lagoa do Guim .....	75
Tabela 8 – Distribuição das frações granulométricas (%) da Lagoa do Pontal.....	77
Tabela 9 – Concentração dos elementos maiores na Lagoa do Guim.....	84
Tabela 10 – Concentração dos elementos maiores na Lagoa do Pontal.....	85
Tabela 11 – Matriz de correlação dos elementos maiores e frações granulométricas da Lagoa do Guim .....	86
Tabela 12 – Matriz de correlação dos elementos maiores e frações granulométricas da Lagoa do Pontal.....	87
Tabela 13 – Atividades antrópicas e metais pesados utilizados .....	88
Tabela 14 – Valores de referência de Bowen para os metais pesados selecionados .....	89
Tabela 15 – Descrição, uso e ocupação do solo e localização das lagoas marginais selecionadas.....	95
Tabela 16 – Condições ambientais e mobilidade relativa dos elementos químicos.....	96
Tabela 17 – Valores médios de matéria orgânica e composição textural das lagoas marginais .....	98
Tabela 18 – Valores de matéria orgânica (%) encontrados nas lagoas marginais.....	99
Tabela 19 – Valores referência para os metais (CONAMA 344/04) e estatística descritiva dos resultados .....	122
Tabela 20 – Concentrações de base ( <i>background</i> ) para Cu, Pb e Zn .....	124
Tabela 21 – Estoque de metais pesados (toneladas) nos sedimentos das lagoas marginais .....	124
Quadro 1 – Classificação das lagoas marginais.....	23
Quadro 2 – Classificação do Fator de Enriquecimento (FE).....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CIC – *Constant Initial Concentration*

CRS – *Constant Rate of Supply*

DRX – Difração de Raios-X

Eh – Potenciais redox

FDA – Faixa Araçuaí

FDB – Faixa de Dobramento Brasília

FE – Fator de Enriquecimento

FRX – Fluorescência de Raio-X

ICDD – *International Center for Diffraction Data*

ICP-OES – Espectrometria de Emissão Ótica

ICP-OES – *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy*

JCPDS – *Joint Committee on Powder Diffraction Standards*

MAXVER – Máxima verossimilhança

MDE – Modelo Digital de Elevação

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

PDI – Processamento Digital de Imagens

pH – Potencial Hidrogeniônico

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

U-Pb – Urânio – chumbo

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Hipótese de trabalho .....	19
1.2	Objetivos .....	20
2	LAGOAS MARGINAIS: ORIGEM E IMPORTÂNCIA AMBIENTAL.....	21
2.1	Metais pesados nos ambientes aquáticos .....	25
2.2	Os radionuclídeos no meio ambiente.....	27
2.2.1	Radionuclídeos naturais e a datação de sedimentos recentes .....	31
2.2.2	Taxas de sedimentação utilizando $^{210}\text{Pb}$ .....	34
2.2.3	Modelos para datação com $^{210}\text{Pb}$ .....	35
3	ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E FISIAGRÁFICOS DO ALTO-MÉDIO SÃO FRANCISCO.....	38
3.1	Localização e aspectos socioeconômicos da área de estudo.....	40
3.2	Geologia regional.....	49
3.3	Geomorfologia regional .....	52
4	TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS.....	58
4.1	Planejamento da pesquisa de campo e identificação das lagoas.....	59
4.1.1	Identificação das lagoas marginais e mapeamento do uso e da ocupação dos solos.....	59
4.1.2	Seleção das lagoas marginais .....	61
4.2	Trabalhos de campo e amostragem.....	62
4.3	Procedimentos e análises laboratoriais .....	65
4.3.1	Caracterização granulométrica e textural .....	65
4.3.2	Análise do conteúdo de matéria orgânica.....	66
4.3.3	Caracterização mineralógica.....	66
4.3.4	Caracterização química.....	67
4.3.5	Determinação de elementos traços e metais pesados – ICP-OES .....	68
4.3.6	Taxa de sedimentação e datação dos sedimentos .....	70
4.4	Tratamento e apresentação dos dados.....	71
5	GRANULOMETRIA, MINERALOGIA E QUÍMICA TOTAL DOS SEDIMENTOS COLETADOS .....	72
5.1	Mineralogia e composição química dos sedimentos .....	78
5.2	Composição química total dos sedimentos.....	81
5.3	Concentração total de elementos traços nas lagoas marginais.....	87

6	AS LAGOAS MARGINAIS E A QUALIDADE AMBIENTAL NO ALTO-MÉDIO SÃO FRANCISCO-MG.....	93
6.1	Concentrações e enriquecimento de metais nas lagoas marginais.....	102
7	GEOCRONOLOGIA E EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS PRESSÕES E IMPACTOS AMBIENTAIS NO ALTO-MÉDIO SÃO FRANCISCO .....	110
7.1	Geocronologia e taxas de sedimentação nas lagoas marginais.....	112
7.2	Registros históricos das concentrações de matéria orgânica e metais pesados nas lagoas marginais.....	115
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	127
	REFERÊNCIAS .....	129
	ANEXO A – Concentrações de elementos traços analisados por Fluorescência de Raios-X na Lagoa do Guim .....	140
	ANEXO B – Concentrações de elementos traços analisados por Fluorescência de Raios X na Lagoa do Pontal .....	141
	ANEXO C – Concentrações de metais pesados determinadas por Espectrometria de Emissão Ótica – ICP/OES .....	142
	ANEXO D – Mosaico comparativo das concentrações de metais pesados nas lagoas marginais .....	144



## 1 INTRODUÇÃO

Lagoas marginais são feições temporárias do sistema fluvial, de curta duração no tempo geológico, onde predominam processos deposicionais típicos de ambientes lacustres. Os sistemas lacustres, por sua vez, recobrem cerca de 1% das áreas continentais, armazenam aproximadamente 0,01% das águas superficiais (BERNER; BERNER, 1986; BRIDGE; DEMICCO, 2008) decorrentes de contextos climáticos e geológicos, podendo ser classificados, segundo sua origem, em lagos glaciais, tectônicos, fluviais, vulcânicos, costeiros e mistos (MEYBECK, 1995).

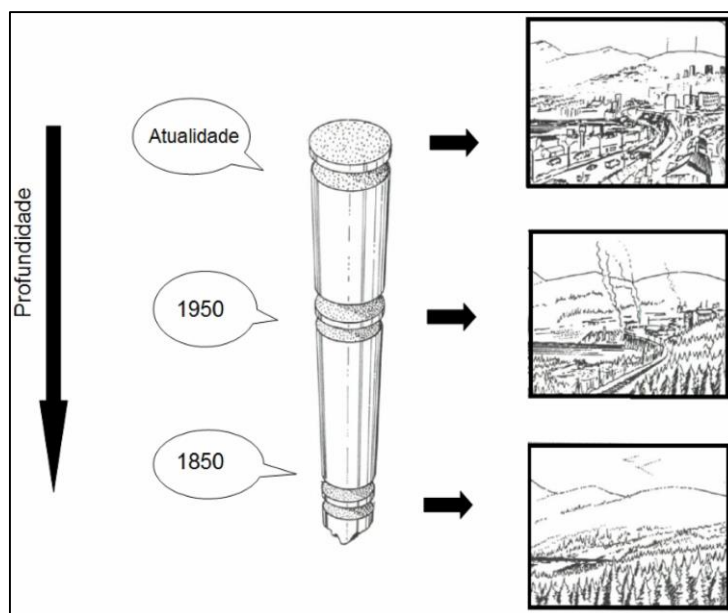
Nas regiões tropicais, a origem dos ambientes lacustres está predominantemente associada com a ação fluvial dos cursos d'água, sobretudo nos médios e baixos cursos de rios de ordens mais elevadas. Nestes segmentos, o sistema rio-planície tende a ser caracterizado pela ocorrência de *habitats* aquáticos e transicionais (aquático-terrestre) que apresentam diferentes morfologias e grau de comunicação com o canal fluvial. Dentre estes *habitats*, destacam-se as lagoas marginais, que geralmente ocupam as depressões laterais do canal fluvial estando permanente ou sazonalmente conectadas com este (SOUZA FILHO; STEVAUX, 1995).

De maneira geral, as lagoas marginais decorrem do transbordamento ou da migração lateral dos canais fluviais e são corpos hídricos de grande importância ecológica, uma vez que funcionam como berçários para reprodução de peixes, abrigam muitas espécies de pássaros e servem de mananciais de água para dessedentação e irrigação (JUNK; BAYLEY; SPARKS, 1989).

Do ponto de vista hidrodinâmico e ambiental, as lagoas marginais exercem papel fundamental na retenção de parte da carga fluvial transportada, principalmente nos períodos de cheia, na acumulação de nutrientes, materiais orgânicos e contaminantes geralmente adsorvidos aos sedimentos.

Em ambientes lacustres, como as lagoas marginais, os sedimentos depositam-se continuamente ao longo do tempo em camadas e com diferentes taxas de sedimentação. Por isso, a coluna sedimentar encontra-se cronologicamente organizada, estando os sedimentos mais antigos localizados na base dos testemunhos e os mais recentes no topo (FIGURA 1).

**Figura 1** – Testemunho sedimentar mostrando a organização cronológica das camadas de sedimentos e as ações antrópicas ao longo do tempo



Fonte: Modificado de Smol (2008).

Em virtude de uma série de propriedades físicas e químicas favoráveis, os sedimentos possuem a capacidade de registrar e conservar as condições ambientais presentes na bacia de drenagem na época da deposição. Assim, podem ser utilizados em análises espaço-temporais para reconstituir o histórico de uso e ocupação dos solos, os efeitos das pressões antrópicas e os impactos produzidos nas bacias de drenagem (ARGOLLO, 2001; CAZOTTI, 2006; GODOY *et al.*, 2006; NERY, 2009).

De modo geral, análises espaço-temporais da contribuição e dos efeitos das pressões antrópicas sobre os ambientes aquáticos dependem da existência de registros históricos descrevendo as condições pristinas e do monitoramento contínuo de muitos parâmetros e indicadores. Em contrapartida, na grande maioria dos casos, tais registros e monitoramentos são escassos ou inexistentes. Nesse contexto, os sedimentos depositados ao longo do tempo em lagos, reservatórios e lagoas marginais podem ser coletados, analisados e deles extraídas importantes informações acerca das condições ambientais, anteriores à ocupação humana e aos efeitos das atividades humanas na qualidade ambiental.

No alto-médio curso do Rio São Francisco, entre Três Marias e Pirapora, cerca de 50 lagoas marginais de tamanhos e formas variadas, bem como diferentes níveis de interação hidrogeomorfológica com o canal fluvial, encontram-se distribuídas na planície de inundação. Estas lagoas atualmente estão circundadas por indústrias, sítios

urbanos, monoculturas de café, soja, cana-de-açúcar, pinus e eucaliptos que manejam e introduzem no meio ambiente metais pesados em concentrações que podem comprometer a qualidade dos recursos hídricos na região (BAGGIO, 2008; RIBEIRO, 2010; TRINDADE, 2010).

Nesta mesma área, em 2005, uma mortandade de peixes chamou a atenção de pesquisadores e órgãos ambientais para a problemática ambiental na bacia do Rio São Francisco e, desde então, pesquisas e trabalhos técnico-científicos têm como objetivo fundamental compreender a influência das pressões antrópicas no comportamento hidrodinâmico do canal fluvial e na distribuição de contaminantes nessa bacia hidrográfica. Nesse contexto, muitos desses trabalhos já identificaram concentrações de metais pesados acima dos limites ambientais em áreas de atividades agrícolas, urbanas e industriais (VIANA, 2006; BAGGIO, 2008; RIBEIRO, 2010; TRINDADE, 2010).

Muito embora a influência das atividades antrópicas na concentração e distribuição de metais pesados seja atualmente reconhecida, a ausência de registros históricos descrevendo as condições ambientais pretéritas, sobretudo nos últimos 100 anos, não permite estabelecer com precisão e acurácia os reais impactos ambientais decorrentes das pressões antrópicas nos recursos naturais para esse período.

Assim sendo, nas últimas décadas, em virtude do acirramento das questões ambientais envolvendo os recursos hídricos e a contaminação por metais pesados, parte dos geocientistas passou a adotar radionuclídeos naturais e antropogênicos como traçadores cronológicos dos processos de sedimentação, com intuito de reconstituir as condições ambientais pretéritas e identificar os impactos ambientais provocados pelas atividades humanas.

Radionuclídeos são elementos instáveis de origem natural ou antropogênica encontrados em gases atmosféricos, oceanos, mares, rios, solos e rochas, que pelo decaimento radioativo desintegram-se ao longo do tempo até se transformarem em isótopos estáveis.

Por possuir muitos radioisótopos, alguns com meias-vidas longas, que permitem a investigação de processos de longo-termo e outros com meias-vidas mais curtas aplicados na datação de eventos mais recentes, a série de decaimento do Urânio – chumbo (U-Pb) é a mais estudada e aplicada na geocronologia (BOURDON *et al.*, 2003).

Para datar sedimentos recentes, depositados nos últimos 150 anos, o chumbo-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) é o radionuclídeo mais utilizado atualmente. Esse elemento é considerado um

radionuclídeo intermediário na série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , possui meia-vida de 22,3 anos e foi estudado inicialmente por Goldberg (1963) como traçador geocronológico. Desde então outros pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento da metodologia e a aplicação deste radionuclídeo como ferramenta para datação de sedimentos recentemente depositados em lagos, lagoas, estuários e rios (MATSUMOTO, 1975; ROBBINS; EDGINGTON, 1975; APPLEBY; OLDFIELD, 1978).

No Brasil, a maioria dos trabalhos científicos adotando o  $^{210}\text{Pb}$  como traçador cronológico dos processos de sedimentação foram desenvolvidos em ambientes costeiros, sobretudo em baías e estuários. Desse modo, ao adotar as lagoas marginais do alto-médio curso do Rio São Francisco como áreas de estudo, a presente pesquisa busca ampliar a aplicação do  $^{210}\text{Pb}$  na investigação do histórico de contaminação e taxas de sedimentação em ambientes fluviais e lacustres, analisar a importância desses ambientes para avaliação das condições ambientais atuais e pretéritas e reconhecer a contribuição das atividades antrópicas na concentração e distribuição dos metais pesados no alto-médio curso do Rio São Francisco.

## 1.1 Hipótese de trabalho

O presente trabalho está estruturado na hipótese de que *as lagoas marginais, como feições características da bacia do Rio São Francisco, funcionam como repositórios de sedimentos, que, por sua vez, são continuamente depositados no fundo das lagoas marginais e formam testemunhos cronologicamente organizados, onde as camadas sedimentares mais recentes sobrepõem-se às mais antigas. Assim sendo, o estudo e a análise dos sedimentos extraídos de lagoas marginais no alto-médio curso do Rio São Francisco poderão fornecer informações acerca das condições naturais e da evolução espaço-temporal das pressões e impactos humanos. Essas informações poderão ser obtidas por meio das concentrações de metais pesados encontradas nos registros deposicionais e pela determinação da concentração de  $^{210}\text{Pb}$  nas camadas sedimentares.*

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar o papel das lagoas marginais na formação de testemunhos hidrogeomorfológicos, representativos da dinâmica fluvial e dos impactos ambientais decorrentes das pressões antrópicas no alto-médio curso do Rio São Francisco, buscando estabelecer correlações entre as concentrações de metais pesados e a intensificação dos usos e ocupação dos solos nos últimos 100 a 150 anos.

Este objetivo geral está atrelado aos seguintes objetivos específicos:

- 1- *conhecer os aspectos gerais da deposição dos sedimentos nas lagoas marginais selecionadas;*
- 2- *caracterizar, em termos granulométricos, mineralógicos e do conteúdo de matéria orgânica, as sequências sedimentares de fundo das lagoas marginais que estão sujeitas aos processos de contaminação;*
- 3- *determinar a idade das camadas sedimentares e a taxa de sedimentação nas lagoas marginais selecionadas;*
- 4- *analisar e quantificar as concentrações de metais pesados nas camadas sedimentares das lagoas marginais selecionadas;*
- 5- *investigar a evolução do uso e ocupação dos solos e as possíveis implicações ambientais na área de estudo.*

## 2 LAGOAS MARGINAIS: ORIGEM E IMPORTÂNCIA AMBIENTAL

Anualmente, os sistemas fluviais transferem aproximadamente  $20 \times 10^9$  toneladas de sedimentos dos continentes para os oceanos (RICOMINNI *et al.*, 2000). Nesse percurso, parte dos sedimentos é retida em ambientes de sedimentação naturais, como as planícies de inundação, lagos e lagoas e outra em represamentos construídos pela ação antrópica.

No trabalho de transferência de sedimentos, os rios modelam a paisagem continental e, ao alcançarem os ambientes lacustres, produzem registros sedimentares que podem ser indicativos da evolução do sistema fluvial e guardar o histórico das alterações produzidas pelas atividades antrópicas nas escalas local e regional.

Os sistemas lacustres são elementos temporários nas paisagens e de curta duração no tempo geológico. Segundo Cohen (2003), os ambientes lacustres são formados predominantemente por fenômenos geológicos naturais e podem ser classificados, segundo sua origem, em lagos glaciais, tectônicos, vulcânicos, costeiros e fluviais, além daqueles formados pela dissolução de rochas, impacto de meteoritos e ação dos ventos.

Em relação à escala temporal, o autor sugere, ainda, que os lagos de maior duração, como aqueles de origem tectônica, podem acumular registros sedimentares de até 100 milhões de anos.

De modo geral, lagos e lagoas são corpos d'água com características lênticas que ocupam áreas topograficamente deprimidas. Löffler (2004) considera que o estudo da origem dos ambientes lacustres é um dos mais fascinantes ramos da Geomorfologia. No entanto, o mesmo autor salienta que a distinção rígida entre os ambientes tipicamente lacustres, como os lagos e as lagoas, é uma questão de difícil consenso, pois envolve grande número de variáveis e características comuns a ambos os ambientes.

Em contrapartida, Cohen (2003) salienta que nenhuma classificação para lagos e lagoas deve ser baseada inteiramente na hierarquização dos processos de formação ou dimensões, uma vez que a origem e a evolução destes ambientes muitas vezes decorrem de múltiplos processos.

Dos pontos de vista areal e temporal, muitos autores consideram que, quando comparados com as lagoas, os lagos são maiores em área e mais profundos, além de serem temporalmente mais duradouros (TIMMS, 1992; ESTEVES, 1998; SMOL, 2008). Muito embora esta proposição seja a mais utilizada atualmente, é importante

salientar que não há uma definição consensual sobre quais são as dimensões necessárias para que um corpo d'água seja considerado um lago ou uma lagoa.

O principal ponto de concordância entre os pesquisadores que se dedicam a estudar os lagos e as lagoas é que, independentemente dos limites areais rígidos e da temporalidade, estes ambientes são altamente produtivos do ponto de vista biológico e de grande importância para conservação da biodiversidade regional (JUNK; BAYLEY; SPARKS, 1989; TIMMS, 1992; ESTEVES, 1998; COHEN, 2003).

Nas áreas de climas tropicais, de modo geral, a ocorrência de ambientes lacustres está predominantemente associada ao trabalho dos rios, principalmente nos médios e baixos cursos dos rios de maior ordem hierárquica onde as planícies de inundação geralmente abrigam muitas lagoas marginais. No Brasil, as planícies de inundação, juntamente com as lagoas marginais, ocupam cerca de 700.000 km<sup>2</sup>, representando aproximadamente 8,2% do território nacional (TUNDISI, 1990).

Nas planícies, as lagoas marginais são ambientes com características de deposição tipicamente lacustres que suportam uma grande diversidade ecológica, além de desempenharem importante papel hidrodinâmico na retenção dos sedimentos (JUNK; BAYLEY; SPARKS, 1989).

No Vale do Rio São Francisco, as lagoas marginais são feições hidrogeomorfológicas comuns e de grande importância ecológica. De acordo com Pompeu (1997), a reprodução de peixes de espécies migratórias, como o surubim, o dourado e a curimatã, depende diretamente da manutenção e conservação das lagoas marginais.

Na região de Pirapora, os estudos de Godinho *et al.* (1997) e Godinho (2000) demonstram, respectivamente, que a quantidade de pescado caiu de 11,7 kg.pescador<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> em 1987 para 3,1 kg.pescador<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> em 1999. Para Godinho, Kynard e Martinez (2003), a principal causa do decréscimo da quantidade de peixes é a significativa redução dos pulsos de inundação, que impede a conexão do canal fluvial com as lagoas marginais no período da desova. Nesse sentido, os autores argumentam que o manejo hidrológico realizado a partir de cheias induzidas pode restaurar os estoques pesqueiros na bacia do Rio São Francisco.

Do ponto de vista geomorfológico, Drago (1976) considera que as planícies de inundação são superfícies topográficas bastante dinâmicas, onde os mecanismos de erosão e deposição dos canais fluviais dão origem às lagoas marginais. A partir dos

processos de formação e da morfologia, Drago (1976) propõe um enquadramento para as lagoas marginais (QUADRO 1).

**Quadro 1** – Classificação das lagoas marginais

(continua)

Tipos de lagos	Descrição
<b>Lagoa de canal abandonado</b>	Originada pela divisão do canal fluvial na presença de uma ilha. Durante este processo, se um dos canais receber uma maior vazão, poderá adquirir maior desenvolvimento em sua largura e profundidade, ocasionando a redução da vazão e velocidade da água no outro canal. Com a vazão e a velocidade reduzidas, o canal começa a colmatar-se de sedimentos, em sua desembocadura e na confluência, dando início ao processo de isolamento e formação da lagoa.
<b>Lagoa de meia-lua – <i>Oxbow</i></b>	Devido a processos de deposição nas margens convexas e erosão nas côncavas, os meandros tendem a acentuar sua sinuosidade, chegando a estrangular os meandros vizinhos. Este processo pode ocorrer tanto por transbordamentos que forcem um traçado mais retilíneo quanto pelo aumento gradual da curvatura dos meandros até reduzir a zero a faixa de terra que os separa.
<b>Lagoa de meia-lua composta – <i>Oxbow</i></b>	Apresenta o mesmo processo de formação das lagoas <i>Oxbow</i> , sendo diferenciada pela quantidade de espelhos d'água decorrentes do abandono de vários meandros.
<b>Lagoa de espiras de meandro</b>	Denominam-se espiras de meandro as sequências de elevações e depressões paralelas que se observam nas margens convexas dos meandros. As elevações constituem antigas margens do rio, e as depressões parte de seu canal. Nestas depressões se estabelecem os corpos d'água que são denominados lagos em espiras. Constituem uma paisagem muito característica, integrada por vários espelhos de água estreitos e paralelos dispostos em semicírculo.
<b>Lagoa de diques marginais</b>	Os diques tendem a concentrar o fluxo da corrente nos canais que os margeiam. Estas correntes laterais vão depositando sedimentos nas bordas e sazonalmente água na parte externa dos diques. Estes, por sua vez, podem ser fixados pela vegetação. Este processo origina a elevação das bordas, conferindo ao conjunto uma forma de ferradura. Ao desenvolverem-se longitudinalmente, estes diques se unem ficando entre eles uma superfície mais ou menos côncava, onde se estabelecem as lagoas de diques marginais.
<b>Lagoa de inundação</b>	Sobre a superfície das planícies aluviais próximas dos canais principais, as águas de inundação acumulam sedimentos de várias granulometrias. Parte da água de inundação pode ficar retida nas zonas baixas limitadas por esses sedimentos, originando este tipo de lagoa.



(conclusão)

<b>Tipos de lagos</b>	<b>Descrição</b>
<b>Lagoa de barragem</b>	Origina-se quando um trecho do canal situado entre duas ilhas é abandonado por processos de sedimentação em suas extremidades.
<b>Lagoa de acreção lateral</b>	Processo de formação similar aos tipos canal abandonado, <i>oxbow</i> e <i>oxbow</i> composto, sendo diferenciados pela morfologia do espelho d'água. No caso dos lagos de acreção lateral, a erosão dos diques e a consequente invasão das águas vindo a áreas adjacentes promovem sua expansão.
<b>Lagoa de anexação</b>	Originada por anexação de dois ou mais corpos de água a partir da erosão costeira.
<b>Lagoa de Canal abandonado encadeado</b>	É formada quando um canal ativo une vários lagos. É uma combinação dos processos que originam as lagoas do tipo canal abandonado. Possui espelhos d'água muito irregulares e de grande desenvolvimento longitudinal.
<b>Lagoa de confluência</b>	Origina-se devido à sedimentação que ocorre na confluência de afluentes com o canal principal. Neste local o rio afluente deposita sua carga na forma de barras de canal, que são remodelados por ele mesmo e pelas águas do canal principal. Com desenvolvimento das barras de canal, tem-se a diminuição da velocidade da corrente a montante da confluência. Esta diminuição e o efeito do represamento do canal principal produzem novas áreas de sedimentação. Caso este processo continue, os depósitos de ambos os canais podem se unir, deixando entre eles um espelho d'água destinado a se tornar um ambiente lântico.
<b>Lagoa deltaica</b>	É originada quando um rio deságua em uma lagoa receptora formando um pequeno delta, cujas margens e ilhas, à medida que vão se movendo, vão formando espelhos d'água menores, que constituem as chamadas lagoas delta. Também é comum observar nestes casos que os grandes espelhos d'água podem ser divididos por este processo.
<b>Pântano</b>	Constitui a fase final da evolução dos ambientes lânticos nas planícies aluviais. São áreas rebaixadas, cobertas por vegetação aquática ou adaptadas, mantendo-se durante algum tempo o formato original do corpo de água que lhe deu origem.

---

Fonte: Drago (1976).

Morais *et al.* (2005), utilizando a classificação de Drago (1976), analisaram a morfometria dos sistemas lacustres no médio curso do Rio Araguaia e constataram que, entre os 293 corpos d'água com características lânticas localizados na planície de inundação, 30,03% foram classificados como lagos de canal abandonado e lagos de canal encadeado. Já na bacia do Rio Amazonas, principalmente nos tributários Purus e Juruá, predominam os ambientes lacustres do tipo *oxbow* (JUNK; FURCH, 1993).

No Rio São Francisco, apesar de o grande número de lagoas marginais pontilhar a planície de inundação, trabalhos voltados para a origem e a classificação geomorfológica destes ambientes são desconhecidos até o presente momento.

Do ponto de vista geoquímico, os estudos envolvendo as lagoas marginais ainda são bastante incipientes. Destaca-se, nesse sentido, a contribuição de Junk, Bayley e Sparks (1989), que caracterizaram as lagoas marginais como repositórios de nutrientes, matéria orgânica e contaminantes adsorvidos nos sedimentos.

Entre os contaminantes de maior importância ambiental atualmente manejados no alto-médio São Francisco, encontram-se os metais pesados, cujos efeitos tóxicos e cumulativos têm despertado o interesse de pesquisadores para avaliar o comportamento e a distribuição destes elementos na bacia do Rio São Francisco. É nesse sentido que também se inserem as possíveis contribuições do presente trabalho.

Seja do ponto de vista geomorfológico, seja do geoquímico, as lagoas marginais do Vale do Rio São Francisco permanecem bastante desconhecidas. Em contrapartida, considerando o dinamismo das planícies de inundação e a velocidade das alterações humanas processadas na paisagem regional, corre-se o risco de que estes ambientes tenham seu funcionamento natural alterado ou desapareçam antes mesmo de serem estudados em uma abordagem hidrogeomorfológica.

## **2.1 Metais pesados nos ambientes aquáticos**

Os metais pesados são elementos que ocorrem naturalmente na superfície terrestre, geralmente em baixas concentrações, fazendo parte da composição química das rochas, dos solos e da estrutura dos minerais. São elementos amplamente utilizados nos processos industriais e nas atividades agrícolas e urbanas.

O termo metais pesados tem sido utilizado para se referir ao grupo de elementos químicos que possuem número atômico maior que 20 e densidade específica superior a  $5,0 \text{ g/cm}^3$  (WILD, 1993; MALAVOLTA, 1994; AMARANTE, 1997). Entretanto, esta definição é bastante imprecisa para necessidades ambientais atuais, pois engloba metais, semimetais e metaloides que apresentam comportamentos distintos e diferentes níveis de toxicidade e ecotoxicidade.

Ao longo do tempo, a imprecisão do termo metais pesados gerou diversas abordagens, entre as quais aquelas baseadas na toxicidade e nos efeitos acumulativos

nos organismos. Neste trabalho, serão denominados metais pesados os elementos que, por suas características químicas, apresentam toxicidade e/ou ecotoxicidade que podem produzir efeitos adversos à biota e à saúde humana, conforme Duffus (2002).

Do ponto de vista ambiental, os metais pesados são elementos comumente encontrados nos diversos compartimentos ambientais e são incorporados aos corpos hídricos a partir do intemperismo e erosão de rochas e solos, pelo transporte fluvial, via lançamentos de efluentes domésticos e industriais ou pela precipitação atmosférica.

Nos ambientes aquáticos, os metais encontram-se dissolvidos na água ou adsorvidos aos sedimentos e podem ser transportados por longas distâncias até se depositarem em represamentos antrópicos ou naturais, como as lagoas marginais.

Para Förstner e Wittmann (1979), os sedimentos representam o principal compartimento ambiental de acumulação de contaminantes nos sistemas aquáticos. Eles podem apresentar concentrações de metais pesados muitas vezes superiores às encontradas na água e funcionar como um estoque de contaminantes no ambiente aquático.

Segundo Salomons e Förstner (1984), o principal fator de acumulação de contaminantes nos sedimentos é a alta capacidade de adsorção apresentada, sobretudo pelas partículas menores que 0,063 mm, pois estas são eletricamente ativas e possuem uma grande superfície específica que contribui significativamente para adsorção dos metais pesados.

Para Mudroch e Macknight (1991), ao serem incorporados ao ambiente aquático, os sedimentos sofrem processos de acumulação, reprocessamento e transferência dos seus constituintes, por meio de processos químicos e biológicos nos rios, lagos e águas oceânicas. Já Massutti (1999) salienta que o estudo da composição química dos sedimentos pode indicar, além das condições ambientais atuais, impactos decorridos ao longo do tempo.

De maneira geral, os sedimentos encontrados no sistema fluvial apresentam dimensões variadas, que vão desde argilas (0,002 mm) até matações (25600 mm). Entretanto, nas áreas de baixa energia de transporte, como as lagoas marginais, espera-se que os sedimentos depositados sejam predominantemente finos (< 0,063 mm) e forneçam informações sobre a evolução das concentrações de metais pesados na bacia de drenagem.

## 2.2 Os radionuclídeos no meio ambiente

Radionuclídeos são elementos instáveis de origem natural ou antropogênica comumente encontrados em gases atmosféricos, oceanos, mares, rios, solos e rochas. Os de origem natural podem ter como fonte processos geológicos (radionuclídeos terrestres) e as interações dos raios cósmicos com compostos dispersos na atmosfera (radionuclídeos cosmogênicos). Já os radionuclídeos artificiais ou antropogênicos são conhecidos e produzidos desde a descoberta da radioatividade artificial e fissão nuclear ocorridas entre as décadas de 1930 e 1940 (FIGUERA *et al.*, 1998).

Segundo Bourdon *et al.* (2003), a maioria dos radionuclídeos naturais é encontrada na litosfera fazendo parte da composição química e mineralógica das rochas, solos e minerais. Nesse contexto, têm destacada importância os minerais contendo Urânio e Tório cujas concentrações em granitos são aproximadamente 3 mg/kg e 17 mg/kg, respectivamente (EISENBUD; GESELL, 1997). Nas tabelas 1 e 2, são apresentados os principais minerais e rochas contendo Urânio e Tório e seus respectivos depósitos (LIESER, 1997).

**Tabela 1** – Principais minerais de Urânio e Tório

Míneral	Composição	Conc. de U [%]	Conc. de Th [%]	Depósitos
<i>Pitchblende</i>	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	60-90		Bohemia, Congo, Colorado (USA)
<i>Becquerelite</i>	2UO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	74		Bavária, Congo
<i>Uraninite</i>		65-75	0,5 - 10	Japão, USA, Canadá
<i>Broeggerite</i>	UO <sub>2</sub> · UO <sub>3</sub>	48 - 75	6 - 12	Noruega
<i>Cleveite</i>		48 - 66	3,5 – 4,5	Noruega, Japão, Texas
<i>Carnotite</i>	K(UO <sub>2</sub> )(VO <sub>4</sub> ).nH <sub>2</sub> O	45		USA, Congo, Rússia, Austrália
<i>Casolite</i>	PbO · UO <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	40		Congo
<i>Liebigite</i>	Carbonatos de U e Ca	30		Áustria, Rússia
<i>Thorianite</i>	(Th,U)O <sub>2</sub>	4 - 28	60 - 90	Sri Lanca, Madagascar
<i>Thorite</i>	ThSiO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	1 - 19	40 - 70	Noruega, USA
<i>Monazite</i>	Fosfatos de Th e terras raras		0,1 - 15	Brasil, Índia, Rússia, Noruega, Madagascar.

Fonte: Lieser (1997).

**Tabela 2** – Concentrações médias de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  em rochas e solos

Material	Potássio – 40		Tório - 232		Uranio - 238	
	% total	Bq kg <sup>-1</sup>	ppm	Bq kg <sup>-1</sup>	ppm	Bq kg <sup>-1</sup>
<b>Rochas ígneas</b>						
Basalto*	0,8	300	3-4	10 - 15	0,5 - 1	7 – 10
Rochas máficas	0,3 – 1,1	70 - 400	1,6 – 2,7	7 -10	0,5 – 0,9	7 – 10
Granitos*	>4	>1000	17	70	3	40
<b>Rochas sedimentares</b>						
Calcários	2,7	800	12	50	3,7	40
Arcóseos	2 - 3	600 - 900	2	<8	<1	<10
Areias	<1	<300	6	25	3	40
<b>Rochas*</b>	0,3 – 4,5	70 - 1500	1,6 - 20	7 - 80	0,5 – 4,7	7 - 60
<b>Solos</b>	1,5	400	9	37	1,8	22

Fonte: Eisenbud e Gesell (1997).

O Urânio ( $^{238}\text{U}$ ), o Tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e seus isótopos-filhos são considerados radionuclídeos primordiais, uma vez que foram originados durante o processo de formação do Universo. Estes radionuclídeos possuem meias-vidas suficientemente longas para serem encontrados até os dias atuais (BOURDON *et al.*, 2003).

As séries de decaimento do Urânio-238 e do Tório-232 possuem muitos isótopos radioativos (TABELA 3) com meias-vidas e propriedades geoquímicas variadas. Esta condição faz com seus produtos radioativos sejam encontrados em diferentes ambientes geológicos, possibilitando a investigação de processos que ocorreram em escalas de tempo que vão desde dias até bilhões de anos (BOURDON *et al.*, 2003).

**Tabela 3** – Série de decaimento do Urânio-238

Elemento Emissor	Isótopo	Meia-vida ( $t_{1/2}$ )	Energia da Radiação(MeV)
Urânio 92	U-238 $\downarrow\alpha$	4,5 x 10 <sup>9</sup> anos	4,20 ( $\alpha$ )
Tório 90	Th-234 $\downarrow\beta^-$	24 dias	0,20 ( $\beta^-$ )
Protoactínio 91	Pa-234 $\downarrow\beta^-$	6,7 horas	0,16 ( $\beta^-$ )
Urânio 92	U-234 $\downarrow\alpha$	2,5 x 10 <sup>5</sup> anos	4,76 ( $\alpha$ )
Tório 91	Th-230 $\downarrow\alpha$	8 x 10 <sup>4</sup> anos	4,88 ( $\alpha$ )
Rádio 88	Ra-226 $\downarrow\alpha$	1622 anos	4,78 ( $\alpha$ )
Radônio 86	Rn-222 $\downarrow\alpha$	3,8 dias	5,49 ( $\alpha$ )
Polônio 84	$\alpha\downarrow$ Po-218 $\downarrow\beta^-$	3 minutos	6,0 ( $\alpha$ )
Astatínio 85	$\downarrow$ At-218 $\downarrow\alpha$	2 segundos	6,63 ( $\alpha$ )
Chumbo 82	$\downarrow$ Pb-214 $\downarrow\beta^-$	3 minutos	0,7 ( $\beta^-$ )
Bismuto 83	$\alpha\downarrow$ .Bi-214 $\downarrow\beta^-$	19,7 minutos	5,6 ( $\alpha$ ) 1,6 ( $\beta^-$ )
Tálio 81	$\beta^- \downarrow$ Tl-210 $\downarrow$	1,3 minutos	
Polônio 84	$\downarrow$ Po-214 $\downarrow\alpha$	1,6 x 10 <sup>-4</sup> segundos	7,7 ( $\alpha$ )
Chumbo 82	Pb-210 $\downarrow\beta^-$	22 anos	0,02 ( $\beta^-$ )
Bismuto 83	$\alpha\downarrow$ Bi-210 $\downarrow\beta^-$	( $\alpha$ )2,6x10 <sup>10</sup> anos ( $\beta$ ) 5 dias	4,94 ( $\alpha$ ) 1,17 ( $\beta^-$ )
Polônio 84	$\downarrow$ Po-210 $\downarrow\alpha$	138 dias	5,39 ( $\alpha$ )
Tálio 81	$\beta^- \downarrow$ Tl-206 $\downarrow$	4,2 minutos	1,5 ( $\beta^-$ )
Chumbo 82	Pb-206	Estável	-

Fonte: Bourdon *et al.* (2003).

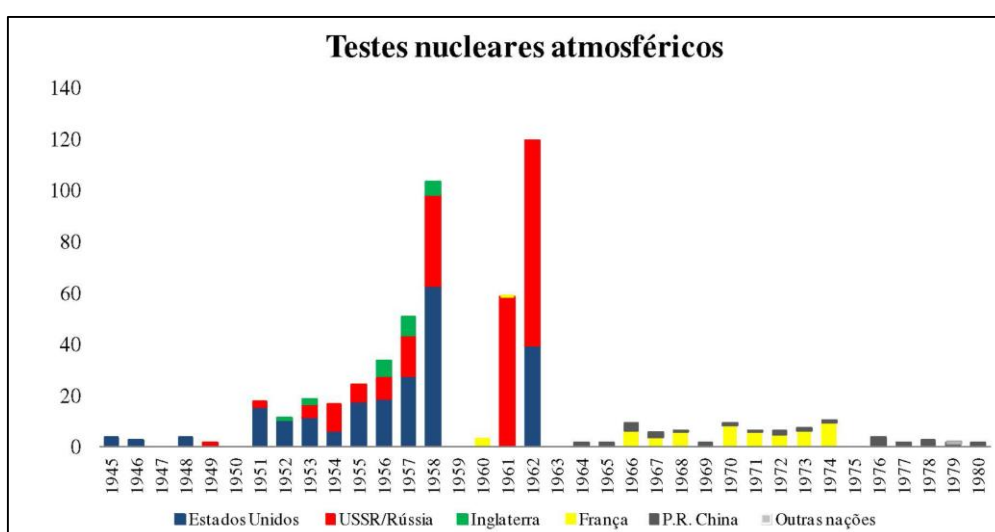
Os radionuclídeos cosmogênicos, por sua vez, são produzidos pela interação dos raios cósmicos com compostos atmosféricos, sobretudo na estratosfera (DUNAI, 2010). Podem apresentar meias-vidas longas, entretanto, geralmente possuem meias-vidas mais curtas que os radionuclídeos primordiais (LIESER, 1997). Dentre os radionuclídeos cosmogênicos, destacam-se <sup>3</sup>He, <sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al, <sup>36</sup>Cl, <sup>21</sup>Ne e <sup>14</sup>C, que são aplicados principalmente na determinação de idades de materiais biogênicos, taxas de denudação e processos geomorfológicos de longo-termo, idades dos glaciares e taxas de remoção da cobertura de gelo e evolução das paisagens (WALKER, 2005). Na Tabela 4, são apresentados os principais radionuclídeos cosmogênicos utilizados para datação e suas respectivas meias-vidas.

**Tabela 4** – Radionuclídeos cosmogênicos mais utilizados em datação de superfícies

Radionuclídeo	Meia-vida	Elementos-alvo predominantes	Principais minerais-alvo
<sup>10</sup> Be	1,36 ± 0,07 Ma	O, Si (Mg)	Quartzo (raramente piroxênios e olivinas)
<sup>14</sup> C	5730 ± 30 anos	O, Si	Quartzo
<sup>26</sup> Al	708 ± 17 Ka	Si	Quartzo
<sup>36</sup> Cl	301 ± 2 Ka	K,Ca, Cl, (Fe, Ti)	Carbonatos, feldspatos e rocha total
<sup>3</sup> He	Estável	Elementos maiores e Li	Olivinas e piroxênios
<sup>21</sup> Ne	Estável	Mg, Al, Si	Quartzo, piroxênio e olivinas

Fonte: Dunai (2010).

Segundo Figueira *et al.* (1998), os radionuclídeos de origem antropogênica passaram a ser mais fortemente incorporados na biosfera a partir da década de 1950, em decorrência dos testes de artefatos nucleares (GRÁFICO 1). Para os autores, estes testes alcançaram seus pontos culminantes entre 1954 e 1958, com as explosões realizadas por Estados Unidos, ex-URSS e Reino Unido, e posteriormente entre 1961 e 1962, com os testes realizados pelos EUA e pela ex-URSS. Entretanto, a partir da década de 1980, a principal fonte de emissão de radionuclídeos artificiais para a atmosfera passou a ser os acidentes nucleares, como os de Chernobyl, em 1986, na Ucrânia, e o de Goiânia-GO, ocorrido em 1987 (ANJOS *et al.*, 2000).

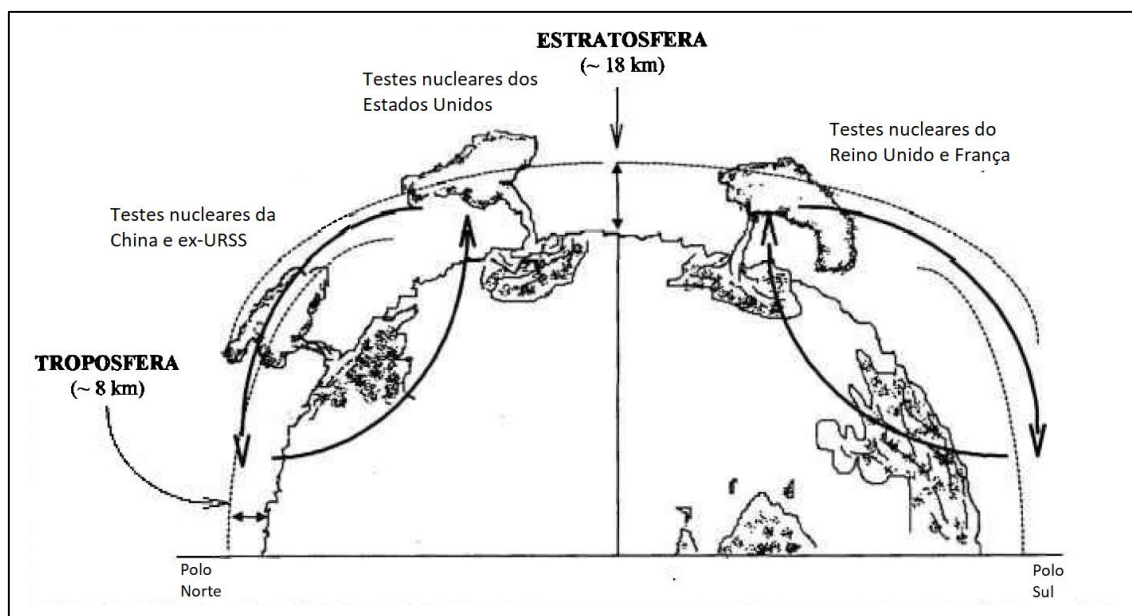
**Gráfico 1** – Quantidade e origem dos testes nucleares realizados entre 1945 e 1980

Fonte: Sanders *et al.* (2012).

Do ponto de vista ambiental, têm destacada importância os radionuclídeos antropogênicos Césio-137 e o Estrôncio-90, que possuem alto rendimento de fissão e meia-vida longa, e o Plutônio-239, produzido nos reatores nucleares (FIGUEIRA, 2000).

Para Glasstone e Dolan (1977), os radionuclídeos antropogênicos são prioritariamente incorporados à biosfera a partir do fenômeno conhecido como *fallout*, que é caracterizado pela deposição de elementos radioativos na superfície terrestre. Para o autor, logo após uma explosão nuclear, todo material radioativo é vaporizado, devido ao intenso calor, e lançado na atmosfera. Iniciado o processo de resfriamento, os principais óxidos condensam-se e interagem com os particulados atmosféricos, formando partículas com diâmetros de 0,1 até 1,0  $\mu\text{m}$ . Nesse contexto, os fragmentos maiores depositam-se rapidamente, em poucas horas, num raio de alguns quilômetros do ponto da explosão, formando o *fallout* local. Já as partículas menores podem alcançar a troposfera e a estratosfera e ser redistribuídas globalmente pela circulação atmosférica, formando o *fallout* global (KATHEREN, 1984 *apud* FIGUEIRA, 2000).

**Figura 2** – Distribuição e circulação do *fallout* entre os hemisférios Norte e Sul



Fonte: Kathren (1984 *apud* FIGUEIRA, 2000).

### 2.2.1 Radionuclídeos naturais e a datação de sedimentos recentes

Os radionuclídeos das séries radioativas  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  são os mais utilizados na datação de eventos geológicos de longo-termo e curto-termo. Este fato, sobretudo,



associa-se aos avanços tecnológicos observados a partir da década de 1980, com o desenvolvimento da espectrometria de massa e de técnicas de separação radioquímica que possibilitaram a detecção de elementos com baixas concentrações nos materiais geológicos (GOLDSTEIN; STIRLING, 2003).

A grande vantagem da aplicação do  $^{238}\text{U}$  e seus produtos radioativos na geocronologia é que os radionuclídeos gerados no decaimento radioativo (FIGURA 3) encontram-se distribuídos por todos os compartimentos ambientais, apresentando meias-vidas que permitem a investigação de eventos com escalas temporais de poucos anos até bilhões de anos (BOURDON *et al.*, 2003).

**Figura 3** – Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  demonstrando os isótopos-filhos e os modos de decaimento

Série do U-238						
U	U-238 4,49x10 <sup>9</sup> a		U-234 2,48x10 <sup>5</sup> a			
Pa	↓	Pa-234 6,7h	↓			
Th	Th-234 24,1d		Th-230 8,0x10 <sup>4</sup> a		Modos de decaimento ↓ α    ↗ β	
Ac			↓			
Ra			Ra-226 1622a			
Fr			↓			
Rn			Rn-222 3,83d			
At			↓			
Po			Po-218 3,05min		Po-214 1,6x10 <sup>-4</sup> s	Po-210 138,4d
Bi			↓	Bi-214 19,7min	↓	Bi-210 5,0d
Pb			Pb-214 26,8min		Pb-210 22,2a	↓
						Pb-206 (estável)

Fonte: Bourdon *et al.* (2003).

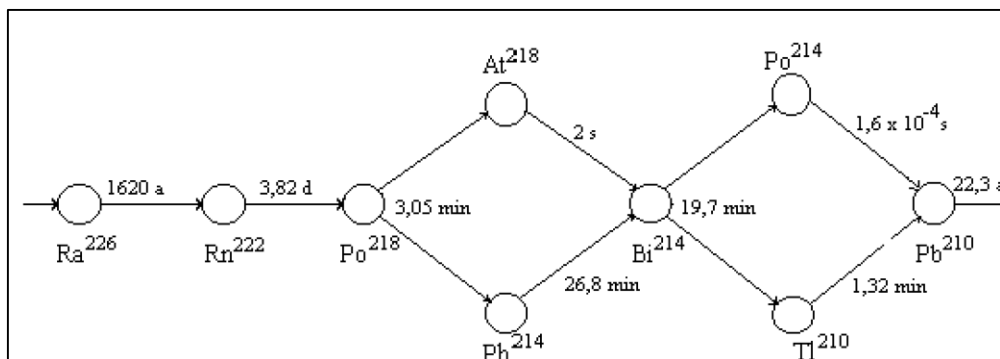
Nas últimas décadas, observa-se crescente preocupação com os efeitos das atividades antrópicas sobre os ecossistemas aquáticos. Nesse contexto, a datação de sedimentos recentemente depositados nos corpos d'água tem possibilitado o levantamento de condições ambientais pretéritas e a avaliação dos impactos causados pelas atividades antrópicas. Entre os radionuclídeos aplicáveis à datação de sedimentos recentes, em uma escala temporal de 100 a 150 anos, o  $^{210}\text{Pb}$  tem demonstrado ser uma poderosa ferramenta de análise para estimar a taxa de sedimentação em rios, lagos e

estuários, prever a vida útil de reservatórios e avaliar afluxo de contaminantes em bacias de drenagem (ARGOLLO, 2001; SOUZA; KNOPPERS, 2003; GODOY *et al.*, 1998b; APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; ROBBINS; EDGINGTON, 1975).

Na série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , o  $^{210}\text{Pb}$  é um elemento intermediário, que possui meia-vida de 22,26 anos, é o isótopo-neto do  $^{226}\text{Ra}$  que possui meia-vida 1622 anos e decai para o  $^{222}\text{Rn}$ , que, por sua vez, decai para  $^{210}\text{Pb}$ . O  $^{222}\text{Rn}$  é um gás inerte com meia-vida de 3,83 dias. Uma parte desse gás permanece na superfície terrestre onde decai para formar o  $^{210}\text{Pb}$  suportado. Já a outra parte escapa pelos espaços intersticiais dos solos para a atmosfera numa taxa média de  $42 \text{ átomos min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  (ARGOLLO, 2001).

Na atmosfera, o  $^{222}\text{Rn}$  decai para radionuclídeos de meias-vidas curtas até formar o  $^{210}\text{Pb}$  não suportado ou em excesso (FIGURA 4). Depois de formado, o  $^{210}\text{Pb}$  participa de uma sequência de interações com os aerossóis e particulados e é rapidamente removido da atmosfera, a uma taxa relativamente constante, pela precipitação úmida ou seca e depositado na superfície terrestre (ARGOLLO, 2001).

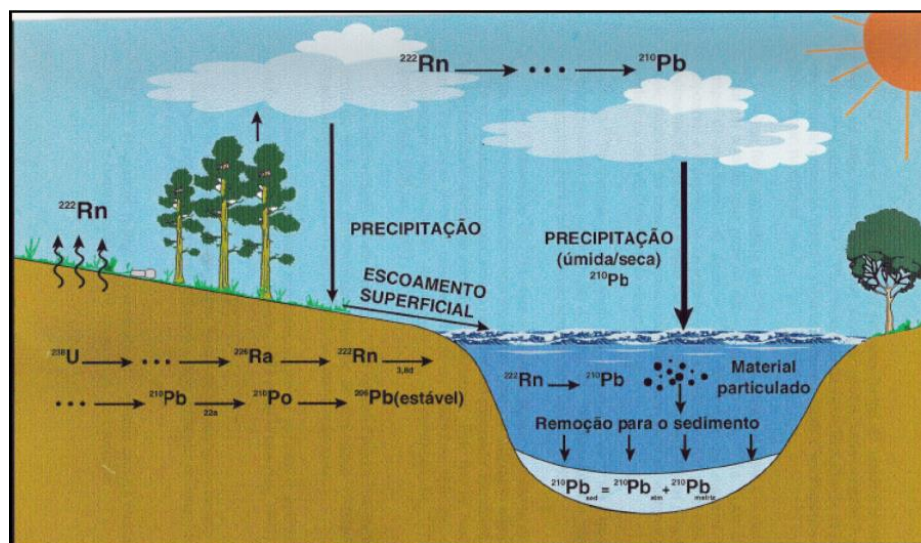
**Figura 4** – Série de decaimento do  $^{226}\text{Ra}$  até o  $^{210}\text{Pb}$



Fonte: Argollo (2001).

Segundo Ivanovich e Harmon (1992), o tempo de residência do  $^{210}\text{Pb}$  na atmosfera é de aproximadamente 10 dias e, ao ser depositado em ambientes aquáticos, uma série de propriedades e reações químicas faz com que os radionuclídeos  $^{210}\text{Pb}$  sejam adsorvidos aos materiais finos, principalmente argila e silte, e incorporados ao registro sedimentar (FIGURA 5).

Figura 5 – Ciclo hidrogeoquímico do  $^{210}\text{Pb}$



Fonte: Godoy *et al.* (2006).

### 2.2.2 Taxas de sedimentação utilizando $^{210}\text{Pb}$

Os sedimentos depositados em ambientes lacustres funcionam como registros de alterações autóctones e alóctones ao longo do tempo (SMOL, 2008). Aplicando-se técnicas adequadas de coleta, análise e datação, é possível investigar a taxa de acumulação dos sedimentos e dos poluentes neles adsorvidos.

A utilização do  $^{210}\text{Pb}$  para estimar a taxa de sedimentação em ambientes aquáticos tem se mostrado uma ferramenta eficaz tanto para geocronologia como para os estudos ambientais. Nesses casos, a determinação da taxa de sedimentação está baseada na quantificação do  $^{210}\text{Pb}$  não suportado ou em excesso e na aplicação de modelos matemáticos (APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; ROBBINS; EDGINGTON; KEMP, 1978).

Na coluna sedimentar, o  $^{210}\text{Pb}$  pode apresentar duas fontes, (1) a produção *in situ* que é decorrente do decaimento radioativo do  $^{226}\text{Ra}$  presentes nos minerais, o  $^{210}\text{Pb}$  suportado, ou (2) a precipitação atmosférica (*fallout*) úmida ou seca,  $^{210}\text{Pb}$  não suportado (KOIDE *et al.*, 1972).

Segundo Argollo (2001), o  $^{210}\text{Pb}$  suportado encontrado nos sedimentos normalmente está em equilíbrio radioativo com  $^{226}\text{Ra}$ . Sendo assim, o  $^{210}\text{Pb}$  precipitado da atmosfera (não suportado) apresenta-se como um excesso em relação ao  $^{210}\text{Pb}$ -suportado e pode ser mensurado a partir da diferença entre a atividade total de  $^{210}\text{Pb}$  e a do  $^{210}\text{Pb}$  suportado, ou seja:

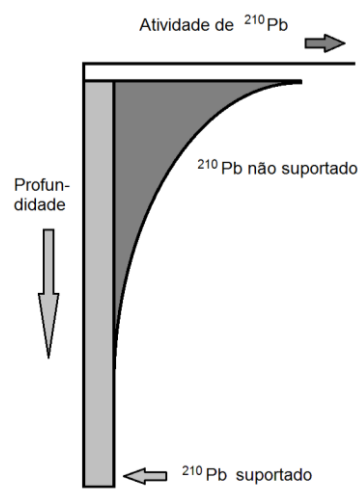
$$[^{210}\text{Pb}(\text{exc.})] = [^{210}\text{Pb}(\text{total})] - [^{210}\text{Pb}(\text{sup.})]$$

Em termos práticos, diferentemente do  $^{210}\text{Pb}$  suportado que se encontra em equilíbrio radioativo com  $^{226}\text{Ra}$ , o  $^{210}\text{Pb}$  em excesso apresenta uma estreita relação com os processos sedimentares. Dessa forma, pressupõe-se que, com a deposição e o soterramento dos sedimentos, o aporte atmosférico de  $^{210}\text{Pb}$  seja interrompido, passando então a existir uma distribuição vertical, onde a atividade do  $^{210}\text{Pb}$  em excesso decresce exponencialmente com a profundidade até se igualar a atividade do  $^{226}\text{Ra}$  num período aproximado de 150 anos (LUBIS, 2006).

### 2.2.3 Modelos para datação com $^{210}\text{Pb}$

A concentração de  $^{210}\text{Pb}$  em excesso na coluna sedimentar apresenta uma relação inversamente proporcional com a profundidade. Esta relação se dá na forma de decaimento exponencial em função do tempo, onde as concentrações de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado estão ajustadas com a meia-vida do radionuclídeo e as taxas de sedimentação locais (ARGOLLO, 2001; MATSUMOTO, 1975; APPLEBY; OLDFIELD, 1992). Na Figura 6, é possível verificar a relação entre a atividade do  $^{210}\text{Pb}$  não suportado e a profundidade, representada por uma curva exponencial que descreve o comportamento do  $^{210}\text{Pb}$  na coluna sedimentar.

**Figura 6** – Curva exponencial do  $^{210}\text{Pb}$  demonstrando a relação atividade-profundidade



Fonte: Elaboração própria.

Com base na relação da atividade do  $^{210}\text{Pb}$  não suportado com a profundidade da coluna sedimentar, diversos autores desenvolveram modelos matemáticos para calcular a taxa de sedimentação (KRISHNASWAMY *et al.*, 1971; MATSUMOTO, 1975; ROBBINS; EDGINGTON, 1975; APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; SHUKLA; JOSHI, 1989; APPLEBY; OLDFIELD, 1992).

De maneira geral, os modelos desenvolvidos foram baseados em quatro princípios fundamentais:

- (1) o fluxo de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado para a interface água-sedimentos é constante;
- (2) a taxa de sedimentação permaneceu constante durante o período estudado;
- (3) a mobilidade do  $^{210}\text{Pb}$  é muito baixa, não havendo migração pós-deposicional;
- (4) a atividade do  $^{210}\text{Pb}$  suportado nos sedimentos independe da profundidade e pode ser considerada como constante.

Dentre os modelos utilizados no cálculo da taxa de sedimentação, destacam-se o *Constant Initial Concentration* – CIC (APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; MATSUMOTO, 1975) e o *Constant Rate of Supply* – CRS (APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; GOLDBERG, 1963; ROBBINS; EDGINGTON, 1975).

No modelo CIC, assume-se que o fluxo  $^{210}\text{Pb}$  não suportado da água para o sedimento é constante e que não houve variação significativa do aporte de sedimento para o corpo d'água nos últimos 150 anos. Nesse sentido, Cazotti *et al.* (2006) salientam que o fluxo atmosférico de  $^{210}\text{Pb}$  em uma dada região é controlado por fatores locais, geográficos e meteorológicos e tem sido considerado constante durante um período muito longo.

Segundo Ferreira *et al.* (2015), o modelo CIC é adequado para datação de sedimentos em reservatórios em virtude da relativa estabilidade encontrada nesses corpos d'água. Nesse modelo, a idade de cada camada de sedimento é calculada de acordo com a equação do decaimento radioativo, e a taxa de sedimentação é representada por valor médio para todo o período estudado, sem que haja informações acerca de variações temporais no aporte de sedimento.

Já o modelo CRS é aplicado quando o aporte de sedimentos é considerado variável ao longo do período investigado e o fluxo de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado na interface sedimento/água permanece constante. Geralmente, este modelo aplica-se aos ambientes de maior dinamismo hidrológico ou com intervenções antrópicas acentuadas (NERY, 2009; CAZOTTI *et al.*, 2006; FERREIRA *et al.*, 2015).

No modelo CRS, o cálculo da taxa de sedimentação é feito a partir da integração dos valores das atividades de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado considerando a profundidade de uma determinada camada de sedimento e a profundidade onde a atividade de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado se torna desprezível (NERY, 2009).

A Figura 7 demonstra um esquema utilizado na obtenção das taxas de sedimentação baseado no modelo CRS onde o cálculo da idade ( $t$ ) em um ponto  $x$  da coluna sedimentar é dado pela equação:  $t = \lambda^{-1} \cdot \ln (A_{\infty}/A_x)$ .

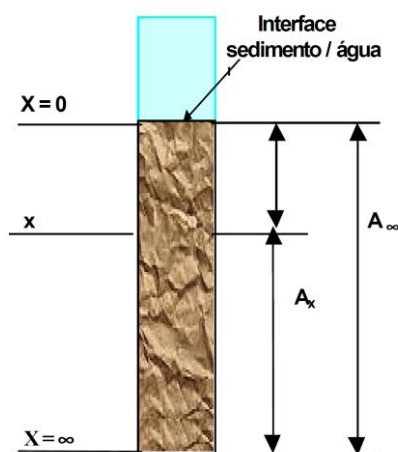
Onde:

$\lambda$  = constante de decaimento radioativo de  $^{210}\text{Pb}$  (que equivale a  $3,11 \times 10^{-2} \text{ ano}^{-1}$ );

$A_{\infty}$  = atividade integrada da superfície até  $A = 0$ ; e

$A_x$  = atividade integrada do ponto  $x$  até  $A = 0$ .

**Figura 7** – Esquema de obtenção das taxas de sedimentação de acordo com o modelo CRS



Fonte: Cazotti (2006).

Muito embora os modelos CIC e CRS considerem o fluxo de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado para interface sedimento/água uma constante, outro aspecto de grande importância para precisão e acurácia dos modelos é a mobilidade pós-deposicional do  $^{210}\text{Pb}$  na coluna sedimentar. Nesse sentido, Robbins e Edginton (1975), em estudos desenvolvidos no Lago Michigan, comparam a taxa de sedimentação obtida com  $^{210}\text{Pb}$  com outros métodos ( $^{137}\text{Cs}$ , estratigrafia e pólenes) e consideraram que a mobilidade do  $^{210}\text{Pb}$  na coluna sedimentar é muito baixa. Robbins *et al.* (1978) também relacionaram as taxas de sedimentação obtidas por  $^{210}\text{Pb}$  com aquelas obtidas por pólenes e consideraram que os resultados estavam concordantes.

### 3 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E FISIAGRÁFICOS DO ALTO-MÉDIO SÃO FRANCISCO

As lagoas marginais selecionadas para o desenvolvimento deste estudo localizam-se na Mesorregião Norte do estado de Minas Gerais, onde ocupam parte da planície de inundação no alto-médio curso do Rio São Francisco.

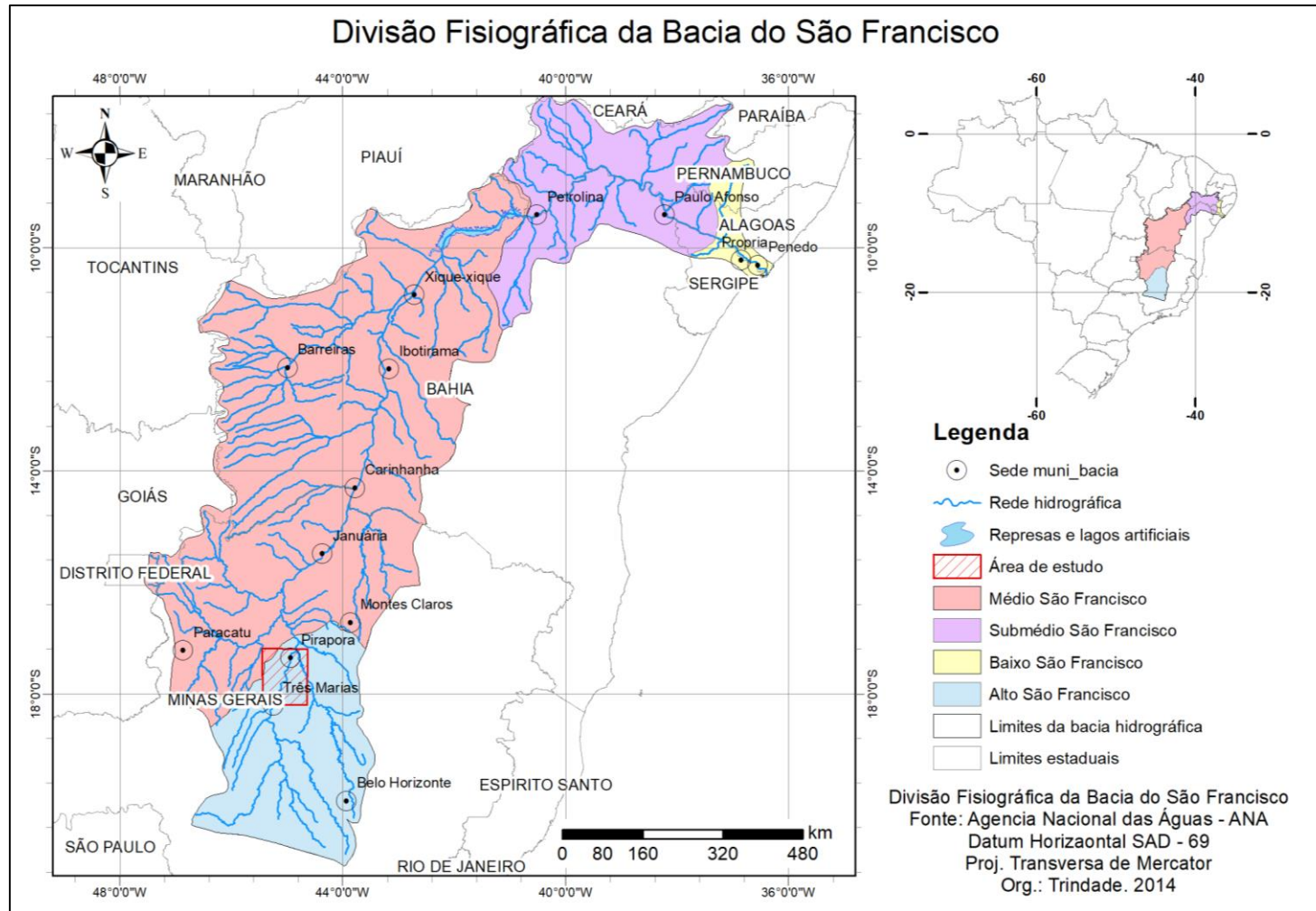
O Rio São Francisco, também conhecido como “Velho Chico”, flui por cinco estados brasileiros: MG, BA, PE, AL e SE. Sua bacia hidrográfica possui área de drenagem de 639.219 km<sup>2</sup> e o canal principal apresenta orientação Sul-Norte com extensão de 2.814 km (SILVA *et al.*, 2003).

Em função da área ocupada e da diversidade dos aspectos sociais, físicos e biológicos, a bacia do São Francisco foi subdividida pela Agência Nacional de Águas (ANA) em quatro regiões fisiográficas (FIGURA 8) denominadas Alto, Médio, Submédio e Baixo curso. Em conjunto, essas regiões abrangem cerca de 8% do território nacional, 503 municípios, parte do Distrito Federal e possuem população total de 16.144.032 habitantes (ANA, 2014).

A região fisiográfica Alto São Francisco inicia-se na nascente, localizada na Serra da Canastra em Minas Gerais, e estende-se até a jusante da cidade de Pirapora, compreendendo um segmento fluvial de 702 km de extensão. Esta região destaca-se por conter os maiores afluentes do São Francisco (Rios das Velhas, Paracatu e Urucuia), pelos altos índices de urbanização e contingente populacional da bacia. Em apenas 15,65% da área total da bacia (100.076 km<sup>2</sup>) há uma concentração de 41,69% da população (6.730.740 habitantes). Do ponto de vista econômico, destacam-se nesta região as atividades industriais, mineração, pecuária e geração de energia (BRASIL, 2006).

O Médio São Francisco inicia-se a jusante da cidade de Pirapora e segue por 1.230 km até a cidade de Remanso, no estado da Bahia. Esta região fisiográfica apresenta uma área de 402.531 km<sup>2</sup>, aproximadamente 63% da área total, e população de 5.117.293 habitantes, que representa cerca de 31,70% da população residente na bacia. O segmento do Rio São Francisco nesta região representa o principal percurso hidroviário, destacando-se no contexto hidrodinâmico pela não ocorrência de represamentos. As principais atividades econômicas encontradas nesta região são agricultura, com destaque para o perímetro irrigado de Petrolina, pecuária, indústria e aquicultura (BRASIL, 2006).

**Figura 8** – Regiões fisiográficas e localização da área de estudo no contexto da bacia hidrográfica do Rio São Francisco



Fonte: ANA (2014).



A região denominada Submédio São Francisco inicia-se na cidade de Remanso e estende-se até a cidade de Paulo Afonso, representando um trecho de 440 km de extensão e uma área de 110.446 km<sup>2</sup> (17%). Nesta região residem aproximadamente 2.455.768 habitantes, 15,21% da população total da bacia. As principais atividades econômicas desenvolvidas nesta região são agricultura, pecuária, agroindústria, mineração e geração de energia (BRASIL, 2006).

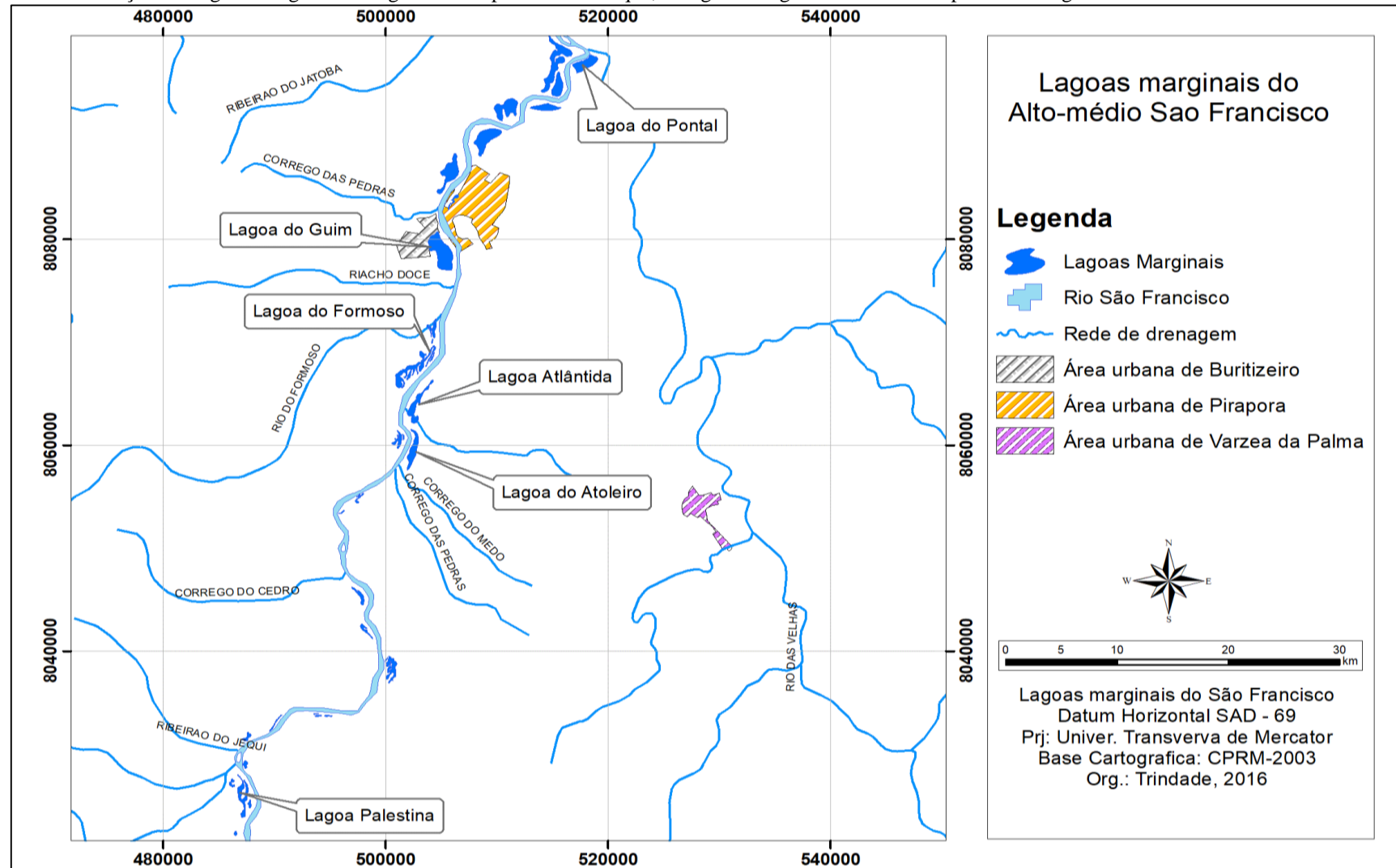
Por fim, a região fisiográfica denominada Baixo São Francisco inicia-se na cidade de Paulo Afonso e avança por 214 km até a desembocadura no Atlântico. Nesta região, encontram-se cerca de 11,40% da população residente na bacia (1.840.231 habitantes) em uma área de 25.523 km<sup>2</sup> (4% da área total). Este segmento fluvial, assim como o Médio São Francisco, é navegável e as principais atividades desenvolvidas são agricultura, pecuária, pesca e aquicultura (BRASIL, 2006).

Ao longo dos 2.814 km de extensão do Rio São Francisco, uma das unidades de paisagem mais características do sistema rio-planície são as lagoas marginais, destacando-se por sua relevância para a conservação da biodiversidade e, sobretudo, pelo seu papel de berçários para reprodução e repovoamento de peixes. Segundo Godinho e Pompeu (2003), no médio-curso do Rio São Francisco, apesar de as lagoas marginais constituírem os mais importantes *habitats* para as espécies de peixes migradoras, estão atualmente submetidas a constantes ameaças de contaminação e desaparecimento.

### **3.1 Localização e aspectos socioeconômicos da área de estudo**

No segmento fluvial de Três Marias até a confluência com o Rio das Velhas em Pirapora (aproximadamente de 160 km), ocorrem 50 lagoas marginais das quais 06 foram selecionadas para amostragem de sedimentos (FIGURA 9). Todas as lagoas encontradas neste segmento estão inseridas na faixa de inundação no alto-médio curso do Rio São Francisco, entre os paralelos 16° 57' S e 18° 21' S, apresentando diferentes processos de formação, diversas morfologias e áreas variando entre 2,4 e 462,00 hectares.

**Figura 9** – Localização das lagoas marginais na região de Pirapora. Em destaque, as lagoas marginais selecionadas para amostragem

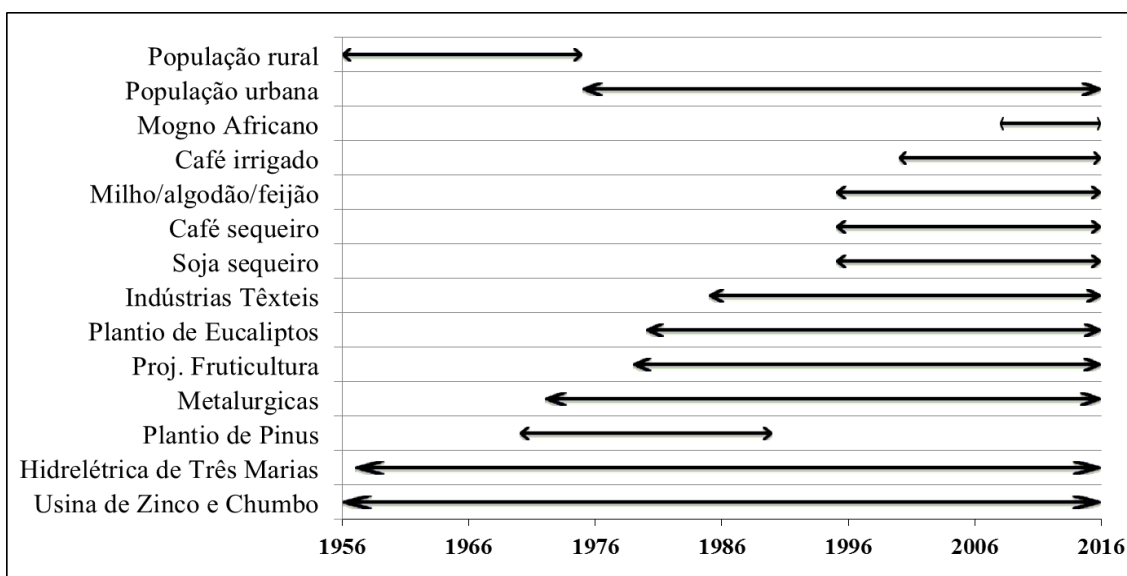


Fonte: Elaboração própria.

Do ponto de vista socioeconômico, as principais atividades encontradas na área de estudo refletem o processo de ocupação da região Norte de Minas Gerais, onde, a partir da década 1960, observou-se uma forte tendência desenvolvimentista, marcada principalmente pela implantação de políticas públicas e incentivos fiscais concedidos pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

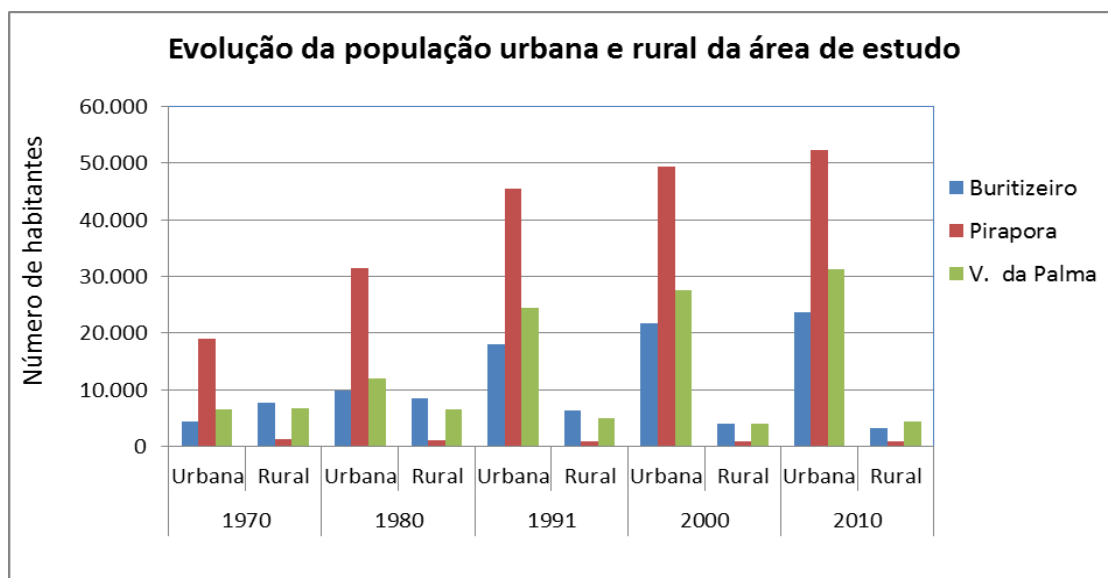
No contexto regional, as políticas públicas e os incentivos fiscais concedidos pela SUDENE produziram grandes alterações na paisagem natural que foram descritas e detalhadas por Baggio (2002), Gama (2006) e Pereira (2007). Neste trabalho, serão abordadas as de maior influência na área de estudo, que se encontram sumarizadas na Figura 10.

**Figura 10** – Linha do tempo das principais atividades antrópicas desenvolvidas na área de estudo



Fonte: Elaboração própria.

Na área de estudo, as transformações da paisagem produziram mudanças no ordenamento territorial. Pereira (2007) salienta que uma das principais transformações no ordenamento territorial foi a criação de polos industriais voltados para metalurgia nas cidades de Montes Claros, Pirapora, Várzea da Palma e Bocaiúva, bem como a implantação de grandes empreendimentos agrícolas na maioria dos demais municípios que compõem a região Norte de Minas. Tal reconfiguração do ordenamento territorial motivou uma rápida migração de pessoas do campo para as cidades, em meados da década de 1970. Decorridos pouco mais de 10 anos do início do projeto desenvolvimentista da SUDENE, a população, que era predominantemente rural, passou a se concentrar nas áreas urbanas, sobretudo nas cidades polos industriais.

**Figura 11** – Evolução da população rural e urbana dos municípios envolvidos na pesquisa

Fonte: Elaboração própria.

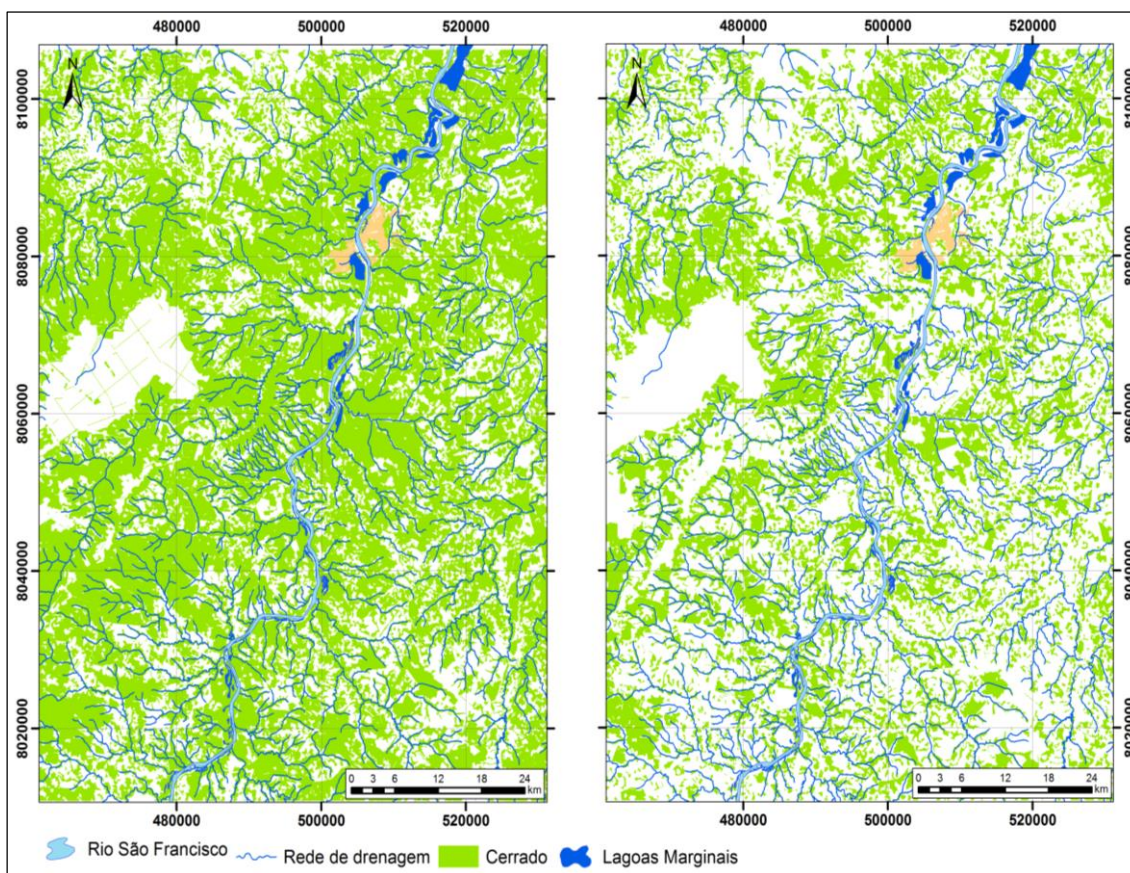
Segundo Baggio (2002), o rápido crescimento da população urbana no município pode ser entendido por fatores como: (i) crescimento da oferta de empregos no setor urbano em decorrência da implantação do setor industrial metalúrgico, ceramista e de bebidas no Município de Pirapora; (ii) crescimento do setor de serviços nos municípios de Pirapora e Buritizeiro; (iii) alteração da política agrícola com introdução de processos modernizantes para o setor; (iv) mudanças na política de definição de uso da terra com a introdução da silvicultura, indutora de mão de obra temporária; (v) criação da política de incentivos fiscais, que de certa forma priorizava os interesses dos grandes produtores.

Para Trindade (2007), esses fatores, aliados ao baixo custo da terra na região, facilitaram a obtenção de grandes glebas de terras por parte dos novos empreendedores e induziram a população rural a migrar para a cidade, gerando em pouco tempo problemas socioeconômicos, como concentração fundiária e desemprego. No campo, a pequena parcela da população rural passou a dividir o espaço físico e conviver com os grandes empreendimentos agrícolas, geralmente empresas reflorestadoras, em um novo contexto socioeconômico e ambiental.

Do ponto vista ambiental, a implantação dos novos empreendimentos agrícolas voltados para o “reflorestamento” utilizando pinus e eucaliptos conduziu à rápida supressão do cerrado (FIGURA 12) e ao desenvolvimento de diversos impactos ambientais (BAGGIO, 2002).

As monoculturas de pinus de eucaliptos ocuparam inicialmente áreas com cota topográfica acima de 750 m de altitude, predominantemente planas, denominadas, popularmente, como Chapadas “Gerais”. Nesse contexto, os primeiros impactos ambientais decorrentes da implantação destas monoculturas foram rapidamente percebidos com a descaracterização e o secamento das veredas (MELO, 2008), bem como na gênese e intensificação dos processos erosivos (TRINDADE, 2007).

**Figura 12** – Classificação multitemporal de Imagens LANDSAT 5 e 8 de 1985 e 2015 mostrando a redução do cerrado na área de estudo



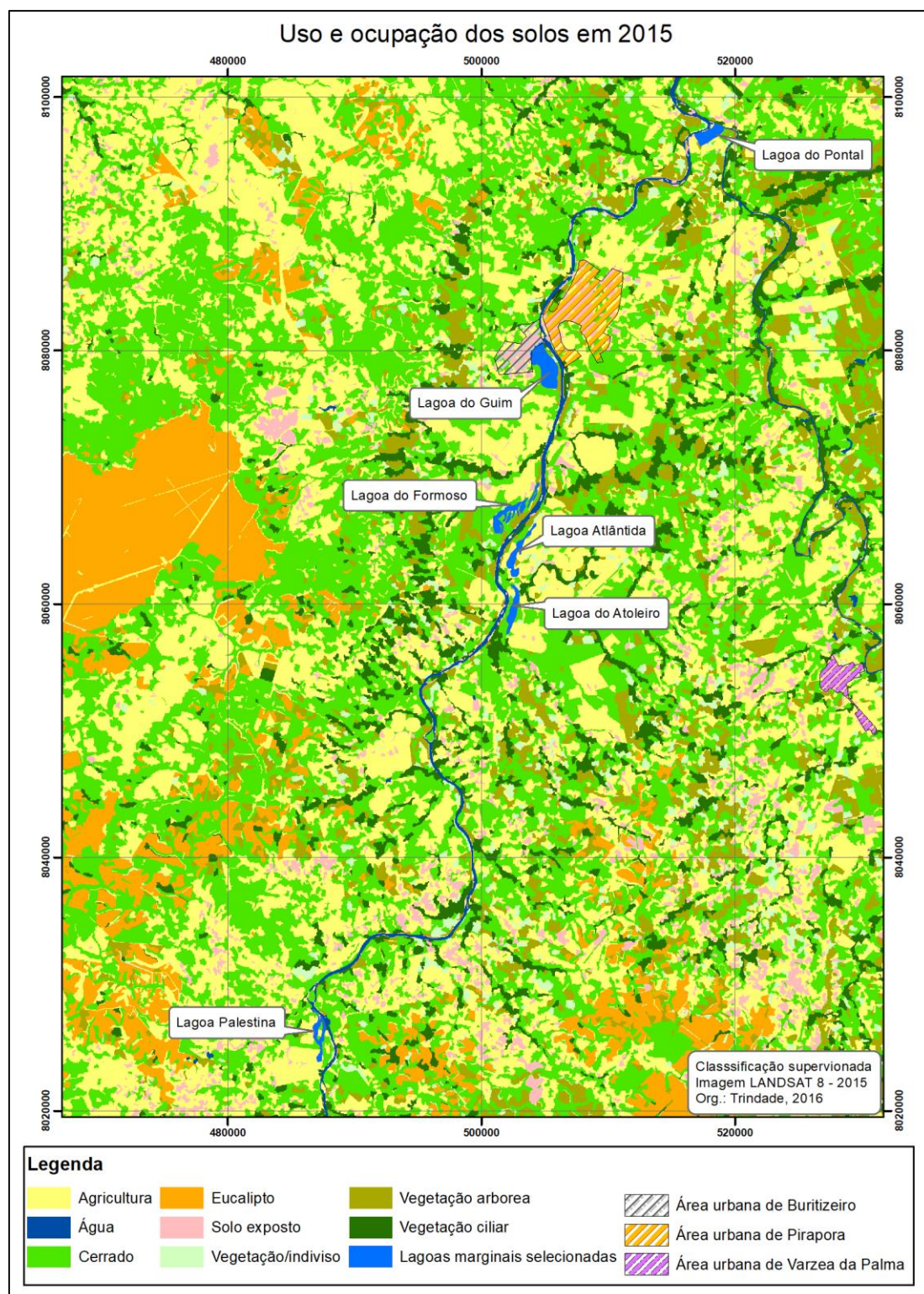
Fonte: Elaboração própria.

A partir da década de 1990, um novo pulso de desenvolvimento e modernização do setor agropecuário brasileiro promoveu mais transformações das paisagens e culminou com a intensificação e a diversificação dos cultivos na área de estudo. Nesta etapa, observa-se a introdução das monoculturas irrigadas de soja, milho e café (BAGGIO, 2002) nas áreas com cotas topográficas mais baixas próximas às drenagens.

Atualmente, as atividades agrícolas estão bem distribuídas, ocupando 31,36% da área, e a vegetação remanescente do cerrado, geralmente restrita às encostas mais

íngremes de menor interesse agrícola, representa 36,79% da cobertura vegetal na área de estudo (FIGURA 13).

**Figura 13** – Classificação multitemporal de Imagens LANDSAT 8 de 2015 mostrando o uso e ocupação da área de estudo

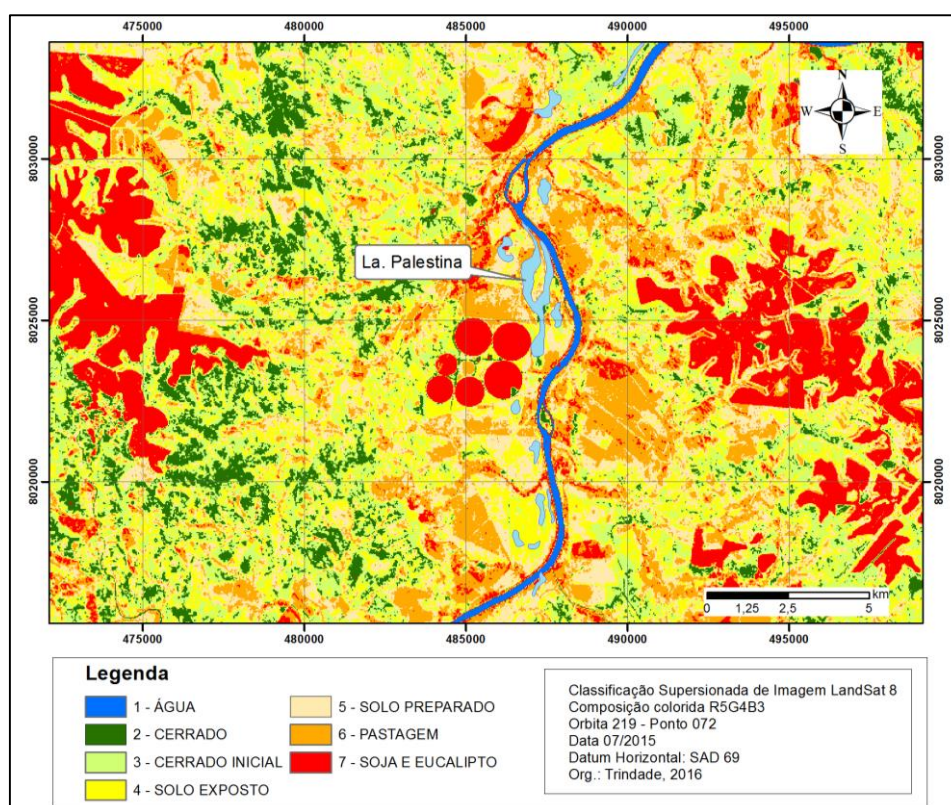


Fonte: Elaboração própria.

Localmente, as 06 lagoas marginais selecionadas encontram-se inseridas em diferentes contextos de uso e ocupação dos solos. Cada um desses usos possui uma assinatura geoquímica que permite estabelecer as contribuições pontuais destas atividades. A este respeito, Walker (2005) salienta que as diversas propriedades físicas e químicas dos sedimentos lacustres e dos lagos, propriamente ditos, fornecem evidências das mudanças que tiveram lugar não só dentro do sistema, mas também nas encostas das bacias de contribuição.

A Lagoa Palestina, localizada nas proximidades do distrito Sambaíba, município de Buritizeiro-MG, encontra-se circundada por culturas irrigadas de soja e milho, além de eucaliptais localizados nos topos das chapadas. Na Figura 14, é possível verificar a distribuição espacial das principais coberturas que, em julho de 2015, encontrava-se dominada pelas pastagens e solos expostos, seguidos pelo cerrado em diversos estágios e pelas culturas irrigadas e eucaliptos.

**Figura 14** – Uso e ocupação do solo no entorno da Lagoa Palestina

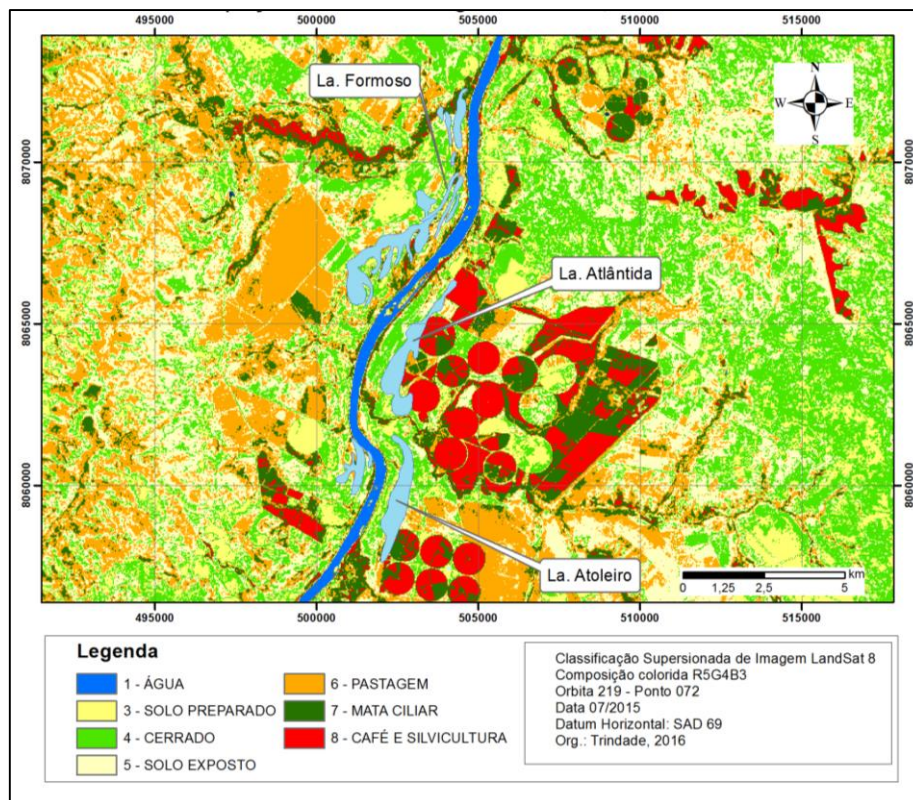


Fonte: Elaboração própria.

As lagoas Atoleiro, Atlântica e Formoso (FIGURA 15) localizam-se na área onde são encontradas muitas culturas irrigadas, principalmente café, cana-de-açúcar,

feijão e milho, além das plantações de eucaliptos e mogno africano. Na Figura 15, é possível verificar os aspectos gerais e a distribuição das principais coberturas em julho de 2015.

**Figura 15** – Uso e ocupação do solo no entorno das lagoas Atoleiro, Atlântica e Formoso

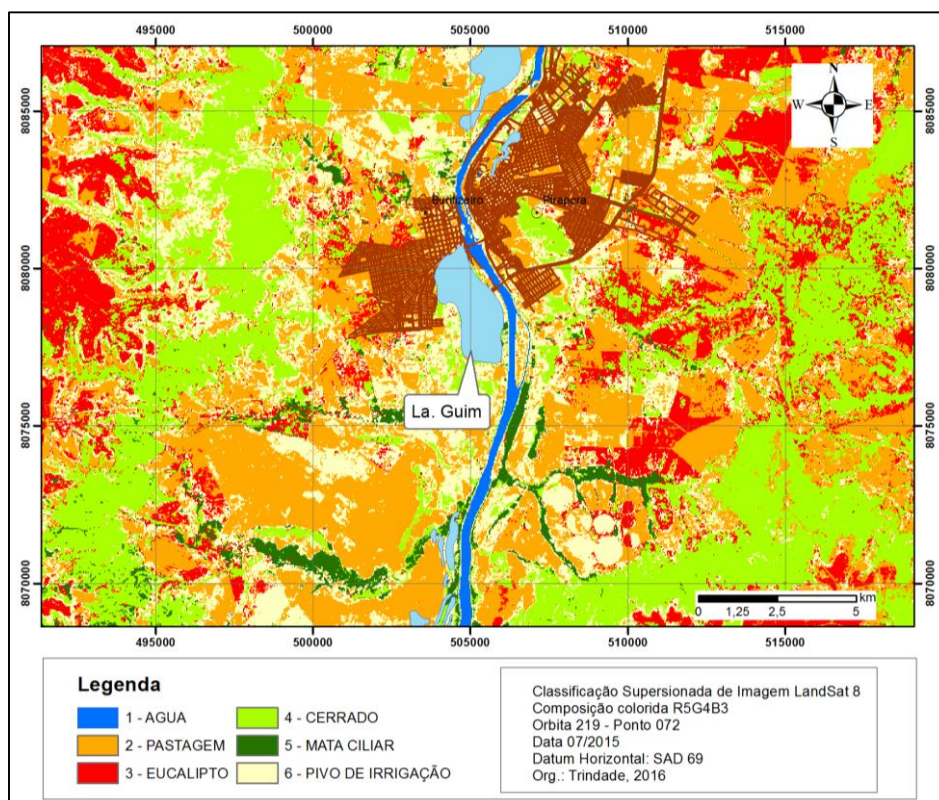


Fonte: Elaboração própria.

A Lagoa do Guim localiza-se na margem esquerda do Rio São Francisco, a montante da cidade de Pirapora. A principal atividade desenvolvida no seu entorno é a pecuária, que ocupa grandes extensões de terra (FIGURA 16). Nesta área, o uso e a ocupação dos solos são marcados pela ocorrência de pastagens, monoculturas de eucalipto, cerrado, culturas irrigadas, solos expostos e mata ciliar.



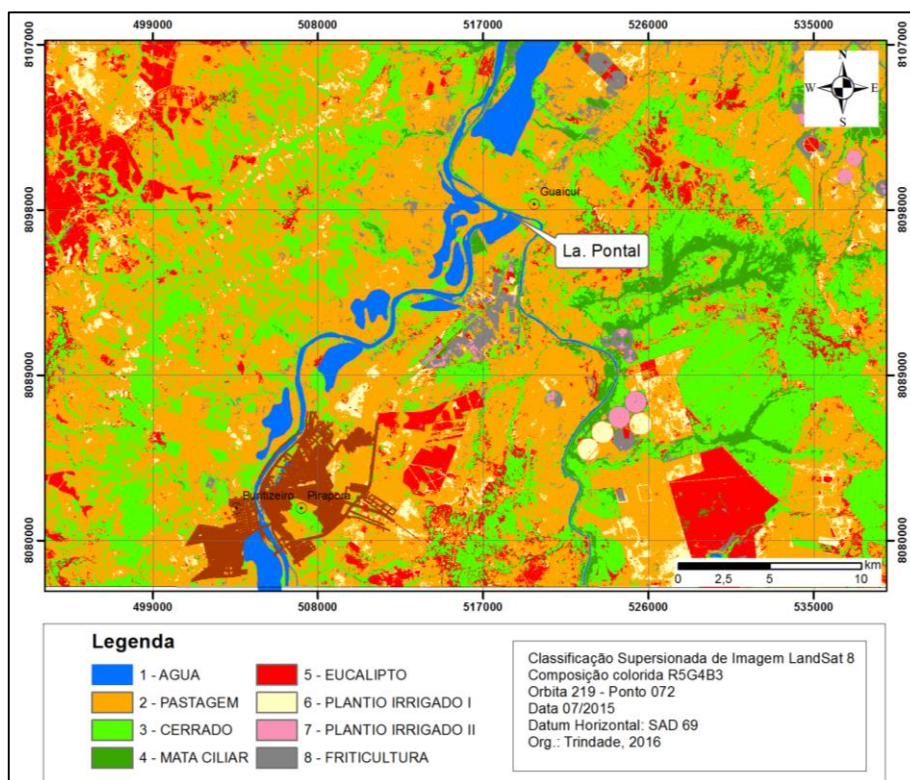
**Figura 16** – Uso e ocupação do solo no entorno da Lagoa do Guim



Fonte: Elaboração própria.

A jusante da cidade de Pirapora encontra-se a Lagoa do Pontal, onde se destacam as atividades industriais (metalurgia e produção têxtil), fruticultura, monocultura de eucaliptos, cana-de-açúcar e pastagens (FIGURA 17). O uso e a ocupação dos solos nesta área são caracterizados pela ocorrência predominante de pastagens e solo exposto, incluindo a área urbana de Pirapora, seguida pelo cerrado bastante descaracterizado, monoculturas de eucaliptos e culturas irrigadas (soja, milho e fruticultura).

**Figura 17** – Uso e ocupação do solo no entorno da Lagoa do Pontal



Fonte: Elaboração própria.

### 3.2 Geologia regional

A região estudada está inserida na Bacia Intracratônica do São Francisco, definida por Alkimin e Martins-Neto (2001) como a porção sul do cráton homônimo. Esta porção encontra-se coberta por unidades sedimentares (bacias sucessoras) com idades inferiores a 1.8 Ga, demonstrando o caráter poli-histórico da Bacia do São Francisco.

A compreensão dos aspectos geológicos regionais somente é possível a partir da investigação de eventos tectônico-sedimentares responsáveis pela estruturação do Cráton do São Francisco, sobretudo aqueles decorrentes do Ciclo Brasileiro (600 Ma). Para Almeida (1977; 1981), o Cráton do São Francisco representa uma das porções da Plataforma Sul-Americana individualizada em decorrência dos processos orogênicos do Evento Brasileiro. Tais eventos originaram a leste a Faixa Araçuaí (FDA) e, a oeste, a Faixa de Dobramento Brasília (FDB), que, atualmente e ao longo dos diversos estágios de preenchimento da bacia sedimentar, funcionaram como altos estruturais.

A bacia sedimentar do São Francisco é interpretada por Dominguez (1993) como o *locus* deposicional dos sedimentos neoproterozoicos, distinguindo-se da Bacia

Sanfranciscana, que representa a área de deposição das coberturas fanerozoicas (SGARBI, 1989; 1991; SGARBI *et al.*, 2001).

As unidades neoproterozoicas encontradas na área de estudo pertencem ao Grupo Bambuí e são localmente representadas pela Fm. Três Marias e com menor ocorrência dos litotipos do Subgrupo Paraopeba. Já as unidades fanerozoicas são representadas principalmente pelo Grupo Areado (FIGURA 18).

Segundo Chiavegatto (1992), a Fm. Três Marias constitui uma espessa sequência tempestífica com relativa persistência lateral composta por arenitos arcoseanos de granulometria fina a muito fina, intercalados por siltitos arcoseanos cinza-esverdeados e violáceos, com contatos discordantes erosivos e idade aproximada de 650 a 600 Ma. Os litotipos desta formação ocorrem em grande parte na área de estudo e representam o substrato regional para os principais canais fluviais. Quando afloram em áreas mais elevadas, geralmente formam os interflúvios das sub-bacias.

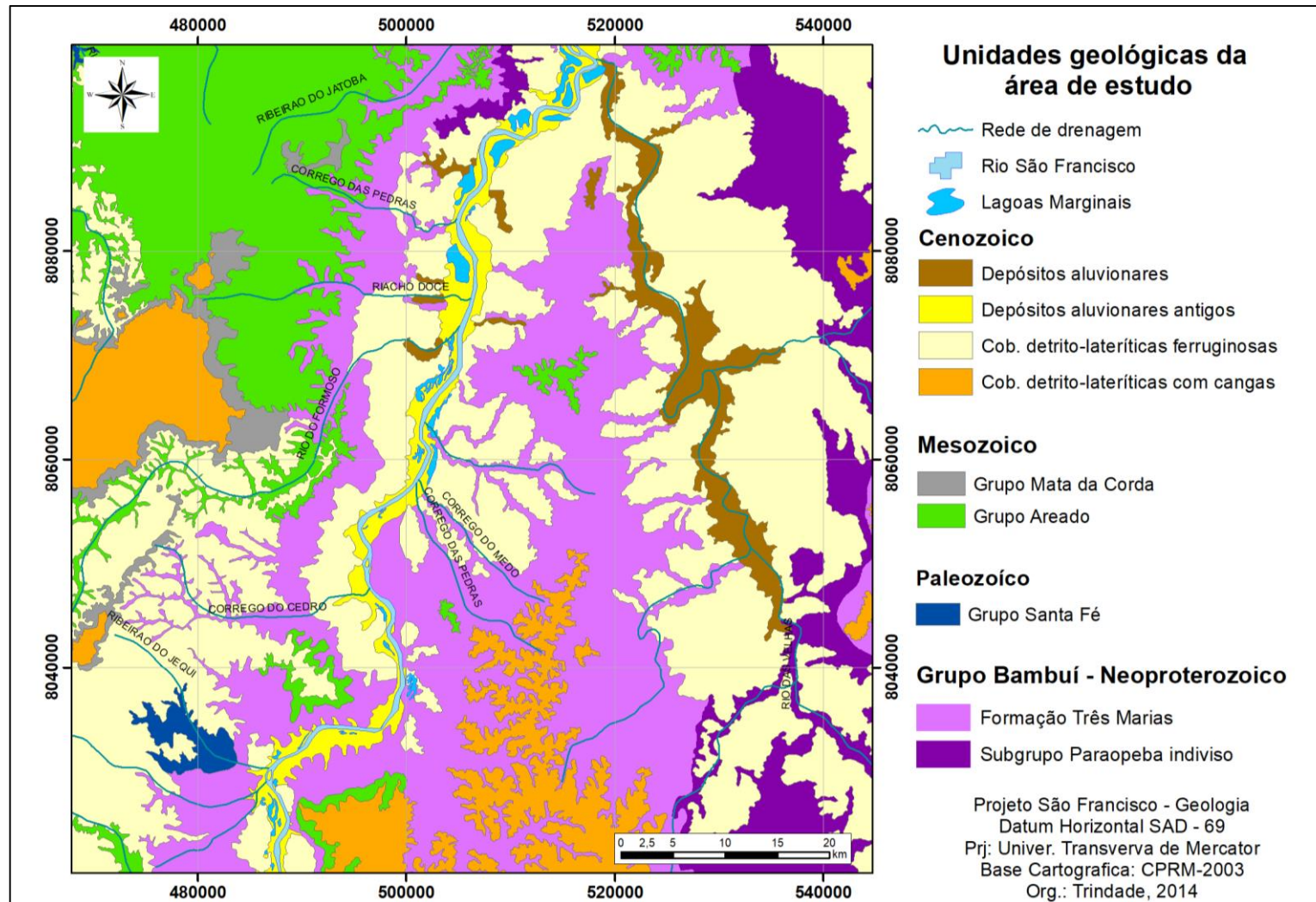
Sotopostos à Fm. Três Marias encontram-se os litotipos do Subgrupo Paraopeba, que correspondem às Formações Serra da Saudade, Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena e Sete Lagoas, sendo caracterizadas basicamente por siltitos, folhelhos e margas intercalados por calcários e dolomitos. Tais litotipos ocorrem de forma mais restrita formando elevações pontuais nas porções leste e norte da área de estudo.

Unidades fanerozoicas ocorrem sobrepostas aos litotipos do Grupo Bambuí e são representadas, cronologicamente, pelos Grupos Santa Fé (Permo-carbonífero), Areado (Cretáceo inferior), Mata da Corda (Cretáceo superior) e pelas coberturas e depósitos aluvionares do quaternário. O Grupo Santa Fé é composto por arenitos, siltitos, argilitos e diamictitos (tilitos e tiloides) (CAMPOS; DARDENNE, 1999) e ocorre pontualmente no Ribeirão do Jequi, nas proximidades da Lagoa Palestina (FIGURA 18).

O Grupo Areado, constituído pelas Formações Abaeté, Quiricó e Três Barras, é representado na área de estudo pelos arenitos fluvio-eólicos da Fm. Três Barras. Segundo Sgarbi (1989), estes litotipos indicam um paleoambiente com aridez crescente na Bacia Sanfranciscana correlativo ao grande deserto no Cretáceo Inferior.

De ocorrência mais restrita, o Grupo Mata Corda é representado na área de estudo pelos arenitos vulcano-clásticos da Fm. Capacete que são observados nas bordas do Chapadão dos Gerais, porção sudoeste da região, onde se encontram oxidados e recobertos por níveis de lateritas ferruginosas, cuja resistência aos processos denudacionais tem sustentado as bordas das chapadas na região (TRINDADE *et al.* 2006).

**Figura 18** – Mapa geológico simplificado da área de estudo. As lagoas marginais estão inseridas no domínio dos depósitos aluvionares antigos



Fonte: Elaboração própria.

O Cenozoico é representado na área de estudo pelas coberturas detrito-lateríticas ferruginosas com concreções, pelas coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e pelos depósitos aluvionares. As coberturas detrito-lateríticas ferruginosas com concreções são encontradas nas cotas mais elevadas da área de estudo, geralmente acima de 700 metros de altitude, e são constituídas por sedimentos inconsolidados de coloração avermelhada com ocorrência de níveis de cangas lateríticas. Tais coberturas diferem das coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, pois as últimas são encontradas em menores cotas topográficas, geralmente abaixo de 600 m, onde não se observa a mesma ocorrência de cangas lateríticas.

Além das coberturas, são encontrados na área de estudo os depósitos aluvionares antigos e os depósitos aluvionares (pleistoceno e holoceno, respectivamente). Os primeiros ocorrem ao longo do Rio São Francisco, desde a confluência com o Rio Abaeté até a confluência com o Rio Paracatu, formando superfícies planas compostas por sedimentos de granulometria predominantemente silto-arenosa. Já os depósitos aluvionares, de menor ocorrência, são sedimentos mais grosseiros, areia e cascalhos que resultam da deposição de sedimentos ao longo das planícies de inundação.

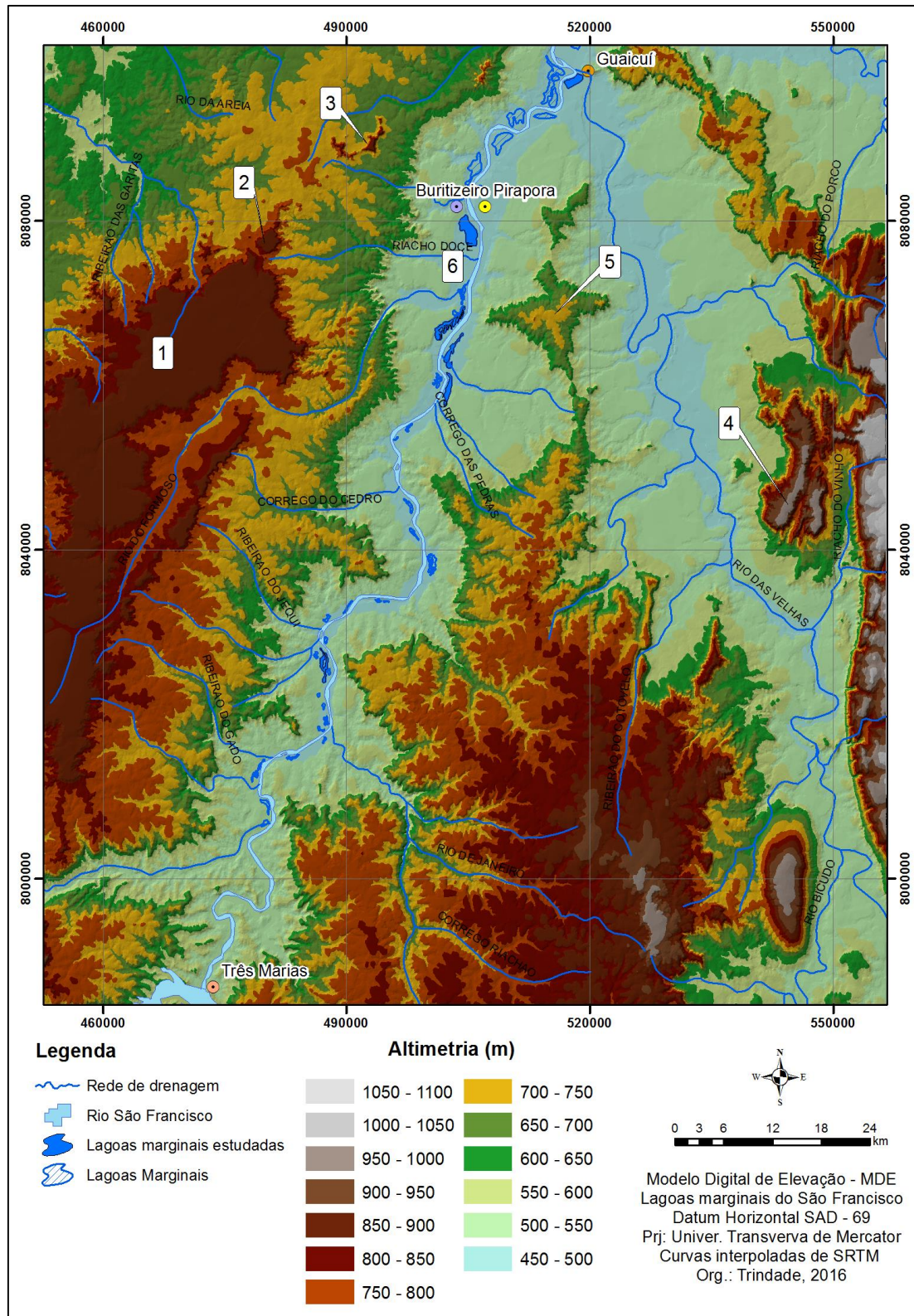
No contexto geológico, as lagoas marginais estão predominantemente associadas aos depósitos aluvionares antigos, os quais ocupam 426,03 km<sup>2</sup> na margem esquerda do Rio São Francisco e 168,18 km<sup>2</sup> na margem direita.

### **3.3 Geomorfologia regional**

As macroformas de relevo encontradas na área de estudo são fortemente influenciadas pelo arcabouço litoestrutural do Neoproterozoico e por reativações tectônicas mais recentes, que, em boa medida, condicionam e controlam o desenvolvimento da rede de drenagem.

Para Valadão (1998), a megageomorfologia do Brasil oriental é pontuada por ciclos de denudação de longa duração e soerguimentos neocenoicos que culminaram na elaboração de três amplas superfícies de aplainamento geneticamente associadas denominadas Superfícies Sul-americana, Sul-americana I e Sul-americana II (FIGURA 19). Mesmo se considerando as controvérsias envolvidas nos debates sobre o tema das superfícies de aplainamento, presentes na literatura e no meio científico, os níveis de aplainamento mencionados são aqui adotados como referências morfológicas e hipsométricas, dada a sua representatividade regional.

**Figura 19** – Modelo Digital de Elevação e os remanescentes das superfícies de aplainamento. Superfície Sul-americana



Legenda: 1. Chapadão dos Geraís, 2. Morro do Chapéu, 3. Serra do Jatobá, 4. Serra da Piedade. Superfície Sul-americana I (5. Morro do Trinchet) e Sul-americana II (6. Depressão Sanfranciscana).

Fonte: Elaboração própria.

Tomando as informações do trabalho de Valadão (*op. cit.*) como referenciais para os níveis morfológicos regionais, os remanescentes da Superfície Sul-americana estão representados na área de estudo por relevos tabulares com cotas topográficas variando entre 800 e 900 m localmente conhecidos como Chapadão dos Gerais, Morro do Chapéu e Serra do Jatobá. Estas feições encontram-se sobrepostas aos litotipos cretácicos dos Grupos Areado e Mata da Corda, associadas a espessos mantos de alteração, aos Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo e a níveis concrecionários (FIGURA 20).

**Figura 20** – Níveis concrecionários que bordejam os remanescentes da Superfície Sul-americana na área de estudo



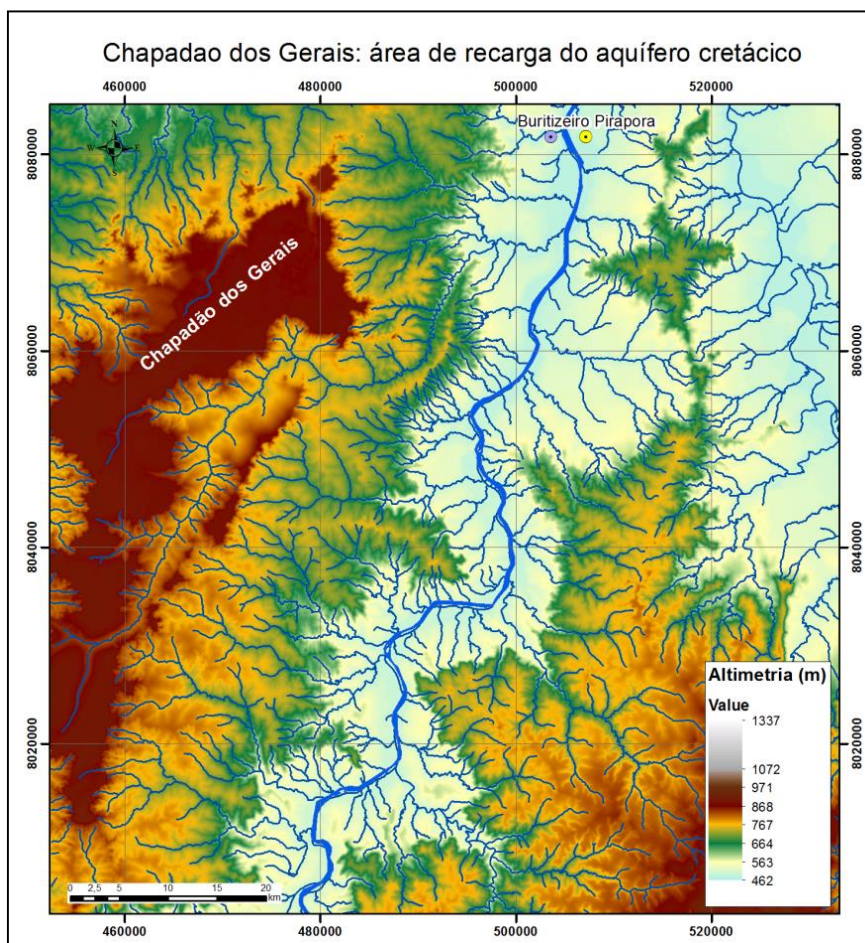
Fonte: Acervo da pesquisa.

O Chapadão dos Gerais seria o registro espacial mais extenso dos remanescentes da Superfície Sul-americana encontrados na área de estudo, conforme Valadão (1998). Com aproximadamente 500 km<sup>2</sup>, o Chapadão dos Gerais apresenta escarpas abruptas geralmente capeadas por níveis concrecionários que lhes conferem maior resistência ao avanço da rede de drenagem, fazendo com que esta feição sobressaia na topografia regional (TRINDADE *et al.*, 2006).

Além dos aspectos morfológicos, os topos das chapadas associados aos remanescentes da Superfície Sul-americana constituem importantes áreas de recarga dos aquíferos cretáceos e contribuem significativamente para a dinâmica hídrica regional, fornecendo água para a maioria das veredas encontradas na área de estudo (FIGURA 21).

Conforme Melo (2008), as veredas do Chapadão dos Gerais são subsistemas que mantêm as interações ecológicas e hidrológicas que perpassam no sistema biogeográfico do cerrado brasileiro. Na área de estudo, fica evidenciado o importante papel das veredas na conservação da biodiversidade regional e na perenização de córregos e rios.

**Figura 21** – Chapadão dos Gerais; remanescente da Superfície Sul-americana



Nota: No contexto hídrico regional, o Chapadão dos Gerais é uma importante área de recarga e descarga. Notar o grande número de cursos d'água que nascem no sopé das escarpas.

Fonte: Elaboração própria, a partir de Valadão (1998).

As cotas intermediárias variando entre 700 e 750 m estariam associadas a remanescentes da Superfície Sul-americana I (FIGURA 18). De acordo com Valadão (1998), entre as três superfícies de aplainamento, cujos remanescentes são encontrados no Brasil Oriental, os referentes à Sul-americana I são os que se encontram em avançado estágio de denudação, chegando a dificultar o reconhecimento em campo. Na região de Pirapora, os principais vestígios desta superfície estariam sobrepostos aos litotipos neoproterozoicos do



Grupo Bambuí, sobretudo aos arenitos arcoseanos da Formação Três Marias, e são encontrados nos interflúvios São Francisco-Velhas e São Francisco-Paracatu. Nestas áreas, os vestígios da Superfície Sul-americana I ocorreriam associados aos neossolos quartzarênicos e aos Latossolos Vermelho-Amarelo, formando áreas planas geralmente ocupadas por eucaliptais e pastagens (FIGURA 22).

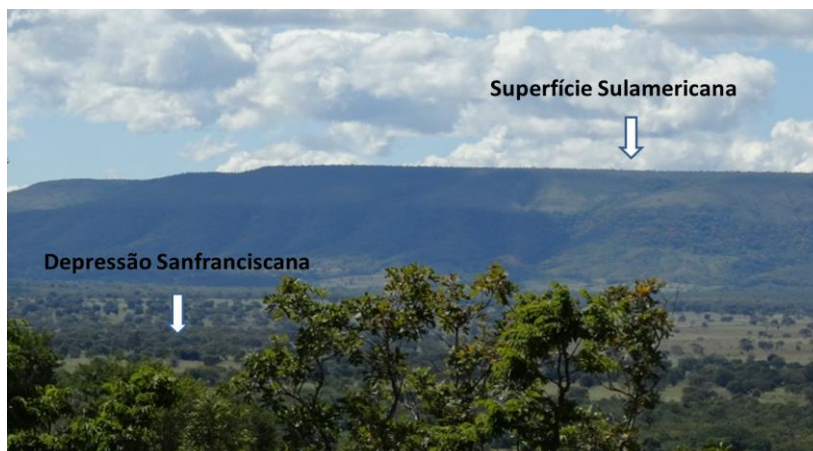
**Figura 22** – Morro do Trinchet, remanescente da Superfície Sul-americana I



Nota: Atualmente o Morro do Trinchet está recoberto por eucalipto. Em primeiro plano, Lagoa marginal do Guim.  
Fonte: Acervo da pesquisa.

Os remanescentes da Superfície Sul-americana II, em contraposição aos da Sul-americana, ocupariam as partes mais baixas do relevo regional, geralmente no piso da Depressão Sanfranciscana, entre as cotas altimétricas 500 e 600 m (FIGURA 23). Estes remanescentes ocorrem principalmente sobrepostos aos litotipos da Fm. Três Marias que constituem o nível de base regional para as principais calhas fluviais na área de estudo.

**Figura 23** – Depressão Sanfranciscana atualmente ocupada por pastagens e agricultura irrigada; ao fundo, remanescente da Superfície Sul-americana com plantio de eucalipto



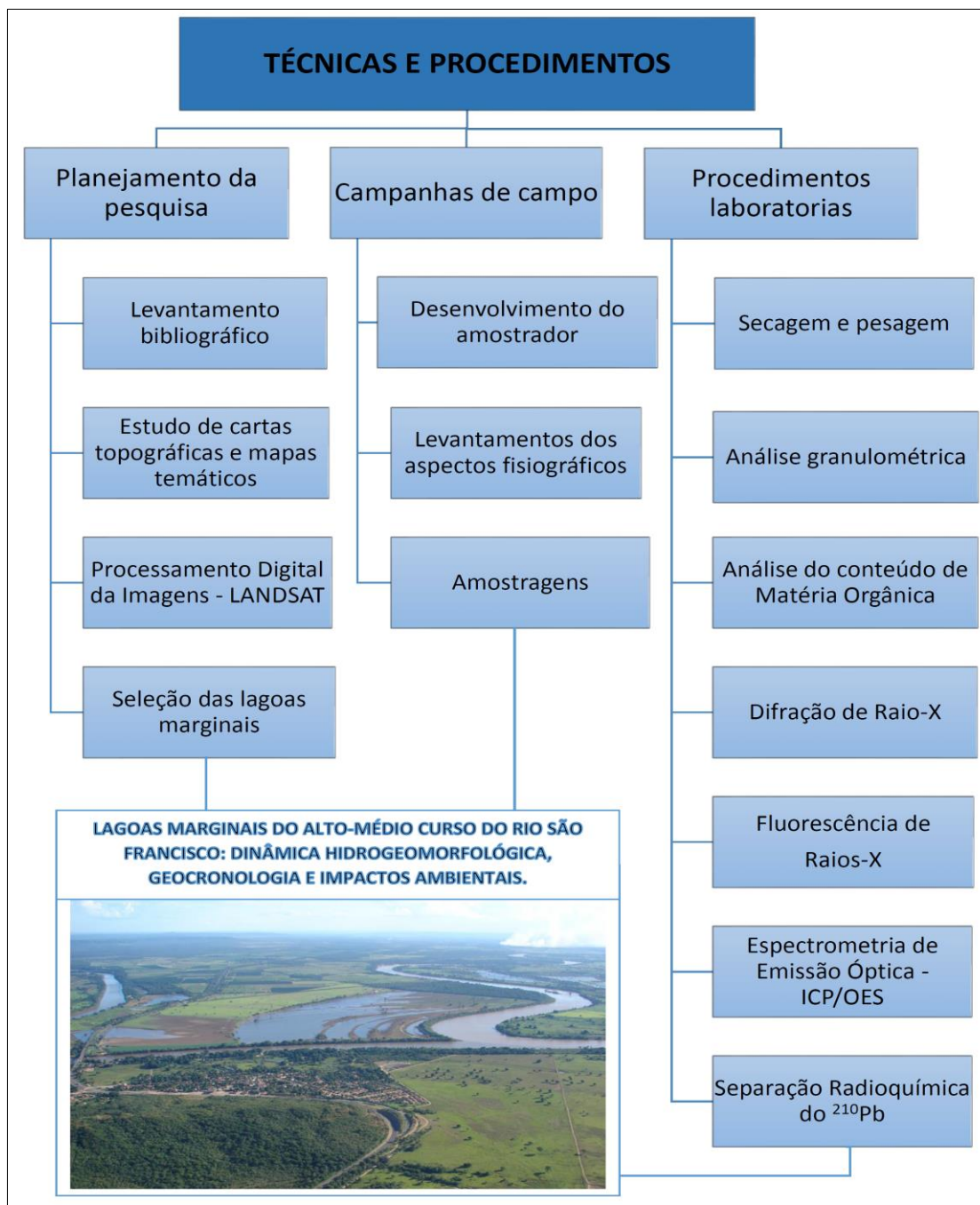
Fonte: Acervo da pesquisa.

Segundo Valadão (1998; 2009), os vestígios da Superfície Sul-americana II, comparativamente aos demais encontrados no Brasil oriental, apresentam maior extensão geográfica e resultaram dos soerguimentos pliocênicos que interromperam a elaboração da Superfície Sul-americana I. Na região de Pirapora, estes vestígios estariam bastante retrabalhados pela rede de drenagem atual, interdigitados com as planícies de inundação dos principais rios regionais. Esta condição favorece o uso agrícola destas áreas, principalmente a implantação de amplas pastagens destinadas à pecuária extensiva.

## 4 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, os métodos e as técnicas foram agrupados em etapas de (1) planejamento da pesquisa e identificação das lagoas marginais, (2) trabalhos de campo e amostragens e (3) análises e procedimentos laboratoriais (FIGURA 24).

**Figura 24** – Fluxograma das técnicas e procedimentos adotados na pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

## **4.1 Planejamento da pesquisa de campo e identificação das lagoas**

Na fase de planejamento da pesquisa, realizou-se o reconhecimento de aspectos fisiográficos (geologia, solos, relevo e vegetação) a partir de mapas e cartas disponibilizadas por órgãos oficiais, relatórios técnicos e trabalhos acadêmicos desenvolvidos na área de estudo.

Foram consultadas cartas geológicas – Folha SE.23-V-D-VI - Chapadão dos Gerais na escala 1:100.000 (CPRM, 2002); Folha - SE.23-X-C-I - Pirapora na escala 1:100.000 (CODEMIG, 2013); Folha SE.23 -Y-B - Três Marias na escala 1:250.000 (CPRM, 2002) –; Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais na escala 1:1000.000 (COMIG/CPRM, 2003); Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais do CETEC (2010) escala 1:1.000.000; Cartas Topográficas do IBGE – SGE na escala 1:100.000; Mapa da Flora Nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais – UFLA/IEF (2005), escala 1:1.000.000; e imagens orbitais do Sistema LANDSAT 5 e 8.

### **4.1.1 Identificação das lagoas marginais e mapeamento do uso e da ocupação dos solos**

Para identificar e mapear as lagoas marginais, foram aplicadas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) em cenas do sistema LANDSAT 5 dos anos 1992 e 2001. A escolha dos anos e das cenas foi baseada nas vazões médias anuais e nos índices pluviométricos medidos na estação de Pirapora.

Em 1992 e 2001 foram registradas, respectivamente, as maiores e menores médias de vazões e precipitações da série histórica 1983-2012, correspondendo ao período no qual é possível encontrar dados de vazão, precipitação e imagens orbitais com resolução adequada aos objetivos do estudo. Em 1992, a vazão média anual alcançou 1.352,95 m<sup>3</sup>/s e a precipitação foi de 2.016 mm/ano. Em contraposição, 2001 foi o ano mais seco da série histórica analisada, quando a vazão média anual foi de 449,92 m<sup>3</sup>/s e a precipitação de 1.055 mm/ano.

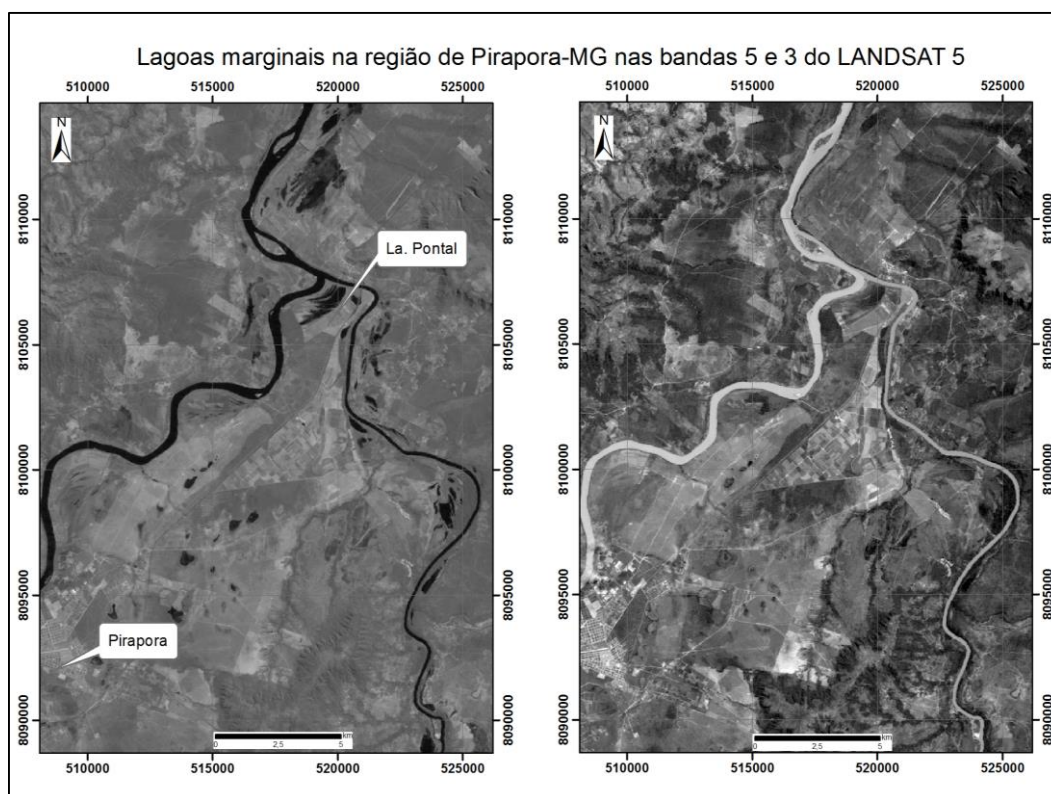
Entre os anos selecionados, buscou-se adquirir cenas representativas das estações úmida e seca. Entretanto, na estação úmida a cobertura de nuvens dificulta a aquisição de imagens adequadas para o mapeamento da área de estudo. Sendo assim, foram selecionadas e processadas imagens LANDSAT 5 órbita 218 ponto 072 que apresentavam menor cobertura

de nuvens e possibilitaram identificar as lagoas marginais, calcular a área ocupada e visualizar a interação das lagoas marginais com o canal fluvial.

As imagens do sistema LANDSAT 5 são consideradas de média resolução, cada pixel cobre uma área de 900 m<sup>2</sup> (30m x 30m) que representa o tamanho do menor objeto visto na imagem. Estas imagens são bastante utilizadas em análises espaço-temporais, pois possuem um considerável acervo e são gratuitamente disponibilizadas.

Para caracterização de corpos hídricos, destacam-se as bandas (canais) 4 e 5, infravermelho próximo e médio, em virtude da resposta espectral dos corpos d'água (FIGURA 25). Nestas bandas os corpos hídricos aparecem bastante escurecidos, pois absorvem praticamente toda a energia radiante incidente em contraposição aos solos e à vegetação, que refletem parte da energia nos comprimentos de onda entre 740 e 2.500 nm (JENSEN, 2000).

**Figura 25** – Identificação de lagoas marginais na região de Pirapora. A figura mostra a comparação entre as Bandas 5 e 3 do LANDSAT 5



Fonte: Elaboração própria.

Na etapa de identificação das lagoas marginais, imagens selecionadas foram submetidas a Classificação Supervisionada no *software* ENVI 4.3. Este tipo de classificação

requer o conhecimento prévio das feições identificadas, sendo que o usuário pode selecionar áreas de interesse e fazer a coleta de amostras (*pixels*) correspondente a cada tipo de cobertura (água, solo, vegetação etc.).

Para classificar as imagens, utilizou-se o classificador Maxver (máxima verossimilhança), cujo resultado apontou a ocorrência de 50 corpos hídricos com características espectrais e morfológicas típicas de lagoas marginais na área de estudo.

Para identificar o uso e a ocupação dos solos, foram selecionadas imagem dos satélites LANDSAT 5 e 8 e processadas a partir do Índice de Vegetação por diferença Normalizada (NDVI) que, além de permitir a identificação da tipologia vegetal, possibilita medir a quantidade e a condição da vegetação em uma determinada área.

O resultado alcançado com o processamento das imagens foi validado a partir de levantamento de campo em 20% dos corpos d'água identificados na classificação supervisionada como lagoas marginais.

#### 4.1.2 Seleção das lagoas marginais

Com base nos usos e ocupação dos solos e no contexto hidrográfico regional, foram selecionadas para coleta dos testemunhos as lagoas marginais Palestina, Atoleiro, Atlântica, Formoso, do Guim e do Pontal (TABELA 5). Estas lagoas, além de receberem os sedimentos de montante transportados pelo São Francisco, apresentam-se circundadas por distintos usos e ocupação dos solos que lhes conferem uma assinatura geoquímica específica e localizam-se em segmentos fluviais onde foram observadas significativas intervenções antrópicas.

**Tabela 5 – Descrição e localização das lagoas marginais selecionadas**

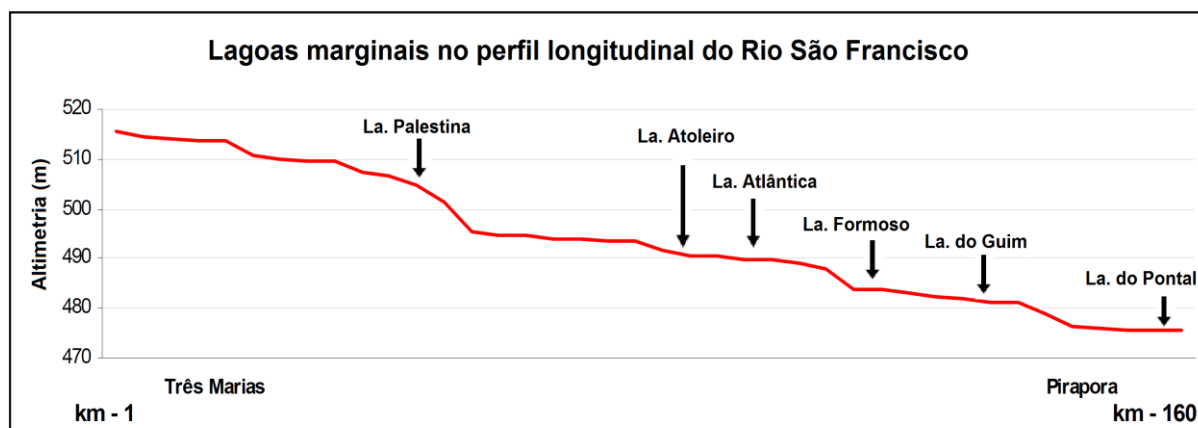
IDENTIFICAÇÃO	USO DO SOLO	COORDENADAS*	ÁREA ALAGADA (ha)
Lagoa Palestina	Soja e milho irrigados	X - 486886,920 Y - 8026261,737	148,90
Lagoa Atoleiro	Pastagem natural /pecuária e café irrigado	X - 502518,462 Y - 8059542,042	160,12
Lagoa Atlântida	Café irrigado e silvicultura-mogno	X - 502990,204 Y - 8064488,788	181,00
Lagoa Formoso	Pecuária intensiva - Pastagem	X - 504099,419 Y - 8069160,910	45,50
Lagoa do Guim	Pastagem natural-pecuária extensiva	X - 505242,605 Y - 8078820,505	462,30
Lagoa do Pontal	Cana de açúcar/urbano/indústria	X - 518015,781 Y - 8097061,500	190,00

\*As coordenadas métricas (UTM) apresentadas foram coletadas com receptor GPS-Garmin 60SCX-map no Datum horizontal SAD-69 – Fuso/zona 23k e indicam o ponto de coleta em cada lagoa.

Fonte: Elaboração própria.

No contexto fluvial, as lagoas marginais selecionadas contemplam os segmentos alto, médio e baixo curso entre Três Marias e Pirapora (FIGURA 26). Neste segmento de aproximadamente 160 km de extensão, não são observadas grandes variações topográficas, em concordância com as declividades médias do relevo regional (5% de declividade).

**Figura 26** – Distribuição espacial das lagoas marginais no perfil longitudinal do Rio São Francisco



Lagoas marginais da margem direita: Atoleiro, Atlântica e Pontal.  
Lagoas marginais da margem esquerda: Palestina, Formoso e Guim.

Fonte: Elaboração própria

## 4.2 Trabalhos de campo e amostragem

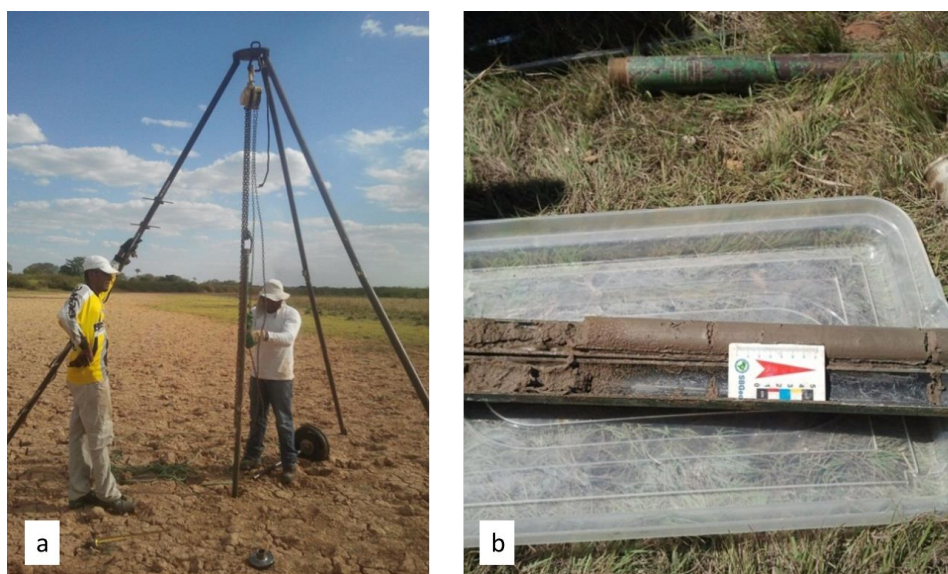
A recuperação de testemunhos de sedimentos, curtos ou longos, depositados em lagoas marginais para avaliação da evolução dos contaminantes requer planejamento e logística que considerem a sazonalidade e a aplicação de técnicas de amostragem que conservem a estratigrafia das camadas. Nesse sentido, a amostragem dos sedimentos foi realizada na estação seca, entre julho e agosto de 2013, quando a lâmina d'água possui menor espessura, possibilitando chegar até o ponto mais central e recuperar uma coluna estratigráfica mais representativa.

Além de considerar os aspectos sazonais, para realização deste trabalho, foi necessário desenvolver um testemunhador de fácil manuseio e transporte que alcançasse camadas sedimentares em profundidade superiores a cinco metros. Atualmente, a maioria dos amostradores disponíveis no mercado recupera poucos centímetros ou necessita de estruturas

de grande porte para ancoragem e operação, fato que inviabiliza a utilização desses equipamentos em ambientes alagadiços e de difícil acesso, como as lagoas marginais.

O amostrador desenvolvido neste trabalho para coleta dos sedimentos consiste em um conjunto articulado composto por testemunhadores bipartidos com 1 metro de comprimento, um peso-batente de 50 kg acoplado à haste-guia, uma polia-moitão, um tripé de içamento e uma talha mecânica com capacidade de içamento de 3 toneladas (FIGURA 27).

**Figura 27** – a) Conjunto amostrador montado na lagoa do Pontal; b) hastes bipartidas com testemunho



Fonte: Acervo da pesquisa.

O conjunto de amostrador é de fácil transporte e montagem e pode ser operado por apenas duas pessoas. O funcionamento dele também é bastante simples, consiste no içamento e na queda livre do peso-batente sobre os testemunhadores e posterior içamento dos testemunhadores contendo as amostras. À medida que o peso-batente vai percutindo sobre os testemunhadores, eles vão sendo cravados na coluna de sedimentos. Depois de cravados, os testemunhadores são içados por uma talha ou guincho mecânico, desmontados e as amostras são identificadas, retiradas e acondicionadas em recipientes plásticos.

Cada testemunhador foi dimensionado com 1 metro de comprimento, sendo que, com o uso de hastes extensoras e encaixes rosqueáveis nas extremidades, é possível alongar o conjunto para alcançar profundidades superiores a 5 metros (FIGURA 28).



**Figura 28** – Conjunto amostrador sendo testado em um dique marginal da Lagoa do Pontal



Fonte: Acervo da pesquisa.

Com o intuito de validar as técnicas de recuperação e testar o amostrador, foram feitos furos experimentais nas lagoas do Pontal e do Guim. Na Lagoa do Pontal, foi recuperado um testemunho de 6,6 metros, que foi subdividido em 28 camadas de espessuras variáveis. Na Lagoa do Guim, obteve-se um testemunho de 3,5 metros, que foi subdividido em 14 camadas sedimentares. Destaca-se que, nesta lagoa, ao se alcançar 3,5 metros de profundidade, observou-se uma transição abrupta de sedimentos pouco friáveis para outros mais finos e compactados, típicos dos arenitos arcoseanos, que representam o embasamento geológico regional. Com estas condições, o amostrador apresentou grande dificuldade de romper o pacote sedimentar, sendo considerado impenetrável para esta técnica.

Tanto na Lagoa do Pontal, como no Lagoa do Guim, a separação das camadas foi feita em campo e considerando as características macromorfológicas, textura e coloração (FIGURA 29).

**Figura 29** – Camadas sedimentares de textura arenosa e silto-argilosa coletada na Lagoa do Pontal



Fonte: Acervo da pesquisa.

Depois de identificadas, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e levadas para o laboratório de Geologia da UNIMONTES, onde permaneceram em temperatura ambiente até a secagem.

### **4.3 Procedimentos e análises laboratoriais**

#### **4.3.1 Caracterização granulométrica e textural**

Para caracterizar os sedimentos do ponto de vista granulométrico e textural, foram realizadas análises por difração a laser por meio do método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

Na análise granulométrica por difração a laser, as amostras foram destorroadas, quarteadas e extraída uma alíquota de 02 gramas de cada camada para análise em um Analisador de Partículas Sympatec Helos – modelo H2387. Esse equipamento utiliza a difração de raios laser e a detecção de partículas com tamanhos que variam de 0,1 a 2.000 micrômetros.

Segundo Beuselinck *et al.* (1998), os analisadores de partículas para determinação das frações granulométricas apresentam vantagens, como alta produtividade, grande amplitude de detecção em apenas uma análise (de 0,04 a 3.500 micrômetros), pouca quantidade de amostra empregada, produção de informações detalhadas (até 72 classes) e a geração de arquivos digitais que podem ser manipulados em *softwares* de estatísticas.

Outra vantagem da caracterização granulométrica por difração laser é a preparação das amostras. Especificamente em sedimentos de lagoas marginais, cuja granulometria é predominantemente fina, a única preparação exigida foi o peneiramento (tamisagem) e retirada de partículas maiores que 02 micrômetros.

Depois do peneiramento, as amostras foram colocadas em cubetas contendo 5 ml de Pirofosfato de Sódio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) e agitadas por aproximadamente 10 segundos. Nesta etapa, o uso do Pirofosfato de Sódio é fundamental, pois promove a dispersão de agregados presentes na amostra. Antes de serem analisadas, as amostras foram novamente agitadas em líquido dispersante e energia ultrassônica por 60 segundos, em temperatura controlada (25 °C).

#### **4.3.2 Análise do conteúdo de matéria orgânica**

O conteúdo de matéria orgânica em solos, sedimentos e ambientes aquáticos exerce uma importante função na adsorção e complexação de contaminantes, principalmente de metais pesados. Dessa forma, o conteúdo de matéria orgânica foi determinado pelo método colorimétrico segundo metodologia de Rajj *et al.* (2001). Este procedimento baseia-se na oxidação da matéria orgânica a  $\text{CO}_2$  por íons dicromato de sódio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), em meio fortemente ácido (ácido sulfúrico -  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

#### **4.3.3 Caracterização mineralógica**

Em ambientes lacustres e fluviais, grande parte dos sedimentos são alóctones e por vezes transportados por longas distâncias antes de serem depositados. Nesse sentido, a caracterização mineralógica pode fornecer indicativos de áreas fontes e informações acerca da ocorrência dos elementos químicos presentes na estrutura cristalina dos minerais.

Neste trabalho, a mineralogia dos sedimentos foi determinada por Difração de Raios-X, no equipamento Panalytical, modelo X'Pert<sup>3</sup> Powder. A identificação das fases cristalinas (minerais) foi obtida por comparação dos difratogramas de Raios-X das amostras com o banco de dados do ICDD – *International Center for Diffraction Data/Joint Committee on Powder Diffraction Standards* – JCPDS (Sets 01 – 50; 2000).

A preparação das amostras para difratometria constitui uma etapa fundamental da análise, pois nela se encontra a principal fonte dos erros de leitura. Para Cullity (1956), em

amostras policristalinas, como os sedimentos, o formato e a organização das partículas interagem com os raios incidentes, afetando a intensidade do feixe de raios difratados. Em sedimentos finos, este fato é bastante comum em virtude da natureza laminar dos argilominerais (filossilicatos) que facilmente adquirem uma orientação preferencial concordante com a superfície do porta-amostra. Com intuito de reduzir os efeitos da orientação preferencial, as amostras compostas foram pulverizadas em moinho de anéis cilíndricos até 220 mesh (0,063 mm) e posteriormente foram manualmente prensadas formando pastilhas para leitura.

#### **4.3.4 Caracterização química**

A Fluorescência de Raio-X (FRX) é uma técnica analítica muito bem estabelecida e amplamente aplicada para determinação da composição química de diversos tipos de amostras. Com alta produtividade, rapidez e boa precisão, a FRX tem-se apresentado como uma opção para a determinação da composição química total de amostras geológicas. Outro destaque desta técnica é a relativa facilidade no preparo das amostras, geralmente em amostras heterogêneas, como sedimentos, solos e rochas, a preparação da amostra consiste em moagem, quarteamento e prensagem.

Não obstante as demais técnicas analíticas, a preparação da amostra para Fluorescência de Raios-X é uma das etapas mais importantes do processo analítico, tendo em vista que fatores como granulometria, distribuição granulométrica e porosidade da amostra podem afetar diretamente a precisão dos resultados. Segundo Schmelnig e Van Grieken (2002), resultados mais satisfatórios podem ser alcançados com a leitura de amostras mais homogêneas com superfícies lisas e planas.

Dessa forma, antes da determinação da composição química, as amostras de sedimentos foram pulverizadas em moinho de anéis cilíndricos por 2 minutos ou até atingirem granulometria < 0,045 mm. Posteriormente, 05 gramas da amostra foram misturadas a 01 grama de resina WAX (aglomerante) e ácido bórico até o preenchimento das pastilhas a serem prensadas. Em seguida, as pastilhas foram prensadas em prensa hidráulica e conduzidas a leitura no equipamento X (AXIOS) da Panalytical.

#### 4.3.5 Determinação de elementos traços e metais pesados – ICP-OES

Elementos traços e metais pesados são elementos que ocorrem na superfície terrestre como constituintes naturais das rochas e dos solos. Geralmente encontrados em baixas concentrações, tais elementos participam da composição de diversos produtos e processos industriais. O crescente interesse na quantificação desses elementos no meio ambiente deve-se ao aumento da demanda, à escassez relativa e aos efeitos que as elevadas concentrações podem provocar na biota e na saúde humana.

Neste trabalho, os elementos selecionados serão quantificados por Espectrometria de Emissão Ótica, que consiste em uma técnica analítica multielementar de ampla aplicação capaz de detectar baixas concentrações presentes nas amostras. Os elementos Cd, Zn, Ni, Cu, Pb e Cr foram previamente selecionados por estarem historicamente associados às atividades antrópicas desenvolvidas na área de estudo e apresentarem toxicidade e ecotoxicidade elevadas.

Diferentemente da Difração de Raios-X e da Fluorescência de Raio-X, a Espectrometria de Emissão Ótica não permite a análise direta de amostras sólidas, sendo necessária a digestão total ou parcial dos sedimentos para uma fase líquida com utilização de reagentes químicos.

A depender dos objetivos do trabalho, a preparação das amostras envolve a separação da fração fina (< 0,063 mm), que apresenta alta capacidade de adsorção de contaminantes e a digestão dos sedimentos de acordo com o objetivo da análise. No presente trabalho, a fração fina foi extraída por peneiramento e a digestão das amostras foi realizada em equipamento de micro-ondas MARS-CEM, norteada pelo método SW-846-3051 – US EPA (USEPA, 1998), que trata da digestão ácida para obtenção da fração extraível de metais pesados em solos e sedimentos.

Neste método, alíquotas de 0,5 gramas da fração mais fina (< 0,063 mm) são adicionadas a 10 ml de ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ) e transferidas para tubos de Teflon do tipo X-Press. Posteriormente, os tubos são fechados, travados e levados à digestão ácida assistida por micro-ondas em sistema fechado, com monitoramento de temperatura e pressão. A utilização da fração fina (< 0,063) é justificada pela interação entre a área superficial específica e a adsorção de contaminantes.

Ao término da programação e do resfriamento, procede-se à filtragem em filtros de nitrato de celulose 0,45µm e transferência para balões volumétricos de 50 ml e adição de água deionizada, até completar o volume.

A quantificação da fração extraível dos metais pesados selecionados foi realizada no equipamento ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy*), com Plasma de Argônio Acoplado Indutivamente – aparelho modelo M 4165 – Spectroflame – *Spectro*. Para validar o procedimento de análise, foi utilizada uma amostra padronizada (padrão geoquímico) para solos com valores certificados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Com a quantificação dos metais via ICP-OES, calculou-se o Fator de Enriquecimento (FE) para camadas sedimentares. O Fator de Enriquecimento de Gresens (1967) é um indicador de contaminação que permite verificar o nível de enriquecimento dos metais e sua possível relação com as fontes naturais e antropogênicas. Para Zhang e Liu (2002), valores de FE inferiores a 2 indicam uma forte contribuição geogênica e valores acima de 2 são fortes indicativos de contribuições antrópicas.

A aplicação do Fator de Enriquecimento como indicador destaca-se por oferecer parâmetros de normalização entre os elementos de interesse, minimizando, assim, os efeitos das diferenças mineralógica e granulométrica entre as amostras.

Os elementos normalizadores mais utilizados são o Fe e o Al, pois são considerados bastante conservativos e pouco solúveis (GOMES *et al.*, 2009). Neste trabalho, o elemento normalizador utilizado foi o Al e o Fator de Enriquecimento (FE) dos elementos selecionados foi obtido pela equação de Gresens (1967).

$$FE = \left\{ \left[ \frac{Ci(amostra)}{Al(amostra)} \right] / \left[ \frac{Ci(background-amostra\ basal)}{Al(background-amostra\ basal)} \right] \right\}$$

Onde:

- $Ci(amostra)$  representa o valor absoluto da amostra de interesse;
- $Ci(background-amostra\ basal)$  o valor absoluto do elemento de interesse no nível mais basal;
- $Al(amostra)$  o valor absoluto do Al da amostra de interesse; e
- $Al(background-amostra\ basal)$  o valor absoluto do Al no nível mais basal.

Depois de calculado o Fator de Enriquecimento (FE), as camadas sedimentares foram categorizadas de acordo com os valores e classes mostrados no Quadro 2:

**Quadro 2** – Classificação do Fator de Enriquecimento (FE)

	<b>Classes</b>	<b>Qualidade dos sedimentos</b>	
	FE < 2	Deficiência de enriquecimento	
	FE = 2 – 5	Enriquecimento moderado	
	FE = 5 – 20	Enriquecimento significativo	
	FE = 20 – 40	Enriquecimento muito alto	
Fonte:	FE > 40	Enriquecimento extremamente alto	Elaboração própria.

#### 4.3.6 Taxa de sedimentação e datação dos sedimentos

Sedimentos recentemente depositados nas lagoas marginais podem fornecer informações acerca do acúmulo sedimentar e da afluência de contaminantes na área estudada. Segundo Nery (2009), os radionuclídeos naturais e antropogênicos mais comumente utilizados como traçadores geocronológicos são  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^7\text{Be}$  e  $^{210}\text{Pb}$ . Neste contexto, o  $^{210}\text{Pb}$  vem se destacando nos estudos de impactos ambientais em virtude da possibilidade de datar sedimentos depositados em ambientes aquáticos continentais nos últimos 150 anos (GODOY *et al.*, 1998; ARGOLLO, 2001; NERY, 2009).

No Brasil, a grande maioria dos trabalhos utilizando o  $^{210}\text{Pb}$  foram realizados em ambientes aquáticos localizados na faixa litorânea e indicam uma taxa de sedimentação média de  $3,2 \text{ mm ano}^{-1}$  (TABELA 6). Nesse sentido, foram coletados seis testemunhos com até 1 metro de profundidade, visando determinar a taxa de sedimentação e a idade das camadas depositadas nas lagoas marginais do Rio São Francisco. Depois de coletados, os testemunhos foram abertos e fatiados em secções de 2 centímetros de espessura, acondicionados em recipientes plásticos, resfriados e levados para secagem em temperatura ambiente.

**Tabela 6** – Taxas de sedimentação em ambientes costeiros brasileiros utilizando o  $^{210}\text{Pb}$ 

<b>Localização</b>	<b>Taxa de Sedimentação (mm/ano)</b>	<b>Referência</b>
Cananeia (SP)	5,0	Saito <i>et. al.</i> , 2001
São Francisco (SE)	1,6	Santos, 2007
Caravelas (BA)	6,68	Neto, 2008
Baía de Todos os Santos	3,2	Argollo, 2001
Baía de Paranaguá	1,2	Souza <i>et al.</i> , 2001
Lagoa de Guanabara (RJ)	8,9	Oliveira <i>et al.</i> , 2004
Baía de Santos (SP)	1,2	Tessler <i>et al.</i> , 2004
Lagoa de Guarapina (RJ)	2,7	Oliveira <i>et al.</i> , 2004

Fonte: Elaboração própria.

Para determinar a taxa de sedimentação e a idade das camadas sedimentares, utilizou-se a separação radioquímica do  $^{210}\text{Pb}$  de acordo com a metodologia desenvolvida por Godoy (1998b) e a aplicação dos modelos CIC – *Constant Initial Concentration* (APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; MATSUMOTO, 1975) e o CRS – *Constant Rate of Supply* (APPLEBY; OLDFIELD, 1978b; GOLDBERG, 1963; ROBBINS; EDGINGTON; KEMP, 1978).

#### **4.4 Tratamento e apresentação dos dados**

Ao término dos procedimentos de campo e laboratoriais, os resultados obtidos foram tratados em *software* de estatística, a fim de identificar as correlações entre os dados químicos e os físicos.

Com os dados granulométricos foram produzidos perfis, diagramas e enquadramento das camadas sedimentares na classificação de Folk (1954) e, com os resultados geoquímicos, juntamente com as taxas de sedimentação e as concentrações de metais pesados, foram processados no *software* STRATER 3.0 e apresentados na forma de perfis verticais.

Os dados geográfico-espaciais foram processados nos *softwares* ENVI 4.3 e ArcGis 10 e apresentados na forma de mapas temáticos e numéricos que poderão subsidiar a tomada de decisão, auxiliar no planejamento e na gestão dos recursos naturais e possibilitar avaliação da influência dos usos e da ocupação dos solos na qualidade ambiental.

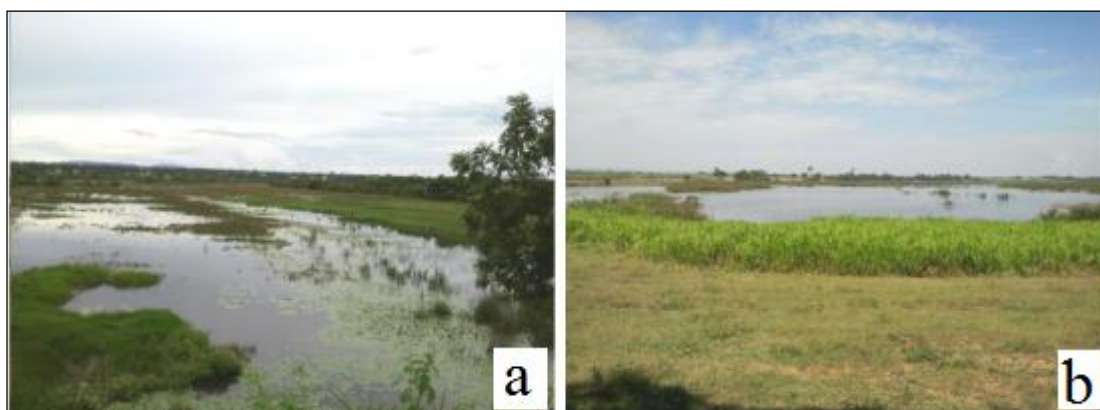


## 5 GRANULOMETRIA, MINERALOGIA E QUÍMICA TOTAL DOS SEDIMENTOS COLETADOS

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os dados das análises granulométrica por Difração Laser, mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) e da composição química total por Fluorescência de Raios-X (FRX), no sentido de caracterizar os sedimentos depositados nas lagoas do Guim e do Pontal. Os resultados das análises mencionadas irão fornecer indicativos sobre a hidrodinâmica do sistema fluvial, condições ambientais e distribuição de elementos químicos de origem natural ou antropogênica.

As lagoas do Guim e do Pontal foram selecionadas (FIGURA 30) por serem representativas, do ponto de vista areal, e estarem estrategicamente localizadas entre as áreas de maior intervenção antrópica na área de estudo.

**Figura 30** – Visada das lagoas marginais selecionadas: a) Lagoa do Guim; b) Lagoa do Pontal



Fonte: Acervo da pesquisa.

Das lagoas do Guim e do Pontal, coletaram-se testemunhos sedimentares utilizando um testemunhador a percussão, que possibilitou a extração das amostras com a preservação da organização das camadas sedimentares. Em campo, o funcionamento do testemunhador demonstrou-se satisfatório, pois foi possível recuperar amostras de sedimentos sem que houvesse inversão na ordem de deposição das camadas sedimentares e a consequente alteração da cronologia deposicional.

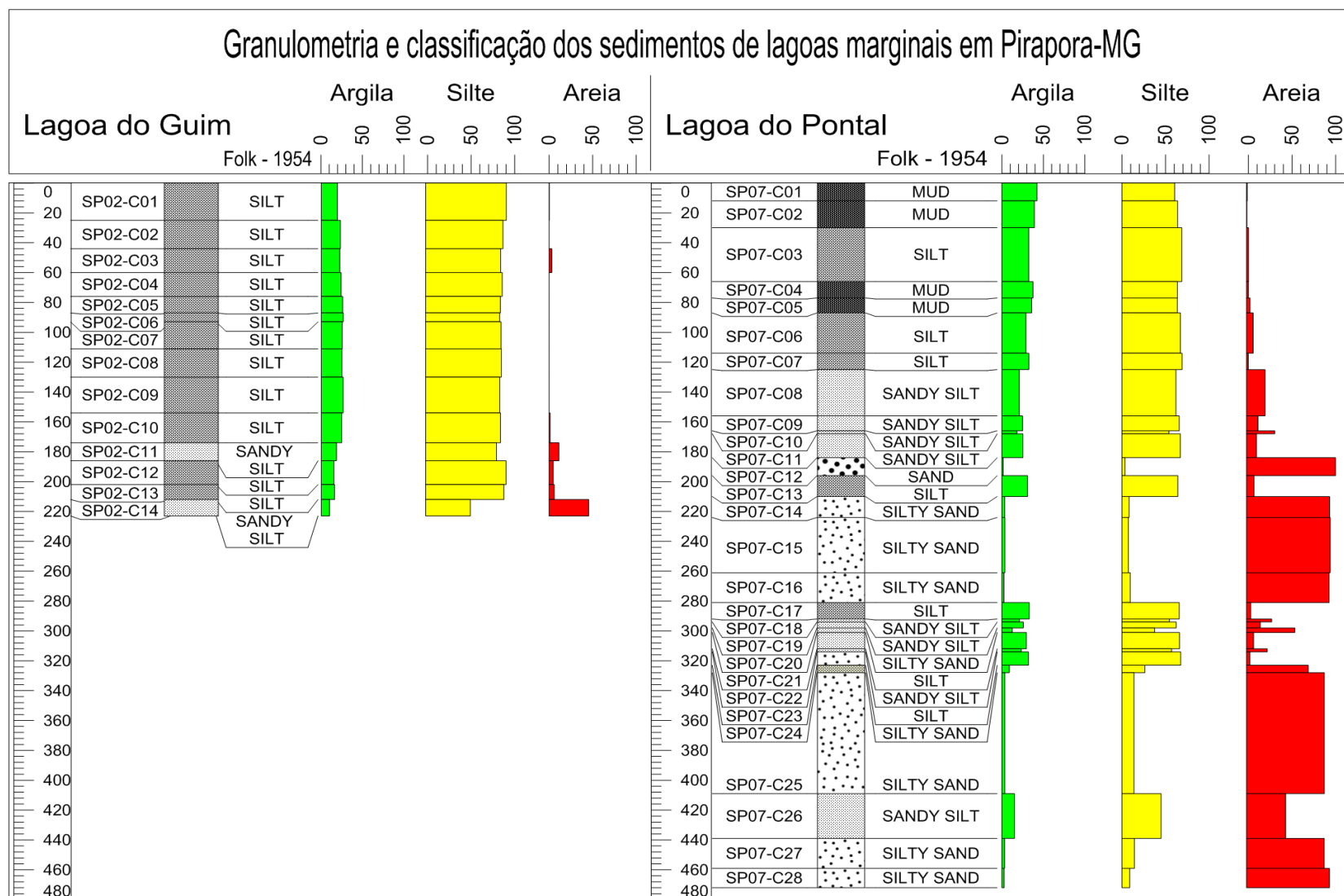
Na Lagoa do Guim, a amostragem alcançou 350 cm de profundidade e gerou um testemunho sedimentar de 223 cm, que foi subdividido em 14 camadas. Durante a amostragem, ao se alcançar 3,5 metros de profundidade, observou-se uma transição abrupta de sedimentos

pouco friáveis para outros mais finos e compactados, típicos dos arenitos arcoseanos, esta camada foi considerada impenetrável para esta técnica. Na Lagoa do Pontal, a amostragem foi mais profunda, alcançou 660 cm e extraiu-se um testemunho de 472 cm, posteriormente subdividido em 28 camadas. Ainda em campo, as camadas foram identificadas e separadas considerando-se os aspectos morfológicos, cor e textura.

Em laboratório, determinou-se a composição granulométrica de cada camada no Analisador de Partículas a Laser – *Sympatec System-Partikel-Technik* modelo H2387, por difratometria laser, considerando intervalos de detecção entre 0,0002 e 2,0mm. As partículas foram classificadas conforme a escala de Wentworth (1922) em argila (< 0,004 mm), silte (0,004 – 0,063mm) e areia (0,063 – 2,0 mm) e com a percentagem de cada fração procedeu-se ao enquadramento das amostras na classificação textural de Folk (1954). A classificação de Folk é baseada em um diagrama triangular, contendo as proporções de cascalho, areia e silte/argila.

Os dados obtidos pela análise granulométrica foram processados e plotados no *software* STRATER 3.0 (FIGURA 31), gerando perfis verticais que demonstraram a distribuição granulométrica das camadas sedimentares nas lagoas do Guim e do Pontal.

**Figura 31** – Distribuição e classificação granulométrica dos sedimentos das lagoas marginais do Guim e do Pontal



Fonte: Elaboração própria.

Na Lagoa do Guim, observou-se que o perfil granulométrico é relativamente homogêneo (FIGURA 31), apresentando porcentagens de silte superiores a 70% na maioria das camadas, com exceção da camada C14, onde essa classe representa 44,75%. As argilas, de modo geral, são a segunda classe de maior ocorrência, entre as camadas sedimentares da Lagoa do Guim, os valores médios são superiores a 20%, sendo os valores baixos encontrados na camada C14 (9,7%) e os mais elevados na camada C06 (25,9%).

Por fim, os sedimentos mais grosseiros, as areias, virtualmente ausentes entre as camadas C01 e C10, ocorrem na camada C14, onde representam 45,6% dos sedimentos (TABELA 7).

De maneira geral, a homogeneidade e a granulometria dos sedimentos coletados na Lagoa do Guim refletem condições típicas de ambientes lacustres onde a deposição de silte e argila predomina. Entretanto, destaca-se a camada 14, na base do perfil, cuja composição granulométrica é bastante diferenciada, sobretudo pela ocorrência de areia (45,6%). Nesta camada, a quantidade de areia, superior ao somatório das demais, e o contato abrupto com a camada sobreposta são um indicativo de variação no suprimento de sedimentos e na competência do canal fluvial.

**Tabela 7** – Distribuição das frações granulométricas (%) da Lagoa do Guim

<b>Camada</b>	<b>cm</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>
<b>C01</b>	0-25	18,9	80,7	0,3
<b>C02</b>	25-44	22,6	77,4	0,0
<b>C03</b>	44-60	21,8	75,1	3,1
<b>C04</b>	60-76	23,3	76,7	0,0
<b>C05</b>	76-87	25,2	74,8	0,0
<b>C06</b>	87-93	25,9	74,1	0,0
<b>C07</b>	93-111	24,6	75,4	0,0
<b>C08</b>	111-130	24,2	75,8	0,0
<b>C09</b>	130-154	25,8	74,2	0,0
<b>C10</b>	154-174	23,9	74,9	1,2
<b>C11</b>	174-186	17,8	70,8	11,4
<b>C12</b>	186-202	14,8	80,5	4,7
<b>C13</b>	202-212	15,7	78,3	6,0
<b>C14</b>	212-223	9,7	44,8	45,6
<b>Número de amostras</b>		14	14	14
<b>Média</b>		21,0	73,8	5,2
<b>Desvio padrão</b>		4,9	8,8	12,1
<b>Mínimo</b>		9,7	44,8	0,0
<b>Máximo</b>		25,9	80,7	45,6

Fonte: Elaboração própria.

Na Lagoa do Pontal, o perfil granulométrico é bastante heterogêneo (FIGURA 31), com diversos contatos abruptos entre as camadas arenosas e as de granulometria mais fina (FIGURA 32), apresentando ainda gradação normal com predominância de sedimentos mais grosseiros na base e os muito finos no topo.

**Figura 32** – Contatos abruptos entre camadas de sedimentos finos e arenosos encontrados no testemunho sedimentar recuperado da Lagoa do Pontal



Fonte: Acervo da pesquisa.

Entre as camadas sedimentares da Lagoa do Pontal, foram encontrados valores médios de 20,0% de argila, 45,9% de silte e 34,1% de areia (TABELA 8), sendo que, a partir de 183 cm, de profundidade, as camadas constituídas por sedimentos mais grosseiros passam a ser mais frequentes e mais espessas. Nesse contexto, destacam-se a camada 12, com 95,2% de areia e 14 centímetros de espessura, e a camada 25, com 83,2% de areia e 81 cm de espessura.

**Tabela 8** – Distribuição das frações granulométricas (%) da Lagoa do Pontal

<b>Camada</b>	<b>cm</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>	<b>Camada</b>	<b>cm</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>
<b>C01</b>	0-12	40,2	59,0	0,8	<b>C15</b>	224-261	3,4	7,2	89,4
<b>C02</b>	12-30	37,2	62,4	0,4	<b>C16</b>	261-281	2,4	9,3	88,3
<b>C03</b>	30-66	30,8	67,0	2,2	<b>C17</b>	281-292	31,3	64,2	4,5
<b>C04</b>	66-77	35,7	62,2	2,1	<b>C18</b>	292-294	20,1	53,1	26,8
<b>C05</b>	77-87	34,2	62,1	3,8	<b>C19</b>	294-298	24,6	60,7	14,7
<b>C06</b>	87-114	27,6	65,4	7,1	<b>C20</b>	298-301	11,8	36,6	51,6
<b>C07</b>	114-125	30,8	67,3	1,9	<b>C21</b>	301-312	28,0	64,4	7,5
<b>C08</b>	125-156	19,8	60,5	19,8	<b>C22</b>	312-314	22,2	55,6	22,3
<b>C09</b>	156-166	23,7	64,1	12,2	<b>C23</b>	314-323	30,5	65,8	3,7
<b>C10</b>	166-168	17,3	52,5	30,2	<b>C24</b>	323-328	8,4	25,6	66,0
<b>C11</b>	168-184	24,1	65,3	10,6	<b>C25</b>	328-409	3,3	13,5	83,2
<b>C12</b>	184-196	1,4	3,4	95,2	<b>C26</b>	409-439	14,4	43,8	41,8
<b>C13</b>	196-210	29,4	62,6	8,1	<b>C27</b>	439-459	3,0	14,0	83,1
<b>C14</b>	210-224	3,2	8,0	88,8	<b>C28</b>	459-472	2,6	8,7	88,7
<b>Número de amostras</b>							28	28	28
<b>Média</b>							20,0	45,9	34,1
<b>Desvio padrão</b>							12,5	23,6	35,4
<b>Mínimo</b>							1,4	3,4	0,4
<b>Máximo</b>							40,2	67,3	95,2

Fonte: Elaboração própria.

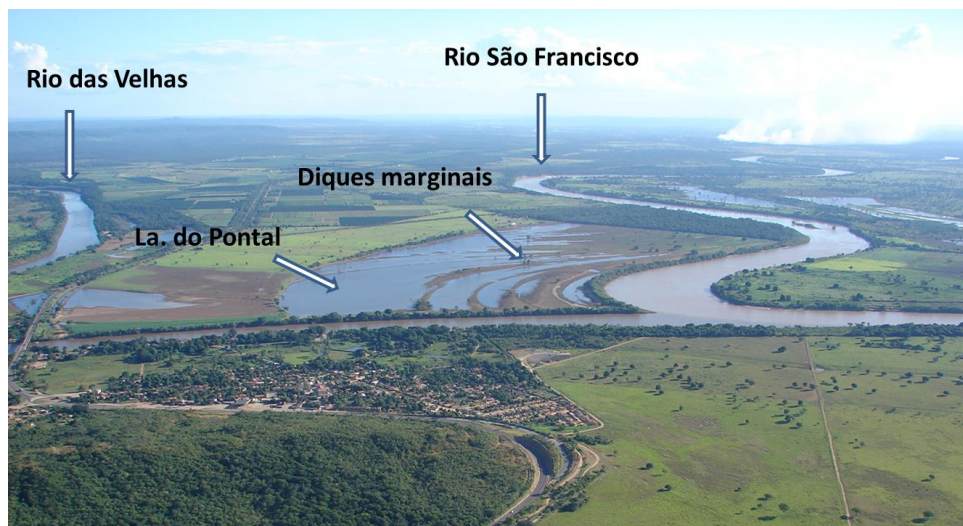
Em conjunto, a arquitetura deposicional das camadas sedimentares da Lagoa do Pontal é marcada por ciclos de deposição de sedimentos grosseiros intercalados com sedimentos finos localizados na parte inferior do perfil (FIGURA 31). Essa arquitetura pode estar associada ao rompimento de diques marginais em períodos de grandes cheias, inundações ou em condições de margens plenas formando depósitos do tipo leques de rompimento de diques, crevasses (CHARLTON, 2008).

Os diques marginais (FIGURA 33) são feições pertencentes ao sistema rio-planície muito comuns na área de estudo, constituídos geralmente por sedimentos arenosos que, ao receberem a energia do pulso de inundação, podem ser rompidos, causando o espraiamento de areias para o interior das lagoas. Além dos pulsos de inundação e sua relação com os leques de rompimento, destaca-se a proximidade da Lagoa do Pontal com a confluência do Rio São Francisco com o Rio das Velhas. Neste local, o efeito do refluxo nos períodos de cheia certamente contribui para a variabilidade faciológica observada no perfil granulométrico.

Outro aspecto observado na Lagoa do Pontal é a ausência de sedimentos grosseiros no topo no perfil, entre 0 e 183 cm, os sedimentos são predominantemente compostos por silte e argila com percentuais iguais ou superiores a 70%. Nesse contexto, os sedimentos da Lagoa

do Pontal assemelham-se aos da Lagoa do Guim e a ausência das camadas arenosas sugere uma mudança no padrão de deposição motivado por alterações no comportamento hidrossedimentológico do rio ao longo do tempo (COLLINSON; THOMPSON, 1982).

**Figura 33** – Sequência de diques marginais na Lagoa do Pontal



Fonte: Acervo da pesquisa.

Assim como demonstrado por vários autores, como Stevaux *et al.* (2009), além das condicionantes naturais, a dinâmica hidrossedimentológica dos rios é fortemente afetada por pressões antrópicas, com destaque para os barramentos e operação das usinas hidrelétricas. Nesse sentido, merece destaque a construção da represa de Três Marias, a montante da área de estudo, que promoveu a regularização das vazões do Rio São Francisco e o controle dos pulsos de inundação, reduzindo significativamente o *input* de sedimentos mais grosseiros para as lagoas marginais.

## 5.1 Mineralogia e composição química dos sedimentos

A partir da Difractometria de Raios-X (DRX), foi identificado o conjunto de minerais principais e acessórios presentes nos sedimentos das Lagoas do Guim e do Pontal. A caracterização mineralógica possibilitou a associação dos sedimentos com possíveis áreas fontes, uma vez que os minerais neles encontrados são herdados da alteração dos litotipos e solos encontrados na região. Outro aspecto a ser considerado em relação à mineralogia dos sedimentos é a capacidade de adsorver metais pesados apresentada por determinados grupos de argilominerais. De acordo Grim e Guven (1978), a capacidade de troca de cátions,

geralmente expressa em miliequivalentes por 100g do argilomineral, tem relação com a capacidade de adsorção de contaminantes e normalmente a faixa de valores apresenta-se da seguinte forma:

<b>Mineral</b>	<b>CTC(meq/100g)</b>
<b>Caulinita</b>	03-15
<b>Ilita</b>	10-40
<b>Clorita</b>	10-40
<b>Alofano</b>	35-50
<b>Esmectita</b>	60-150
<b>Vermiculita</b>	100-150

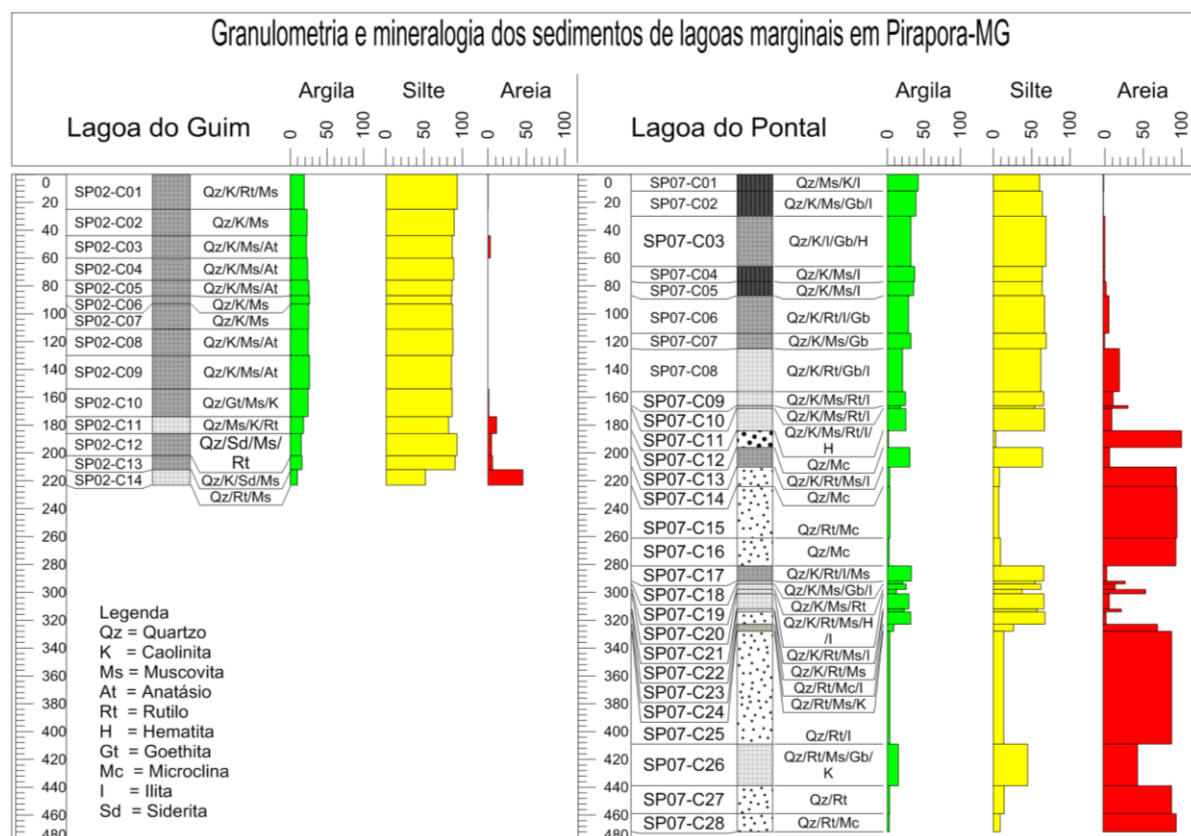
Fonte: Elaboração própria.

Os sedimentos analisados são constituídos por quartzo, caulinita, muscovita, anatásio, rutilo, ilita, hematita, goethita, microclina e siderita (FIGURA 34). O quartzo e a muscovita são os principais minerais encontrados nas camadas sedimentares e refletem a forte influência dos arenitos arcoseanos da Formação Três Marias como área fonte dos sedimentos transportados pelo rio e depositados nas lagoas marginais.

Os litotipos da Formação Três Marias possuem ampla distribuição geográfica na área de estudo e são compostos por minerais de quartzo, feldspatos, principalmente microclina, e micas (CHIAVEGATTO, 1992; SGARBI *et al.*, 2001).



**Figura 34** – Composição mineralógica e granulometria dos sedimentos das lagoas do Guim e do Pontal



Fonte: Elaboração própria.

A caulinita, que é considerado o mineral mais comum nos solos brasileiros, também ocorre em abundância nos sedimentos das lagoas marginais do Guim e do Pontal, sendo que sua distribuição pode estar associada ao intemperismo químico dos feldspatos potássicos encontrados nos arenitos arcoseanos.

Além dos arenitos arcoseanos, ocorrem na área de estudo os litotipos das Formações Três Barras (Grupo Areado) e Capacete (Grupo Mata da Corda), respectivamente arenitos flúvio-eólicos e vulcanoclásticos. Nestes litotipos, é comum a ocorrência de minerais pesados, como rutilo, anatásio, siderita e hematita (SGARBI, 1997), que compõem o conjunto de minerais acessórios encontrados nos sedimentos das lagoas marginais.

Na Lagoa do Guim, quartzo e muscovita ocorrem em todas as camadas sedimentares associados com os sedimentos mais finos, somente a partir da camada C11, onde os sedimentos passam a ser ligeiramente mais grosseiros, é que se observa a ocorrência de minerais pesados, como rutilo e siderita. Este último descrito como mineral comum aos ambientes lacustres tropicais (KRAUSKOPF, 1985).

Na Lagoa do Pontal, observa-se maior recorrência dos minerais, quartzo e caulinita, sendo que nas camadas sedimentares, onde predominam os sedimentos mais grosseiros (C-12, C-14, C-15, C-16, C-25, C-27 e C-28), destacam-se o rutilo e a microclina. Estas camadas são concordantes com os eventos de rompimento de diques (crevasses), apresentados na secção anterior e demonstram a importância dos pulsos de inundação para constituição estratigráfica das lagoas.

Os perfis mineralógicos apresentados descrevem a existência de ambientes deposicionais distintos, do ponto de vista da hidrodinâmica ou do cronológico. Na Lagoa do Guim, a persistência vertical dos sedimentos finos concorda com a relativa homogeneidade do conjunto de minerais e indica uma sedimentação típica de ambientes lacustres de baixa energia. Já na Lagoa do Pontal, os sedimentos grosseiros associados aos minerais quartzo, microclina e rutilo evidenciam um ambiente deposicional mais dinâmico e maior interação da Lagoa do Pontal com o canal fluvial.

Do ponto de vista cronológico, é possível que a lagoa do Guim, que apresentou um testemunho sedimentar mais curto (224 cm), quando comparado com a lagoa do Pontal (472 cm), seja mais recente e o preenchimento/deposição tenha ocorrido em um momento em que a competência do canal fluvial tenha sido reduzida, justificando a ausência de sedimentos grosseiros.

Em relação ao comportamento geoquímico, os argilominerais, caulinita e ilita, estão entre aqueles que apresentam baixa capacidade de adsorção, possibilitando que mudanças nos parâmetros físicos e químicos da água (pH, temperatura) disponibilizem os contaminantes para a coluna d'água. Nesse caso, deve-se considerar o risco potencial de contaminação da biota.

## **5.2 Composição química total dos sedimentos**

Os sedimentos das lagoas do Guim e do Pontal foram caracterizados quimicamente por meio da Fluorescência de Raios-X (método do pó), com o objetivo de conhecer a concentração total dos elementos químicos presentes em cada uma das camadas e avaliar a possível correlação com a composição granulométrica apresentada na seção anterior. Nesse sentido, os elementos foram analisados e divididos em 2 grupos, de acordo com a concentração natural encontrada na crosta e nos folhelhos. No primeiro grupo, estão os

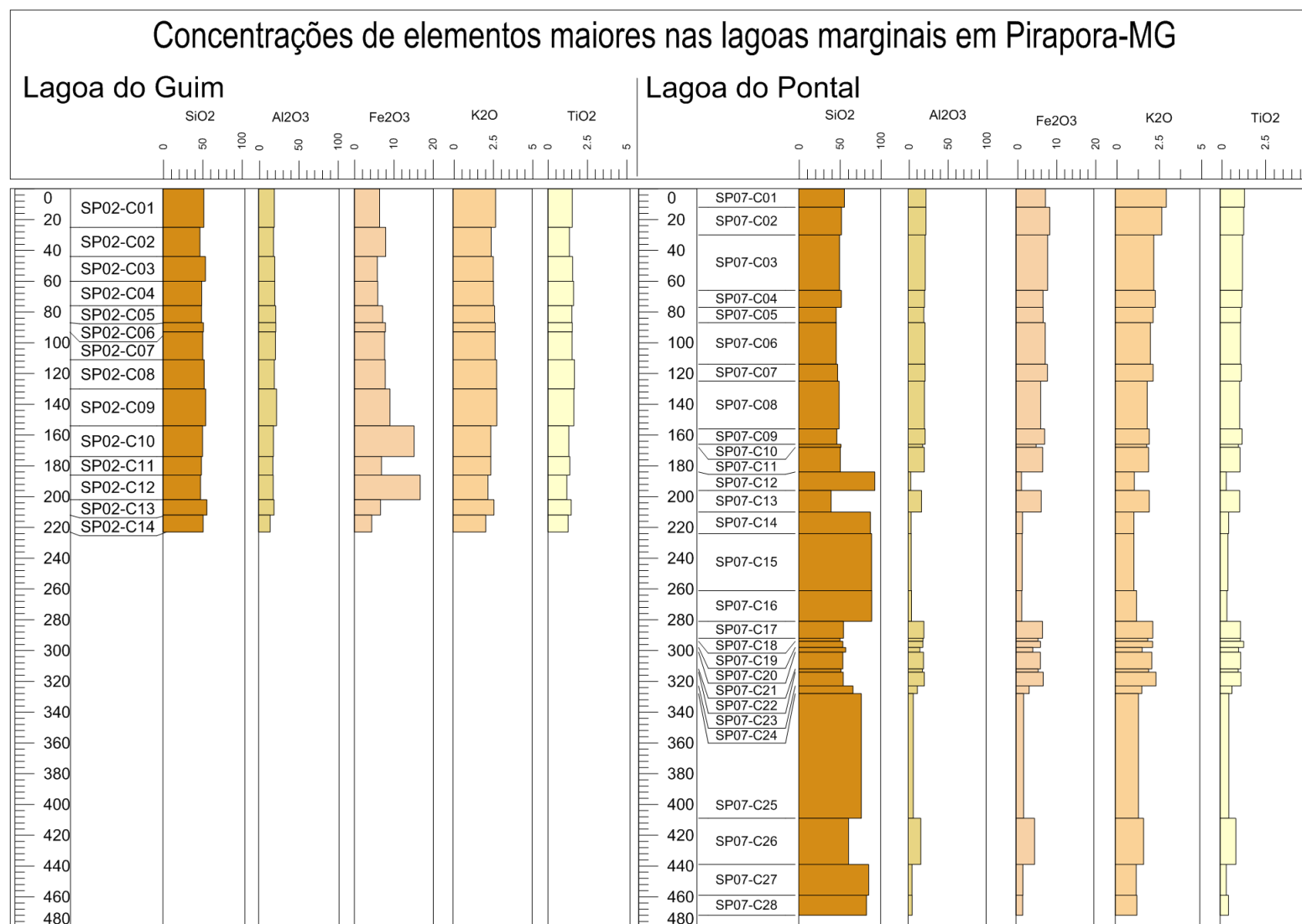
elementos considerados maiores, cuja abundância nos materiais crustais está acima de 1% e, no segundo, os elementos traços cujas concentrações são inferiores a 0,1% ou 1000 ppm (TUREKIAN; WEDEPOHL, 1961; BOWEN, 1979; WEDEPOHL, 1995). Com os resultados obtidos, foram gerados perfis químico e estratigráfico (FIGURA 35), bem como matrizes de correlação de Pearson.

Os elementos maiores Si, Al, Na, Fe, Mg, Ca e K são encontrados principalmente na estrutura cristalina dos minerais formadores de rocha, em componentes da água e participando como constituintes de diversos organismos no ciclo biológico. Naturalmente, a distribuição e as concentrações dos elementos maiores são fortemente controladas pelos arcabouços geológico, pedológico e outros aspectos fisiográficos naturais regionais, sendo reconhecida, em casos específicos, a influência de atividades antrópicas para ocorrência de concentrações acima dos valores considerados normais.

O perfil químico e estratigráfico das lagoas do Guim e do Pontal, representado na Figura 34, evidencia a persistência vertical das concentrações de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{TiO}_2$  até a camada 14, na Lagoa do Guim, aproximadamente 220 cm de profundidade, e camada 11, na Lagoa do Pontal, aproximadamente 183 cm, as concentrações dos elementos supramencionados apresentam comportamentos similares, indicando um padrão de ocorrência.

Entre 183 cm e 472 cm de profundidade, na Lagoa do Pontal, ocorrem concentrações mais elevadas de  $\text{SiO}_2$  que certamente estão associadas aos sedimentos arenosos compostos predominantemente por quartzo. No entanto, entre 183 cm de profundidade e o topo do perfil, apesar de os sedimentos finos predominarem, observa-se uma tendência de enriquecimento de  $\text{SiO}_2$ . Nesse contexto, destaca-se a possível influência das indústrias de ferro-ligas, localizadas a montante da lagoa, que lançam na atmosfera grande quantidade de particulados compostos principalmente por  $\text{SiO}_2$  (RIBEIRO, 2016).

**Figura 35** – Concentração e distribuição dos óxidos dos elementos maiores e a relação químico-estratigráfica das lagoas do Guim e do Pontal



Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, os sedimentos da Lagoa do Guim são predominantemente constituídos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{TiO}_2$  (TABELA 9), sendo que somente  $\text{SiO}_2$  e  $\text{K}_2\text{O}$  apresentaram concentrações médias abaixo dos valores globais estabelecidos por Bowen (1979) e Wedepohl (1995) para folhelhos e para crosta, respectivamente.

Outro aspecto químico e estratigráfico verificado nesta lagoa é a baixa variação das concentrações dos elementos maiores ao longo do perfil (FIGURA 35). Nesse contexto, destaca-se o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cujas elevadas concentrações observadas nas camadas C-10 (15,13%) e C-12 (16,67%) diferem das demais camadas analisadas.

**Tabela 9** – Concentração dos elementos maiores na Lagoa do Guim

<b>Amostra</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>K<sub>2</sub>O</b> (%)	<b>TiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>MgO</b> (%)	<b>CaO</b> (%)	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> (%)	<b>MnO</b> (%)	<b>Na<sub>2</sub>O</b> (%)
<b>C01</b>	49,91	19,58	6,40	2,69	1,48	1,22	0,18	0,22	0,05	0,09
<b>C02</b>	45,16	18,63	7,94	2,41	1,307	1,11	0,29	0,28	0,06	0,05
<b>C03</b>	51,82	20,19	5,80	2,55	1,50	1,26	0,25	0,19	0,02	0,09
<b>C04</b>	47,17	20,12	5,91	2,56	1,56	1,26	0,25	0,14	0,07	0,07
<b>C05</b>	46,99	21,34	7,16	2,63	1,46	1,33	0,31	0,16	0,20	0,06
<b>C06</b>	49,33	21,39	7,88	2,67	1,48	1,34	0,31	0,19	0,16	0,08
<b>C07</b>	48,52	21,01	7,65	2,66	1,47	1,32	0,31	0,19	0,15	0,07
<b>C08</b>	50,32	19,62	7,82	2,76	1,62	1,31	0,23	0,19	0,06	0,10
<b>C09</b>	52,17	22,38	9,01	2,77	1,58	1,36	0,23	0,21	0,05	0,10
<b>C10</b>	48,31	18,48	15,13	2,39	1,27	1,15	0,17	0,35	0,06	0,07
<b>C11</b>	46,91	17,76	6,88	2,39	1,33	1,15	0,17	0,18	0,04	0,06
<b>C12</b>	45,83	18,19	16,67	2,21	1,15	1,17	0,47	0,18	0,43	0,06
<b>C13</b>	53,61	19,23	6,61	2,59	1,42	1,34	0,32	0,12	0,11	0,08
<b>C14</b>	49,02	14,43	4,41	2,07	1,23	0,88	0,21	0,10	0,08	0,07
<b>Média</b>	48,93	19,45	8,23	2,53	1,42	1,23	0,26	0,19	0,11	0,08
<b>Desvio padrão</b>	2,47	1,97	3,45	0,21	0,14	0,13	0,08	0,06	0,11	0,02
<b>Mínimo</b>	45,16	14,43	4,41	2,07	1,15	0,88	0,17	0,10	0,02	0,05
<b>Máximo</b>	53,61	22,38	16,67	2,77	1,62	1,36	0,47	0,35	0,43	0,10
<b>Crosta<sup>1</sup></b>	64,92	14,63	4,42	3,54	0,52	2,24	4,12	0,15	0,07	3,46
<b>Folhelhos<sup>2</sup></b>	58,40	15,12	6,75	3,2	0,77	2,49	3,09	0,16	0,11	1,29

1 – Concentração média na crosta terrestre superior. Fonte: Wedepohl (1995).

2- Concentração média em folhelhos. Fonte: Bowen (1979).

Na Lagoa do Pontal, os sedimentos também são constituídos por  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O}$  e  $> \text{TiO}_2$ . Entretanto, nesta lagoa, somente o  $\text{K}_2\text{O}$  possui concentrações abaixo das médias globais da crosta e folhelhos (TABELA 9).

Em contraposição à Lagoa do Guim, que apresenta um testemunho sedimentar mais curto e homogêneo, a Lagoa do Pontal é marcada pela alta variação nas concentrações dos elementos maiores ao longo do perfil. Destaca-se, nesse contexto, o  $\text{SiO}_2$  que, nas camadas

C12, C14, C15, C16, C27 e C28, demonstra concentrações superiores a 80% e uma relação concordante com os ciclos de deposição de sedimentos grosseiros observados no perfil granulométrico (FIGURA 31).

**Tabela 10** – Concentração dos elementos maiores na Lagoa do Pontal

<b>Amostra</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>K<sub>2</sub>O</b> (%)	<b>TiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>MgO</b> (%)	<b>CaO</b> (%)	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> (%)	<b>MnO</b> (%)	<b>Na<sub>2</sub>O</b> (%)
<b>C01</b>	55,73	22,77	7,57	3,02	1,40	1,30	0,12	0,11	0,04	0,09
<b>C02</b>	52,18	22,78	8,67	2,75	1,35	1,09	0,14	0,10	0,10	0,09
<b>C03</b>	49,78	21,86	8,12	2,28	1,28	0,98	0,14	0,11	0,13	0,08
<b>C04</b>	52,01	21,07	6,94	2,37	1,25	1,02	0,16	0,11	0,09	0,06
<b>C05</b>	45,69	20,06	6,98	2,24	1,18	0,97	0,16	0,11	0,08	0,04
<b>C06</b>	45,77	21,66	7,51	2,08	1,17	0,87	0,18	0,10	0,08	0,05
<b>C07</b>	47,44	21,82	8,07	2,24	1,22	0,92	0,19	0,10	0,14	0,04
<b>C08</b>	49,29	20,93	6,33	1,89	1,12	0,9	0,18	0,11	0,09	0,07
<b>C09</b>	46,48	21,81	7,35	2,01	1,26	0,97	0,22	0,12	0,19	0,07
<b>C10</b>	51,50	18,42	5,19	1,86	1,05	0,84	0,18	0,11	0,06	0,07
<b>C11</b>	50,76	20,69	6,86	1,97	1,14	0,88	0,19	0,11	0,12	0,07
<b>C12</b>	92,85	3,21	1,40	1,13	0,35	0,06	0,02	0,03	0,01	0,22
<b>C13</b>	39,58	17,14	6,47	2,01	1,12	0,75	0,14	0,01	0,08	0,03
<b>C14</b>	87,47	3,77	1,68	1,11	0,49	0,10	0,03	0,03	0,02	0,19
<b>C15</b>	88,94	3,95	1,6	1,11	0,45	0,11	0,03	0,03	0,02	0,18
<b>C16</b>	89,06	4,28	1,49	1,26	0,39	0,12	0,03	0,03	0,02	0,26
<b>C17</b>	54,58	20,21	6,81	2,22	1,17	0,96	0,23	0,12	0,10	0,07
<b>C18</b>	50,44	18,84	5,66	1,92	1,16	0,83	0,19	0,12	0,06	0,06
<b>C19</b>	53,74	18,8	6,29	2,21	1,35	1,04	0,23	0,13	0,09	0,08
<b>C20</b>	57,3	14,97	4,33	1,59	1,06	0,63	0,18	0,09	0,05	0,09
<b>C21</b>	53,81	19,61	6,25	2,16	1,18	0,94	0,21	0,12	0,07	0,05
<b>C22</b>	51,48	18,21	5,7	1,97	1,04	0,81	0,22	0,11	0,06	0,06
<b>C23</b>	54,29	20,72	7,00	2,41	1,20	1,00	0,22	0,12	0,09	0,06
<b>C24</b>	66,16	11,81	3,4	1,57	0,68	0,52	0,13	0,08	0,04	0,14
<b>C25</b>	76,39	6,49	1,94	1,37	0,50	0,24	0,06	0,05	0,02	0,21
<b>C26</b>	60,77	16,19	4,78	1,68	0,90	0,69	0,17	0,10	0,06	0,10
<b>C27</b>	85,36	4,89	1,77	1,24	0,35	0,14	0,04	0,04	0,01	0,19
<b>C28</b>	82,66	5,03	1,74	1,28	0,48	0,16	0,07	0,04	0,02	0,22
<b>Média</b>	60,41	15,79	5,28	1,89	0,97	0,71	0,15	0,09	0,07	0,11
<b>Desvio padrão</b>	16,07	7,05	2,41	0,50	0,35	0,37	0,07	0,04	0,04	0,07
<b>Mínimo</b>	39,58	3,21	1,40	1,11	0,35	0,06	0,02	0,01	0,01	0,03
<b>Máximo</b>	92,85	22,78	8,67	3,02	1,40	1,30	0,23	0,13	0,19	0,26
<b>Crosta<sup>1</sup></b>	64,92	14,63	4,42	3,54	0,52	2,24	4,12	0,15	0,07	3,46
<b>Folhelhos<sup>2</sup></b>	58,40	15,12	6,75	3,2	0,77	2,49	3,09	0,16	0,11	1,29

1 – Concentração média na crosta terrestre superior. Fonte: Wedepohl (1995).

2- Concentração média em folhelhos. Fonte: Bowen (1979).

De maneira geral, os elementos maiores encontrados na área de estudo são concordantes com a caracterização granulométrica e mineralógica apresentada, sobretudo no que diz respeito às concentrações de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O e TiO<sub>2</sub>, e o arcabouço geológico regional.

Com intuito de verificar a relação existente entre as classes granulométricas e os elementos maiores, foram realizados testes de Correlação de Pearson (TABELAS 11 e 12). Os resultados foram enquadrados segundo a proposta de Dancey e Reidy (2006), que propuseram uma classificação da variação da magnitude da correlação. Para os autores, os valores de r entre 0,10 e 0,30 indicam uma correlação positiva fraca; valores de r de 0,40 até 0,6 correlação moderada e valores de r de 0,70 até 1 indicam uma correlação positiva forte. Estas classes demonstram a interdependência das variáveis X em relação a Y, de forma que quando r =1 (correlação positiva perfeita), o comportamento da variável X é igual ao da variável Y; e quando r = -1 (correlação negativa perfeita), os comportamentos das variáveis são inversamente proporcionais.

Na Lagoa do Guim, correlações fortes foram encontradas entre as argilas e as concentrações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O e MgO, este último também possui correlação positiva forte com a fração silte. Já na Lagoa do Pontal foram observadas muitas correlações positivas fortes, entre as quais cita-se a correlação das concentrações de SiO<sub>2</sub> e de Na<sub>2</sub>O com fração de areia e a dos sedimentos finos com as concentrações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, MgO, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e MnO (TABELA 11).

**Tabela 11** – Matriz de correlação dos elementos maiores e frações granulométricas da Lagoa do Guim

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	Argila	Silte	Areia
SiO <sub>2</sub>	1												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	1											
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,32	0,00	1										
K <sub>2</sub> O	0,47	0,87	-0,25	1									
TiO <sub>2</sub>	0,51	0,73	-0,49	0,90	1								
MgO	0,41	0,93	0,00	0,89	0,73	1							
CaO	-0,23	0,17	0,40	-0,13	-0,27	0,23	1						
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,24	0,15	0,56	0,08	-0,14	-0,01	-0,26	1					
MnO	-0,39	0,00	0,60	-0,29	-0,46	0,06	0,88	-0,19	1				
Na <sub>2</sub> O	0,83	0,39	-0,21	0,62	0,70	0,45	-0,32	-0,08	-0,38	1			
Argila	0,00	<b>0,84</b>	0,06	<b>0,75</b>	0,65	<b>0,70</b>	-0,09	0,47	-0,20	0,23	1		
Silte	-0,01	0,66	0,37	0,57	0,31	<b>0,71</b>	0,32	0,39	0,20	0,09	0,53	1	
Areia	0,01	-0,82	-0,29	-0,72	-0,49	-0,80	-0,19	-0,47	-0,06	-0,16	-0,79	-0,94	1

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 12** – Matriz de correlação dos elementos maiores e frações granulométricas da Lagoa do Pontal

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	Argila	Silte	Areia
SiO <sub>2</sub>	1												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,95	1											
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,92	0,98	1										
K <sub>2</sub> O	-0,80	0,91	0,93	1									
TiO <sub>2</sub>	-0,93	0,98	0,96	0,92	1								
MgO	-0,91	0,98	0,96	0,95	0,98	1							
CaO	-0,87	0,86	0,79	0,67	0,85	0,83	1						
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,74	0,85	0,77	0,73	0,82	0,86	0,87	1					
MnO	-0,77	0,79	0,83	0,62	0,77	0,73	0,73	0,65	1				
Na <sub>2</sub> O	0,96	-0,92	-0,89	-0,77	-0,91	-0,89	-0,87	-0,74	-0,72	1			
Argila	-0,85	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	<b>0,94</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	0,69	-0,85	1		
Silte	-0,96	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,88</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,87</b>	<b>0,80</b>	<b>0,81</b>	-0,94	0,92	1	
Areia	<b>0,93</b>	-0,98	-0,98	-0,93	-0,97	-0,97	-0,83	-0,78	-0,79	<b>0,93</b>	-0,97	-0,99	1

Fonte: Elaboração própria.

Considerando os testes de Pearson e os demais dados apresentados, fica evidente a correlação entre os aspectos texturais, os elementos maiores e o processo de preenchimento das lagoas marginais. Nesse sentido, a diferenciação das camadas dentro da própria coluna sedimentar e entre as lagoas, bem como a correlação entre as assinaturas químicas de elementos, como o SiO<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>O e as camadas arenosas encontradas na Lagoa do Pontal, indicam a ocorrência de dois importantes registros temporais da hidrodinâmica do sistema rio-planície. Um primeiro momento, relacionado com o transporte e a deposição de sedimentos mais grosseiros, compostos de SiO<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>O nas camadas de base da lagoa do Pontal, e um segundo momento, mais recente, em que os sedimentos finos, compostos por Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O e MgO predominam na coluna sedimentar das duas lagoas.

### 5.3 Concentração total de elementos traços nas lagoas marginais

Os elementos traços ocorrem naturalmente na superfície terrestre em baixas concentrações. A existência de concentrações acima dos valores de referência geralmente está associada com as anomalias geoquímicas, que caracterizam os depósitos minerais, e principalmente, com as atividades antrópicas, que manejam os elementos traços em seus processos produtivos. Para Prado Filho (1992), além da contribuição dos aspectos geológicos na distribuição dos elementos traços, em ambientes aquáticos as concentrações acima dos valores considerados normais decorrem principalmente de fontes antropogênicas (TABELA 13).



No Anexo A, são apresentadas as concentrações de todos os elementos traços analisados. Entretanto, em virtude dos objetivos propostos e das fontes antrópicas localizadas na área de estudo, nesta seção serão discutidos o comportamento, a distribuição e a concentração dos elementos traços Cr, Ni, Cu, Zn, As, Co, Pb e Cd. Segundo Duffus (2002), estes elementos possuem toxicidade e ecotoxicidade elevada, alto potencial de acumulação nos organismos, estão presentes em diversas atividades industriais e podem ser enquadrados no grupo dos metais pesados.

**Tabela 13** – Atividades antrópicas e metais pesados utilizados

Atividade	Metais Pesados							
	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Sn	Zn
Papel								
Petroquímica								
Ind. de cloro e KOH (eletrolítica)								
Fertilizantes								
Refinarias de petróleo								
Usinas Siderúrgicas								
Ind. de metais não ferrosos								
Veículos automotores e aviões								
Vidro, cimento, cerâmica								
Ind. Têxtil								
Ind. de couros								
Usinas termoelétricas								
Fáb. de borracha								
Fáb. de baterias e eletroquímicas								
Fáb. de tintas e corantes								
Fáb. de plásticos e resinas								
Metalurgia (galvanização/fundição)								

Fonte: Prado Filho (1992).

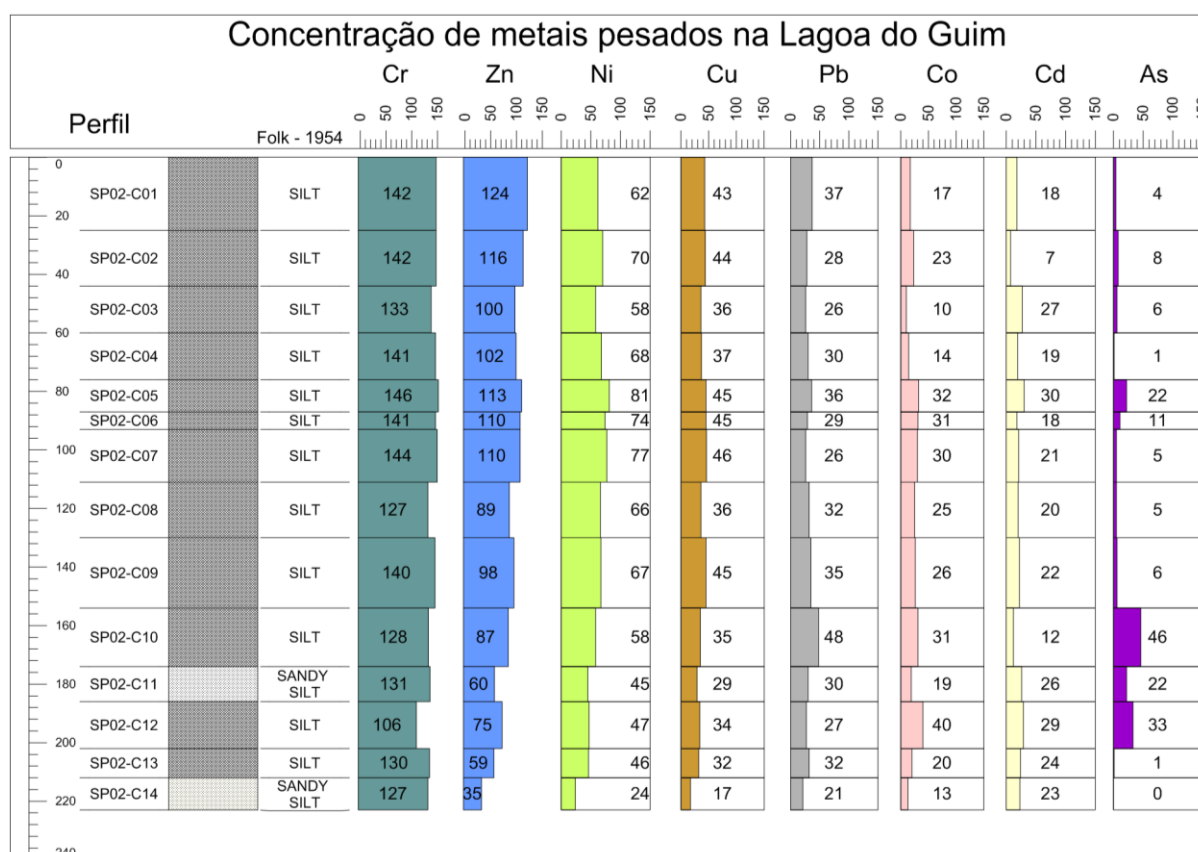
Os resultados químicos obtidos pela Fluorescência de Raios-X foram comparados com os dados de abundância crustal de Bowen (1979) que descrevem os teores médios de elementos traços encontrados em folhelhos (TABELA 14). No entanto, é importante ponderar que valores de referência, de qualquer natureza, não devem ser tomados como absolutos, pois podem excluir particularidades locais e servem principalmente como indicativos de anomalias positivas ou negativas em relação ao padrão global.

**Tabela 14** – Valores de referência de Bowen para os metais pesados selecionados

Elementos	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Co
Folhelhos	90 ppm	68 ppm	39 ppm	120 ppm	1,8 ppm	0,22 ppm	23 ppm	19 ppm

Fonte: Bowen (1979).

Na Lagoa do Guim, os sedimentos analisados apresentaram concentrações médias e totais acima dos valores referência para todos os elementos, sendo que a camada C-05 (SP02-C05), localizada a 80 cm de profundidade, difere das demais, apresentando as concentrações mais elevadas para a maioria dos elementos analisados (FIGURA 36).

**Figura 36** – Distribuição e concentração de metais pesados (mg/kg) na Lagoa do Guim

Fonte: Elaboração própria.

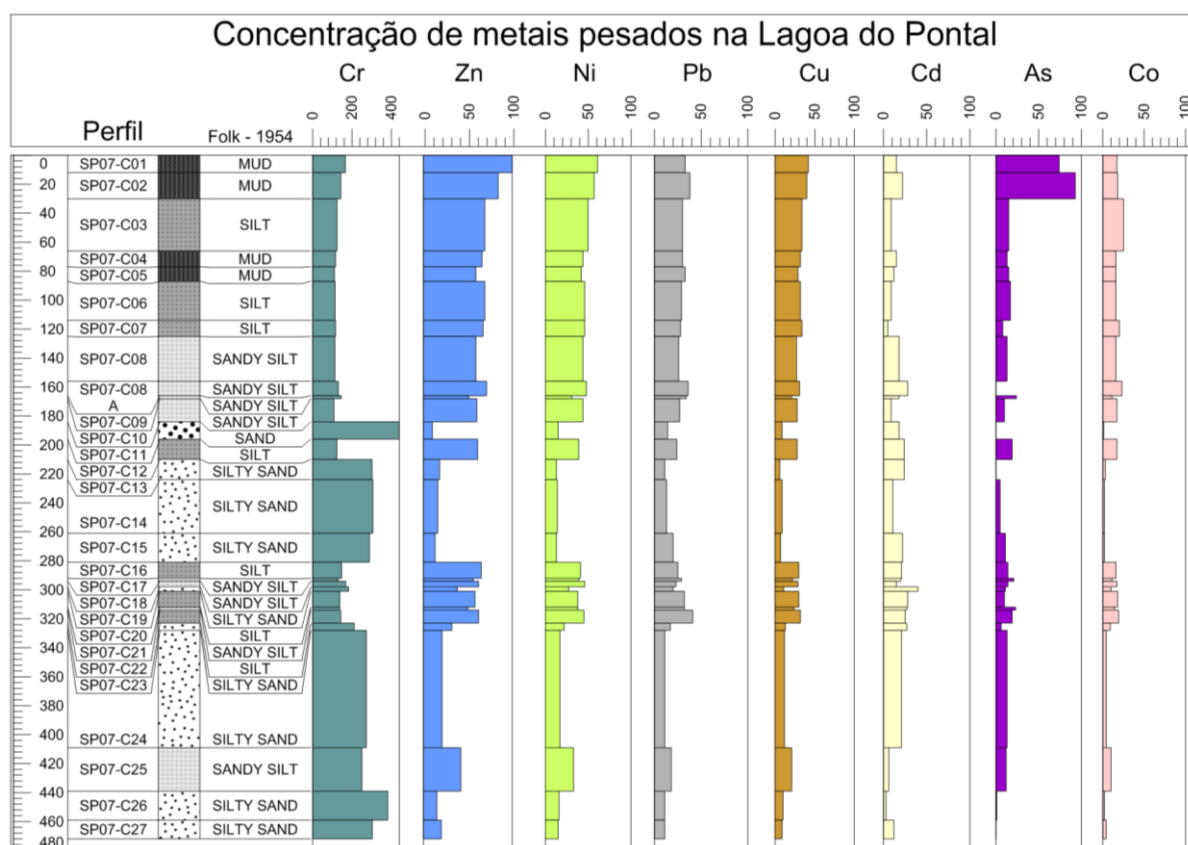
Uma análise geral do perfil demonstrado na Figura 36 permite verificar que os elementos Cr, Ni, Cu, Pb e Zn possuem tendência de enriquecimento da base para o topo. Nesse contexto, destacam-se as concentrações de Zn, que passou de 35 ppm na base do perfil para 124 ppm na camada de topo, indicando enriquecimento aproximado de 350%. Tendências de enriquecimento da base para o topo, envolvendo os metais pesados em

ambientes aquáticos, têm sido frequentemente associadas à intensificação dos usos e ocupação dos solos nas bacias de contribuição (LIMA *et al.*, 2011; SABARIS, 2011; NERY, 2009; ARGOLLO, 2001; GODOY *et al.*, 1998b).

Na área de estudo, Trindade (2010), analisando a influência das atividades antrópicas na concentração e distribuição dos metais pesados nos sedimentos fluviais do Rio São Francisco, encontrou concentrações similares às detectadas na camada 1 de Zn (125,25 ppm) e Pb (47,89) e associou-as às práticas agrícolas desenvolvidas na região.

O perfil químico da Lagoa do Pontal (FIGURA 37) demonstra que concentrações médias são inferiores às encontradas na Lagoa do Guim, com exceção do Cr e do As. Estes dois últimos elementos chamam bastante a atenção não somente pela alta concentração média, mas também por apresentarem uma grande variação entre as camadas.

**Figura 37** – Distribuição e concentração de metais pesados (mg/kg) na Lagoa do Pontal



Fonte: Elaboração própria.

No caso do Cr, as concentrações mais elevadas ocorrem a partir de 183 cm de profundidade, com tendência de enriquecimento para a base. Baggio (2008), analisando os

litotipos em áreas adjacentes, associa o comportamento do Cr a uma fonte litogênica e descreve concentrações significativas deste elemento nos arenitos e argilitos da Formação Três Marias.

Em contraposição ao Cr, o As tem as concentrações mais elevadas no topo do perfil e forte tendência de enriquecimento para o topo. Esse elemento possui alta toxicidade e é comumente encontrado na composição de herbicidas utilizados em culturas como cana-de-açúcar (GRISOLIA, 2005).

Os testes de correlação entre as concentrações de metais pesados e as frações granulométricas confirmam a forte correlação positiva entre o Cr e as areias na Lagoa do Pontal e entre o Ni, Cu, Zn e as frações argila e silte na Lagoa do Guim.

**Figura 38** – Matriz de Coeficiente de Correlação – Frações granulométricas e metais pesados

		Lagoa do Guim										
		Argila	Silte	Areia	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Co
Cr		0,60	0,10	-0,32	1,00							
Ni		<b>0,92</b>	0,62	-0,82	0,66	1,00						
Cu		<b>0,83</b>	0,70	-0,85	0,61	0,93	1,00					
Zn		<b>0,78</b>	0,64	-0,78	0,64	0,90	0,92	1,00				
As		0,08	0,21	-0,18	-0,43	-0,02	-0,01	-0,06	1,00			
Cd		-0,30	-0,11	0,20	-0,31	-0,24	-0,25	-0,34	0,01	1,00		
Pb		0,43	0,42	-0,48	0,13	0,30	0,31	0,29	0,57	-0,29	1,00	
Co		0,30	0,36	-0,38	-0,25	0,36	0,41	0,19	0,63	0,04	0,29	1,00
		Lagoa do Pontal										
		Argila	Silte	Areia	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Co
Cr		-0,83	-0,92	<b>0,91</b>	1,00							
Ni		<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	-0,95	-0,82	1,00						
Cu		<b>0,97</b>	<b>0,92</b>	-0,95	-0,80	0,98	1,00					
Zn		<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	-0,95	-0,84	0,98	0,97	1,00				
As		0,56	0,37	-0,44	-0,33	0,59	0,58	0,62	1,00			
Cd		-0,05	-0,01	0,03	-0,13	-0,07	-0,13	-0,02	0,07	1,00		
Pb		0,85	0,86	-0,87	-0,80	0,84	0,84	0,84	0,52	0,16	1,00	
Co		0,89	0,95	-0,95	-0,87	0,92	0,91	0,90	0,33	0,02	0,82	1,00

Fonte: Elaboração própria.

As positivas e fortes correlações observadas entre a grande maioria dos elementos analisados e as frações finas (silte e argila) corroboram os trabalhos de Förstner e Wittmann (1979), Salomons e Förstner (1984) e Moore *et al.* (1989), evidenciando a importância do tamanho das partículas nos processos de adsorção e enriquecimento de metais pesados e

demonstram ainda a importância das lagoas marginais como repositório de sedimentos cujas características granulométricas e químicas possibilitam a avaliação espaço-temporal dos usos dos solos e a influência das atividades antrópicas na qualidade ambiental.

## 6 AS LAGOAS MARGINAIS E A QUALIDADE AMBIENTAL NO ALTO-MÉDIO SÃO FRANCISCO-MG

As lagoas marginais do alto-médio curso do Rio São Francisco são sistemas abertos, bastante produtivos, de grande importância para conservação da biodiversidade regional. São feições do sistema rio-planície que possuem padrões sazonais bem definidos cujo dinamismo é marcado pelos pulsos de inundação em períodos de cheia. Para Junk, Bayley e Sparks (1989), o pulso da inundação é a força direcionadora que promove a interação dos ambientes terrestres e aquáticos no sistema rio-planície e as trocas de nutrientes e organismos entre estes *habitats*.

Além das trocas de nutrientes e organismos, o transbordamento lateral das águas do rio, em decorrência dos pulsos de inundação, lança ao longo do tempo nas lagoas marginais sedimentos de variadas granulometrias, materiais orgânicos e contaminantes inorgânicos, de modo que as camadas de sedimentos constituem registros deposicionais de grande relevância para avaliação de qualidade ambiental, reconstituição das condições ambientais pretéritas e predição de cenários futuros decorrentes dos usos e ocupação dos solos.

Em ambientes deposicionais, a textura e a composição química dos sedimentos são importantes registros da qualidade ambiental na bacia de drenagem. Segundo Wetzel (2001), os sedimentos encontrados nos ecossistemas fluviais e lacustres são predominantemente constituídos por partículas minerais, incluindo argilas, carbonatos e silicatos, compostos inorgânicos de origem biogênica e material orgânico em diversos estágios de decomposição.

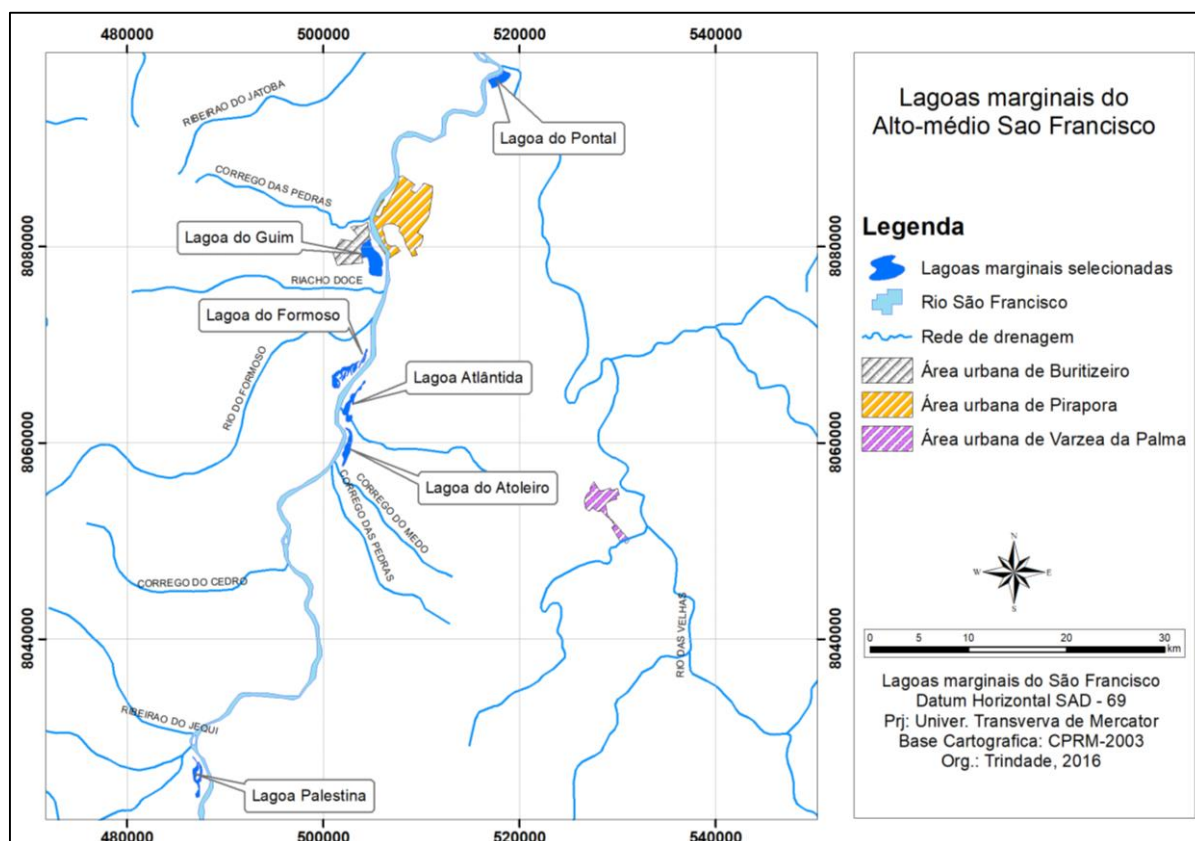
Para Förstner e Wittmann (1979), uma das principais características dos sedimentos nos ambientes aquáticos é a alta capacidade de adsorver e complexar contaminantes. Esta característica transforma os sedimentos no principal compartimento de acumulação de metais pesados. Segundo os autores, existe uma relação inversamente proporcional entre as concentrações de metais pesados e a granulometria dos sedimentos, de forma que, quanto menor for a particular sedimentar, maior será a capacidade de adsorver e complexar metais pesados.

Além da granulometria, o conteúdo de matéria orgânica exerce um papel fundamental na acumulação dos metais pesados em sedimentos e solos. Segundo Kiehl (1977 *apud* SANTOS *et al.*, 2006), para cada 1% de matéria orgânica somada ao solo, aumenta-se em 7 m<sup>2</sup> a superfície específica das partículas, resultando assim em uma maior acumulação de metais pesados e outros contaminantes.

Em sedimentos fluviais ou lacustres, tanto a matéria orgânica quanto as concentrações de metais pesados podem derivar de fontes naturais ou atividades antrópicas. Na área de estudo, reconhecidamente as atividades industriais e agrícolas têm introduzido metais pesados e matéria orgânica no meio ambiente em concentrações cada vez mais elevadas, comprometendo a qualidade dos recursos hídricos e produzindo efeitos adversos à biota (POMPEU; GODINHO, 2003; BAGGIO, 2008; TRINDADE, 2010; RIBEIRO, 2010).

Neste capítulo, serão apresentados os dados da composição textural, conteúdo de matéria orgânica e concentração de metais pesados (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb e Zn) nos sedimentos, com o objetivo de reconhecer a importância das lagoas marginais para avaliação da qualidade ambiental no alto-médio curso do Rio São Francisco (FIGURA 39).

**Figura 39** – Lagoas marginais selecionadas e o contexto hidrográfico regional



Fonte: Elaboração própria.

No alto-médio curso do Rio São Francisco, entre Três Marias e Pirapora, ocorrem cerca de 50 lagoas marginais perenes e temporárias, entre as quais foram selecionadas seis para analisar a influência do uso e ocupação dos solos na qualidade dos sedimentos

recentemente depositados (TABELA 15). Destas lagoas foram extraídos testemunhos sedimentares com aproximadamente 50 cm de profundidade, seccionados em camadas de 2 cm de espessura. A espessura das camadas foi baseada nas taxas de sedimentação encontradas em ambientes deposicionais continentais brasileiros (ARGOLLO, 2001; SAITO *et al.*, 2001; GODOY *et al.*, 2006; NERY, 2009).

**Tabela 15** – Descrição, uso e ocupação do solo e localização das lagoas marginais selecionadas

IDENTIFICAÇÃO	USO DO SOLO	COORDENADAS UTM*	ÁREA ALAGADA (ha)
Lagoa Palestina	Soja e milho irrigados	X - 486886,920 Y - 8026261,737	148,90
Lagoa do Atoleiro	Pastagem natural /pecuária e café	X - 502518,462 Y - 8059542,042	160,12
Lagoa Atlântida	Café e silvicultura	X - 502990,204 Y - 8064488,788	181,00
Lagoa do Formoso	Pecuária intensiva - Pastagem	X - 504099,419 Y - 8069160,910	45,50
Lagoa do Guim	Pastagem natural-pecuária extensiva	X - 505242,605 Y - 8078820,505	462,30
Lagoa do Pontal	Cana de açúcar/urbano/indústria	X - 518015,781 Y - 8097061,500	190,00

\*As coordenadas métricas (UTM) apresentadas foram coletadas com receptor GPS-Garmin 60SCX-map no Datum horizontal SAD-69 – Fuso/zona 23k.

Fonte: Elaboração própria.

Depois de extraídas as camadas sedimentares, as amostras foram secadas em temperatura ambiente e submetidas à análise textural pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), determinação do conteúdo de matéria orgânica pelo método colorimétrico segundo metodologia proposta por Raij *et al.* (2001), e os metais pesados, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb e Zn, foram quantificados por Espectrometria de Emissão Ótica com plasma indutivamente acoplado ICP-OES. Antes da quantificação dos metais pesados, as amostras foram peneiradas, extraído 0,5g da fração fina (< 0,063 mm) e digeriu-se parcialmente cada uma das amostras com HNO<sup>3</sup> em micro-ondas seguindo o método SW-846-3051 – US EPA (USEPA, 1998).

Os elementos Cd, Cr, Ni, Cu, Pb e Zn foram selecionados para análise por participarem como compostos e insumos na maioria das atividades antrópicas encontradas na área de estudo (PRADO FILHO, 1992) e por apresentarem pouca mobilidade em condições ambientais tipicamente encontradas em lagoas marginais. Rose *et al.* (1979) salientam que, entre os fatores que influenciam na mobilidade dos metais pesados, os potenciais redox (Eh) e hidrogeniônico (pH) têm grande importância, de forma que em ambientes redutores de baixa energia cinética os elementos Cd, Cr, Ni, Cu, Pb e Zn são considerados muito pouco móveis.



Na Tabela 16, são apresentadas as condições ambientais e a mobilidade relativa de alguns elementos químicos (ROSE *et al.*, 1979).

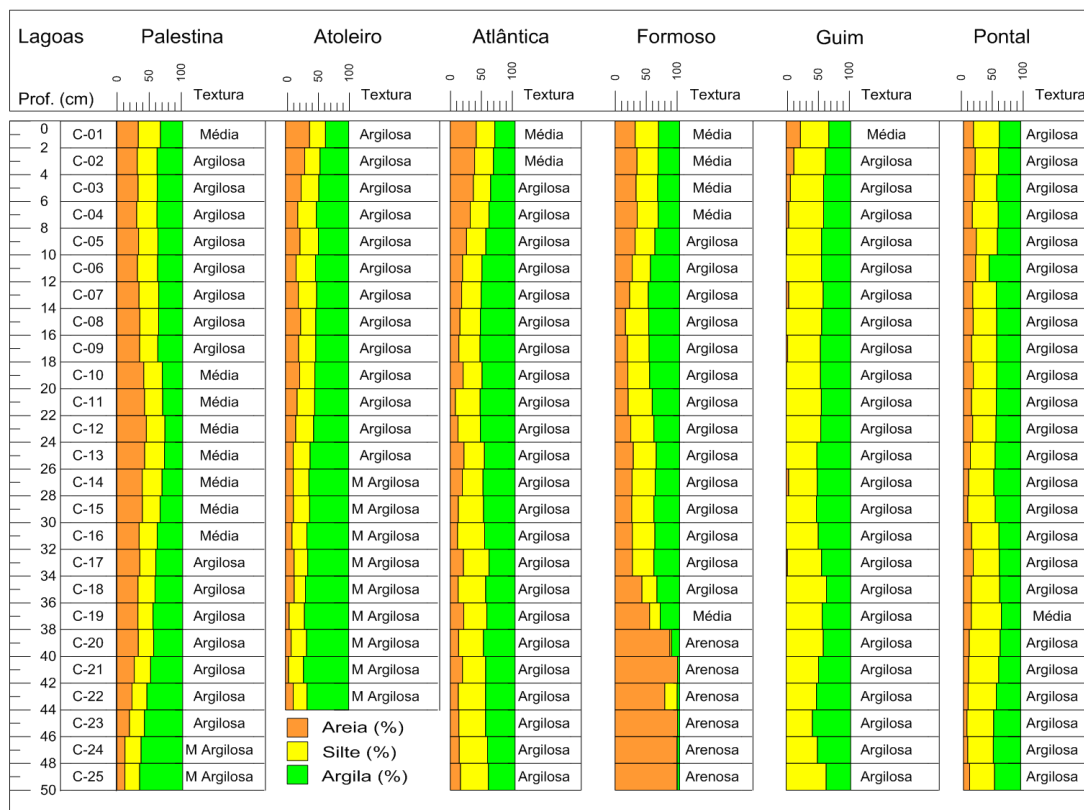
**Tabela 16 – Condições ambientais e mobilidade relativa dos elementos químicos**

<b>Mobilidade relativa</b>	<b>pH 5 - 8</b>	<b>pH &lt; 4</b>	<b>Redutoras</b>
<b>Altamente móveis</b>	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, Mo, B	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, B	Cl, Br, I, Rn, He
<b>Moderadamente móveis</b>	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, U, As, (Sr, Hg, Sb?)	Ca, Na, Mg, Sr, Hg, Cu, Ag, Co, Li, F, Zn, Cd, Ni, U, V, As, Mn, P	Ca, Na, Mg, Li, Sr, Ba, Ra, F, Mn
<b>Pouco móveis</b>	K, Rb, Ba, Mn, Si, Ge, P, Pb, Cu, Ni, Co, (Cd, Be, Ra, In, W)	K, Rb, Ba, Si, Ge, Ra	K, Rb, P, Si, Fe
<b>Muito pouco móveis</b>	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Sn, ETR, Platinóides, Au, (Cr, Nb, Ta, Bi, Cs?)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Sn, ETR, Platinóides, Au, As, Mo, Se	Fe, Al, Ga, Ti, Hf, Th, Sn, ETR, Platinóides, Au, Cu, Ag, Pb, Zn, Cd, Hg, Ni, Co, As, Sb, Bi, U, V, Se, Te, Mo, In, Cr, Nb, Ta

Fonte: Extraído de Rose *et al.* (1979).

Do ponto de vista textural, os sedimentos depositados nas lagoas marginais são predominantemente finos (argilas e siltes), sendo que 77% das camadas sedimentares foram classificadas como argilosas, 11% possuem textura média, 8% textura muito argilosa e somente 4% possuem textura arenosa (FIGURA 40). Somente a Lagoa do Formoso apresentou camadas sedimentares com texturas arenosas localizadas na base dos testemunhos, onde os valores de areias estão acima de 77%.

**Figura 40** – Perfis verticais mostrando a granulometria e textura dos sedimentos nas lagoas marginais



Fonte: Elaboração própria.

Segundo Junk, Bayley e Sparks (1989), a granulometria dos sedimentos encontrados nas lagoas marginais é reflexo da hidrodinâmica e da interação do canal fluvial com as lagoas; entretanto, Carvalho (2008) destaca que atividades antrópicas, como a agricultura e o uso urbano, podem influenciar diretamente a composição textural dos sedimentos.

Para Von Sperling (2005), lagos e represamentos localizados em áreas cobertas por matas e florestas apresentam baixa atividade biológica de produção e baixas taxas de assoreamento. Já aqueles localizados em áreas urbanas e agrícolas apresentam elevada atividade biológica de produção e altas taxas de assoreamento em virtude da maior mobilização de solos e deposição de sedimentos nos corpos d'água. Sendo assim, os dados da Tabela 17 mostram que sedimentos mais grosseiros são encontrados na Lagoa do Formoso, onde o uso do solo é marcado por grandes áreas recobertas por pastagens do tipo *Brachiaria sp.*, e os sedimentos mais argilosos ocorrem na Lagoa do Atoleiro, onde também se observa o desenvolvimento de pecuária, todavia, com a preservação das pastagens naturais.

**Tabela 17** – Valores médios de matéria orgânica e composição textural das lagoas marginais

Parâmetro	Palestina	Atoleiro	Atlântida	Formoso	Guim	Pontal
MO (%)	1,6	1,8	1,6	0,9	1,0	0,7
Argila (%)	40,7	57,1	45,8	30,9	46,7	41,8
Silte (%)	27,3	25,5	35,0	25,4	52,7	44,2
Areia (%)	32,0	17,4	19,2	43,7	2,3	14,0
Uso do solo	- Soja e milho irrigados	-Pastagem natural -Café irrigado	- Café e Silvicultura	- Pecuária intensiva - Pastagem	-Pastagem natural -Pecuária extensiva	-Cana urbano e indústria

Fonte: Elaboração própria.

Muito embora a movimentação dos solos envolva muitos aspectos como declividade, quantidade e erosividade das chuvas, tipo de solo, densidade e tipo de cobertura vegetal, tipo de manejo e práticas de conservação dos solos, muitos autores têm descrito uma maior movimentação de solos em áreas de pastagens plantadas. Santos *et al.* (1998) compararam a perda de solo em áreas de pastagem coberta por capim *Andropogon gayanus* e *Brachiaria brizantha* com áreas cobertas por pastagens naturais e encontram valores de 22,9 t.ha<sup>-1</sup> para as pastagens plantadas e 3,4 t.ha<sup>-1</sup> para as naturais.

Outro aspecto demonstrado na Tabela 17 é a relativa concordância entre os valores médios de matéria orgânica e os valores médios de argila, de forma que, na Lagoa do Atoleiro, onde se observam os maiores valores médios de matéria orgânica, também são verificadas as maiores quantidades médias de argila. Para Trask (1939), o conteúdo de matéria orgânica em sedimentos é dependente da quantidade de argila. O autor afirma ainda que, em ambientes aquáticos, as argilas concentram cerca de 2 vezes mais matéria orgânica que os siltes e 4 vezes mais que as areias.

Entre as lagoas marginais selecionadas, valores máximos de matéria orgânica e carbono orgânico (8,24% e 4,78%, respectivamente) foram encontrados nas lagoas Atlântica e mínimos (0,0%) na Lagoa do Formoso. Bezerra (1987), analisando os sedimentos do lago da represa de Três Marias, a montante da área de estudo, encontrou 8,6% de matéria orgânica e classificou o ecossistema como oligotrófico. Esteves *et al.* (1985), estudando o mesmo lago, sugeriu que a oligotrofia do ecossistema no lago de Três Marias poderia ser diretamente associada ao oligotrofismo dos solos da região.

De modo geral, foi verificado que nas lagoas marginais ocorrem baixas quantidades de matéria orgânica (TABELA 18), corroborando os estudos de Esteves *et al.* (1985). Os valores mais elevados foram observados nas lagoas Palestina (5,26%), Atoleiro (5,26%) e na Atlântica (8,24%), onde o uso e a ocupação dos solos são caracterizados pela presença de

cultivos irrigados de soja, milho e café que geralmente introduzem e manejam quantidades significativas de fertilizantes organominerais.

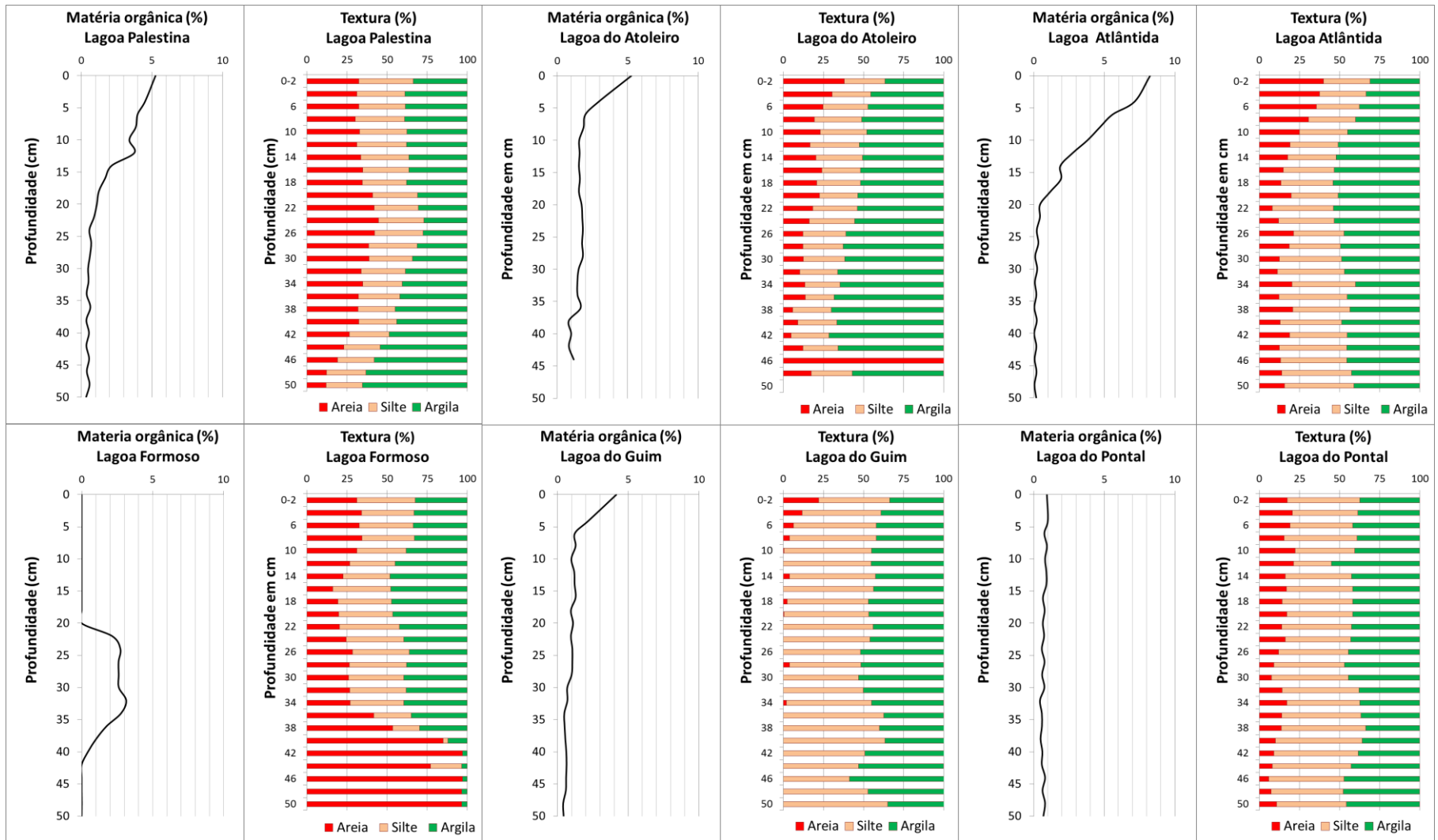
**Tabela 18** – Valores de matéria orgânica (%) encontrados nas lagoas marginais

Lagoa	Palestina	Atoleiro	Atlântica	Formoso	Guim	Pontal
<b>Média</b>	1,55	1,76	1,61	0,87	1,03	0,71
<b>Mínimo</b>	0,34	0,82	0,03	0,00	0,40	0,44
<b>Máximo</b>	<b>5,26</b>	<b>5,26</b>	<b>8,24</b>	3,14	4,16	1,00
<b>Desvio padrão</b>	1,57	0,90	2,41	1,21	0,76	0,15
<b>Uso do solo</b>	- Soja e milho irrigados	-Pastagem natural -Café irrigado	- Café irrigado e Silvicultura de mogno	- Pecuária intensiva - Pastagem plantada	-Pastagem natural -Pecuária extensiva	-Cana e Urbano e indústria

Fonte: Elaboração própria.

Nas lagoas do Formoso e do Pontal, o comportamento vertical da matéria orgânica é bastante diferenciado. Na Lagoa do Formoso, entre 0 e 20 cm de profundidade não foram encontrados valores de matéria orgânica (0%), passando a valores máximos e mínimos de 3,24% e 1,02% entre 22 e 42 cm e retornando a 0% no restante do perfil. Já na Lagoa do Pontal, os valores de matéria orgânica são bastante homogêneos, com pouca variação ao longo do perfil, não sendo encontrados valores superiores a 1%. Nestes casos, para melhor entendimento do comportamento vertical da matéria orgânica e sua relação com aspectos ambientais, deve-se considerar a introdução de outros parâmetros físicos e químicos.

**Figura 41** – Distribuição vertical dos valores de matéria orgânica e composição textural dos sedimentos nas lagoas marginais

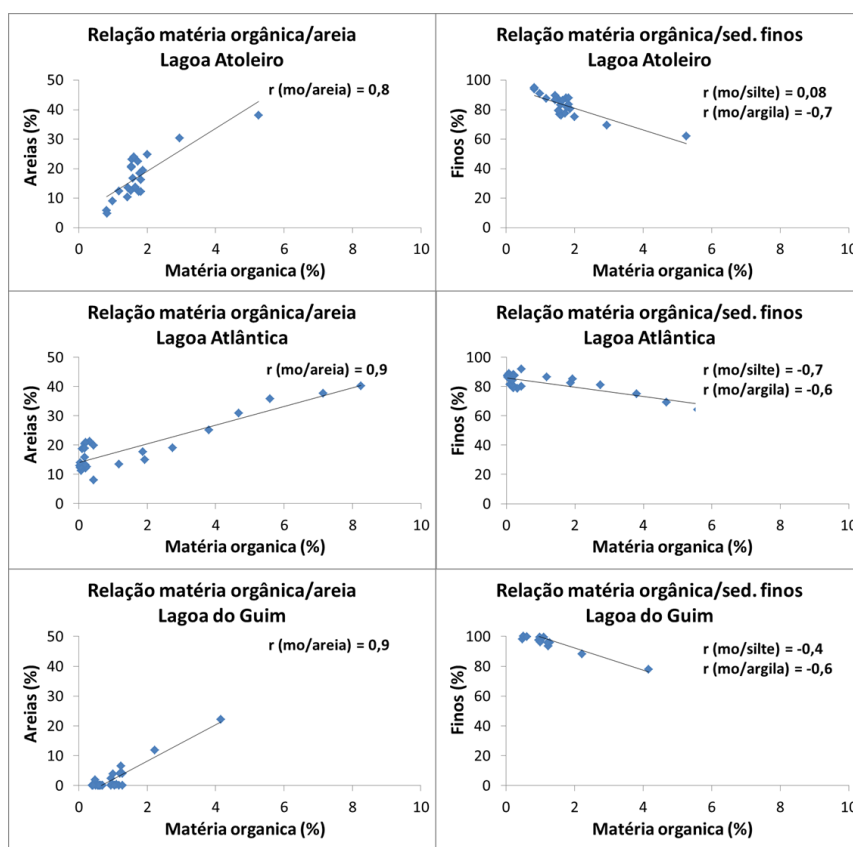


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 41, são apresentadas a quantidade e a distribuição vertical da matéria orgânica juntamente com a composição textural de cada camada sedimentar. Ao se analisarem os resultados, camada por camada, verifica-se que, no caso das lagoas marginais do alto-médio São Francisco, a relação sugerida por Trask (1939) não se confirma e a quantidade de matéria orgânica possui correlações significativas ( $r^2 > 0,8 / p < 0,05$ ) com os sedimentos mais grosseiros.

Os testes de correlações entre as concentrações de matéria orgânica e a textura dos sedimentos foram aplicados em todas as camadas sedimentares, sendo que nas lagoas do Atoleiro, Atlântica e do Guim observaram-se correlações fortes positivas ( $r^2 = 0,8$  e  $0,9 / p < 0,05$ ) entre o conteúdo de matéria orgânica e os sedimentos mais arenosos (FIGURA 42). Nas demais lagoas, as correlações entre a matéria orgânica e a textura, de modo geral, foram consideradas fracas ou moderadas.

**Figura 42** – Relação entre matéria orgânica e frações granulométricas



Fonte: Elaboração própria.

Tyson (1995) considera rara a ocorrência de concentrações de matéria orgânica superiores a 0,5% em sedimentos arenosos. Entretanto, o mesmo autor destaca que aspectos locais, como ocorrência de elementos suporte (Fe, Al e Mn), potencial redox baixo ou

negativo, gerando condições redutoras, potencial hidrogeniônico (pH) alcalino a neutro, bem como a própria quantidade de material orgânico disponibilizado nos compartimentos ambientais, concorrem para a acumulação da matéria orgânica nos sedimentos.

Atualmente, diversos trabalhos têm destacado forte tendência de aumento de matéria orgânica e eutrofização dos ambientes lacustres em decorrência da intensificação das atividades humanas nas bacias de drenagens (VON SPERLING, 2005). Nesse contexto, é possível que a tendência de acumulação da matéria orgânica nas camadas mais superficiais e de menor conteúdo de sedimentos finos nas lagoas marginais do alto-médio curso do Rio São Francisco esteja relacionada, entre outros aspectos, com a intensificação do uso e da ocupação dos solos nas bacias de drenagem que promove a substituição da vegetação natural e um maior aporte de sedimentos e material orgânico para o sistema fluvial.

### **6.1 Concentrações e enriquecimento de metais nas lagoas marginais**

A investigação do aporte de contaminantes nos ecossistemas aquáticos é uma das mais importantes etapas da avaliação da qualidade ambiental. Entre os muitos parâmetros e indicadores adotados para avaliar a qualidade ambiental em ambientes aquáticos, os metais pesados têm bastante relevância, pois apresentam toxicidade e ecotoxicidade capazes de provocar efeitos deletérios à biota e à saúde humana. Estes elementos são naturalmente encontrados em baixas concentrações na superfície terrestre, mas podem ser introduzidos em altas concentrações nos ecossistemas aquáticos a partir das atividades antrópicas.

No alto-médio curso do Rio São Francisco, as lagoas marginais funcionam como corpos receptores d'água e sedimentos, que por sua vez podem carrear, adsorver e complexar grande quantidade de metais pesados oriundos da agricultura, sítios urbanos e indústrias.

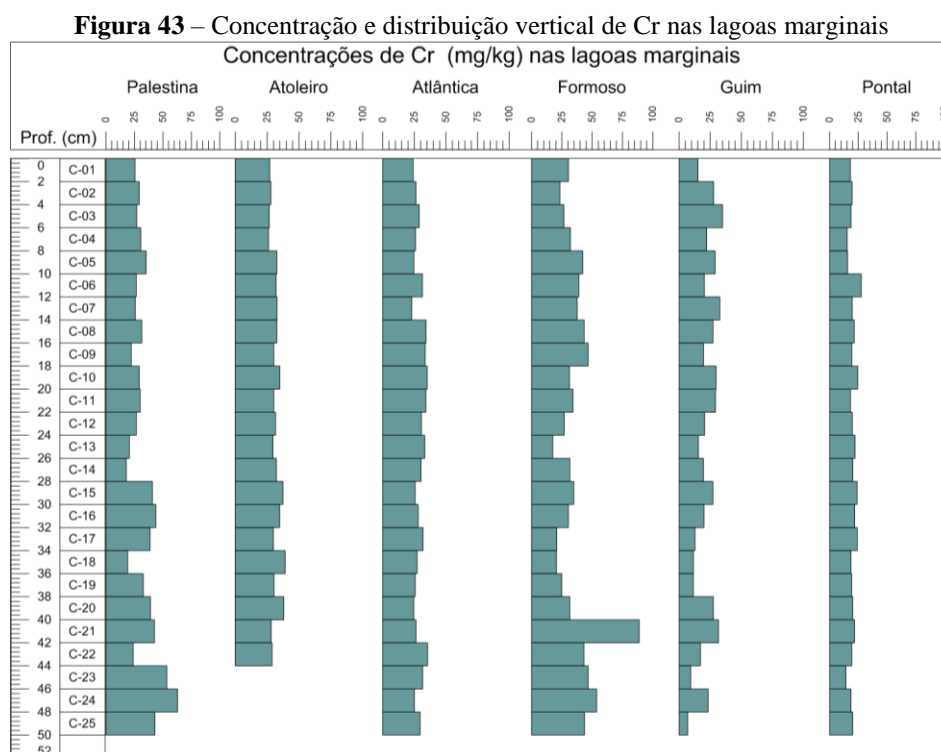
Nesta seção, os sedimentos das lagoas marginais foram analisados por espectrometria de emissão ótica – ICP-OES para obtenção das concentrações de Cd, Cr, Ni, Cu, Pb e Zn e determinação do Fator de Enriquecimento (FE), para os mesmos elementos, visando reconhecer a influência das atividades antrópicas na qualidade ambiental.

Nos Anexos, são apresentadas tabelas contendo todas as concentrações dos elementos analisados e um mosaico de figuras que permitirá comparar a distribuição vertical e as concentrações de metais pesados entre as lagoas marginais.

Entre os elementos selecionados, o Cd foi o único que apresentou concentrações abaixo do limite de detecção do método em todas as camadas sedimentares. No entanto, Ribeiro *et al.* (2012) e Trindade *et al.* (2012), analisando água e sedimentos do Rio São Francisco, encontraram concentrações significativas desse elemento. Neste trabalho, os dados obtidos por fluorescência (Capítulo 5) apontaram a ocorrência de concentrações de Cd acima de 30 mg/kg nas lagoas do Guim e do Pontal.

Segundo Tessier *et al.* (1979), no meio aquático os metais estão associados a 4 fases geoquímicas (troçável, orgânica, redutível e residual) sendo que para cada uma dessas fases existe um método adequado de extração. Dessa forma, é possível que a ausência do Cd nos sedimentos analisados por espectrometria de emissão óptica – ICP-OES esteja relacionada com a fase geoquímica na qual o elemento se encontra nas lagoas marginais e com o tipo de extração adotado nesta etapa.

Na Figura 43, é possível verificar as concentrações de Cr nos sedimentos das lagoas marginais. Entre as lagoas, os valores máximos foram observados nas camadas C-24 (62,93 mg/kg – La. Palestina), C-18 (39,19 mg/kg – La. Atoleiro), C-22 (35,49 mg/kg – La. Atlântica), C-21 (88,78 mg/kg – La. Formoso), C-03 (34,97 mg/kg – La. do Guim) e C-06 (27,54 mg/kg – La. do Pontal).



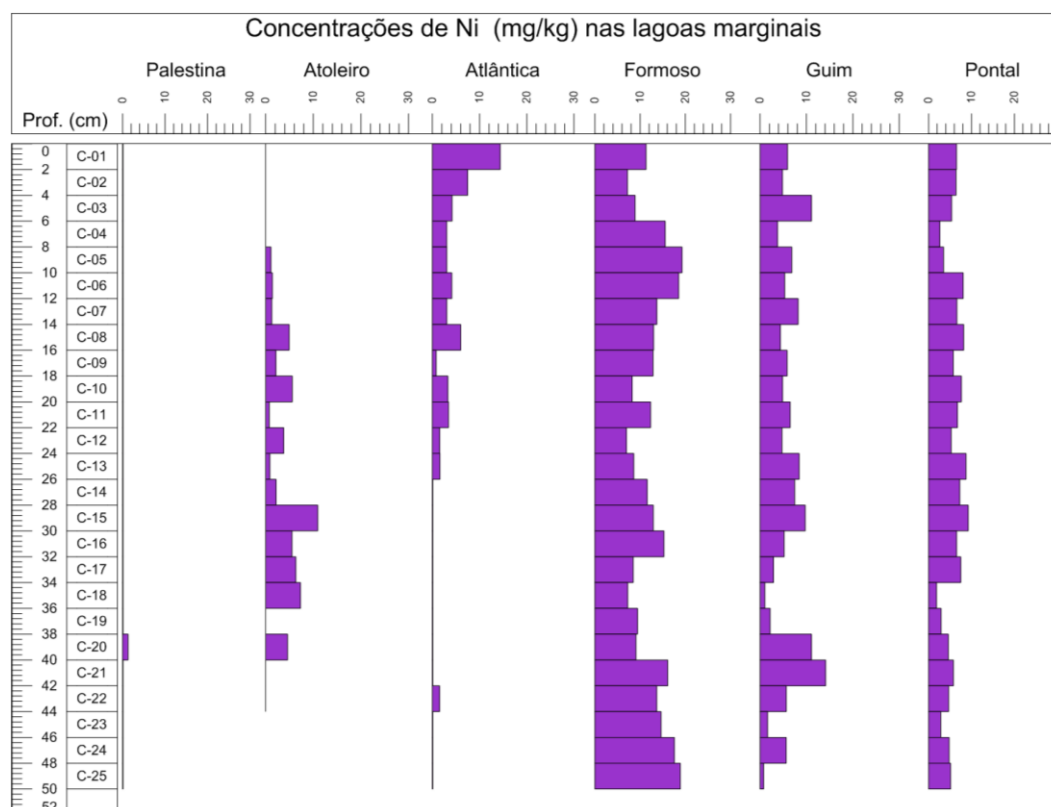
Fonte: Elaboração própria.



De modo geral, as concentrações de Cr apresentaram comportamento inverso ao esperado para elemento com forte condicionante antrópica, onde as camadas mais basais possuem concentrações mais baixas do que as camadas superiores. Trindade (2010), estudando os sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora, encontrou concentrações máximas de 61,16 mg/kg de Cr e sugeriu a contribuição de fontes litogênicas para este elemento. No mesmo sentido, o fator de enriquecimento (FE), calculado para Cr, confirma a influência da litologia, uma vez que, entre todas as camadas analisadas, somente as camadas C-03 (FE = 2,01), C-04 (FE = 2,28), C-05 (FE = 2,04), C-08 (FE = 2,08) e C-10 (FE = 2,12) na Lagoa do Guim apresentaram um enriquecimento moderado, todavia com valores extremamente próximos ao limite abaixo do qual se desconsideram as contribuições antrópicas (ZHANG; LIU, 2002).

As concentrações de Ni nas lagoas marginais (FIGURA 44) são bastante heterogêneas e demonstram contribuições de origem antropogênica nas lagoas Atoleiro, Atlântica e do Guim, onde os usos e a ocupação dos solos são caracterizados por pastagens (naturais e plantadas), culturas de café irrigadas por pivô central e silvicultura de mogno africano.

**Figura 44** – Concentração e distribuição vertical de Ni nas lagoas marginais



Fonte: Elaboração própria.

As maiores concentrações de Ni foram observadas na camada C-05 (19,25 mg/kg) da Lagoa do Formoso e as menores na Lagoa Palestina, onde somente a camada C-20 (1,27 mg/kg) apresentou concentrações acima do limite de detecção. As lagoas Atoleiro e Atlântica também possuem camadas com concentrações de Ni abaixo do limite de detecção nas porções mais superficiais de C-01 a C-04 e nas camadas mais basais entre C-14 e C-25. Entretanto, no caso da Lagoa Atlântica, quando ocorrem concentrações detectáveis pelo método, quase sempre as camadas sedimentares apresentam enriquecimento por Ni.

O fator de enriquecimento calculado para Ni apontou contribuições antrópicas em diversas camadas das lagoas Atlântica e do Guim. Na Lagoa Atlântica, foi verificado nível de enriquecimento significativo na camada C-01 (FE = 11,85) e enriquecimento moderado nas camadas C-02 (FE = 4,22), C-03 (FE = 3,41), C-04 (FE = 3,15), C-05 (FE = 4,42), C-06 (FE = 3,42), C-07 (FE = 4,68) e C-08 (FE = 3,71). Na Lagoa do Guim, com exceção das camadas C-18 (FE= 0,92), C-23 (FE = 1,74) e C-25 (FE = 1,0), todas as demais possuem algum nível de enriquecimento por fontes antrópicas, sendo que nas camadas C-13, C-14, C-15, C-20 e C-21 foi verificado nível de enriquecimento significativo (FE >5 e <20).

Vale considerar que o Ni é um micronutriente amplamente utilizado em cultivos agrícolas, está presente na composição química da maioria dos fertilizantes e atua principalmente no metabolismo do N, na uréase foliar e no metabolismo do Fe (MALAVOLTA *et al.*, 2006). Na área de estudo, as elevadas concentrações de Ni e as contribuições antropogênicas verificadas no Fator de Enriquecimento certamente estão associadas ao uso de agrotóxicos e fertilizantes fosfatados nos cultivos de café, milho e soja, uma vez que as concentrações de Ni nestes produtos podem variar de 24 a 3.300 mg/kg (MALAVOLTA *et al.*, 2006).

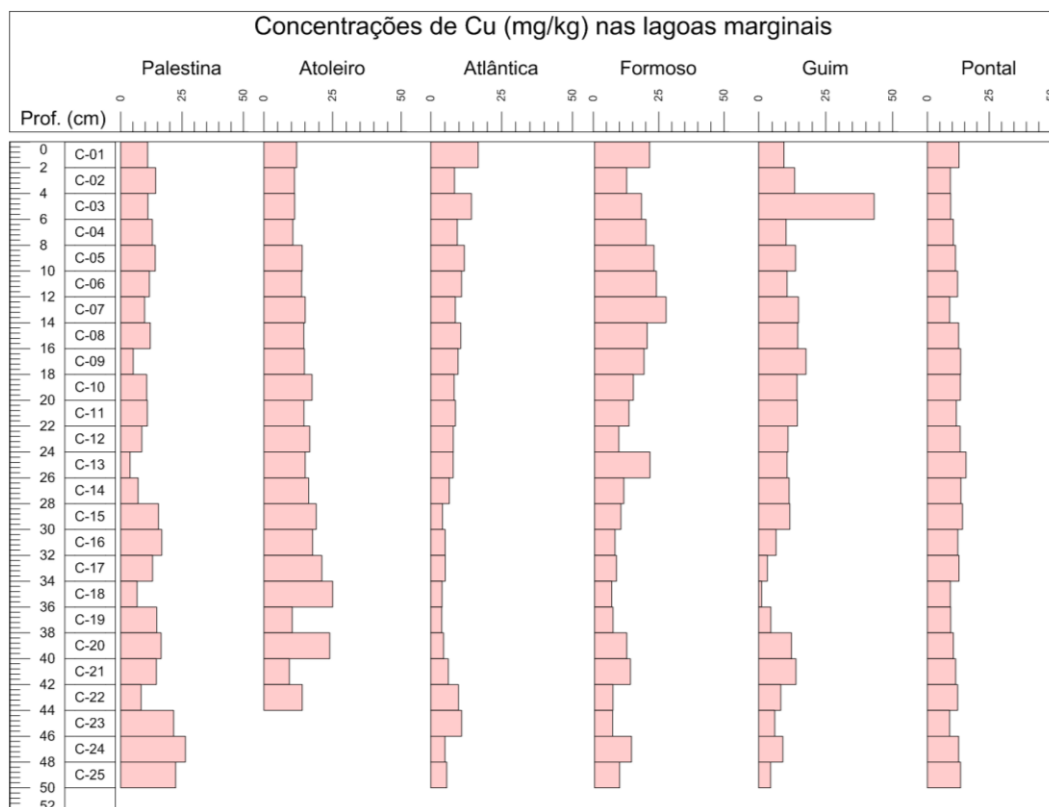
A distribuição e as concentrações de Cu nos sedimentos das lagoas marginais são apresentadas na Figura 45. A partir desta figura, é possível verificar que as mais altas concentrações de Cu ocorrem nas camadas C-03 (41, 43 mg/kg) da Lagoa do Guim, C-07 (26,30 mg/kg) da Lagoa Formoso e na C-24 (25,37 mg/kg) da Palestina. As concentrações mais baixas foram verificadas nas camadas C-13 (3,66 mg/kg) da Lagoa Palestina e na C-18 (1,06 mg/kg) da Lagoa do Guim.

Os dados obtidos com o fator de enriquecimento para Cu indicaram contribuições de origem antrópica em camadas sedimentares das lagoas Formoso, do Guim e Atlântica. Esta

última, por sua vez, possui o maior número de camadas moderadamente enriquecidas por Cu (C-01 FE = 2,64; C-03 FE = 2,24; C-05 FE = 3,30; C-07 FE = 2,55; e C-23 FE = 2,50).

A Lagoa Atlântica localiza-se na margem direita do Rio São Francisco, próximo ao limite municipal Pirapora-Várzea da Palma, onde desde o início da década de 2000 se destaca a produção e a irrigação do Café Cerrado. Nos cultivos de café, o Cu é um importante fungicida que atua no combate a doenças como a ferrugem, além de promover vigor e retenção foliar ao cafeeiro (MALAVOLTA *et al.*, 2006). Entretanto, concentrações acima de 4.000 mg/kg encontradas em mudas e na casca do café demonstram a problemática ambiental da aplicação de doses excessivas de agroquímicos à base de cobre (KABATA-PENDIAS, 2010).

**Figura 45** – Concentração e distribuição vertical de Cu nas lagoas marginais



Fonte: Elaboração própria.

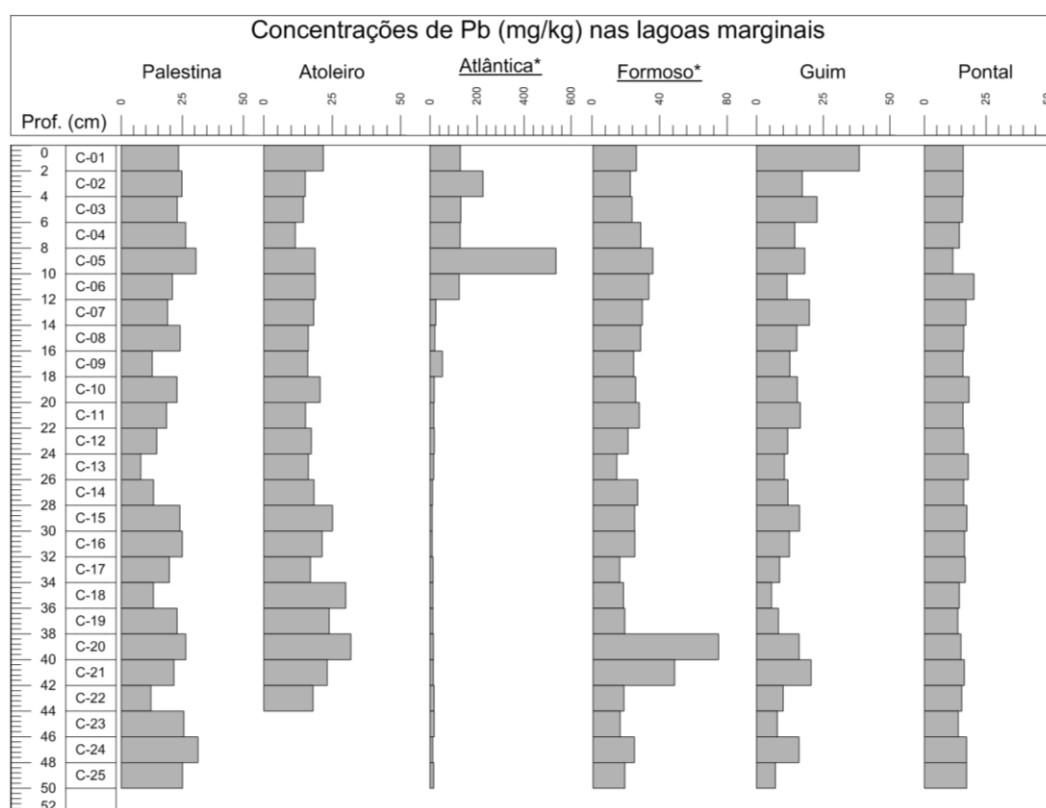
Na Figura 46, é possível visualizar a distribuição e as concentrações de Pb nos sedimentos das lagoas marginais selecionadas.

O Pb e o Zn são elementos que possuem forte associação com as atividades antrópicas no alto-médio curso do Rio São Francisco. Trindade (2010), analisando os sedimentos do Rio

São Francisco em áreas a montante das lagoas marginais, encontrou concentrações de Zn acima de 5.500 mg/kg e 300 mg/kg de Pb em estações de amostragens sob a influência da usina de beneficiamento de Zn e Pb da Votorantim Metais em Três Marias.

De modo geral, as concentrações de Pb nas lagoas marginais são mais baixas que as observadas nos sedimentos do rio. Entretanto, teores acima de 100 mg/kg de Pb foram observados nas camadas superiores (de C-01 a C-06) da Lagoa Atlântica, onde os valores se mantiveram sempre acima de 120 mg/kg, chegando a 536 mg/kg na camadas C-05.

**Figura 46** – Concentração e distribuição vertical de Pb nas lagoas marginais



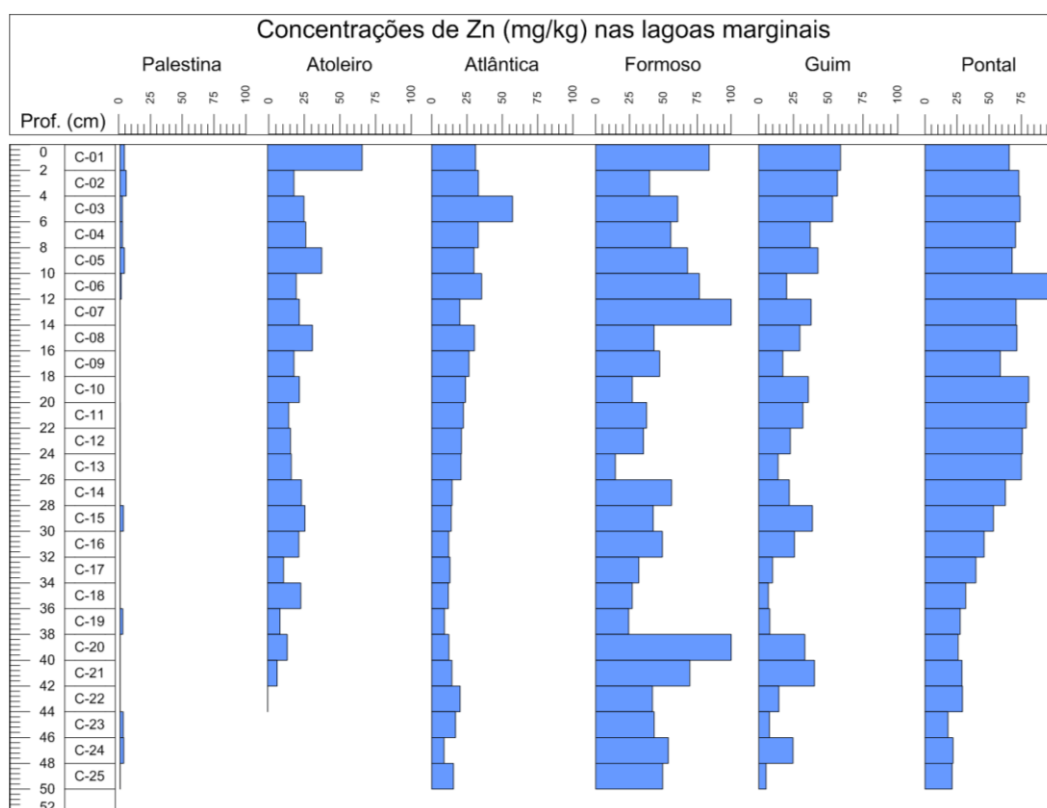
\* Intervalo alterado em virtude das altas concentrações encontradas em camadas das lagoas Atlântica e Formoso. Fonte: Elaboração própria.

O fator de enriquecimento calculado para Pb indicou contribuição de fontes antropogênicas em camadas sedimentares das lagoas Atlântica, Formoso e do Guim. Na Lagoa Atlântica, as camadas C-01 (FE = 8,83), C-02 (FE = 10,52), C-03 (FE = 8,87), C-04 (FE = 11,07) e C-06 (FE = 8,53) apresentaram nível de enriquecimento significativo e a camada C-06 com FE = 64,19 apresentou um enriquecimento extremamente alto. Já as lagoas Formoso e do Guim obtiveram, respectivamente, níveis de enriquecimento significativo e moderado, nas camadas C-20 e C-21 (Formoso) e C-01 (Guim).

Muito embora a qualidade da água e do sedimento seja diretamente afetada pelas concentrações de Zn e Pb derivadas da usina de beneficiamento da Votorantim Metais no alto-médio São Francisco (OLIVEIRA, 2005; RIBEIRO, 2010; TRINDADE, 2010), é importante destacar que o Zn é um micronutriente amplamente utilizado nos cultivos da região e pode se transformar em uma fonte difusa de contaminação. Neste contexto, observou-se que camadas sedimentares enriquecidas por Zn e associadas a contribuições de origem antropogênica estão distribuídas por todas as lagoas marginais estudadas.

Pontualmente, as camadas C-01 (83,70 mg/kg), C-07 (160,90 mg/kg), C-20 (120 mg/kg), da Lagoa Formoso, e as camadas C-06 (102,09 mg/kg) e C-10 (80,74 mg/kg), da Lagoa do Pontal, foram as que apresentaram as mais altas concentrações de Zn (FIGURA 47). Estas duas lagoas estão associadas à pecuária intensiva com pastagens plantadas (Formoso) e ao cultivo de cana-de-açúcar (Pontal).

**Figura 47** – Concentração e distribuição vertical de Zn nas lagoas marginais



Fonte: Elaboração própria.

O fator enriquecimento calculado para Zn indicou que este elemento é o que possui maior influência das atividades antrópicas na área de estudo. Em todas as lagoas estudadas,

foram observados níveis de enriquecimento. Nesse contexto, destacam-se as lagoas do Atoleiro, onde 95% das camadas analisadas apresentaram nível de enriquecimento extremamente alto ( $FE > 40$ ), e a do Pontal, com 76% das camadas com nível de enriquecimento moderado ou significativo.

Além da distribuição do fator de enriquecimento do Zn, chamam a atenção os observados nas lagoas Atoleiro e Palestina. Na Lagoa Atoleiro, foi observado na C-01  $FE = 399,04$  e na Palestina também na C-01  $FE = 56,44$ . Nestas duas lagoas, o uso dos solos é marcado pelo cultivo de soja e milho irrigados (Palestina) e café irrigado e pastagens naturais (Atoleiro).

De modo geral, os resultados apresentados neste capítulo demonstraram a forte influência das atividades antrópicas, sobretudo a agricultura, na distribuição e concentração dos metais pesados e a importância das lagoas marginais como repositórios de material orgânico e metais pesados de origem natural ou antropogênica.

As concentrações dos micronutrientes Ni, Cu, e Zn e seus respectivos fatores de enriquecimento encontrados nos sedimentos das lagoas Palestina, Atoleiro e, principalmente, na Lagoa Atlântica deixam evidente a contribuição dos cultivos irrigados no comprometimento da qualidade dos recursos hídricos no alto-médio São Francisco.

Embora o Pb não seja considerado um micronutriente para plantas, concentrações cada vez mais elevadas dele têm sido observadas em solos e plantas e associadas à participação desse elemento na composição dos adubos orgânicos e minerais, pesticidas e fertilizantes (KABATA-PENDIAS, 2010).

Além das mais elevadas concentrações de Ni, Cu, Pb e Zn, as lagoas marginais localizadas próximas aos cultivos irrigados concentram as maiores quantidades de material orgânico. Nesse contexto, testes de correlações entre a matéria orgânica e a concentração de metais apontaram a existência de correlações significativas ( $r^2 > 0,8$ ;  $p > 0,05$ ) nas lagoas Palestina, Atoleiro e Atlântica, sugerindo que os metais pesados nestas lagoas estão mais ligados ao conteúdo de matéria orgânica do que à ocorrência de sedimentos finos.

Por fim, destaca-se o comportamento vertical dos metais pesados na coluna sedimentar das lagoas selecionadas. Com exceção do Cr, que possui forte influência litogênica, os demais elementos analisados possuem algum nível de enriquecimento nas camadas superficiais e mais recentes, confirmando a importância das lagoas marginais no traçamento do histórico de contaminação e do uso e da ocupação dos solos.

## 7 GEOCROLOGIA E EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS PRESSÕES E IMPACTOS AMBIENTAIS NO ALTO-MÉDIO SÃO FRANCISCO

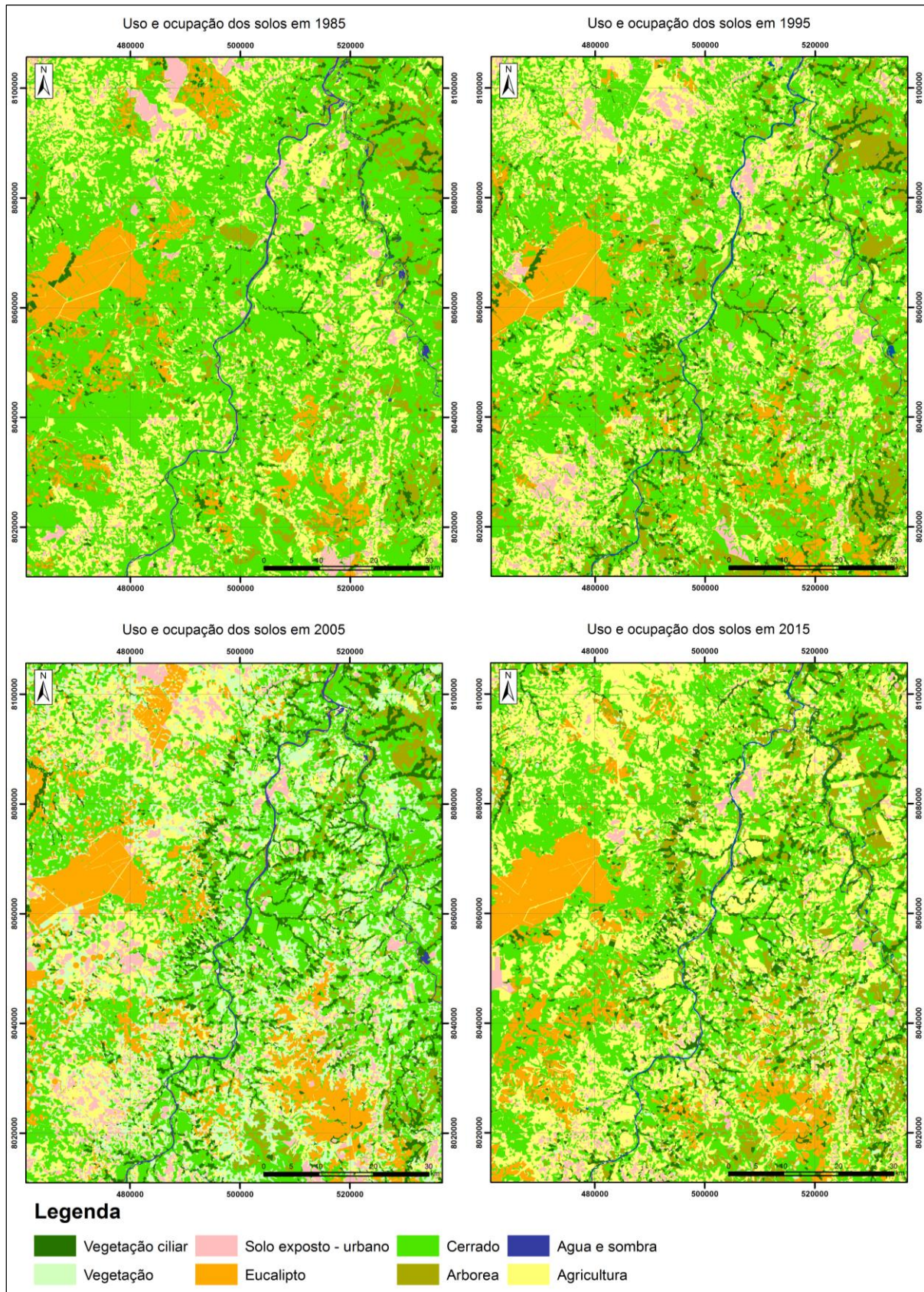
Os sedimentos, por sua capacidade de acumular metais pesados, são excelentes traçadores das mudanças ambientais (XUE; YAO; XIA, 2007). A quantificação das concentrações de metais pesados nos sedimentos e a determinação da cronologia deposicional possibilitam reconstituir o histórico de contaminação e a contribuição das atividades antrópicas. Em alguns casos, este conjunto de análise permite identificar as condições pristinas dos ambientes aquáticos e estabelecer valores de referência para metais pesados e outros contaminantes.

Neste capítulo, será discutida a evolução espaço-temporal das pressões antrópicas e seus impactos ambientais, a partir das concentrações dos metais pesados Ni, Cu, Pb e Zn extraídas das camadas sedimentares de lagoas marginais no alto-médio São Francisco. A cronologia de deposição das camadas sedimentares e a taxa de sedimentação dos sedimentos foram baseadas na mensuração do radionuclídeo  $^{210}\text{Pb}$ , conforme metodologia proposta por Godoy *et al.* (1998b), e os metais pesados selecionados foram quantificados via ICP/OES.

A partir do processamento de imagens LANDSAT 5 e 8, foi possível avaliar o ritmo de alteração da paisagem natural na área de estudo. A Figura 48 mostra a rápida supressão da vegetação nativa ocorrida entre 1985 e 2015 e a introdução de novos cultivos e grandes empreendimentos agrícolas.

Neste período, grande parte do cerrado norte mineiro foi substituída pelas monoculturas de eucaliptos, pinus e outros cultivos irrigados (FIGURA 48). Entre 1985 e 2015, o cerrado, que até então ocupava cerca de 55,47% da área de estudo, passou a representar 36,79%, uma redução de 145.303,66 de hectares. Em contraposição, os tratos antrópicos, agricultura e eucaliptos, passaram de 29,32%, em 1985, para 40,28%, em 2015, um significativo aumento de 85.114,42 hectares.

**Figura 48** – Classificação multitemporal de imagens LANDSAT 5 e 8 de 1985 e 2015 mostrando a substituição do cerrado na área de estudo



Fonte: Elaboração própria.

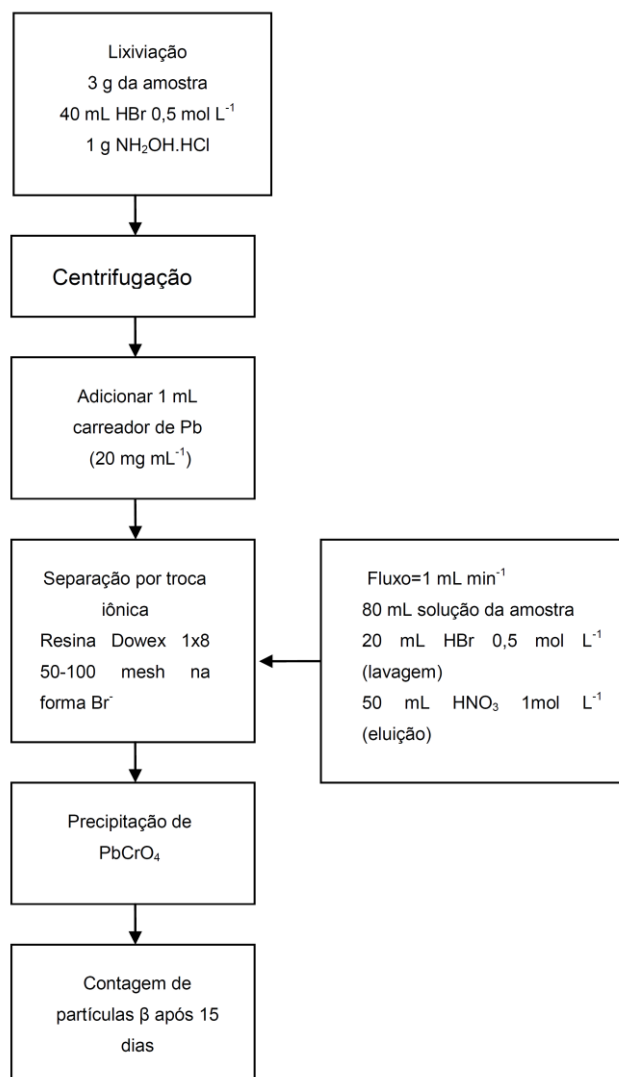


Além do quantitativo do cerrado que foi suprimido, tem importância a localização que os novos empreendimentos agrícolas e cultivos comerciais ocuparam, sobretudo a partir de 1985. Em sua grande maioria, estes cultivos apresentam alta demanda de água, de forma que é possível verificar na Figura 48 que as áreas agrícolas anteriormente localizadas nas porções mais elevadas, planas e distantes dos principais cursos d'água passaram a ocupar as áreas mais rebaixadas e próximas dos cursos d'água, sobretudo aquelas adjacentes às lagoas marginais. Nesse contexto, é possível que, desde sua implantação e desenvolvimento na década de 1970, as atividades agrícolas de grande porte tenham passado a influenciar diretamente na qualidade da água e no fluxo de contaminantes na região do alto-médio São Francisco.

### **7.1 Geocronologia e taxas de sedimentação nas lagoas marginais**

Os sedimentos, ao se depositarem em ambientes aquáticos, preservam características químicas e físicas que servem como registros do histórico de contaminação nas bacias de drenagem. Para determinar a idade deposicional dos sedimentos e o ritmo de deposição nos últimos 100 a 150 anos, a quantificação do  $^{210}\text{Pb}$  em excesso ou não suportado tem sido a técnica de datação mais utilizada atualmente.

Neste trabalho, a determinação da atividade de  $^{210}\text{Pb}$  nos sedimentos extraídos das lagoas marginais selecionadas foi acessada a partir de separação radioquímica, conforme metodologia proposta por Godoy *et al.* (1998b). O método consiste na lixiviação do  $^{210}\text{Pb}$  com  $\text{HBr}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , conforme demonstrado na Figura 49.

**Figura 49** – Método analítico utilizado para determinar a atividade de  $^{210}\text{Pb}$ 

Fonte: Godoy *et al.* (1998b).

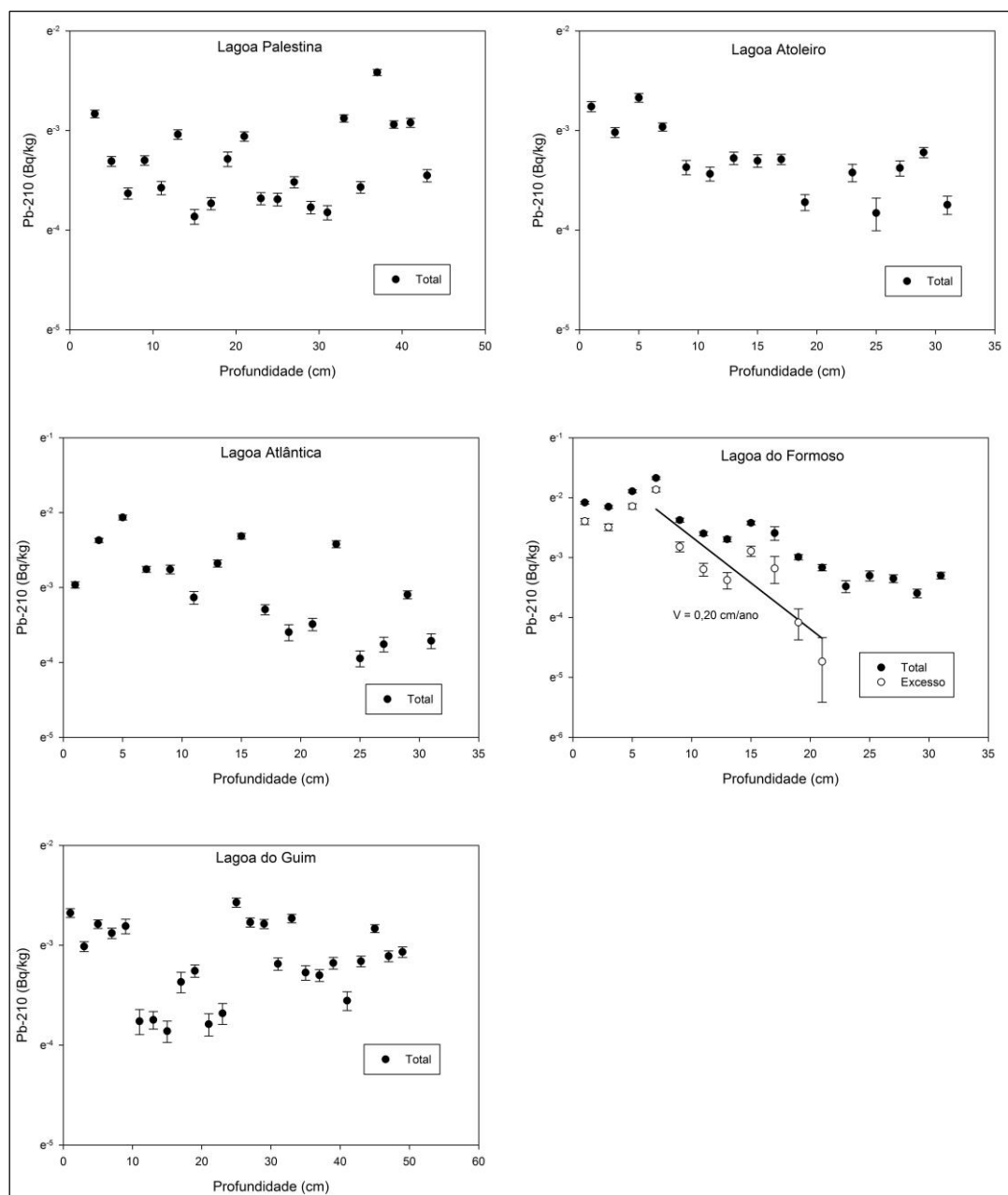
Com a determinação da atividade do  $^{210}\text{Pb}$  total e do  $^{210}\text{Pb}$  não suportado ou em excesso, é possível calcular as taxas de sedimentação a partir da Lei do Decaimento Radioativo, que descreve uma redução exponencial do conteúdo de  $^{210}\text{Pb}$  com a profundidade (APPLEBY; OLDFIELD, 1978b).

Para calcular a taxa de sedimentação e a época da deposição dos sedimentos nas lagoas marginais selecionadas, coletaram-se seis testemunhos, cada um deles com aproximadamente 50 cm, que foram posteriormente seccionados em camadas de 2,0 cm de espessura.

Na Figura 50, é apresentada a relação entre a atividade de  $^{210}\text{Pb}$  e a profundidade nas lagoas marginais, nota-se que, exceto na Lagoa do Formoso, a distribuição das concentrações de  $^{210}\text{Pb}$  é bastante irregular, sem tendência de decaimento exponencial em função da profundidade. Este fato, possivelmente, está associado com o desaparecimento sazonal da lâmina d'água e consequente avanço das atividades agrícolas para o interior das lagoas. As atividades agrícolas, assim como o

pisoteio de gado e outras bioturbações, podem produzir amplas zonas de mistura abaixo da interface água-sedimento.

**Figura 50** – Relação da atividade de do  $^{210}\text{Pb}$  total e em excesso e taxa de sedimentação



Fonte: Elaboração própria.

Entre os testemunhos analisados, o referente à Lagoa do Formoso apresentou correlação significativa ( $0,89 / p < 0,05$ ) entre o conteúdo de  $^{210}\text{Pb}$  e a profundidade estabelecendo uma taxa de sedimentação de  $0,2 \text{ cm/ano}^{-1}$  para os últimos 100 anos (FIGURA 50). Seguramente, a conservação e a preservação da cronologia das camadas sedimentares nesta lagoa estão associadas à perenidade, uma vez que a partir de análises multitemporais de imagens orbitais LANDSAT 5 e 8 de 1985 a

2015 e de fotografias aéreas do projeto USAF-Brazil de 1964, observou-se que a Lagoa do Formoso manteve uma lâmina d'água durante todo o período estudado.

Sobre os testemunhos que possuem camadas de mistura em profundidade, Sanchez-Cabeza e Ruiz-Fernandes (2012) salientam que estes não devem ser usados na datação de eventos históricos. Nesse contexto, apesar da aparente tendência de redução da atividade do  $^{210}\text{Pb}$  com a profundidade, os testemunhos das lagoas Palestina, Atoleiro, Atlântica, do Guim e do Pontal não foram considerados para o cálculo da taxa de sedimentação e datação das camadas sedimentares.

Taxas de sedimentação de  $0,2 \text{ cm/ano}^{-1}$ , ou aproximadas, têm sido encontradas em distintos ambientes deposicionais. Entretanto, a comparação direta entre tais ambientes ainda é incipiente, uma vez que os poucos dados disponíveis sobre taxas de sedimentação referem-se predominantemente aos ambientes costeiros, sobretudo estuários e baías.

De modo geral, o conjunto de dados geocronológicos para sedimentos recentemente depositados, tanto em climas tropicais quanto em outros contextos climáticos, aponta que os ambientes lacustres têm apresentado taxas de sedimentação de poucos milímetros por ano (APPLEBY; OLDFIELD, 1992; ARGOLLO, 2001; NERY, 2009; GODOY *et al.*, 2006).

## **7.2 Registros históricos das concentrações de matéria orgânica e metais pesados nas lagoas marginais**

A taxa de sedimentação de  $0,2 \text{ cm/ano}^{-1}$  encontrada no testemunho da Lagoa do Formoso foi aplicada nas demais lagoas, com intuito de encontrar correlações entre as camadas sedimentares, alterações antrópicas conhecidas, inferir o período de deposição e analisar a evolução espaço-temporal das concentrações de matéria orgânica e dos metais pesados Cu, Ni, Pb e Zn na área de estudo.

Muito embora cada lagoa marginal no alto-médio São Francisco possua características singulares que condicionam sua taxa de sedimentação, alternativamente, eventos como presença de pólen, lançamento de pesticidas e metais pesados têm sido utilizados no sentido de validar os resultados (APPLEBY; OLDFIELD, 1992; GODOY *et al.*, 1998a). Assim, de maneira geral, a deposição de sedimentos a uma velocidade de  $0,2 \text{ cm/ano}^{-1}$  mostrou-se concordante com os registros históricos das transformações da paisagem e alterações no uso e na ocupação dos solos na área de estudo.

Os registros históricos sedimentares encontrados nas lagoas marginais a partir da aplicação da taxa de sedimentação de  $0,2 \text{ cm/ano}^{-1}$  abrangeram um período de 100 anos, de 1915 a 2015, no entanto, a relação direta entre a geocronologia fornecida pelo  $^{210}\text{Pb}$  e os eventos hidrodinâmicos e ocupacionais engloba as incertezas inerentes aos métodos de datação. Dessa forma, o período

analisado (1915 a 2015) foi subdividido em décadas e foram apresentados os dados de concentração de metais pesados e matéria orgânica referentes a cada camada sedimentar.

O período analisado representa as maiores alterações na paisagem natural na área de estudo, sobretudo a partir das décadas de 1950 e 1960, com a chegada dos grandes empreendimentos agrícolas voltados para monocultura de pinus e eucaliptos, e posteriormente nas décadas de 1990 e 2000, com a introdução das culturas irrigadas de soja, café e milho (FIGURA 51).

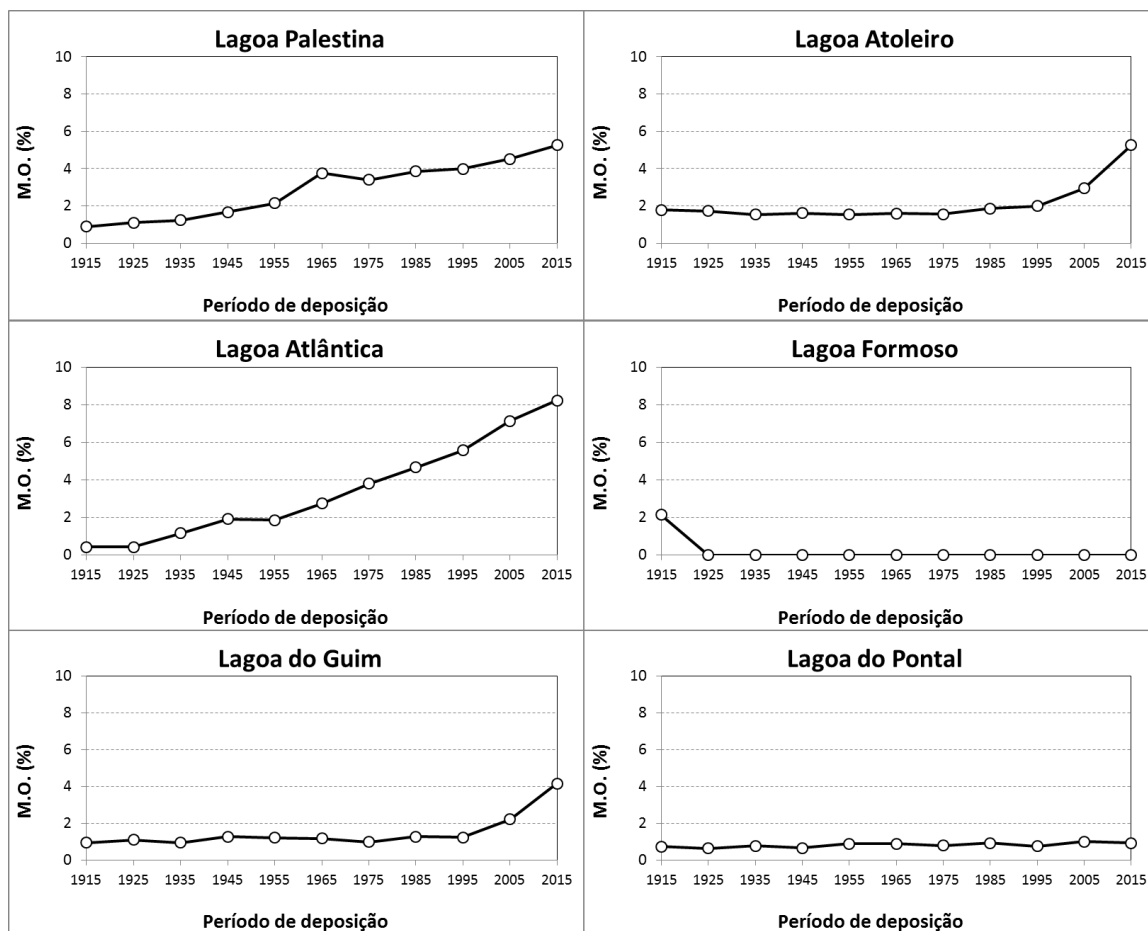
**Figura 51** – Testemunho sedimentar e atividades antrópicas desenvolvidas entre 1915 e 2015 na área de estudo



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 52 demonstra a evolução temporal do conteúdo de matéria orgânica encontrado nas lagoas marginais. Destacam-se neste contexto as lagoas Palestina e Atlântica, cujo acréscimo mais significativo de matéria orgânica ocorreu em meados das décadas de 1960 e 1950, respectivamente, e as lagoas Atoleiro e do Guim com maiores taxas de acumulação observadas a partir da década de 2000.

**Figura 52** – Evolução temporal do conteúdo de matéria orgânica nas lagoas marginais



Fonte: Elaboração própria.

Nas lagoas Palestina e Atlântica, a partir de 1955 o conteúdo de matéria orgânica aumentou 144,65% e 338,30%, respectivamente. Já nas lagoas Atoleiro e do Guim, o mesmo comportamento é verificado a partir da década de 1995, quando o conteúdo de matéria orgânica nas camadas sedimentares aumentou 181,28% e 238,21%.

De modo geral, os teores totais de matéria orgânica podem ser considerados baixos, no entanto, a variação e a acumulação nas lagoas marginais coincidem com os dois mais importantes períodos de intensificação do uso e da ocupação dos solos na região, ocorridos nas décadas de 1960 e 1990.

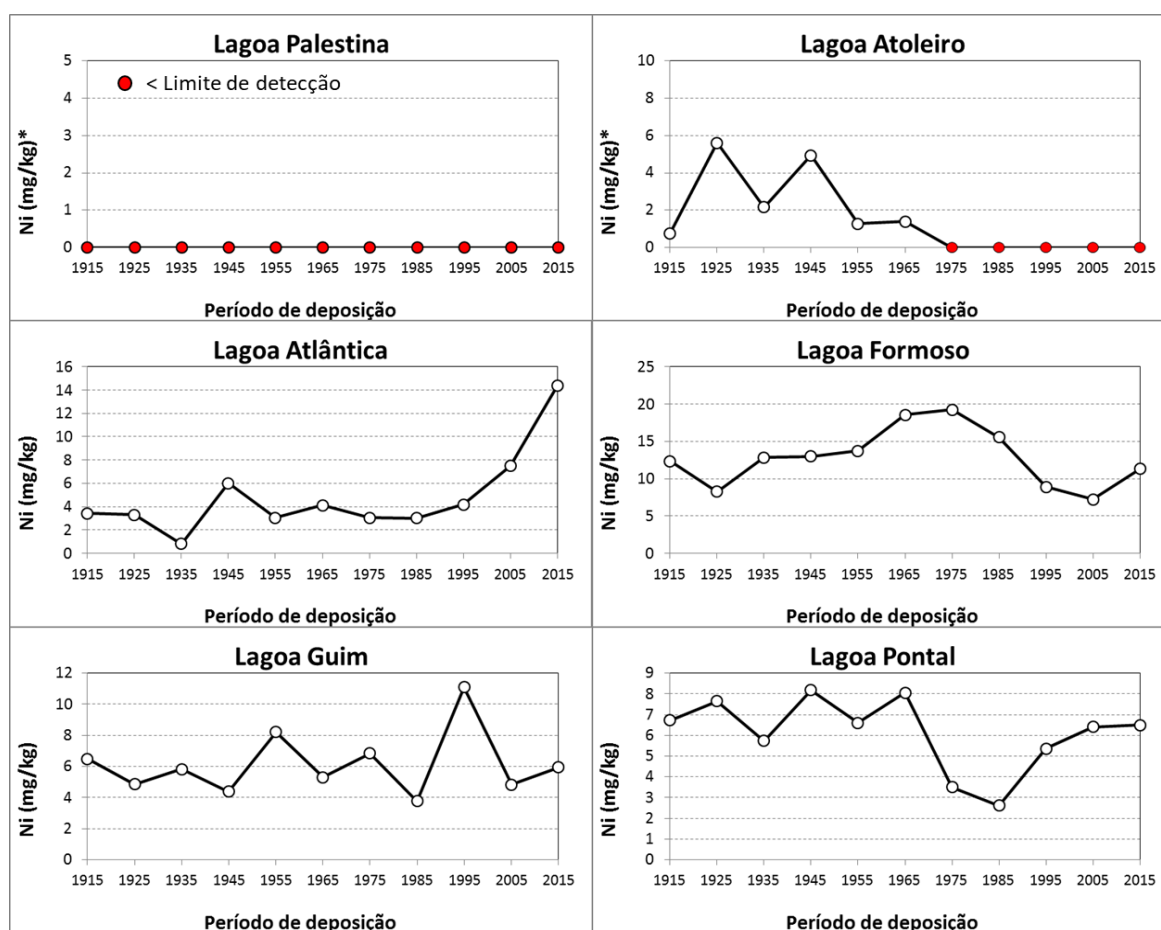
A datação dos sedimentos por  $^{210}\text{Pb}$  e o cálculo da taxa de sedimentação demonstraram o aporte dos metais pesados Ni, Cu, Pb e Zn para as lagoas marginais em momentos específicos e possibilitaram a identificação da contribuição das pressões antrópicas nos últimos 100 anos.

No período estudado, as concentrações de Ni apresentaram comportamentos distintos entre as lagoas marginais (FIGURA 53). Nas camadas sedimentares da Lagoa Palestina, as concentrações permaneceram abaixo do limite de detecção do método durante todo o período analisado. Na Lagoa

Atoleiro, as camadas mais superficiais depositadas entre 1975 e 2015, as concentrações também permaneceram abaixo do limite de detecção do método.

Em contraposição, na Lagoa Atlântica, as concentrações de Ni apresentaram um aumento acentuado e contínuo a partir de 1985, passando de 3,03 mg/kg para 14,37 mg/kg em 2015, representando um incremento de 374,22%. Na Lagoa do Guim, o pico de concentração de Ni coincide com o período que vai de 1985 a 1995, passando de 3,77 mg/kg para 11,09 mg/kg, um aumento de 194,30%, e reduzindo posteriormente para 5,94 mg/kg em 2015.

**Figura 53** – Evolução temporal das concentrações de níquel nas lagoas marginais selecionadas



\* Em destaque camadas sedimentares com concentrações abaixo do limite de detecção do método utilizado.  
Fonte: Elaboração própria.

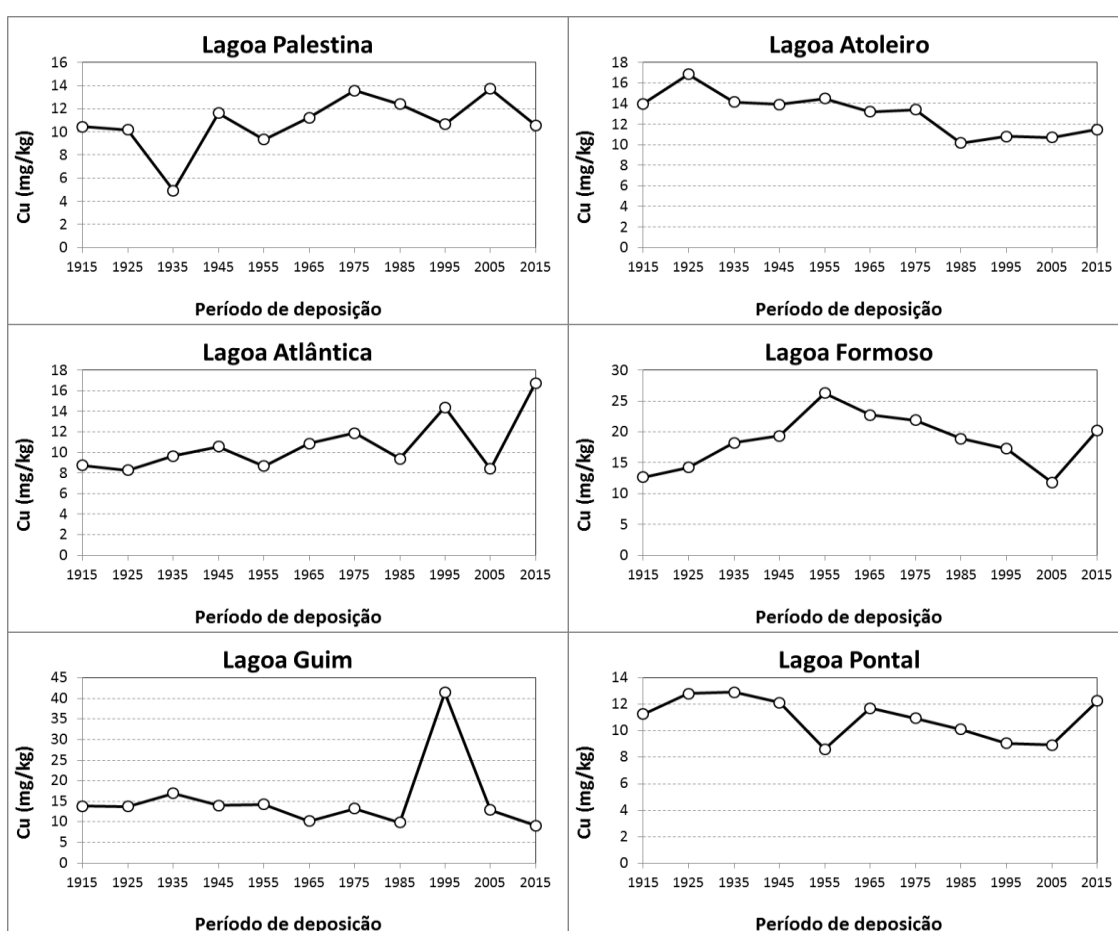
Para as concentrações de Cu, entre 1955 e 2015 foram observadas variações importantes nas lagoas Atlântica, Formoso e Guim (FIGURA 54). Desde 1975, as concentrações de Cu vêm apresentando tendência de incremento nas camadas superiores e mais recentes da Lagoa Atlântica, passando de 8,69 mg/kg para 16,74 mg/mg em 2015, perfazendo um aumento de 92,68%.

Na Lagoa do Formoso, um maior aporte de Cu em 1955 fez com que as concentrações aumentassem 35,79%, passando de 19,37 em 1945 mg/kg para 26,30 mg/kg. Posteriormente, entre 1965 e 2005, as concentrações de Cu sofreram forte redução, voltando a aumentar entre 2005 e

2015, passando, respectivamente, de 11,83 para 20,71 mg/kg, desta vez com um aumento acumulado de 71,43%. Comportamento similar foi verificado na Lagoa do Pontal, onde, desde 1965, as concentrações de Cu nos sedimentos que vinham reduzindo aumentaram 37,33% entre 2005 e 2015.

Na lagoa do Guim, destaca-se a variação do cobre entre 1985 e 1995. Neste período, foi verificado um aumento de 321,02%, onde as concentrações passaram de 9,84 mg/kg para 41,43mg/kg. Em contraposição, atualmente, esta lagoa é a que apresenta menor concentração de Cu na camada mais superficial C-01 (9,09 mg/kg).

**Figura 54** – Evolução temporal das concentrações de cobre nas lagoas marginais selecionadas



Fonte: Elaboração própria.

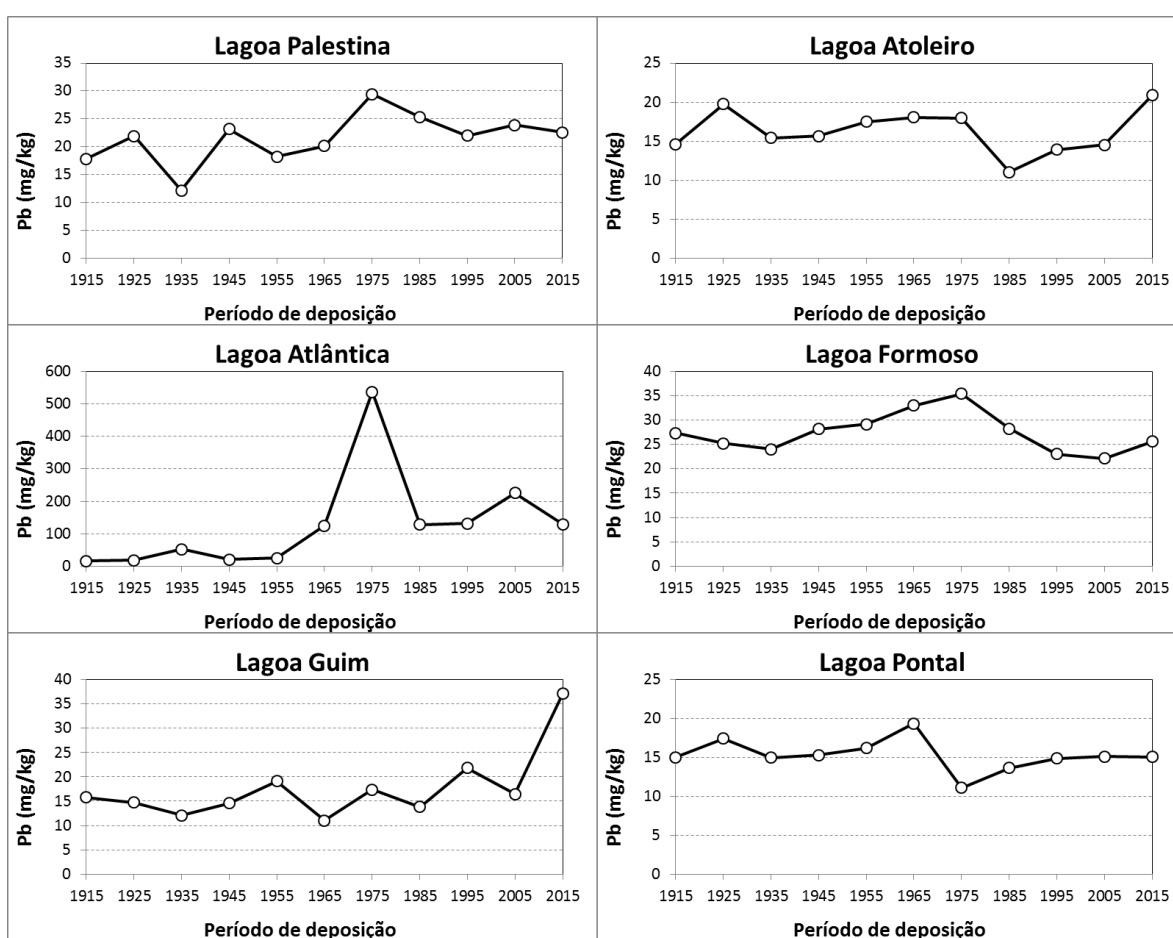
A evolução temporal das concentrações de Pb apresentada na Figura 54 mostra variações importantes nas lagoas Palestina, Atlântica, Formoso e do Guim. Nesse contexto, as concentrações de chumbo na Lagoa Palestina apontam um maior aporte de Pb entre 1955 e 1995, com destaque para o ano 1975, quando foram observados os maiores valores (29,75 mg/kg), representando um aumento de 61,60% em relação às 18,20 mg/kg observadas em 1955.



Na Lagoa Atlântica, destaca-se o incremento acentuado de Pb entre 1955 e 1975; no período, as concentrações aumentaram 2.505,15%, passando de 20,56 mg/kg para 536 mg/kg. Concentrações de Pb desta magnitude em sedimentos chamam bastante a atenção, pois geralmente produzem efeitos adversos à biota e à saúde humana (Resolução CONAMA nº 344/2004).<sup>1</sup>

Na lagoa do Guim, a variação de chumbo nos sedimentos é mais discreta que a encontrada na Atlântica. Entretanto, nas camadas superiores e mais recentes, observa-se uma forte tendência de enriquecimento entre 2005 e 2015, neste período foi verificado um aumento de 124,53% nas concentrações de Pb.

**Figura 55** – Evolução temporal das concentrações de chumbo nas lagoas marginais selecionadas



Fonte: Elaboração própria.

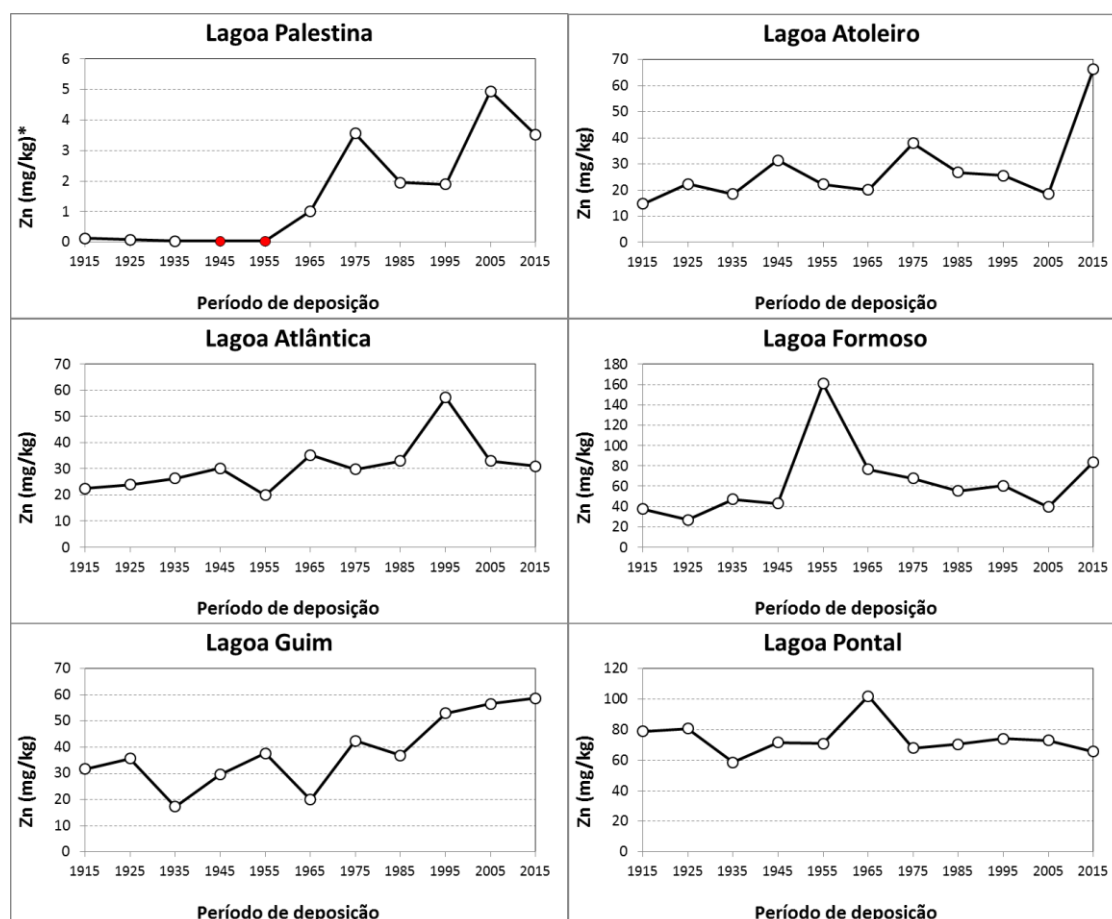
Entre os elementos selecionados, o zinco foi o que apresentou maior variação no período analisado. Certamente este comportamento relaciona-se à distribuição espacial dos cultivos e à ampla participação do Zn na composição dos agroquímicos utilizados na região.

<sup>1</sup> “Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, e dá outras providências.” Nesta resolução, encontram-se descritos os limites ambientais para as concentrações de metais pesados nos sedimentos.

Do ponto de vista espacial, em todas as lagoas marginais estudadas o Zn apresenta picos de concentração ou tendência de enriquecimento atual (FIGURA 56. Na Lagoa Palestina, as camadas sedimentares mais basais apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do método adotado, no entanto, a partir de 1965, são descritas concentrações cada vez mais elevadas, representando um aumento de 247,52% desta época até 2015.

Na Lagoa Atoleiro, as concentrações de Zn apresentaram declínio de 105,5% entre 1975 e 2005. Entretanto, entre 2005 e 2015, foi observada uma forte tendência de acumulação de Zn nas camadas mais recentes, onde as concentrações passaram de 18,49 mg/kg para 64,36 mg/kg em 2015, acumulando um aumento de 258,94%. Na Lagoa do Guim, assim como na Palestina e na Atlântica, as concentrações de Zn também possuem tendência de enriquecimento nas camadas mais recentes, entre 1985 e 2015, onde foi observado um aumento de 59,11%.

**Figura 56** – Evolução temporal das concentrações de zinco nas lagoas marginais selecionadas



\* Em destaque concentrações abaixo do limite de detecção do método.

Fonte: Elaboração própria.

As lagoas Atlântica, Formoso e do Pontal, diferentemente das demais que demonstraram tendências, apresentaram picos nas concentrações de Zn, que representam momentos de maior aporte do elemento para essas lagoas. Na Lagoa Atlântica, o pico de concentração ocorre em 1995,

com aumento de 73,67% em comparação com 1985, e verifica-se também uma redução de 84,29% quando comparado com 2015.

Na Lagoa do Formoso, o principal pico de concentração ocorre entre 1945 e 1955, período no qual as concentrações de Zn apresentaram aumento de 274,22%, passando de 43,00 mg/kg para 169,90 mg/kg. Entre 2005 e 2015, um novo pico de concentração é observado, desta vez as concentrações passaram de 39,74 mg/kg para 83,70 mg/kg, representando um aumento de 110,62%.

Por fim, a Lagoa do Pontal, que até então não havia apresentado variações significativas nas concentrações de matéria orgânica e de metais pesados, é a que demonstra a maior concentração média de Zn (73,99 mg/kg) no período analisado e um importante pico de concentração entre 1955 e 1965. Neste período, os valores passaram de 70,90 mg/kg em 1955 para 102,09 mg/kg em 1965, representando um aumento de 43,99%.

De modo geral, as concentrações de Ni, Cu, Pb e Zn encontradas nas camadas sedimentares das lagoas marginais estão dentro dos limites ambientais aceitáveis, estabelecidos pela resolução CONAMA 344/04 (TABELA 19). Com exceção da camada C-11, depositada em 1975 na Lagoa Atlântica, cujas concentrações de chumbo registradas (536 mg/kg) estiveram muito acima do Nível II (91,3 mg/kg), indicando um comprometimento do ambiente aquático naquela época.

**Tabela 19** – Valores referência para os metais (CONAMA 344/04) e estatística descritiva dos resultados

Elemento (mg/kg)	Nível I*	Nível II**	Média	Mínimo	Máximo
<b>Cu</b>	35,70	197,00	11,85	1,06	41,43 <sup>1</sup>
<b>Ni</b>	18,00	35,00	4,96	0,00	19,25 <sup>1</sup>
<b>Pb</b>	35,00	91,30	26,66	5,42	536,00 <sup>2</sup>
<b>Zn</b>	123,00	315,00	30,37	0,03	160,90 <sup>1</sup>

\* Limiar abaixo do qual não se observam efeitos adversos à biota.

\*\* Concentrações acima das quais geralmente são observados efeitos adversos à biota.

1 – Concentrações na faixa de incerteza entre o Nível I e o Nível II.

2 – Concentrações acima do Nível II.

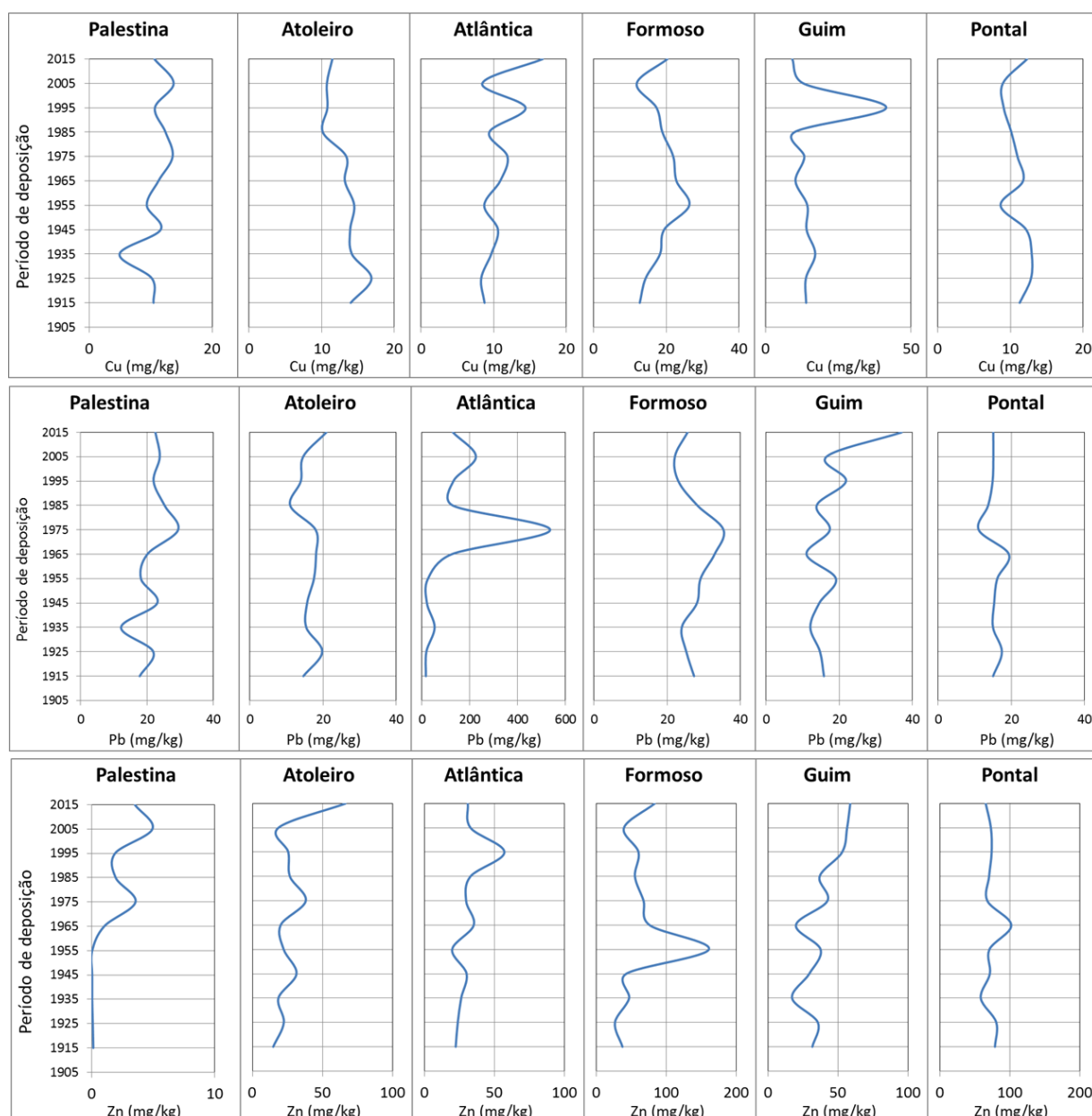
Fonte: Elaboração própria.

Muito embora a grande maioria das concentrações dos metais Ni, Cu, Pb e Zn ainda permaneça dentro dos limites aceitáveis, segundo a Resolução CONAMA nº 344/2004, com a datação dos sedimentos e o cálculo da taxa de sedimentação pode-se identificar a influência das pressões antrópicas, sobretudo das atividades agrícolas na acumulação destes elementos nas camadas sedimentares mais recentes. Nesse contexto, os elementos que melhor representaram os impactos ambientais decorrentes da intensificação dos usos e da ocupação dos solos na área de estudo são Zn, Cu e Pb.

Os perfis das concentrações de Zn, Cu e Pb nas lagoas marginais apresentaram um período deposicional coincidente com o início das atividades agrícolas na área de estudo, sobretudo a partir

de meados da década de 1960, quando são observadas as maiores variações (picos de concentrações) e início do processo de acumulação dos metais (FIGURA 57).

**Figura 57** – Evolução das concentrações de Cu, Pb e Zn nas lagoas marginais



Fonte: Elaboração própria.

Com os dados geocronológicos e as concentrações de Zn, Cu e Pb, foi possível calcular o estoque de metais pesados incorporados aos sedimentos entre 1965 e 2015. Os valores foram obtidos pela relação da concentração de metais encontrados numa determinada camada com as concentrações de base (*background*).

Para determinar os valores referentes às concentrações de base (*background*), foi adotada a média das concentrações de Cu, Pb e Zn encontradas nas camadas sedimentares depositadas nas

lagoas marginais antes de 1960 (TABELA 20), que representa a época da introdução dos cultivos agrícolas na região. Já para as concentrações de metais, de origem antropogênica, foi considerado um valor médio das concentrações de Cu, Pb e Zn a partir de 1965.

**Tabela 20** – Concentrações de base (*background*) para Cu, Pb e Zn

Lagoa	Palestina	Atoleiro	Atlântica	Formoso	Guim	Pontal	Média
<b>Conc. de base Cu (mg/kg)</b>	9,30	14,68	9,18	18,17	14,58	11,55	12,91
<b>Conc. de base Pb (mg/kg)</b>	18,65	16,59	26,67	26,76	15,25	15,77	19,95
<b>Conc. de base Zn (mg/kg)</b>	0,06	21,87	24,54	63,11	28,53	72,13	35,04

Fonte: Elaboração própria.

Para encontrar a concentração de metal por  $\text{Kg.m}^{-3}$ , foi utilizada a equação sugerida por Loureiro (2006):

$$C_{\text{tn}} = ([A_m - B_{\text{cg}}] \times T_{\text{finos}} \times (1 - T_{\text{água}}) \times \text{Dens} \times 10^{-3})$$

Onde:

$C_{\text{tn}}$  = Concentração do metal em  $\text{kg.m}^{-3}$  na camada sedimentar “n” do testemunho “t”.

$[A_m]$  = Concentração do metal na amostra em mg.kg.

$[B_{\text{cg}}]$  = Concentração de base em mg.kg.

$T_{\text{finos}}$  = Teor de finos em%.

$T_{\text{água}}$  = Teor de água em%.

Dens = Densidade em  $\text{g.cm}^{-3}$ .

A partir da quantificação de metais incorporados aos sedimentos em  $\text{kg.m}^{-3}$  em um dado período deposicional e do volume da camada sedimentar em relação à área total da lagoa, foram encontrados os estoques de Cu, Pb e Zn (TABELA 21).

**Tabela 21** – Estoque de metais pesados (toneladas) nos sedimentos das lagoas marginais

Elemento	Palestina	Atoleiro	Atlântica	Formoso	Guim	Pontal	Total
<b>Estoque de Cu</b>	22,82	0,00	23,20	2,04	20,48	0,00	68,53
<b>Estoque de Pb</b>	43,96	0,00	1557,32	3,48	58,22	0,00	1662,97
<b>Estoque de Zn</b>	23,07	85,23	100,50	2,54	215,20	36,19	462,73

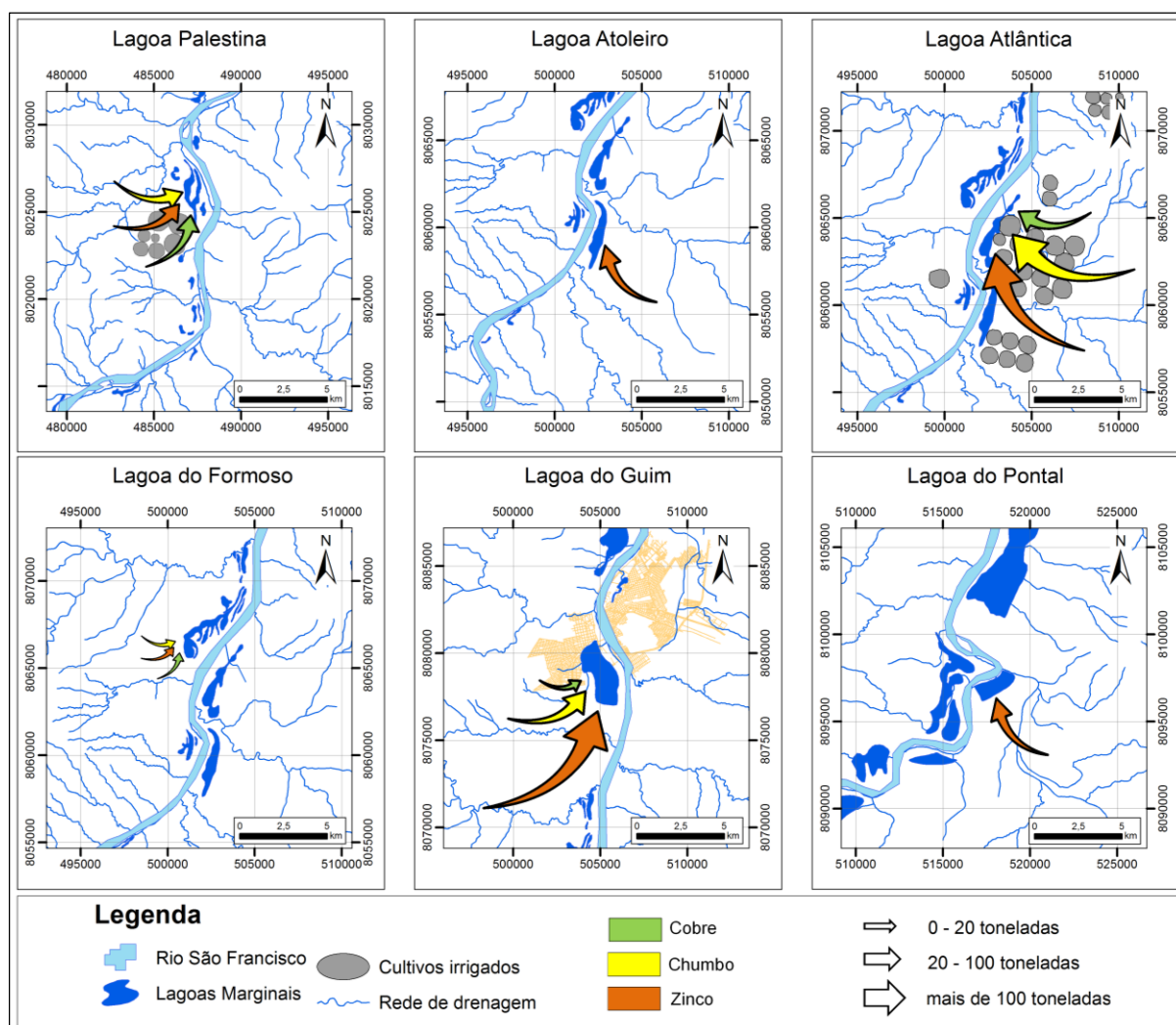
Fonte: Elaboração própria.

De modo geral, os resultados geocronológicos, as concentrações e o cálculo do estoque de metais indicam que entre 1965 e 2015 as atividades antropogênicas, principalmente as agrícolas, introduziram na área de drenagem das lagoas marginais concentrações crescentes de metais que

culminaram na deposição de 68,53 toneladas de Cu, 1.662,97 toneladas de Pb e 462,73 toneladas de Zn nos últimos 50 anos.

Na Figura 58 é possível verificar o fluxo de Cu, Pb e Zn para lagoas marginais entre 1965 e 2015. Neste contexto destacam-se as lagoas, Palestina, Atlântica e do Guim, que estocaram a maior quantidade de metais nos últimos 50 anos.

**Figura 58** – Fluxos de metais pesados Cu, Pb e Zn para lagoas marginais entre 1965 e 2015



Fonte: Elaboração própria.

Individualmente, a Lagoa Atlântica apresenta-se como a mais comprometida pelas concentrações dos metais analisados. Considerando estoque total de Cu, Pb e Zn, 76,60% encontram-se depositados nesta lagoa. A Lagoa Guim também se encontra comprometida, nesta lagoa os estoques de Cu, Pb e Zn representam 13,39% do total.

Do ponto de vista espacial, estoques de Cu, Pb e Zn revelam uma forte relação com os cultivos irrigados. Com exceção da Lagoa do Guim, onde predomina a pecuária intensiva, na Palestina e na Atlântica ocorrem os cultivos irrigados de soja e café, respectivamente.

De modo geral, entre os metais analisados, a principal problemática ambiental regional está relacionada com as concentrações de zinco. Este micronutriente, nos últimos 50 anos, foi o mais manejado e incorporado aos sedimentos das lagoas marginais no alto-médio São Francisco numa taxa de 7,7 toneladas por ano.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, concentrações crescentes de contaminantes são manejadas e introduzidas nos sistemas aquáticos. A intensificação do uso e da ocupação dos solos a partir da segunda metade do século XX foi responsável por grande parte dos metais pesados atualmente encontrados nos corpos hídricos.

No alto-médio São Francisco, a intensificação do uso e da ocupação dos solos data da década de 1960, com a chegada dos grandes empreendimentos agrícolas, contudo, registros históricos do fluxo de sedimento e contaminantes são inexistentes do ponto de vista regional.

Uma das maneiras de se reconstituir o histórico de contaminação das bacias de drenagem é por meio da datação dos sedimentos recentemente depositados. No Brasil, a maioria dos trabalhos envolvendo sedimentos depositados num período de 100 a 150 anos concentra-se nas zonas litorâneas e no entorno de áreas densamente urbanizadas, produzindo dados geocronológicos e de taxas de sedimentação bastante pontuais em estuários e baías.

A este respeito, o presente trabalho demonstrou que a adoção das lagoas marginais como testemunhos da evolução espaço-temporal certamente permitirá a integração dos dados geocronológicos já existentes para a costa brasileira àqueles produzidos nas áreas interioranas, ampliando o arcabouço de informações sobre os efeitos das pressões antrópicas nos ambientes aquáticos.

Os resultados obtidos confirmaram a hipótese da utilização das lagoas marginais como testemunhos hidrogeomorfológicos dos impactos ambientais decorrentes das pressões antrópicas nas bacias de contribuição e sugerem que, além da avaliação da evolução das concentrações de metais, é possível estudar as alterações produzidas pelas atividades humanas a partir de outros parâmetros, como o conteúdo de matéria orgânica.

No alto-médio São Francisco, as lagoas marginais comportaram-se como ambientes repositórios de sedimentos, matéria orgânica e contaminantes. Os sedimentos depositados nesse período são predominantes argilo-siltosos, com textura argilosa, pobres em matéria orgânica e com teores significativos de metais pesados nos últimos 100 anos.

Na Lagoa do Formoso, em virtude da perenidade observada, as camadas sedimentares permaneceram organizadas cronologicamente, permitindo a datação dos sedimentos e a determinação do fluxo de metais na bacia de drenagem. A aplicação do radioisótopo  $^{210}\text{Pb}$  com traçador geocronológico nos sedimentos destas lagoas demonstrou ser uma técnica bastante adequada para o reconhecimento do histórico de contaminação entre 1915 e 2015.

A taxa de sedimentação de  $0,2 \text{ cm/ano}^{-1}$  e as concentrações de metais, principalmente Cu, Pb e Zn, encontradas nos sedimentos relevou o efeito das pressões antrópicas no alto-médio São



Francisco e deixou evidente que as lagoas marginais, além da importância ecológica, exercem papel singular na investigação dos fluxos de sedimentos, geoquímicos e de contaminantes, abrindo inúmeras possibilidades de avaliar as condições ambientais atuais e pretéritas, bem como predizer a qualidade ambiental nas bacias de contribuição.

O histórico de contaminação por metais pesados abrangeu um período de 100 anos, sendo que os maiores impactos regionais em relação às concentrações de Cu, Pb e Zn ocorreram nos últimos 50 anos, coincidindo com a intensificação do uso e da ocupação dos solos na área de estudo. Neste período, à medida que o cerrado norte mineiro foi sendo substituído por cultivos irrigados, as concentrações Cu, Pb e Zn incorporadas aos sedimentos foram aumentando na ordem de 15,82 toneladas por ano, culminando no estoque de 76,60 toneladas de Cu, 319,38 toneladas de Pb e 474,14 toneladas de Zn.

## REFERÊNCIAS

ALKIMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A. Bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. A. *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia- Nucleo-MG, 2001. p. 9-30.

ALMEIDA, D. F. *Gestão Ambiental dos Sedimentos de Corrente do Rio São Francisco na Região de Três Marias (MG/ Brasil)*. 2010. 94 f. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2010.

ALMEIDA, F. F. O Cráton do Paranaimirim e sua relação com o do São Francisco. In: SIMPÓSIO DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, Salvador, 1979. *Anais...* Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia – Nucleo BA-SE, 1981. p. 1-10.

ALMEIDA, F. F. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, p. 285-295, 1977.

AMARANTE, A. *Comportamento geoquímico de metais pesados em sedimentos argilosos da Bacia de São Paulo – estudo de caso*. 1997. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Regiões Fisiográficas da Bacia do São Francisco*. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

ANJOS, R. M. *et al.* The Study of Goiânia Radiological Accident in the Modern Physics Teaching. *Rev. Bras. de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, p. 60-68, 2000.

APPLEBY, P. G.; OLDFIELD, F. Application of  $^{210}\text{Pb}$  to sedimentation studies. In: IVANOVICH, M.; HARMON, R. S. (Ed.). *Uranium-series disequilibrium: application to Earth, marine, and environmental sciences*. Oxford: Clarendon Press, 1992. p. 731-778.

APPLEBY, P. G.; OLDFIELD, F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediments from Finland. *Nature*, v. 280, p. 53-55, 1978a.

APPLEBY, P.; OLDFIELD, F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment. *Catena*, v. 5, p. 1-8, 1978b.

ARGOLLO, R. M. *Cronologias de sedimentação recente e de deposição de metais pesados na baía de Todos os Santos usando  $\text{Pb}^{210}$  e  $\text{Cs}^{137}$* . 2001. 104 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

BAGGIO, H. F. *Alterações na paisagem natural e agrícola do município de Buritizeiro – MG: implicações do plantio generalizado de pinus e eucalipto no meio físico, biológico e sócio-econômico*. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte-MG, 2002.

BAGGIO, H. F. *Contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em água superficial e sedimento de corrente na Bacia do Rio do Formoso, município de Buritizeiro, MG.* 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte-MG, 2008.

BERNER, E. K.; BERNER, R. A. *Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles.* 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Princeton University Press, 1986. 486 p.

BEUSELINCK, L. *et al.* Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, v. 32, n. 3-4, p. 193-208, 1998.

BEZERRA, M. A. O. *Contribuição ao estudo do ciclo do nitrogênio na represa de Três Marias, MG.* 127f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, UFSCar, São Carlos, 1987.

BOURDON, B. *et al.* Introduction to U-series geochemistry. In: BOURDON, B. *et al.* (Ed.). *Uranium series geochemistry.* Geochemical Society and Mineralogical Society of America, 2003. p. 1-21.

BOWEN, H. J. M. *Environmental chemistry of the elements.* New York: Academic Press, 1979.

BRASIL. *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco.* Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2006. 148 p.

BRENNER, M.; PELOW, A. J.; SCHELSKE, C. L. Disequilibrium between <sup>226</sup>Ra and supported <sup>210</sup>Pb in a sediment core from a shallow lake. *Limnol. Oceanogr.*, v. 39, n. 5, p. 1222-1227, 1994.

BRIDGE, J. S.; DEMICCO, R. V. *Earth Surface Process, landforms and sediment deposits.* New York: Cambridge University Press, 2008. 815 p.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Distribuição estratigráfica e sistemas deposicionais do Grupo Urucuaia Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 2, n. 18, p. 481-499, 1999.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática.* 2. ed., rev., atual. e ampl. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 602 p.

CAZOTTI, R. I. *et al.* Geocronologia isotópica (<sup>210</sup>Pb e <sup>226</sup>Ra) de sedimentos límnicos: determinação de velocidades e taxas de sedimentação, e de idades. In: MOZETO, A. A.; UMBUZEIRO, G. A.; JARDIM, W. F. *Métodos de coleta, análises físico-químicas e ensaios biológicos e ecotoxicológicos de sedimentos de água doce.* São Carlos: Cubo Multimídia, 2006. p. 36-57.

CHARLTON, R. Fundamentals of Fluvial Geomorphology. London: Routledge. *Chemosphere*, v. 51, n. 8, p. 723-733, 2008.

CHIAVEGATTO, J. R. S. *Análise estratigráfica das sequências tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco.* 1992. 216 f.

Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 1992.

COHEN, A. S. *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*. New York, Oxford University Press, 2003. 525 p.

COLLINSON, J. D.; THOMPSON, D. B. *Sedimentary Structures*. London: Allen & Unwin, 1982. 194 p.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). 2004. *Resolução CONAMA nº 344, de 25 de março de 2004*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/conama>. Acessado em 1 jul. 2014.

CULLITY, B. D. *Elements of the X-Ray Diffraction*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1956. 509 p.

DANCEY, C.; REIDY, J. *Estatística sem Matemática para Psicologia: usando SPSS para Windows*. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608p.

DOMINGUEZ, J. M. L. As coberturas do Cráton do São Francisco: abordagem do, 20., Salvador. *Anais...* Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. p. 137-159. CD.

DRAGO, E. C. Origen y clasificacion de ambientes leníticos en llanuras aluviales. *Revi. Assoc. Cienc. Nat. Lit.*, Santa-Fé, v. 1, n. 7, p. 123-137, 1976.

DUFFUS, J. H. Heavy metals – a meaningless term?. *Pure Applied Chemical*, Edinburgh-Scotland, v. 74, n. 5, p. 793-807, 2002.

DUNAI, T. J. *Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 187 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EISENBUD, M.; GESELL, T. F. *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial & Military Sources*. 4. ed. From Natural, Industrial and Military Sources, Academic Press, 1997. 641 p.

ESTEVES, F. A. *et al.* Caracterização limnológica preliminar da represa de Três Marias (MG) com base em alguns parâmetros ambientais básicos. *Ciênc. Cult.*, v. 37, n. 4, p. 608-617, 1985.

FERREIRA, P. A. L.; SILVA, S. C.; POMPEO, M.; FIGUEIRA, R. C. L. Geocronologia e datação por radionuclídeos, um estudo de caso: Represa Paiva Castro (Sistema Cantareira – Mariporã – São Paulo). In: POMPEO, M; MOSCHIBI-CARLOS, V.; NISHIMURA, P. Y.; SILVA, S. C.; LÓPEZ-DOVAL, J. C. D.. (Org.). *Ecologia de reservatórios e interfaces*. 1ª ed. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015, v. 1, p. 109-119.

FIGUEIRA, R. C. L.; CUNHA, I. I. L. A contaminação dos oceanos por radionuclídeos antropogênicos. *Química Nova*, v. 21, n. 1, p. 73-77, 1998.

FIGUEIRA, R. C. L. *Inventário de radionuclídeos artificiais em água do mar e sedimentos da costa sul do Brasil*. Tese (Doutorado em Química Nuclear) – Instituto de Pesquisas Nucleares, São Paulo, 2000.

FOLK, R. L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, v. 62, n. 4, p. 344-359, 1954.

FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. *Metall Pollution in the aquatic Environment*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1979. 483 p.

GAMA, M. G. C. *Água, vereda, veredeiro: um estudo sobre as agriculturas camponesa e comercial, nas cabeceiras do rio Formoso, em Buritizeiro-MG*. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia-MG, 2006.

GAMA, M. G. C.; PAULA, A. M. N. R.; LIMA, S. C. Implantação da agricultura comercial no município de Buritizeiro, Cerrado Mineiro: o uso capitalista dos recursos naturais. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, n. 10, p. 1-12, 2003.

GLASSTONE, S.; DOLAN, P. J. United States. *United States & United States*. The effects of nuclear weapons. Washington: U. S. Dept. of Defense, 1977.

GODINHO, A. L.; POMPEU, P. S. A importância dos ribeirões para os peixes de piracema. In: GODINHO, A. L.; GODINHO, H. P. *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais*. Belo Horizonte: PUC Minas, 2003. p. 361-372.

GODINHO, A.L.; KYBARD, B.; MARTINEZ, C.B. Cheia induzida: manejando a água para restaurar a pesca. In: GODINHO, A. L.; GODINHO, H. P. *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais*. Belo Horizonte: PUC Minas, 2003. p. 307-326.

GODINHO, A.L. *Programa de pesquisa e ações para conservação e restauração de recursos pesqueiros de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Fundep, 2000. 65p. (Relatório).

GODINHO, H. P.; MIRANDA, M. T. O.; GODINHO, A. L.; SANTOS, J. E. Pesca e biologia do surubim *Pseudoplatystoma coruscans* no rio São Francisco, em Pirapora, MG, p. 27-42. In: MIRANDA, M. O. T. (org.). *Surubim*. Belo Horizonte: IBAMA, 1997. 157p.

GODOY, J. M. *et al.* A study of Guanabara Bay sedimentations rates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Budapest, v. 227, n. 1-2, p. 157-160, 1998a.

GODOY, J. M. *et al.* An alternative method for the determination of excess  $^{210}\text{Pb}$  in sediments. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 75, n. 1-4, p. 111-115, 1998b.

GODOY, J. M.; PADOVANI, C. R.; GALDINO, S. Geocronologia do assoreamento e níveis de mercúrio em lagos marginais do Rio Taquari no Pantanal. In: GALDINO, S.; VIEIRA, L. M.;

PELLEGRIN, A. (Ed.). *Impactos ambientais e socioeconômicos na bacia do rio Taquari – Pantanal*. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2006. p. 163-173.

GOLDBERG, E. D. Geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ . In: *Radioactive Dating, International Atomic Energy Agency*. Vienna, 1963. p. 121-130.

GOLDSTEIN, S. J.; STIRLING, C. H. Techniques for measuring uranium-series nuclides: 1992-2002. *Rev Mineral Geochem.*, v. 52, p. 23-57, 2003.

GOMES, F. C.; GODOY, J. M.; CARVALHO, Z. L. Metal concentrations, fluxes, inventories and chronologies in sediments from Sepetiba and Ribeira Bays: A comparative study. *Marine Pollution Bulletin*, v. 64, p. 10-20, 2009.

GRESENS, R. L. Composition volume relations of metassomatism. *Chem. Geol.*, v. 2, n. 1. p.47-65, 1967.

GRIM, R. E.; GRUVEN, N. *Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties and Uses*. New York, Elsevier Scientific Publ, 1978. 256p.

GRISOLIA, C. K. *Agrotóxicos – mutações, reprodução e câncer*. Brasília. Ed. Universidade de Brasília, 2005. 392 p.

IVANOVICH, M.; HARMON, R. S. *Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences*. 2. ed. Oxford, New York: Oxford Clarendon Press, 1992. 910p.

JENSEN, J. R. Remote Sensing of water. In: JENSEN, J. R. *Remote Sensing of environment: an earth resource perspective*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 2000. p. 258-312.

JOSHI, S. R.; SHUKLA, B. S. AB initio derivation of formulations for Pb-210 dating of sediments. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 148, n. 1, p. 73-79, 1991.

JUNK, W.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in River-floodplains System. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, n. 106, p. 110-127, 1989.

JUNK, WJ.; FURCH, K. 1993. A general review of tropical South American floodplains. *Wetlands Ecology and Management*, vol. 2, no. 4, p. 231-238.

KABATA-PENDIAS, A. *Trace elements in soils and plants*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 534 p.

KOIDE, M., SOUTAR, A.; GOLDBERG, E. D. Marine geochronology with Pb-210. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 14, p. 442-446, 1972.

KRAUSKOPF, K. B. *Introduction to geochemistry*. 2<sup>nd</sup> ed. Auckland: McGraw-Hill Book Company, 1985. 617 p.

KRISHNASWAMY, S.; MARTIN, J. M.; MEYBECK, M. Geochronology of lake sediments. *Earth Planet Sei. Lett.*, v. 11, p. 407-414, 1971.

LEANDRO, G. R. S.; SOUZA, C. A. Pantanal de Cáceres: composição granulométrica dos sedimentos de fundo no rio Paraguai entre a foz do rio Cabaçal e a cidade de Cáceres, Mato Grosso, Brasil. *Rev. Ambi-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 263-276. 2012.

LIESER, K. H. *Nuclear and radiochemistry: fundamentals and applications*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1997. 472 p.

LIMA, E. A. M. *Avaliação da qualidade dos sedimentos e prognósticos geoquímico ambiental da zona estuarina do Rio Botafogo, Pernambuco*. 2008. 205 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife-PE, 2008.

LIMA, J. E. F. W. *et al. Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do rio São Francisco*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001. 108 p.

LOFFLER, H. The Origin of Lake Basins. In: O’Sullivan, P.E.; Reynolds, C.S. *The Lakes Handbook: Limnology and Limnetic Ecology*. Oxford, Blackwell, 2004. p. 09-60.

LOSKA, K.; WIECHUŁA, D. Application of Principal Component Analysis for the estimation of source of Heavy Metal Contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, v. 51, n. 8, p. 723-33, 2003.

LOUREIRO, D. D. *Evolução dos aportes de metais pesados na Lagoa Rodrigo de Freitas-RJ*. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal Fluminense -UFF, Rio de Janeiro-RJ, 2006.

LUBIS, A. A. Constant rate of supply (CRS) model for determining the sediment accumulation rates in the coastal area using  $^{210}\text{Pb}$ . *Journal of Coastal Development*, v. 10, n. 1, p. 9-18, 2006.

MALAVOLTA, E. *et al.* Micronutrientes e metais pesados – essencialidade e toxidez. In: PATERNIANI, E. (Org.). *Ciência, agricultura e sociedade*. Brasília – DF: Embrapa, 2006. v. 1, p. 117-154.

MALAVOLTA, E. *Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificações e fatos*. São Paulo: ProduQuímica, 1994. 153p.

MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda., 2006. 638 p.

MATSUMOTO, E.  $^{210}\text{Pb}$  geochronology of sediments from Lake Shinji. *Geochemical Journal*, v. 9, p. 167-172, 1975.

MASUTTI, M. B. *O Manguezal do Itacorubi como Barreira BiogeoQuímica: estudo de Caso*. Florianópolis: Universidade Regional de Santa Catarina, 1999. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, 1999.

MELO, D. R. de. *Evolução das Veredas sob Impactos Ambientais nos Geossistemas Planalto do Buritizeiro/MG*. 2008, 353f. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências-Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2008.

MEYBECK, M. Global distribution of lakes. In: LERMAN, A.; IMBODEN, D.; GAY, J. *Physics and chemistry of lakes*. New York: Springer-Verlag, 1995. p. 1-35.

MOORE, J. N.; BROOKE, E.; JOHNS, S. Grain size partitioning of metals in contaminated coarse-grained river Floodplains: Clark Fork River, Montana, USA. *Envir. Geol. Water Sci.* New York, n. 2, p. 107-115, 1989.

MORAIS, R. P. ; OLIVEIRA, L. G. ; LATRUBESSE, E. M. ; DIÓGENES, R. C. P. . Morfometria de sistemas lacustres da planície aluvial do médio rio Araguaia. *Acta Scientiarum. Biological Sciences* (Online), Maringá-PR, v. 27, p. 203-213, 2005.

MUDROCH, A.; MACKNIGHT, S. D. Bottom sediment sampling. In: MUDROCH, A.; MACKNIGHT, S. (Ed.). *CRC Handbook of techniques for aquatic sediment sampling*. Boca Raton; CRC Press Inc., 1991. 210p.

NERY, J. R. C. *Determinação da taxa de sedimentação na foz do rio Amazonas usando o  $^{210}\text{Pb}$  como geocronômetro*. 2009. 158 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro-SP, 2009.

NETO, A. M. *Modificações da zona costeira do extremo sul da Bahia nos últimos 150 anos, e sua relação com a sedimentação do banco de Abrolhos*. 2008, 176f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, 2008.

OLIVEIRA, G. H. R.; PATCHINEELAM, T. C. S.; PATCHINEELAM, S. M. Validação do método de geocronologia de  $^{210}\text{Pb}$  por espectrometria gama utilizando o detector coaxial de GE ultrapuro do Departamento de Geoquímica da UFF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 2. *Anais...* São Paulo: Resumos do II Simpósio Brasileiro de Oceanografia, 2005. CD-Rom.

PEREIRA, A. M. *Cidade média e região: o significado de Montes Claros no Norte de Minas Gerais*. 347f. 2007. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

POMPEU, P. S. *Efeitos das estações seca e chuvosa e da ausência de cheias nas comunidades de peixes de três lagoas marginais do médio São Francisco*. 1997. 72f. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte-MG, 1997.

POMPEU, P. S.; GODINHO, H. P. Ictiofauna de três lagoas marginais do médio São Francisco. In: GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L. (Org.). *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais*. Belo Horizonte: PUC Minas, 2003. p. 167-181.



PRADO FILHO, J. F. *Ciências do Ambiente: Ecologia, Degradação e Proteção Ambiental*. Dpto. de Engenharia Gerencial e Economia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Minas Gerais, 1992.

RAIJ, B. V. *et al. Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, IAC, 2001. p. 177-179.

RIBEIRO, E. V. *Avaliação da qualidade da água do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora: metais pesados e atividades antropogênicas*. 2010. 196 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RIBEIRO, E. V. *et al. Metais pesados e qualidade da água do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora-MG: índice de contaminação*. *Geonomos*, Belo Horizonte, n. 01, p. 49-63, 2012.

RICOMINI, C., P.; GIANINI, C. F.; MANCINI, F. Rios e processos aluviais. In: TEIXEIRA, W. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 191-214.

ROBBINS, J. A.; EDGINGTON, D. N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 39, p. 285-304, 1975.

ROBBINS, J.; EDGINGTON, A. D.N.; KEMP, A. L. Comparative  $^{210}\text{Pb}$ .  $^{137}\text{Cs}$  and pollen geochronologies of sediments from Lakes Ont sedi and Erie. *Q. Res.*, 10, p. 256-278, 1978.

ROSE, A. W.; HAWKES, H. E.; WEBB, J. S. *Geochemistry in mineral exploration*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Academic Press, 1979. 657p.

RUTHERFORD, E., SODDY, F. The Cause and Nature of Radioactivity I, II. *Philosophical Magazine*, v. 4, n. 21, 1902.

SABARIS, T. P.P. *O método geocronológico do Pb-210 aplicado no estudo da taxa de sedimentação em uma porção da Bacia do Rio Atibaia (SP)*. 2010. 152 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro-SP, 2010.

SAITO, R. T. *et al.*  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  geochronologies in the Cananéia-Iguape estuary (São Paulo, Brazil). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 249, n. 1, p. 257-261, 2001.

SALOMONS, W.; FÖRSTNER, U. *Metals in the Hydrocycle*. Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer Verlag, 1984. 349 p.

SANCHEZ-CABEZA, J. A.; RUIZ-FERNANDES, A. C. *Radiocronologia de Sedimentos Costeros Utilizando  $^{210}\text{Pb}$ : Modelos, Validacion y Aplicaciones*. Viena: International Atomic Energy Agency, 2012. 118 p.

SANTOS, D. *et al.* Perdas de solo e produtividade de pastagens nativas e melhoradas sob diferentes práticas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 2, p. 183-189, 1998.

SANTOS, D. R. dos *et al.* Poluentes orgânicos e inorgânicos. In: POLETO, C.; MERTEN, G. H. (Org.). *Qualidade dos sedimentos*. Porto Alegre: ABRH, 2006. p. 181-237.

SANTOS, E. S. *Aplicação de marcadores geoquímicos para a avaliação dos impactos das barragens nos sedimentos do estuário do Rio São Francisco (Al/Se)*. 2007. 139f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2007.

SANTOS, I. R.; BURNETT, W. C.; GODOY, J. M. Radionuclides as tracers of coastal processes in Brazil: review, synthesis, and perspectives. *Brazilian Journal of Oceanography*, n. 56, v. 2, p. 115-131, 2008.

SAWER, C. N.; MCCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. 5. ed. New York: MacGraw-Hill, 2003. 768p.

SCHMELING, M.; VAN GRIEKEN, R. E. Sample Preparation for X-ray Fluorescence. In: VAN GRIEKEN, R. E.; MARKOWICZ, A. A. *Handbook of X-Ray Spectrometry: Methods and Techniques*. New York: Marcel Dekker Inc., 2002. p. 933-976.

SGARBI, G. N. C. Arenitos éolicos da Formação Areado (Bacia Cretácea do São Francisco): caracterização, diagênese e aspectos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 342-354, 1991.

SGARBI, G. N. C. *et al.* Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozóico da bacia do São Francisco. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. A. *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia. Núcleo MG, 2001. p. 93-138.

SGARBI, G. N. C. *Geologia da Formação Areado, Cretáceo Médio a Inferior das Bacia do São Francisco, oeste do Estado de Minas Gerais*. 1989. 324 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

SHUKLA, B. S.; JOSHI, S. R. An Evaluation of the CIC Model of <sup>210</sup>Pb Dating of Sediments. *Environ. Geol. Water Sci.*, v. 14, n. 1, p. 73-76, 1989.

SILVA, P. A. *et al.* Determinação da extensão do Rio São Francisco. In: SBSR, 11. *Anais...* Belo Horizonte: INPE. 2003. p. 393-400.

SMOL, J. P. *Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2008. 383 p.

SOUZA FILHO, E. E.; STEVAUX, J. C. Geologia e geomorfologia fluvial. In: ESTUDOS ambientais da planície de inundação do Rio Paraná, no trecho compreendido entre a foz do Rio Paranapanema e o Reservatório de Itaipu: Relatório final de projeto. Maringá: FUEM-Nupelia. São Paulo: FINEP, 1995. p. 205-235.

SOUZA W. F. L.; KNOPPERS, B. Fluxos de água e sedimentos a costa leste do Brasil: relações entre a tipologia e as pressões antrópicas. *Geochim. Brasil*, v. 17, n. 1, p. 057-074, 2003.

SOUZA, M. C. de *et al.* Taxas de sedimentação no complexo estuarino da baía de Paranaguá, Estado do Paraná, estimadas a partir do método de datação por espectrometria gama: resultados preliminares. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO (ABEQUA), 8. *Anais...* Imbé: Boletim de Resumos, 2001. p. 182-183.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná downstream the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, v. 110, p. 1-20, 2009.

TESSIER, A.; CAMPBELL, P. G. G.; BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, v. 51, n. 17, p. 844-851, 1979.

TIMMS, B. V. *Lakes geomorphology*. Adelaid. Australia: Gleneagles Agency, 1992. 180 p.

TRASK, P. D. Organic content of recent marine sediments, In: TRASK, P. D. (ed.). Recent marine sediments: a symposium. *Sot. Econ. Palaeontologists Mineralogists*, Spec. Publ. n. 4, 1939, p. 428-453.

TRINDADE W. M. *Condicionantes litoestruturais na origem e desenvolvimento de processos erosivos e arenização na Bacia do Rio do Formoso-MG*. 2007. 97f. Monografia, Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Montes Claros, Pirapora-MG, 2007.

TRINDADE, W. M. *Concentração e distribuição de metais pesados em sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora/MG: fatores naturais e antrópicos*. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

TRINDADE, W. M. *et al.* O Grupo Mata da Corda na Bacia Hidrográfica do Rio do Formoso e suas feições morfológicas correlatas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA REGIONAL E CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6. *Anais...* Goiana: UFG Ed., 2006. p. 01-09.

TRINDADE, W. T; HORN, A. H; RIBEIRO, E. V. Concentrações de metais pesados em sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora-MG: Geoquímica e classificação de risco ambiental. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 20, n. 1, p. 64-75, 2012.

TUNDISI, J. G. Conservation and management of continental aquatic ecosystems in Brazil. In: HONGLIANG, L.; YUTIAN, Z.; HAISHENG, L. (Ed.). *International Conference on the Conservation and Management of Lake*. Pequim, 1990. *Anais...*, p. 573-584.

TUREKIAN, K.; WEDEPOHL, K. H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 72, p. 175-192, 1961.

TYSON, R. V. *Sedimentary Organic Matter: Organic facies and palynofacies*. London, U.K.: Chapman & Hall, 1995. 615p.

UNITED NATIONS. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, v. II. Effects. UNSCEAR, 2000. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York, 2000.

URBAN, N. R. *et al.* Mobility and diagenesis of Pb and  $^{210}\text{Pb}$  in peat. *Geochim Cosmochim Acta*, v. 54, n. 33, p. 29-46, 1990.

USEPA. *Method 3051*. 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/SW-846/3051.pdf>>. Acesso em: mar. 2014.

VALADÃO, R. C. *Evolução de Longo-Termo do Relevo do Brasil Oriental (Desnudação, Superfícies de Aplanamento e Soerguimentos Crustais)*. 1998. 243 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

VALADÃO, R. C. Geodinâmica de Superfícies de Aplanamento, Desnudação Continental e Tectônica Ativa como condicionantes da Megageomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, p. 77-90, 2009.

VIANA, V. M. F. C. *Estudo Hidrogeoquímico das Veredas do Rio do Formoso no Município de Buritizeiros, Minas Gerais*. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

VILLWOCK, J. A. *Aspectos da sedimentação da região nordeste da Lagoa dos Patos: Lagoa do Casamento e Saco do Cocuruto-RS*. 1977. 188 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS, 1977.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 1).

WALKER, M. *Quaternary Dating Methods*. London: John Wiley & Sons, 2005. 286 p.

WEDEPOHL K. H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, n. 7, p. 1217-1232, 1995.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and glass terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, Chicago, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WETZEL, R. G. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego: Academic Press, 2001. 1014p.

WILD, A. *Soils and the Environment: Introduction*. New York: Cambridge University, 1993. 287 p.

WOMAN, M. G.; LEOPOLD, L. B. Rivers flood plains: some observations on their formation. *Professional Paper, United States Geological Survey*, Washington, n. 282, p. 87-107, 1957.

XUE, B.; YAO, S.; XIA, W. Environmental changes in Lake Taihu during the past century as recorded in sediment cores. *Hydrobiologia*, v. 581, n. 1, p. 117-123, 2007.

ZHANG, J.; LIU, C. L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, v. 54, p. 1051-1070, 2002.

**ANEXO A – Concentrações de elementos traços analisados por Fluorescência de Raios-X na Lagoa do Guim**

<b>Amostra</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Zr</b>	<b>Mo</b>	<b>Cd</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
<b>C01</b>	154	142	17	62	43	124	4	135	71	264	12	18	25	4	643	470	37
<b>C02</b>	146	142	23	70	44	116	8	125	64	246	0	7	5	3	590	LD	28
<b>C03</b>	141	133	10	58	36	100	6	130	76	295	22	27	16	5	596	861	26
<b>C04</b>	138	141	14	68	37	102	1	133	77	280	25	19	10	7	630	1074	30
<b>C05</b>	148	146	32	81	45	113	22	144	75	244	31	30	LD	7	726	970	36
<b>C06</b>	150	141	31	74	45	110	11	137	73	247	9	18	26	8	757	444	29
<b>C07</b>	154	144	30	77	46	110	5	139	75	241	8	21	30	6	725	515	26
<b>C08</b>	152	127	25	66	36	89	5	131	88	245	2	20	27	4	726	360	32
<b>C09</b>	176	140	26	67	45	98	6	139	83	243	9	22	11	3	746	226	35
<b>C10</b>	135	128	31	58	35	87	46	115	53	266	52	12	LD	LD	558	1241	48
<b>C11</b>	129	131	19	45	29	60	22	100	55	293	16	26	6	8	528	335	30
<b>C12</b>	122	106	40	47	34	75	33	97	45	247	24	29	24	LD	508	420	27
<b>C13</b>	148	130	20	46	32	59	1	108	58	317	25	24	4	7	587	403	32
<b>C14</b>	100	127	13	24	17	35	LD	55	43	340	13	23	21	7	458	615	21
<b>Crosta<sup>1</sup></b>	53	35	11,6	19	14	52	2	110	316	237	4	0,1	2,5	0,3	668	1,4	17
<b>Folhelhos<sup>2</sup></b>	130	90	19	68	45	95	13	140	300	1,8	2,6	0,3	6,0	1,5	580	na	20

1 – Concentração média na crosta terrestre superior. Fonte: Wedepohl (1995).

2 – Concentração média em folhelhos. Fonte: Bowen (1979).

**ANEXO B – Concentrações de elementos traços analisados por Fluorescência de Raios X na Lagoa do Pontal**

<b>Amostra</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Zr</b>	<b>Mo</b>	<b>Cd</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
<b>C01</b>	161	166	17	61	42	100	74	154	53	253	7	15	14	4	629	50	33
<b>C02</b>	152	143	18	57	40	84	93	139	50	243	12	22	33	LD	616	361	38
<b>C03</b>	142	124	25	50	34	69	15	110	47	275	5	9	2	2	549	79	30
<b>C04</b>	139	116	16	44	32	66	13	112	42	285	9	15	19	2	528	198	30
<b>C05</b>	136	111	16	42	29	59	15	103	42	277	3	12	14	5	503	87	33
<b>C06</b>	137	114	16	46	32	69	17	96	45	276	4	9	9	4	518	245	29
<b>C07</b>	141	116	20	46	34	67	8	108	42	252	3	5	12	3	546	113	28
<b>C08</b>	115	113	16	44	27	59	13	81	45	311	12	18	24	3	487	199	26
<b>C09</b>	128	131	23	48	31	71	LD	96	56	302	24	28	14	3	575	475	36
<b>C10</b>	92	145	11	31	21	51	24	73	37	314	21	18	14	9	415	560	34
<b>C11</b>	121	108	17	44	28	60	10	87	44	303	4	9	8	LD	499	16	27
<b>C12</b>	26	440	1	15	9	10	LD	28	42	152	6	18	15	10	228	243	14
<b>C13</b>	117	123	17	39	28	61	19	92	36	284	13	24	12	3	468	519	24
<b>C14</b>	25	302	3	13	6	18	LD	28	32	206	11	24	30	9	229	847	11
<b>C15</b>	23	306	2	14	9	16	5	29	35	180	1	11	9	8	233	126	13
<b>C16</b>	20	289	2	13	7	13	11	35	41	155	18	22	4	10	261	712	20
<b>C17</b>	131	147	16	41	30	65	14	98	42	279	11	21	14	4	515	529	25
<b>C18</b>	108	130	11	39	22	56	21	79	48	374	11	20	9	2	464	359	29
<b>C19</b>	129	168	17	46	29	62	14	94	58	316	7	15	14	1	532	99	23
<b>C20</b>	72	183	10	27	11	38	11	55	40	581	27	40	5	7	379	687	20
<b>C21</b>	125	138	18	38	30	58	10	104	42	328	30	28	14	5	499	566	32
<b>C22</b>	106	137	14	38	24	50	23	81	44	288	21	27	7	3	446	738	32
<b>C23</b>	134	143	19	45	32	62	19	115	41	307	26	25	19	1	527	752	41
<b>C24</b>	60	211	9	22	13	32	6	47	39	173	9	27	22	8	339	412	17
<b>C25</b>	36	273	4	17	12	21	13	36	43	147	17	21	32	9	295	676	11
<b>C26</b>	81	250	10	33	21	42	12	61	44	275	2	6	3	5	414	24	18
<b>C27</b>	21	382	2	16	10	15	1	32	37	139	LD	3	3	12	249	7	11
<b>C28</b>	24	303	4	15	9	20	LD	30	36	184	0	12	7	7	268	155	11
<b>Crosta<sup>1</sup></b>	53	35	11,6	59	14	52	2	110	316	237	4	0,1	2,5	0,3	457	1,4	17
<b>Folhelhos<sup>2</sup></b>	130	90	19	68	45	95	13	140	300	1,8	2,6	0,3	6,0	1,5	580	na	20

1 – Concentração média na crosta terrestre superior. Fonte: Wedepohl (1995).

2 – Concentração média em folhelhos. Fonte: Bowen (1979).

**ANEXO C – Concentrações de metais pesados determinadas por Espectrometria de Emissão Ótica – ICP/OES**

Camada	Lagoa	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Lagoa	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Lagoa	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
C-01	<b>Palestina</b>	25,58	10,58	LLD	22,55	3,51	<b>Atoleiro</b>	27,05	11,47	LLD	20,90	66,37	<b>Atlântica</b>	24,02	16,74	14,37	129,47	31,02
C-02	<b>Palestina</b>	29,25	13,71	LLD	23,88	4,94	<b>Atoleiro</b>	27,94	10,72	LLD	14,55	18,49	<b>Atlântica</b>	26,28	8,42	7,48	225,52	33,01
C-03	<b>Palestina</b>	26,98	10,67	LLD	22,01	1,90	<b>Atoleiro</b>	26,72	10,79	LLD	13,93	25,53	<b>Atlântica</b>	28,91	14,37	4,18	131,67	57,17
C-04	<b>Palestina</b>	30,59	12,39	LLD	25,34	1,95	<b>Atoleiro</b>	26,07	10,15	LLD	11,02	26,70	<b>Atlântica</b>	25,99	9,38	3,03	128,69	32,93
C-05	<b>Palestina</b>	35,38	13,55	LLD	29,41	3,56	<b>Atoleiro</b>	32,67	13,39	LLD	17,97	38,00	<b>Atlântica</b>	24,65	11,89	3,05	536,00	29,83
C-06	<b>Palestina</b>	26,57	11,24	LLD	20,12	1,01	<b>Atoleiro</b>	32,07	13,19	1,40	18,08	20,08	<b>Atlântica</b>	31,43	10,89	4,12	124,37	35,27
C-07	<b>Palestina</b>	25,74	9,34	LLD	18,20	0,03	<b>Atoleiro</b>	32,77	14,48	1,28	17,51	22,27	<b>Atlântica</b>	22,91	8,69	3,05	25,14	19,91
C-08	<b>Palestina</b>	31,41	11,61	LLD	23,14	0,03	<b>Atoleiro</b>	32,65	13,92	4,93	15,64	31,40	<b>Atlântica</b>	34,24	10,58	6,00	20,56	30,19
C-09	<b>Palestina</b>	22,21	4,91	LLD	12,18	0,03	<b>Atoleiro</b>	30,19	14,16	2,16	15,40	18,50	<b>Atlântica</b>	33,58	9,65	0,81	52,89	26,32
C-10	<b>Palestina</b>	29,26	10,18	LLD	21,93	0,08	<b>Atoleiro</b>	34,90	16,85	5,60	19,76	22,36	<b>Atlântica</b>	35,14	8,27	3,29	18,41	23,88
C-11	<b>Palestina</b>	30,08	10,44	LLD	17,82	0,12	<b>Atoleiro</b>	30,17	13,99	0,77	14,62	14,80	<b>Atlântica</b>	34,10	8,73	3,43	16,35	22,40
C-12	<b>Palestina</b>	26,63	8,27	LLD	13,97	0,12	<b>Atoleiro</b>	31,53	16,07	3,78	16,71	16,05	<b>Atlântica</b>	30,59	7,95	1,56	18,44	20,98
C-13	<b>Palestina</b>	20,56	3,66	LLD	7,62	0,12	<b>Atoleiro</b>	29,63	14,48	0,87	15,65	16,59	<b>Atlântica</b>	33,21	7,92	1,61	15,90	20,72
C-14	<b>Palestina</b>	17,91	6,82	LLD	12,70	0,12	<b>Atoleiro</b>	32,29	15,64	2,19	17,63	23,76	<b>Atlântica</b>	30,29	6,58	0,77	10,90	14,40
C-15	<b>Palestina</b>	40,78	14,80	LLD	23,04	2,73	<b>Atoleiro</b>	37,39	18,29	10,93	24,10	26,17	<b>Atlântica</b>	25,65	4,16	0,77	9,31	13,75
C-16	<b>Palestina</b>	43,76	16,09	LLD	24,02	0,12	<b>Atoleiro</b>	34,85	17,07	5,52	20,46	21,92	<b>Atlântica</b>	28,02	5,09	0,77	9,46	11,96
C-17	<b>Palestina</b>	38,73	12,49	LLD	18,90	0,12	<b>Atoleiro</b>	29,94	20,26	6,34	16,37	11,18	<b>Atlântica</b>	31,91	5,11	0,77	13,06	12,91
C-18	<b>Palestina</b>	19,09	6,40	LLD	12,62	0,12	<b>Atoleiro</b>	39,19	24,09	7,32	28,78	23,23	<b>Atlântica</b>	27,19	4,02	0,77	12,84	11,75
C-19	<b>Palestina</b>	32,79	14,09	LLD	21,96	2,16	<b>Atoleiro</b>	30,38	9,94	LLD	22,98	8,65	<b>Atlântica</b>	25,71	3,93	0,77	12,65	8,96
C-20	<b>Palestina</b>	39,07	15,83	1,27	25,37	0,12	<b>Atoleiro</b>	38,11	23,04	4,61	30,60	13,81	<b>Atlântica</b>	24,58	4,54	0,77	14,76	12,09
C-21	<b>Palestina</b>	42,66	13,97	LLD	20,73	0,12	<b>Atoleiro</b>	28,29	8,92	LLD	22,26	6,72	<b>Atlântica</b>	26,33	6,21	0,77	14,62	14,26
C-22	<b>Palestina</b>	23,88	7,96	LLD	11,66	0,12	<b>Atoleiro</b>	28,85	13,44	LLD	17,27	0,09	<b>Atlântica</b>	35,49	9,78	1,54	17,57	20,11
C-23	<b>Palestina</b>	53,49	20,75	LLD	24,61	2,58	<b>Atoleiro</b>						<b>Atlântica</b>	31,59	10,92	0,77	17,82	16,85
C-24	<b>Palestina</b>	62,93	25,37	LLD	30,18	2,98	<b>Atoleiro</b>						<b>Atlântica</b>	25,10	5,03	0,77	11,86	8,64
C-25	<b>Palestina</b>	43,05	21,53	LLD	24,06	0,12	<b>Atoleiro</b>						<b>Atlântica</b>	29,55	5,67	0,77	15,97	15,35

<b>Camada</b>	<b>Lagoa</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Lagoa</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Lagoa</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
C-01	<b>Formoso</b>	30,39	20,28	11,32	25,55	83,70	<b>Guim</b>	15,20	9,09	5,94	37,03	58,74	<b>Pontal</b>	18,00	12,27	6,50	15,05	65,63
C-02	<b>Formoso</b>	23,37	11,83	7,22	22,08	39,74	<b>Guim</b>	27,77	12,90	4,83	16,49	56,51	<b>Pontal</b>	19,58	8,94	6,40	15,08	73,05
C-03	<b>Formoso</b>	26,70	17,29	8,88	23,02	60,48	<b>Guim</b>	34,97	41,43	11,09	21,83	52,99	<b>Pontal</b>	18,69	9,06	5,37	14,87	74,10
C-04	<b>Formoso</b>	32,01	18,89	15,54	28,25	55,41	<b>Guim</b>	22,22	9,84	3,77	13,82	36,91	<b>Pontal</b>	15,27	10,11	2,61	13,65	70,46
C-05	<b>Formoso</b>	42,21	21,89	19,25	35,38	67,76	<b>Guim</b>	29,04	13,23	6,85	17,40	42,50	<b>Pontal</b>	15,65	10,95	3,50	11,08	67,93
C-06	<b>Formoso</b>	39,00	22,76	18,52	32,95	76,45	<b>Guim</b>	20,31	10,19	5,30	11,04	19,99	<b>Pontal</b>	27,54	11,72	8,06	19,32	102,09
C-07	<b>Formoso</b>	37,58	26,30	13,70	29,11	160,90	<b>Guim</b>	32,71	14,27	8,21	19,07	37,62	<b>Pontal</b>	19,63	8,62	6,61	16,16	70,90
C-08	<b>Formoso</b>	43,34	19,37	12,97	28,15	43,00	<b>Guim</b>	27,29	14,02	4,38	14,55	29,51	<b>Pontal</b>	21,46	12,15	8,17	15,30	71,56
C-09	<b>Formoso</b>	46,68	18,24	12,85	23,97	47,13	<b>Guim</b>	19,63	16,98	5,83	12,08	17,27	<b>Pontal</b>	19,32	12,92	5,74	14,97	58,62
C-10	<b>Formoso</b>	31,26	14,26	8,25	25,22	26,96	<b>Guim</b>	29,74	13,76	4,85	14,73	35,64	<b>Pontal</b>	24,43	12,81	7,64	17,41	80,74
C-11	<b>Formoso</b>	34,18	12,67	12,31	27,33	37,56	<b>Guim</b>	29,31	13,86	6,49	15,80	31,71	<b>Pontal</b>	18,17	11,26	6,74	15,00	78,84
C-12	<b>Formoso</b>	26,95	8,94	6,99	20,70	35,22	<b>Guim</b>	20,48	10,51	4,72	11,24	22,61	<b>Pontal</b>	19,76	12,75	5,26	15,29	75,85
C-13	<b>Formoso</b>	17,43	20,42	8,59	14,02	14,47	<b>Guim</b>	15,53	10,19	8,43	10,08	13,87	<b>Pontal</b>	22,13	15,03	8,73	17,07	75,05
C-14	<b>Formoso</b>	31,57	10,78	11,56	26,41	56,00	<b>Guim</b>	19,58	10,95	7,47	11,36	21,92	<b>Pontal</b>	20,21	13,05	7,27	15,26	62,63
C-15	<b>Formoso</b>	34,79	9,68	12,92	24,60	42,38	<b>Guim</b>	27,21	11,17	9,74	15,52	38,52	<b>Pontal</b>	23,91	13,62	9,25	16,57	53,29
C-16	<b>Formoso</b>	30,35	7,50	15,26	24,70	49,14	<b>Guim</b>	20,00	6,26	5,20	11,89	25,65	<b>Pontal</b>	21,84	11,81	6,52	15,65	46,04
C-17	<b>Formoso</b>	20,74	8,07	8,46	15,75	31,81	<b>Guim</b>	12,79	3,10	2,91	8,35	9,86	<b>Pontal</b>	24,07	12,27	7,49	15,91	39,58
C-18	<b>Formoso</b>	20,54	6,37	7,25	17,97	26,88	<b>Guim</b>	11,51	1,06	1,04	5,42	6,85	<b>Pontal</b>	18,64	8,94	1,84	13,62	31,71
C-19	<b>Formoso</b>	24,85	6,77	9,43	18,74	24,34	<b>Guim</b>	11,45	4,39	2,18	7,90	7,86	<b>Pontal</b>	19,24	9,06	2,91	12,99	27,42
C-20	<b>Formoso</b>	31,46	11,87	9,07	74,15	120,36	<b>Guim</b>	27,52	11,77	11,09	15,35	33,07	<b>Pontal</b>	20,10	10,11	4,60	14,21	25,83
C-21	<b>Formoso</b>	88,78	13,18	16,11	48,20	69,44	<b>Guim</b>	31,73	13,39	14,13	19,65	40,03	<b>Pontal</b>	21,71	10,99	5,78	15,56	28,77
C-22	<b>Formoso</b>	43,14	6,74	13,67	18,22	41,80	<b>Guim</b>	17,15	7,93	5,66	9,59	14,42	<b>Pontal</b>	19,33	11,75	4,68	14,56	29,20
C-23	<b>Formoso</b>	46,67	6,60	14,62	16,04	43,14	<b>Guim</b>	9,37	5,74	1,63	7,50	7,59	<b>Pontal</b>	14,21	8,62	2,85	13,17	17,89
C-24	<b>Formoso</b>	53,69	13,59	17,57	24,42	53,59	<b>Guim</b>	23,35	8,65	5,64	15,31	24,56	<b>Pontal</b>	18,65	12,17	4,79	16,45	21,79
C-25	<b>Formoso</b>	43,67	9,23	18,90	18,78	49,41	<b>Guim</b>	6,94	4,28	0,77	6,80	5,25	<b>Pontal</b>	20,14	12,89	5,13	16,46	21,16



### ANEXO D – Mosaico comparativo das concentrações de metais pesados nas lagoas marginais

