

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - FUB
CENTRO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO - CDT
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

RELATÓRIO FINAL

ESTUDO MULTIDISCIPLINAR DO ESTADO FÍSICO DO LAGO PARANOÁ: TOPO-BATIMETRIA, QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E BALANÇO HÍDRICO

**Convênio Nº 01/2017 – ADASA – UnB
Processo 197.001.077/2016**

Brasília-DF

FICHA CATALOGRÁFICA

Roig, H.L.; Garnier, J; Ianniruberto, M.; Minoti, R; Koide, S.
ESTUDO MULTIDISCIPLINAR DO ESTADO FÍSICO DO LAGO
PARANOÁ: TOPO-BATIMETRIA, QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E
BALANÇO HÍDRICO

199 p.

Relatório Técnico. Convênio Nº 01/2017 ADASA-UnB,
Processo 197.001.077/2016 - Universidade de Brasília.

1. Cota-área-volume; Assoreamento, Geoquímica; zona crítica; modelo
hidrológico

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Roig, H.L.; Garnier, J; Ianniruberto, M.; Minoti, R.; Koide, S. Estudo multidisciplinar do estado físico do Lago Paranoá: Topo-batimetria, Qualidade dos sedimentos e Balanço hídrico. 2019. 44 p. Relatório Técnico. Convênio Nº 01/2017 - ADASA - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Henrique Llacer Roig; Jérémie Garnier; Marco Ianniruberto; Ricardo Minoti; Sergio Koide.

TÍTULO do volume: Estudo multidisciplinar do estado físico do Lago Paranoá: Topo-Batimetria, Qualidade dos Sedimentos e Balanço Hídrico

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília e a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal permissão para emprestar ou reproduzir cópias deste relatório somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam-se outros direitos de publicação e nenhuma parte deste relatório pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores e das instituições conveniadas (ADASA e UnB).

Henrique Llacer. Roig. Jeremie Garnier; Marco Ianniruberto; Ricardo Minoti; Sergio Koide
e-mail: roig@unb.br, garnie@unb.br; ianniruberto@unb.br; rtminoti@unb.br; koide@unb.br

Equipe

Coordenação Geral

Henrique Llacer Roig

Jérémie Garnier

Coordenação dos Módulos

Jérémie Garnier

Marco Ianniruberto

Ricardo Minoti

Sergio Koide

Doutorandos

Elton Souza Oliveira

Maria Elisa Costa

Gilliard Nunes

Bolsistas

Amanda Cecilia N. Aguiar

Antônio Mendes de Carvalho

Fabio Barros Curado Fleury

Gabriela Nunes Turquetti

Henrique Dantas Borges

Ilanna de Souza Rego

Paulo Henrique Praça de França

Péricles de Brito Macedo

Rogério Souza

Thays Mitsuko Tsuji

Sumário

1.	Introdução	6
1.1	Contextualização	7
1.2	Justificativa	9
1.3	Objetivo e Resultados Esperados.....	11
1.4	Organização do Texto	12
2.	MAPA TOPOBATIMÉTRICO	13
2.1	Introdução	14
2.2	Etapas e Métodos	15
2.2.1	Levantamento de dados	17
2.2.1.1	Ecobatimetro Monofeixe	17
2.2.1.2	Ecobatimetro Multifeixe	18
2.2.1.3	Comparação da resolução dos Ecobatímetros	20
2.1.1.1	Datum geodésico	21
2.1.2	Processamento dos dados	22
2.2	Resultados	25
2.3	Conclusões e considerações finais	30
3.	ASSOREAMENTO E ESTRATIGRAFIA DOS SEDIMENTARES	32
3.1	Introdução	33
3.2	Etapas e Métodos	34
3.2.1	Bases batimétricas anteriores (1960 - 2009)	34
3.2.1.1	Entrada de Dados	35
3.2.1.2	Georreferenciamento	37
3.2.1.3	Vetorização e Geração do Modelo Digital de Terreno (batimétrico)	38
3.2.1.4	Cálculo da Cota x Área x Volume batimétrico.	38
3.2.2	Estratigrafia e sedimentologia dos Braços do Lago Paranoá	39
3.2.2.1	Trabalho de campo – levantamento dos perfis	39
3.2.2.2	Processamento das amostras	42
3.2.2.3	Geocronologia - ²¹⁰ Pb	43
3.3	Resultados	44
3.3.1	Bases batimétricas e o assoreamento do Lago - 1960 / 2018	44
3.3.2	Assoreamento e Estratigrafia dos principais Braços do Lago Paranoá	50
3.3.2.1	Braço do Riacho fundo	51

3.3.2.2	Braço do Bananal	58
3.3.2.3	Braço do Gama	64
3.3.2.4	Perfil do Torto	67
3.4	Conclusões e considerações finais	71
4.	QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E ÁGUA DO LAGO PARANOÁ	74
4.1	Contextualização	75
4.2	Materiais e Métodos	79
4.2.1	Amostragem e Anáse <i>in situ</i>	80
4.2.1.1	Sedimentos e Solos	80
4.2.1.2	Águas Superficiais	83
4.2.1.3	Águas Intersticiais	84
4.2.2	Preparação das Amostras	85
4.2.2.1	Extração Total – Digestão dos sedimentos	85
4.2.2.2	Partição – Extração Seletiva e Sequencial, ESSeq	86
4.2.3	Análises	87
4.2.4	Determinação Química	87
4.2.4.1	Controle e Tratamento do Dados	88
4.3	Resultados	90
4.3.1	Geoquímica dos Sedimentos	90
4.3.1.1	Composição Química dos Sedimentos	90
4.3.1.2	Perfis Estratigráficos (áreas assoreadas)	96
4.3.2	Partição dos Elementos nos Sedimentos Atuais	99
4.3.2.1	Extrações Seletivas e Sequenciais (ESSEQ) elementos maiores	99
4.3.3	Qualidade das águas e quantificação dos fluxos de elementos entre os sedimentos e a coluna de água do Lago Paranoá	108
4.3.3.1	Qualidade das Águas Superficiais	108
4.3.3.2	Análise da sub-bacia do Riacho Fundo:	114
4.3.3.3	Águas Intersticiais	118
4.4	Conclusões e considerações finais	130
5.	BALANÇO HÍDRICO DO LAGO PARANOÁ	135
5.1	Introdução	136
5.2	Construção da base de dados	139
5.2.1	Modelo digital de elevação	139
5.2.2	Base cartográfica de solos.	139
5.2.3	Base cartográfica de uso e ocupação do solo.	142

5.2.4	Uso da água	146
5.3	Modelagem hidrológica das bacias afluentes ao Lago Paranoá	147
5.3.1	Dados Meteorológicos e Hidrológicos.	149
5.3.2	Áreas não monitoradas.	149
5.4	Balanço Hídrico	153
5.5	Balanço hídrico quantitativo a partir de cenários formulados	154
5.6	Resultados	157
5.6.1	Calibração e verificação das vazões das sub-bacias afluentes monitoradas do Lago Paranoá e estimativa das vazões afluentes de áreas de drenagem direta e sub-bacias não monitoradas.	157
5.6.2	Determinação do balanço hídrico médio do Lago Paranoá no período compreendido entre 1982 e 2017.	166
5.6.3	Balanço hídrico quantitativo das sub-bacias afluentes e do Lago Paranoá a partir de cenários formulados – cenários exploratórios críticos	167
5.6.3.1	Sub-bacia hidrográfica do ribeirão Bananal	170
5.6.3.2	Sub-bacia hidrográfica do ribeirão do Gama	171
5.6.3.3	Sub-bacia hidrográfica do riacho Fundo	171
5.6.3.4	Sub-bacia hidrográfica do ribeirão do Torto	172
5.6.3.5	Sub-bacia hidrográfica do córrego Cabeça de Veado	173
5.6.3.6	Área de drenagem direta (urbana)	173
5.6.4	Análise dos cenários para o Lago Paranoá	177
5.7	Considerações Finais	179
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	182
6.1	Conclusões	183
6.2	Contribuição desses resultados na gestão dos recursos hídricos	187
6.3	Perspectivas	188
7.	Referências Bibliográficas	190

CAPÍTULO I

Introdução

1.1 Contextualização

A ocupação da bacia hidrográfica do Paranoá e seus impactos é um dos pontos mais polêmicos sobre a manutenção das condições ambientais do Lago Paranoá, principalmente sobre o seu estágio de assoreamento e a qualidade das suas águas. O assoreamento é palco de grandes debates sobre a sua origem, sua real situação, bem como, sobre as possíveis intervenções com o objetivo de mitigação. Parte deste problema advém do seu posicionamento geográfico, que traz uma fragilidade, no que tange a qualidade e quantidade de água, devido à intensa ocupação das margens e das suas bacias de contribuição. Estudos consagrados na literatura científica (Felizola *et al.*, 2001; UNESCO, 2002) determinaram que, entre 1954 e 1999, aproximadamente 41% da cobertura vegetal da bacia de contribuição do Lago Paranoá desapareceu. Já os estudos realizados por Menezes (2010), Menezes *et al.* (2012), Castro *et al.* (2019), Costa (2019), Costa *et al.* (2019) e Lima (2019) atualizaram os dados de uso e ocupação do solo para período entre 2009 e 2018. Estes estudos constataram que o lago está submetido a uma elevada e constante pressão antrópica, não somente pela degradação das bacias hidrográficas dos tributários, mas também pelas inúmeras atividades concentradas ao longo das suas margens. Essas atividades tem invadido a área do espelho d'água causando impacto direto sobre o seu volume útil, visto que o faixa operacional do reservatório varia somente 1m (Resolução ADASA nº 14, de 20 de dezembro de 2019).

Esses fatos, associados à implantação de um sistema de captação de água para abastecimento humano pela CAESB em meados de 2018 (ADASA, 2018), demandam uma avaliação ainda mais atenta das modificações causadas pela evolução do padrão no uso da terra sobre o futuro do lago, com destaque para a qualidade das águas e dos sedimentos. O mapeamento da qualidade das águas segue um rotina já bem estabelecida pela CAESB e ADASA. Entretanto, muito pouco ou quase nada se conhece sobre os sedimentos das áreas assoreadas. Além disso, é intensa a discussão sobre a possibilidade de intervenção para o desassoreamento de algumas regiões, como o braço do Bananal, opção que somente pode ser considerada a partir do conhecimento da composição e distribuição dos sedimentos.

Em virtude do caráter cênico e de lazer do lago, a pressão da sociedade motivou vários setores governamentais a preparar um processo de desassoreamento do lago. Esta situação levou o comitê de bacia (ou MMA) a solicitar uma análise previa das condições destas áreas. Toda esta preocupação dar-se-á, pois não se conhece a natureza do material depositado nessas regiões. Sabe-se que existe uma grande diversidade de materiais de naturezas aportando o lago (Franz et al, 2014), porém, não se conhecem as suas características *in situ*, nem a variabilidade temporal do material depositado.

Por exemplo, existem pontos controversos sobre a existência de camadas ou bolsão de sedimento enriquecido em poluentes orgânicos e metais. De fato, ao contrário do possível prejuízo causado pela perda da capacidade de armazenamento hídrico (que é desconhecida), existe a hipótese de que o assoreamento permitiu o isolamento de camadas sedimentares orgânicas, ricas em nutrientes e metais. Neste contexto, uma pergunta importante a ser feita, e respondida é “onde foi parar todo o material orgânico que estava no lago durante a década de 70/80/90?” Principalmente quando o lago passou por sérios problemas de eutrofização (Starling *et al.*, 2002 e Angelini, *et al.*, 2008). Grande quantidade de matéria orgânica foi gerada e provavelmente depositada neste período. Sem contar que, produtos como algicidas foram usados pela CAESB para controlar o processo de eutrofização (Padovesi-Fonseca e Philomeno, 2004). Esses produtos são normalmente ricos em metais pesados, como cobre (Svirčev *et al.*, 2008) e sabe-se que a aplicação de algicidas pode causar um dano ainda maior com a liberação de toxinas na água (Nardini & Nogueira, 2008). Toda esta matéria orgânica e os metais pesados decantaram e estão sedimentados em algum lugar do lago, provavelmente nos braços onde as condições de eutrofização foram piores e mais intensas (Starling & Lazzaro, 1997; Altafin *et al.*, 1995).

Um exemplo desse fenômeno foi no final da década de 70. Neste período, ocorreu o 1º grande “*bloom*” da cianobactéria *Mycrocystis aeruginosa*, concentrada principalmente no braço do Riacho Fundo, devido à extensa urbanização da respectiva sub-bacia, sem grandes tratamentos do esgotamento sanitário, causando a primeira grande mortandade de peixes, que se repetiram outras vezes durante as

década de 80 e 90 (Angelini, *et al.*, 2008 e Burnett, 2001). Após todo esforço realizado para a recuperação do lago (Starling, 1993), desde o início deste século o Lago Paranoá tem sido classificado como um reservatório oligotrófico.

Entretanto, o estudo realizado por Batista e Fonseca (2018), aponta para que, apesar do lago apresentar concentrações de fósforo total e fósforo solúvel reativo e de biomassa algal típicos de um reservatório oligotrófico, os dados de concentrações de nitrogênio total e os grupos funcionais de fitoplânctons apontaram para um ambiente mesotrófico. Estes dados, conjuntamente com o registro de cianobactérias em densidades acima do normal no Braço do Riacho Fundo, são indicadores de instabilidades do ecossistema aquáticos do lago e apontam para a necessidade de intensificação do monitoramento e análise de cianotoxinas, de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914/2011.

Neste contexto, pensando também no uso das águas do lago para abastecimentos, este estudo buscou entender o balanço hidrológico das Bacias de contribuição e do Lago Paranoá e os impactos decorrentes do possível desassoreamento de parte das áreas assoreadas do lago. Também faz parte do escopo deste estudo, entender melhor os processos biogeoquímicos que ocorreram e ocorrem na parte assoreada e na interface sedimentos-água.

1.2 Justificativa

A utilização/gestão de ambientes aquáticos associados a grandes centros urbanos torna-se cada vez mais complexa frente aos múltiplos usos e às demandas crescentes. Entre os principais problemas associados aos recursos hídricos estão os conflitos relacionados à disponibilidade quali-quantitativa e a destinação de uso.

A porção central do DF, onde se localiza a Bacia do Lago Paranoá, apresenta elevada densidade demográfica (JATOBÁ, 2017). Essa é a única bacia hidrográfica que está totalmente inserida no DF e se divide em cinco unidades hidrográficas de gerenciamento, cujos principais afluentes são o Riacho Fundo e os Ribeirões de Torto, Bananal, Gama e Cabeça de Veado (CRH-DF, 2016).

Quando o Lago Paranoá foi criado, suas principais funções eram: a composição paisagística, lazer, melhoria no microclima da região e a geração de energia elétrica (Rocha, 1994). Além das opções listadas, o Lago também foi utilizado para diluição de efluentes sanitários tratados (Starling *et al.*, 2002). Reforçando a demanda multiusuário do Lago, atualmente ele é fonte de abastecimento humano em função da alta demanda e da grave crise hídrica sofrida em 2017 (ADASA, 2018 - decreto 39.555/2018). Além disso, o Lago vem sendo submetido a constante processo de assoreamento pois, desde a sua criação, as diferentes atividades antrópicas têm, diretamente ou indiretamente, alterado as condições de sedimentação no Lago e conseqüentemente influenciado significativamente a dinâmica dos elementos no *continuum* "sedimento-água-organismo", principalmente relacionado aos nutrientes e metais pesados. De fato, os materiais inorgânicos e orgânicos sedimentados e armazenados sofrem modificações (físico-químicas) pós-deposicionais ao longo do tempo, como por exemplo, devido os processos biogeoquímicos de diagênese precoce.

Os processos pós-deposicionais podem modificar a especiação de elementos e conseqüentemente a sua biodisponibilidade, comprometendo a qualidade dos sedimentos e os fluxos de elementos na interface sedimento/águas. Lembrando que, parte destes sedimentos podem conter muitos elementos químicos nocivos, os quais foram acumulados durante a década de 70/80/90 (Branco e Senna, 1994, 1996a,b; Padovesi-Fonseca e Philomeno, 2004).

Neste contexto, a questão do desassoreamento tem sido cogitado por alguns órgãos governamentais, como uma possível solução para os problemas existentes no lago. De maneira geral, existe a hipótese de que o possível processo de desassoreamento possa levar à liberação de elementos químicos tais como, fosforo e metais pesados, alterando o estado trófico do lago. Esses potenciais efeitos colaterais, fazem com que seja necessário entender, medir e modelar a transferência de contaminantes no sistema sedimento-água-organismos pois, atualmente, este processo é totalmente desconhecido. Isso torna-se importante, visto que, a qualidade da água do lago, apesar da grande recuperação durante os anos 2000, apresenta sinais de instabilidade do sistema, devido ao surgimento de "*blooms*" da cianobactéria

nos últimos anos (Costa *et al.*, 2017). Em 2016, uma mortandade de peixes ocorreu no Braço do Riacho Fundo, próximo a ETE Sul, devido ao surgimento de cianobactérias, tornando o braço um pequeno tapete verde. Como consequência, foi interditada cerca de 5% da área do Lago Paranoá para o banho e a pesca (ADASA, 2016).

Deste modo, o desafio que se coloca para a ADASA é a melhoria do conhecimento sobre a dinâmica e qualidade das águas e sedimentos do Lago Paranoá, através de uma abordagem multidisciplinar, que seja capaz de fornecer um novo modelo para auxiliar na definição de políticas públicas, a fim de promover a gestão sustentável dos recursos naturais e a proteção ambiental.

Incorpora-se a este processo a necessidade da construção de ferramentas que permitam a previsão de vazões aportadas ao Lago sob diferentes cenários climatológicos e de uso e ocupação da terra, bem como seus impactos sobre a qualidade das águas e dos sedimentos aportados ao lago.

1.3 Objetivo e Resultados Esperados

Conforme apresentado no plano de trabalho e retificado no 3º Termo Aditivo, o objetivo geral do projeto é “O estudo multidisciplinar do estado físico do Lago Paranoá, com a finalidade de dar uma visão integrada dos processos que afetam o volume do reservatório e a qualidade das águas, finalizando com a construção de balanço hídrico”. Os resultados específicos alcançados pelo projeto foram:

1. Determinação da Cota-Área-Volume do Lago Paranoá para o ano de 2018 a partir do novo Modelo Digital do Elevação integrado gerado no projeto;
2. Estudo da variabilidade temporal da cota-área-volume a partir de dados históricos disponíveis. Neste caso, o comitê de acompanhamento, em conjunto com a coordenação do projeto, definiu como referência o levantamento realizado no ano de 2009;
3. Determinação das principais áreas assoreadas com a quantificação dos seus volumes;
4. Determinação da qualidade dos sedimentos nas áreas assoreadas;

5. Determinação da disponibilidade biogeoquímica dos elementos nos sedimentos;
6. Determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá com base no levantamento do escoamento superficial direto ao lago pela aplicação do método racional e aplicação de modelo de balanço hídrico simplificado; e
7. Determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá com base na aplicação do modelo hidrológico SWAT em bacias afluentes.

1.4 Organização do Texto

Visando manter a mesma estrutura do plano de trabalho e dos relatórios parciais, este relatório é composto por 5 capítulos, o primeiro introdutório e os próximos quatro referentes os módulos e objetivos específicos, ou seja:

- Capítulo II - Mapa Topobatimétrico (Módulo I);
- Capítulo III - Assoreamento e estratigrafia dos sedimentares (– Modulo I e II)
- Capítulo IV - Análise geoquímica e da qualidade dos sedimentos e água do Lago Paranoá (Módulo II);
- Capítulo IV - Modelagem do Balanço Hídrico da Bacia e do Lago (Módulo III);
- Capítulo V: Conclusões, considerações finais e perspectivas

CAPÍTULO II

MAPA TOPOBATIMÉTRICO

Marco Ianniruberto
Henrique Llacer Roig

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para determinação do volume útil do reservatório até a altitude máxima de 1000,80m sobre o nível médio do mar, em atendimento ao objetivo específico 1 do plano de trabalho. Para alcançar o objetivo foram adotadas técnicas modernas de aquisição de dados com elevada resolução e acurácia, de modo que o modelo digital do terreno resultante possa se tornar referência para o monitoramento contínuo do Lago Paranoá, uma vez que, os dados de modelos anteriores carecem de maiores informações cartográficas e metodológicas. Os dados para a geração do modelo do fundo do lago foram obtidos com levantamentos topográfico com LiDAR (parte emersa) e batimétrico com SONAR hidrográfico multifeixe e monofeixe (parte submersa) que, após cuidadoso processo de redução ao *datum* comum e controle de qualidade, foram integrados visando a construção de um modelo consistente para toda a área de estudo. A metodologia proposta visou também tratar com particular cuidado o processo do cálculo da curva cota-área-volume do lago entre a zona de flutuação e a cota máxima de enchimento.

Para o mapeamento da borda do lago (parte emersa) estava previsto a utilização de levantamento fotogramétrico com câmeras não paramétricas embarcadas em VANT com a prévia autorização dos órgãos competentes. Esta proposta tinha por objetivo testar o uso desta tecnologia inovadora e de baixo custo para a complementação dos dados batimétricos do reservatório. Entretanto, com a manutenção do nível d'água operacional do Lago Paranoá bem acima do estipulado para o período previsto para a atividade "Execução do aerolevanteamento e topográficos" com VANT - entre fevereiro e julho de 2018 (conforme cronograma de trabalho do 3º Termo Aditivo), esta etapa não foi realizada. Deste modo, os dados da parte emersa foram substituídos, em acordo com a equipe técnica da ADASA, pelos dados do levantamento do terreno por LIDAR contratado pela Terracap na escala de 1:2.000. Ressalta-se que a escala e resolução dos dados topográficos são compatíveis com os dados batimétricos levantados neste projeto. As características dos levantamentos com Lidar podem ser encontrados nos relatórios técnicos da TOPOCART junto ao setor de cartografia da TERRACAP (TERRACAP, 2018).

Deve-se destacar que o estudo para o uso do VANT, com o objetivo de refinar o mapeamento topo-batimétrico da margem do lago, não foi abandonado. Testes para

a verificação do seu potencial foram realizados pelo geólogo Fabio Fleury, bolsista do projeto, durante a realização do curso de especialização em Geoprocessamento de 2018 (IG/UnB). Os resultados alcançados que demonstram o potencial do uso desta tecnologia, podem ser encontrados na monografia de especialização (na forma de artigo científico - Anexo I).

Considerando o exposto, no âmbito das atividades do convênio, foram realizados levantamentos batimétricos no Lago Paranoá, em diferentes períodos e utilizando diferentes sonares. A tabela 2.1 a seguir ilustra o histórico de levantamentos realizados que forneceram os dados utilizados para determinar morfologia e profundidade da parte imersa do reservatório. Vale ressaltar que os levantamentos de 2015 foram os primeiros testes realizados ainda durante o período de construção do plano de trabalho, com vista a verificação da metodologia proposta. Do mesmo modo, os levantamentos realizados no primeiro semestre de vigência do projeto (agosto a dezembro de 2017), anterior ao repasse dos recursos, foram realizados com o objetivo de reavaliar a metodologia proposta, calibração dos equipamentos, controle de qualidade e treinamento da equipe do projeto.

Toda a superfície alagada do Lago foi levantada entre fevereiro e agosto de 2018, com a exceção do levantamento realizado no braço do Córrego do Bananal, que em virtude das obras no chamado Trevo de Triagem Norte. Durante todo o período de execução do projeto esta região do Lago esteve interditada devido a obra do Trevo da saída norte, tornando necessário o uso de um dado adquirido em 2015.

2.2 Etapas e Métodos

As atividades executadas para alcançar os objetivos desta fase do projeto foram:

1 – Levantamento de dados de profundidade das regiões submersas com ecobatímetro multifeixe e monofeixe de alta frequência (primeiro semestre de 2018), após a calibração dos ecobatímetros monofeixe e multifeixe, controle de qualidade e treinamento da equipe (segundo semestre de 2017);

2 – Processamento dos dados para obtenção do mapa topo-batimétrico integrado. Nesta etapa foram processados os dados de profundidade, obtidos com

sonares, e topográficos, obtidos com LiDAR, para gerar o modelo digital do terreno (MDT) de toda a área do Lago. O processamento incluiu controle de qualidade, redução ao *Datum* vertical de referência e interpolação do conjunto de dados.

Tabela 2.1 – Histórico das etapas de levantamentos batimétricos realizados no âmbito do projeto.

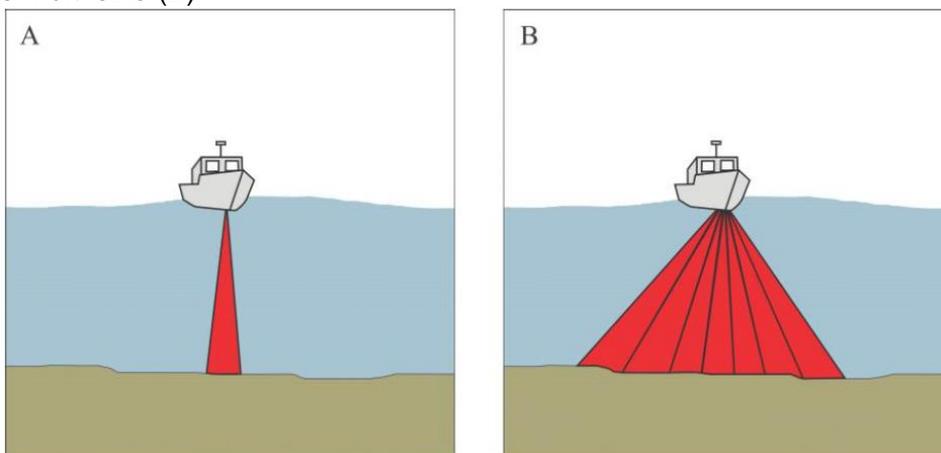
Ano	Área levantada	Sensores	Embarcação
2018	Todo o Lago Paranoá até a profundidade mínima de cerca de 2m, após controle de qualidade dos dados levantados no segundo semestre de 2017.	Ecobatímetro Multifeixe Reson Seabat 8101, frequência de 240 kHz, integrado a um sistema GNSS Vector VS330 com correções diferenciais Atlas banda-L, sensor de movimento SBG Ekinox-E e sonda de velocidade do som Valeport Mini-SVP. Sistema de navegação e aquisição de dados sonar PDS2000	Lancha hidrográfica Levefort em alumínio naval Stella II
2018	Orla e parte dos braços (profundidade < 2m) para preencher a área não hidrografada pelo multifeixe.	Ecobatímetro hidrográfico ODOM Echotrac CVM de dupla frequência (33/200 kHz), integrado a um sistema GNSS Hemisphere AtlasLink com correções diferenciais Atlas banda-L. Sistema de navegação e aquisição de dados sonar Hypack 2010.	Bote inflável Nautika SR 450
2017	Lago Paranoá - área central. Controle de qualidade multifeixe e treinamento da equipe	Ecobatímetro Multifeixe Reson T50-P, frequência de 420 kHz, integrado a um sistema GNSS Vector VS330 com correções diferenciais Atlas banda-L, sensor de movimento SBG Ekinox-E e sonda de velocidade do som Valeport Mini-SVP. Sistema de navegação e aquisição de dados sonar PDS2000	Lancha hidrográfica Levefort em alumínio naval Stella II
2017	Braço do Riacho Fundo - a Sudoeste da Ponte das Garças até a profundidade mínima de cerca de 0,5m. Calibração e controle de qualidade monofeixe e treinamento da equipe	Ecobatímetro hidrográfico ODOM Echotrac CVM de dupla frequência (33/200 kHz), integrado a um sistema GNSS Hemisphere AtlasLink com correções diferenciais Atlas banda-L. Sistema de navegação e aquisição de dados sonar Hypack 2010.	Bote inflável Nautika SR 450
2017	Braço do Córrego do Torto - braço a Noroeste da QL7 até a profundidade mínima de cerca de 0,5m. Calibração e controle de qualidade monofeixe e treinamento da equipe	Ecobatímetro hidrográfico ODOM Echotrac CVM de dupla frequência (33/200 kHz), integrado a um sistema GNSS Hemisphere AtlasLink com correções diferenciais Atlas banda-L. Sistema de navegação e aquisição de dados sonar Hypack 2010.	Bote inflável Nautika SR 450
2015	Córrego do Bananal - braço a Noroeste da Ponte do Bragueto até a profundidade mínima de cerca de 0,2m. Primeiros teste realizados durante a construção do convênio	Ecobatímetro hidrográfico ODOM Echotrac CVM de dupla frequência (33/200 kHz), integrado a um sistema GNSS Hemisphere AtlasLink com correções diferenciais Atlas banda-L. Sistema de navegação e aquisição de dados sonar Hypack 2010.	Bote inflável Nautika SR 450

Fonte:elaborada pelo autor

2.2.1 Levantamento de dados

A execução dos levantamentos foi realizada utilizando dois tipos de ecobatímetro: monofeixe e multifeixe (Figura 2.1). O sistema monofeixe, ou ecobatímetro hidrográfico tradicional, permite a determinação da profundidade exclusivamente na vertical do sensor e foi utilizado para levantamento das regiões mais rasas pois pode ser instalado em embarcação de menor calado. O sistema multifeixe adquire dados numa seção transversal à direção de navegação, permitindo assim uma cobertura de uma faixa do assoalho cuja largura varia em função da profundidade.

Figura 2.1: determinação da profundidade mediante ecobatímetro hidrográfico monofeixe (A) e multifeixe (B).



Fonte: Gabriela Nunes Turqueti

2.2.1.1 Ecobatímetro Monofeixe

O ecobatímetro monofeixe é o sistema tradicional utilizado em hidrografia, que permite a determinação da profundidade no nadir do sonar (Figura 2.1 - esquerda) mediante a medição do tempo duplo de percurso de um pulso acústico (Δt) entre a superfície e o fundo. A profundidade é consequentemente determinada pela equação 2.1.

$$h = \frac{1}{2} \Delta t \cdot \bar{c} \tag{eq.2.1}$$

Onde h é a profundidade e c a velocidade média de propagação da onda acústica na lâmina d'água, estimada mediante o procedimento de calibração chamado de "bar-check", a ser realizado na primeira instalação e repetido todas as vezes que o sensor for deslocado. Considerando que a velocidade média auferida pode variar em função da temperatura, o procedimento de calibração deve ser repetido também todas as vezes que há variação significativa da temperatura da água.

As sondagens batimétricas são adquiridas e georreferenciadas em tempo real pelo sistema de navegação e aquisição Hypack, que fornece interface entre o sonar e o sistema de posicionamento GNSS diferencial (Figura 2.2).

Figura 2.2: Representação esquemática do sistema de navegação e aquisição para levantamento monofeixe.



Fonte: Gabriela Nunes Turquetti

2.2.1.2 Ecobatímetro Multifeixe

O ecobatímetro multifeixe é um sistema bem mais complexo, mas com a capacidade de adquirir dados batimétricos com uma resolução espacial muito maior, permitindo a varredura completa de uma seção transversal à linha de navegação e a composição de modelos digitais de alta precisão (Figura 2.1 - direita). Para o

levantamento do Lago Paranoá, foram utilizados dois modelos: o Reson Seabat 8101 (frequência de 240 kHz e 511 feixes) e o Reson T50-P (420 kHz e 512 feixes), ambos integrado a um sistema de posicionamento por satélite GNSS diferencial com precisão horizontal estimada de cerca de 4 cm. Para garantir a melhor precisão do sistema de medição, a operação com ecobatímetros multifeixe necessita de alguns sensores auxiliares para compensação do movimento da embarcação (rotações e queda livre) e da refração das ondas acústicas pela estratificação do meio de propagação. Portanto, a bordo do barco foram instalados um sensor de movimento (*Motion Reference Unit*, MRU) e uma sonda de velocidade do som (*Sound Velocity Probe*, SVP), o que permitiu compensar tanto as oscilações do barco quanto as variações de velocidade de propagação do som na água, respectivamente. A tabela 2.2 mostra as características dos sensores instalados a bordo do barco hidrográfico durante as etapas de levantamento.

A fotografia na Figura 2.3 mostra o barco hidrográfico Stella II com o transdutor do multifeixe Reson T50-P instalado num braço basculante em posição de repouso durante o transferimento para área de trabalho. Uma vez alcançada a área de trabalho, o braço é rapidamente racionado para que o sensor se encaixe na posição operacional, na proa do barco. Esta configuração foi escolhida pois a proa do barco é a posição que garante minimização do ruído hidrodinâmico e variações de calado em função de deslocamento de pesos a bordo. Deve-se ressaltar que o levantamento com multifeixe ficou restrito à profundidade de cerca de 2m, devido às limitações de navegação apresentada pela embarcação utilizada.

A fase mais importante na instalação e configuração inicial de sistemas multifeixe é a calibração para a eliminação do desalinhamento tri-axial entre o MRU e o transdutor do multifeixe. A calibração é realizada utilizando um protocolo padrão, denominado de “*patch test*”, que permite compensar as três componentes angulares do desalinhamento para garantir o correto georreferenciamento das sondagens e a justaposição de varreduras adjacentes. Tal procedimento deve ser realizado na primeira instalação e todas as vezes que o transdutor sofre deslocamentos. A instalação realizada a bordo do barco hidrográfico Stella II permite que o encaixe do transdutor ocorra sempre na mesma posição, dispensando assim a necessidade de se repetir a calibração diariamente.

Durante a operação de aquisição de dados, o perfil de velocidade do som na coluna d'água foi adquirido diariamente utilizando a sonda SVP em consideração da sensibilidade das medidas do multifeixe a variações da velocidade de propagação das ondas acústicas na água.

Figura 2.3: Barco hidrográfico com multifeixe Reson T50-P instalado na proa com braço basculante para rápido posicionamento em configuração operacional.



Fonte: Marco Ianniruberto

2.2.1.3 Comparação da resolução dos Ecobatímetros

Os sistemas mono e multifeixe utilizados no levantamento possuem diferenças significativas não somente pela quantidade e densidade de dados adquiridos em cada ciclo de medição, mas também em termos de frequência operacional e abertura (diretividade) dos feixes acústicos, que juntos determinam a resolução espacial de cada ponto de sondagem. Para ilustrar tais diferenças, foi elaborada uma tabela comparativa (Tabela 2.3) do multifeixe RESON T50P e do ecobatímetro hidrográfico ODOM CVM. Pode se observar que no nadir, único ponto comum de comparação, o sistema multifeixe possui uma resolução de uma ordem de magnitude melhor que o monofeixe. Por essa razão, o monofeixe foi utilizado somente onde não havia possibilidade de navegar com o multifeixe.

Tabela 2.2 – Especificações dos equipamentos utilizados para o levantamento multifeixe.

Equipamento	Fabricante	Características Gerais
Rastreador GNSS Modelo Vector VS330	Hemisphere	<ul style="list-style-type: none"> • RTK e DGPS; • Correção AtlasLink • Dupla frequência L1/L2 das constelações NAVSTAR e GLONASS; • Heading de 0,1°; • Acurácia horizontal com L-Band: 0,08m
Ecobatímetro Multifeixe modelo T50-P	Teledyne Reson	<ul style="list-style-type: none"> • Varredura de até 150° com até 512 feixes; • Taxa de coleta de até: 66 Hz; • Abertura de feixe de 0.5° x 1° • Resolução de 6mm • Frequência 420 kHz
Sensor de movimento e compensador de ondas modelo Ekinox-E	SBG Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Correções angulares Pitch, Roll e Yaw com 0,03° de precisão; • Correção vertical Heave com precisão de 2 cm.
Sensor de velocidade de propagação do som na água modelo Digibar V	Teledyne Odom	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de amostragem de até 100 Hz; • Resolução: 0,1 m/s; • Acurácia: ± 0,2 m/s; • Intervalo de medição: 1400 – 1600 m/s;
Perfilador de velocidade de propagação do som na água	Teledyne Odom	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de amostragem de até 1 kHz; • Resolução: 0,1 m/s; • Acurácia: ± 0,05 m/s; • Intervalo de medição: 1400-1700 m/s; • Profundidade de até 100 m de medição;

Fonte: Marco Ianniruberto

2.1.1.1 Datum geodésico

Todos os dados batimétricos foram georreferenciados no *datum* horizontal WGS84, Fuso UTM 23-South. As cotas batimétricas foram reduzidas à cota 1000 m do Lago utilizando as leituras do nível da régua instalada próximo à barragem do Paranoá e disponíveis no site da Agencia Nacional de Águas (<http://gestorpcd.ana.gov.br/exportarDados.aspx>). Utilizando o dado reduzido é possível transformar as cotas batimétricas em elevações do terreno, passo propedêutico a integração com dados topográficos e de aerolevamento.

2.1.2 Processamento dos dados

- Controle de qualidade das sondagens obtidas com ecobatimetro Monofeixe

O controle de qualidade dos dados adquiridos com o ecobatimetro monofeixe é realizado no Hypack, a mesma *suite* software utilizada para a aquisição. Os problemas mais comuns são:

a) perda ou degradação do sinal GNSS, que provoca mudanças repentinas da posição do barco e descontinuidade na linha de navegação. Estes erros são corrigidos eliminando o ponto de medição ou interpolando a posição no intervalo entre duas posições reconhecidas como certas. Neste segundo caso não há perda de dados pois a medição é associada à posição interpolada.

Tabela 2.3 – Comparação da resolução do ecobatimetro multifeixe RESON T50P e do ecobatimetro hidrográfico ODOM CVM.

RESON SEABAT T50-P				ODOM Echotrak CVM							
Frequência (kHz)		420		Abertura do feixe (°)		0.5		Frequência (kHz)		200	
Velocidade do som (m/s)		1500		Número de feixes		512		Número de feixes		1	
Comprimento de onda (m)		0.004		Abertura angular (°)		±75°		Abertura do feixe (°)		4°	
Feixe #	Ângulo de apontamento		Resolução espacial (m)			Resolução espacial (m)					
	theta (deg)	theta (rad)	a 2 m	a 5 m	a 10m	a 2 m	a 5 m	a 10m			
256	0.00	0.000	0.017	0.044	0.087	0.140	0.350	0.699			
271	7.50	0.131	0.018	0.044	0.088						
286	15.00	0.262	0.018	0.045	0.090						
301	22.50	0.393	0.019	0.047	0.094						
316	30.00	0.524	0.020	0.050	0.101						
331	37.50	0.654	0.022	0.055	0.110						
346	45.00	0.785	0.025	0.062	0.123						
361	52.50	0.916	0.029	0.072	0.143						
376	60.00	1.047	0.035	0.087	0.175						
391	67.50	1.178	0.046	0.114	0.228						
406	75.00	1.309	0.067	0.169	0.337						

Fonte: Marco Ianniruberto

b) erro na medição da profundidade, que é provocado por reverberações na lâmina d'água ou em presença de fundo com baixo coeficiente de reflexão. Estes valores anômalos de profundidade são avaliados comparando com o ecograma e a ação seguinte pode ser exclusão do ponto, interpolação ou digitalização do ecograma com correção do valor auferido.

- Controle de qualidade ecobatímetro Multifeixe

O controle de qualidade dos dados adquiridos com os ecobatímetro multifeixe foi realizado no pacote software PDS2000 da Reson. Por ser um sistema mais complexo, o procedimento é realizado em três fases:

i) conferência dos offsets de instalação, velocidade do som e correção da navegação. Nesta fase, é gerado um primeiro modelo digital para verificar a presença de artefatos decorrentes de falhas na compensação do alinhamento do transdutor e do MRU, da inconsistência do perfil de velocidade do som e de problemas decorrentes de saltos na posição medida pelo GNSS.

ii) filtragem automática dos dados anômalos. Para facilitar a remoção de dados espúrios, o software de processamento disponibiliza filtros automáticos que permitem facilitar a remoção automática de eventuais medidas erradas (reverberação na lâmina d'água ou falhas na detecção do fundo). Os filtros operam tanto utilizando limites fixos, por exemplo, definindo limites mínimo e máximo de profundidade, ou eliminando feixes consistentemente imprecisos, quanto com base estatística, utilizando o desvio padrão para individualizar medidas anômalas.

iii) filtragem manual. Este tipo de filtragem é executado para remover eventuais medidas anômalas remanescentes depois da aplicação da filtragem automática.

- Redução ao nível altimétrico comum

A redução ao *datum* vertical de referência, neste caso a cota 1000 metros sobre o nível do mar, utilizada como referência para o Lago Paranoá, é realizada inserindo a correção de nível na ferramenta "*Tide Editor*": nos dias em que o levantamento foi realizado com cota do lago acima de 1000, a diferença foi descontada da profundidade para obter o valor reduzido; dados adquiridos quando o nível do lago estava abaixo da cota 1000 m tiveram o valor incrementado pela diferença entre a cota de referência

e a cota observada. Após redução ao datum comum, é possível unir medidas realizadas em tempos diferentes, com diferentes elevações da superfície do lago.

- Interpolação do MDE

Após o controle de qualidade, o conjunto de dados batimétricos pós-processados e reduzido para a cota foi exportado em formato de tabela ASCII para interpolação do modelo digital do terreno (MDT). Esta operação foi realizada no software Fledermaus da QPS mediante as seguintes etapas:

- a) importação de todas as tabelas de dados de profundidade coletadas com sonar mono e multifeixe;
- b) integração da batimetria com dados topográficos LIDAR disponibilizados pela Terracap, após redução ao datum *datum* horizontal SIRGAS2000 e *datum* altimétrico Imbituba;
- c) interpolação dos dados para um modelo digital de resolução 5x5 m utilizando o algoritmo geoestatístico de krigagem;
- d) geração de mapa topobatimétrico e cálculo do volume e superfície do Lago.

- Cálculo do volume

O cálculo do volume e da superfície alagada na cota 1000 m.s.n.m. do Lago Paranoá foi realizada utilizando a técnica de interpolação trapezoidal, comumente adotada para determinação do volume de estruturas geológicas (Slavinić & Cvetković, 2016).

- Cálculo da curva Cota-Área-Volume (CAV)

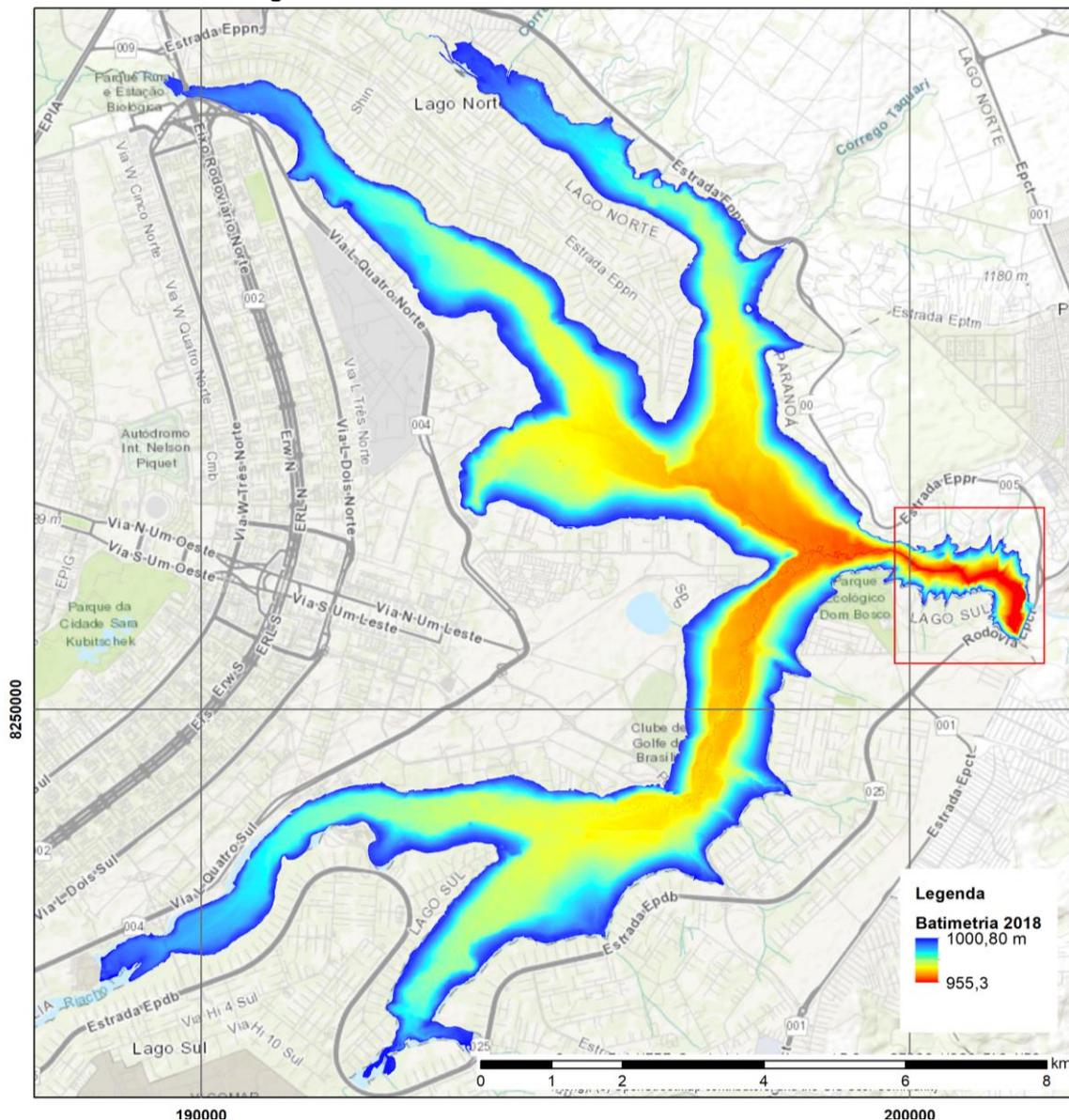
O cálculo do volume e da superfície alagada em passos de 1 metro, da cota 965 até a cota 1000 do Lago Paranoá, foi realizada utilizando a técnica de integração trapezoidal do MDE (figura 3.4), comumente adotada para determinação do volume de estruturas geológicas (Slavinić & Cvetković, 2016).

Ao realizar o cálculo da CAV foi observado que técnicas alternativas de integração para o cálculo do volume, como a integração de Simpson de 1/3 e 3/8, não afetam significativamente o volume calculado, todavia, o processo de interpolação parece ter um efeito mais relevante.

2.2 Resultados

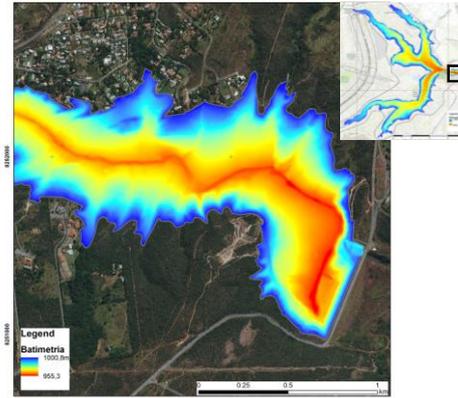
A partir do levantamento batimétrico 2018 integrado com os dados do LIDAR disponibilizado pela TERRACAP, obteve-se o novo mapa topobatimétrico do Lago Paranoá (figuras 2.4 e 2.5).

Figura 2.4 - Modelo digital de elevação do Lago Paranoá com resolução 5x5m. Retângulo vermelho detalhe da fig. 2.5



Fonte: produzido pelos autores a partir batimetria de 2018.

Figura 2.5- Detalhe do modelo digital do lago para a região próxima à barragem



Fonte: produzido pelos autores.

A partir deste MDT foi possível calcular a nova e atualizada curva Cota-Área-Volume da cota geodésica 955,3m, correspondente a profundidade máxima do lago, até a cota 1000,80m com passo de 0,5 m (figura 2.6 e tabela 2.4). A tabela e a curva foram obtidas mediante rotina realizada em Python com base no MDE calculado no ArcGIS com interpolador geoestatístico *Universal Kriging*.

Figura 2.6: Curva Cota-Área-Volume (CAV) do Lago Paranoá com base no modelo digital interpolado com técnica geoestatística (tabela 2.5)

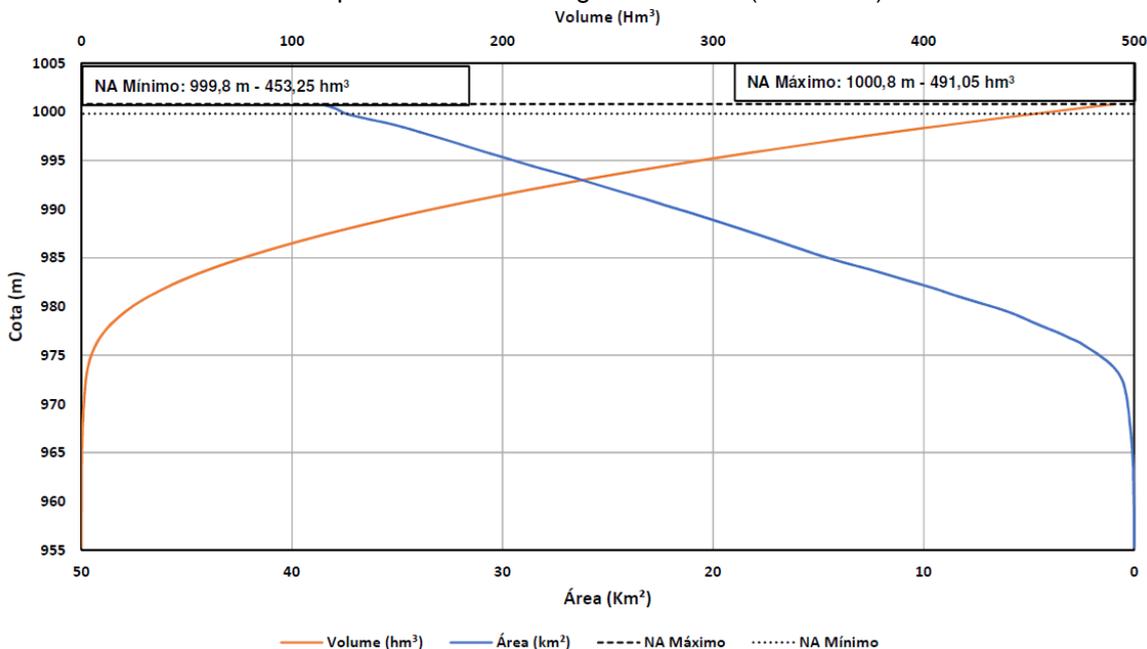


Tabela 2.4: Tabela de dados calculados a partir de modelo interpolado com "Krigagem" e utilizados para construção da CAV

TABELA - COTA X ÁREA X VOLUME - Lago Paranoá		
Cota de Operação (m)	Área (km²)	Volume (hm³) Krigagem
1000,8	38,57594398	491,04826
1000,3	37,90716248	472,02686
999,8	37,43042875	453,24763
999,3	36,48361652	434,79410
998,8	35,41291364	416,88789
998,3	34,52817189	399,45829
997,8	33,75184822	382,43976
997,3	32,97413099	365,80629
996,8	32,2150468	349,55841
996,3	31,47611189	333,68066
995,8	30,71819781	318,17562
995,3	29,92497181	303,05517
994,8	29,16047018	288,32958
994,3	28,3781546	273,98089
993,8	27,52434994	260,04247
993,3	26,69869442	246,52839
992,8	25,93826981	233,40648
992,3	25,16998123	220,66253
991,8	24,40400826	208,30192
991,3	23,61829575	196,32781
990,8	22,86975096	184,73986
990,3	22,13275713	173,52091
989,8	21,3487944	162,67814
989,3	20,61018489	152,21792
988,8	19,88657209	142,12324
988,3	19,17213336	132,38296
987,8	18,45421227	123,00079
987,3	17,75763803	113,97398
986,8	17,06105185	105,28759
986,3	16,38175809	96,95369
985,8	15,70221905	88,95065
985,3	15,00894586	81,29127
984,8	14,25050974	73,99647
984,3	13,41794324	67,09666
983,8	12,55357781	60,62281
983,3	11,75768925	54,56230
982,8	10,9788892	48,89661
982,3	10,1871265	43,62062

TABELA - COTA X ÁREA X VOLUME - Lago Paranoá		
Cota de Operação (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³) Krigagem
981,8	9,403021794	38,74240
981,3	8,73604557	34,22438
980,8	7,987897056	30,05262
980,3	7,227216762	26,26440
979,8	6,449227903	22,85651
979,3	5,792289879	19,81538
978,8	5,241998543	17,08139
978,3	4,723030941	14,59533
977,8	4,166892684	12,38262
977,3	3,587085305	10,45934
976,8	3,09235556	8,79608
976,3	2,593941858	7,38940
975,8	2,218073618	6,19950
975,3	1,855383002	5,18837
974,8	1,540779613	4,34626
974,3	1,235684537	3,66271
973,8	0,996751921	3,11308
973,3	0,793697871	2,67296
972,8	0,649008865	2,31970
972,3	0,536274198	2,02849
971,8	0,46342458	1,78398
971,3	0,412204852	1,56922
970,8	0,367020618	1,37778
970,3	0,327422794	1,20707
969,8	0,295215671	1,05390
969,3	0,266777487	0,91562
968,8	0,240773139	0,79081
968,3	0,215817592	0,67839
967,8	0,191386249	0,57824
967,3	0,168339923	0,48977
966,8	0,146107654	0,41274
966,3	0,127018744	0,34558
965,8	0,108790969	0,28754
965,3	0,091301939	0,23844
964,8	0,075414479	0,19758
964,3	0,062384843	0,16392
963,8	0,052695978	0,13583
963,3	0,045686046	0,11192
962,8	0,04029806	0,09090

TABELA - COTA X ÁREA X VOLUME - Lago Paranoá		
Cota de Operação (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³) Krigagem
962,3	0,034474152	0,07263
961,8	0,029002154	0,05712
961,3	0,025775616	0,04372
960,8	0,022185007	0,03189
960,3	0,018195171	0,02193
959,8	0,011815512	0,01449
959,3	0,006724867	0,01023
958,8	0,005700394	0,00719
958,3	0,004565588	0,00466
957,8	0,003442362	0,00271
957,3	0,002170568	0,00132
956,8	0,001072353	0,00054
956,3	0,000510816	0,00019
955,8	0,000168832	0,00002
955,3	0	0,00000

Com o objetivo de avaliar o efeito do método de interpolação, foi gerado um MDE com método da “*Topo-to-raster*”, a respectiva curva cota-área-volume (Fig. 2.7) foi calculada e o volume foi comparado com o calculado pelo “*Universal Kriging*”, obtendo uma diferença de 0,2% (tabela 2.5) o que pode ser considerada insignificante, ou seja, é possível usar os dois modelos de interpolação.

Figura 2.7- Curva Cota-Área-Volume (CAV) do Lago Paranoá com base no modelo interpolado com a técnica “*Topo-to-raster*”

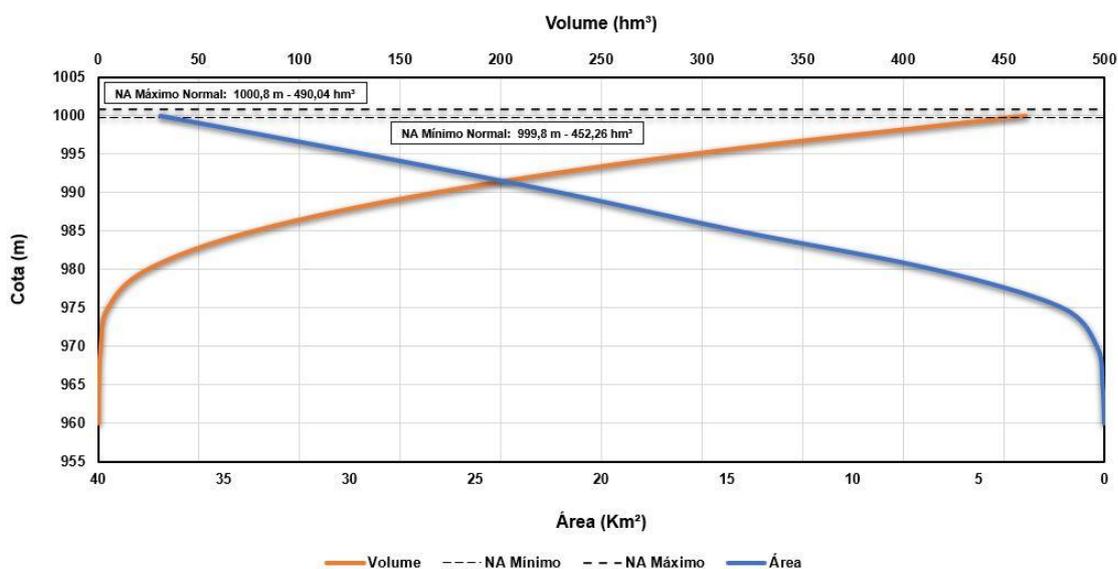


Tabela 2.5 - Comparação dos volumes e superfícies calculadas com os métodos “topo-to-raster” e “universal kriging”)

COTA (m)	Método	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)	Diferença Volume
1000	Topo-to-raster	37.626.224	459.732.727	0,2%
1000	Kriging	37.528.552	460.792.734	

2.3 Conclusões e considerações finais

A geração do MDE do Lago Paranoá envolveu o uso de tecnologia de ponta para o levantamento dos dados batimétricos, para o qual foi utilizado um conjunto composto por um barco hidrográfico equipado com sonares de alta resolução e sensores auxiliares para a compensação do movimento e posicionamento em tempo real da embarcação. Por razões de logística e segurança da navegação, o barco com ecobatímetro multifeixe operou em profundidades maiores que 2m, enquanto a faixa próxima da orla foi levantada com barco de menor calado, equipado com ecobatímetro hidrográfico de alta frequência, garantindo a cobertura total da área submersa, mesmo que com menor resolução.

O conjunto permitiu a aquisição de milhões de pontos de sondagem, alcançando a densidade de dados necessária para representar corretamente a complexidade morfológica do assoalho do Lago para uma escala de representação de detalhe (resolução submétrica com escala de até 1:1000m na faixa mais rasa), sem precedentes para este lago. O esforço tecnológico e logístico colocado na aquisição dos dados foi preparado com cuidadoso processo de controle de qualidade, redução e fusão do conjunto de dados batimétricos com os dados topográficos disponibilizados pelo GDF e adquiridos por aerolevanteamento. Após a fusão em um único banco de dados, a geração do MDE foi realizada utilizando método de interpolação geoestatístico, visando otimizar o ajuste do modelo à real morfologia do Lago.

A metodologia de aquisição, processamento e integração dos dados utilizada neste projeto permitiu a geração de um MDE de resolução 5x5m, adequado para objeto deste estudo. Todavia, a densidade de dados levantados permite que, se

necessário para análise com maior detalhamento, possam ser gerados modelos com melhor resolução espacial, alcançando resolução submétrica.

O MDE do Lago Paranoá gerado é um resultado relevante em vários aspectos, pois, além de servir como base para a modelagem hidrológica e o balanço hídrico (Capítulo V), representa também um marco para comparação da evolução do processo de assoreamento do lago que será discutido no capítulo III.

Deste modo, podemos considerar que os resultados e conclusões apresentados atenderam aos objetivos e resultados esperados, proposto no plano de trabalho do convênio firmado entre a ADASA e UnB, no qual podemos destacar que este é o primeiro modelo topobatimétrico disponível capaz de abranger a área e volume útil do lago entre as cotas de 999,5 e 1000,8m, permitindo determinar o volume disponível para cada cota.

Como perspectivas para aprimoramento do conhecimentos sobre as áreas assoreadas é recomendado levantamentos geofísicos do tipo sonografia com o objetivo de verificação e comprovação as características texturais das camadas existentes no pacote de sedimentos depositados no assoalho do Lago.

CAPITULO III

3. ASSOREAMENTO E ESTRATIGRAFIA DOS SEDIMENTARES

Henrique Roig

Elton Souza Oliveira

Marco Ianniruberto

Jérémie Garnier

3.1 Introdução

Um dos principais problemas que chamam a atenção da população e dos órgãos governamentais com relação ao Lago Paranoá é o evidente assoreamento, principalmente dos braços, que vem acontecendo ao longo do tempo, mas que intensificou de maneira significativa recentemente. Todos os anos, especialmente nos períodos de fortes chuvas, este assunto vem à tona, sem que os órgão gestores possam dar uma explicação objetiva, fundamentada em fatos científicos e quantitativos, devido à falta de dados.

Neste contexto, após a construção da nova carta topo-batimétrica do Lago (Capítulo II), foi possível determinar a geometria das camadas sedimentares das áreas assoreadas a partir dos dados históricos adquiridos durante o desenvolvimento da tese de doutorado de Elton Souza Oliveira (2020). Parte deste acervo histórico está arquivado na DHN, ainda no formato original de mapas de campo (folhas de bordo), que tiveram que passar por uma série de procedimentos de digitalização, retificação e redução, para poderem ser utilizadas neste estudo e gerar o MDT referido a época da formação do Lago Paranoá. O processo de aquisição e geração do MDT está detalhadamente descrito na tese de doutorado (Oliveira, 2020) e será reproduzido de forma objetiva no item 3.2 - Etapas e Métodos deste capítulo. Também fizeram parte da pesquisa de doutorado o estudo estratigráfico, que se iniciou na fase de construção da proposta deste convênio e foi complementado com novos levantamentos no decorrer dos trabalhos (ADASA/UnB).

Considerando o exposto, este capítulo apresenta os resultados referentes a evolução do assoreamento, tendo como base as cartas batimétricas anteriores (1960 e 2009) e o novo modelo topobatimétrico de 2018 (Capítulo II). Também é apresentada a estratigrafia dos sedimentos dos quatro principais braços do Lago Paranoá, com destaque para os **Braços do Bananal e Riacho Fundo**, que sofrem mais intensamente do processo de assoreamento em comparação com os outros dois braços.

Destaca-se que após a entrega do 1º Relatório parcial e durante a 1ª reunião de apresentação e discussão dos dados topo-batimétricos com equipe de coordenação técnica da ADASA, realizada em 03 de agosto de 2018, ficou acordado

que seriam utilizados como referência somente os dados de 2009 em função da baixa qualidade e densidade dos dados anteriores (1958,1960 e 1979). Entretanto, no decorrer do trabalho realizado por Oliveira (2020), foi possível reprocessar com êxito a geometria/georreferenciamento dos dados de 1960, que passaram a constituir a referência inicial para as análises do assoreamento do Lago. Com relação aos dados batimétricos de 2009, adquiridos no âmbito de projeto de pesquisa fomentado pela FAP-DF e detalhadamente descritos no relativo relatório técnico, é necessário especificar que o levantamento envolveu exclusivamente a parte submersa do Lago, sem integração com a topografia da parte emersa, comportando subestimativa tanto do volume quanto da área do reservatório.

Por último, os resultados aqui apresentados estão em conformidade com as metas descritas no 2º Termo Aditivo (item 3.2.1 do plano de trabalho) e os objetivos 2 e 3 do no plano de trabalho inicial.

3.2 Etapas e Métodos

Considerando que este capítulo trata de dois pontos distintos, embora complementares, as etapas e métodos serão descritas separadamente para cada objetivo específico. Na 1ª parte serão tratados os métodos e resultados do reprocessamento da série histórica de dados batimétricos (1960 e 2009) e a determinação das áreas assoreadas; e na 2ª parte serão apresentadas as etapas realizadas para determinação da estratigrafia dos pacotes sedimentares.

3.2.1 Bases batimétricas anteriores (1960 - 2009)

Com vistas a alcançar o objetivo desta etapa de trabalho, ou seja, a determinação da situação do lago até 2009, fez-se necessário a construção da base de dados batimétricos do período 1960 a 2009. Para tanto, foram realizadas as seguintes etapas de trabalho:

1. **Entrada de dados** - Obtenção, fotocópia digital e georreferenciamento (em DATUM original) dos documentos batimétricos de 1960;

2. **Reprojeção** dos mapas batimétricos para o sistema oficial do Brasil – SIRGAS 2000 com a projeção UTM zona 23;
3. **Vetorização** dos mapas batimétricos de 1960;
4. **Incorporação** dos dados batimétricos levantados pelo IG/UnB no ano de 2009;
5. **Geração** do Modelo Digital do Terreno do lago para os anos de 1960, 1988 e 2009; e
6. **Comparação** das Cotas x Áreas x Volumes para as datas de 1960, 2009, e 2018 e determinação das áreas assoreadas.

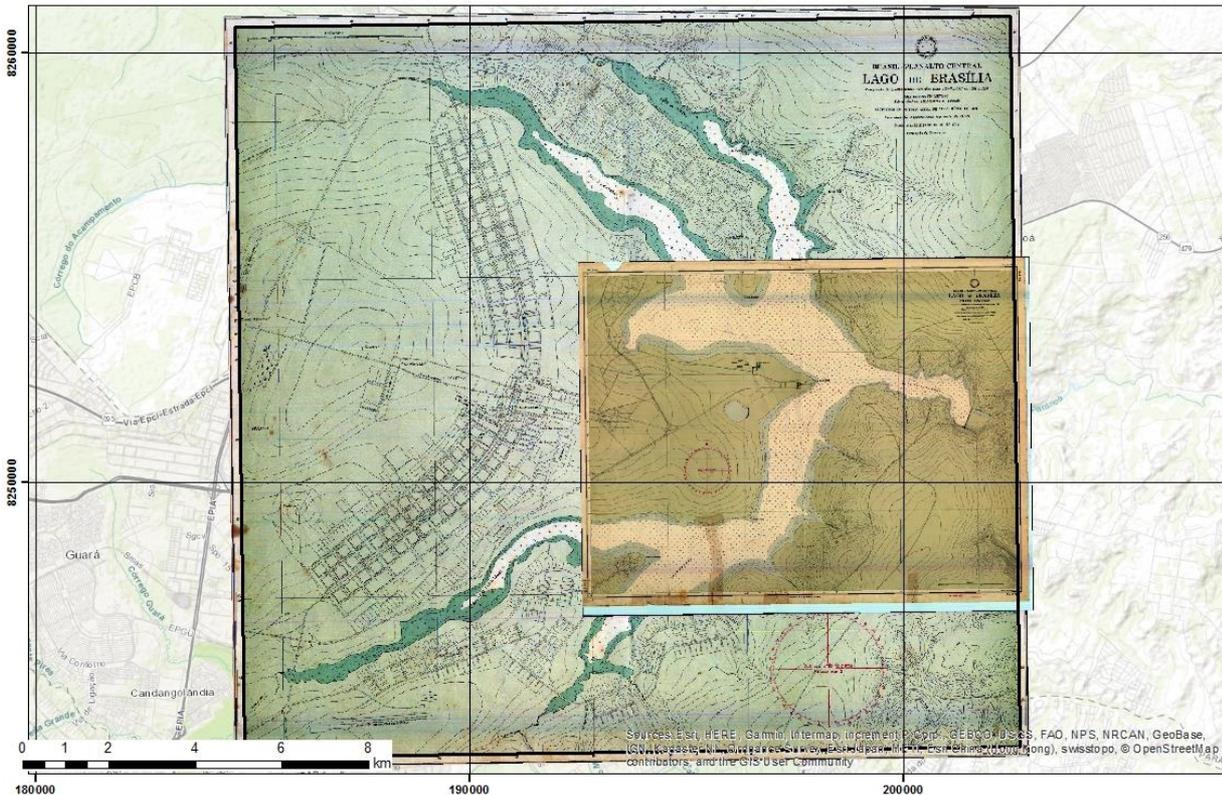
3.2.1.1 Entrada de Dados

A **Batimetria de 1960** refere-se ao primeiro levantamento realizado no lago, logo após o seu enchimento, representando assim, as condições iniciais do reservatório. Foi possível obter as cartas batimétricas confeccionada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha (DHN) nas escalas de 1:10.000 (parte central do lago) e 1:25.000 (todo o lago - Fig 3.1). Os originais, carta de bordo, em poliéster (não deformado), estão arquivados na mapoteca da DHN. O processo de fotocópia digital foi realizado na própria DHN utilizando um scanner cartográfico formato A0 com resolução de 500dpi.

Batimetrias de 2009 – Estes dados foram levantados pelo projeto de pesquisa do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília financiado pela FAP-DF intitulado “Caracterização Morfológica e Estratigráfica do Lago Paranoá” (Pires, 2010). Nesse projeto, a grande maioria da superfície do Lago foi levantada com o Ecobatímetro Multifeixe ResonSeabat 8101 integrado a um sistema de posicionamento por satélite DGPS com precisão estimada de cerca de 5 cm. O levantamento foi feito com uso de sensores auxiliares: sensor de movimento e sonda de velocidade do som, o que permitiu compensar as oscilações do barco e as variações de velocidade de propagação do som na água, respectivamente, para garantir a elevada precisão do sistema de medição. Deve-se ressaltar que os levantamentos ficaram restritos a profundidade da coluna de água igual ou superior a 2m. As áreas com profundidades menores foram levantadas com o ecobatímetro Odom Echotrak CVM. Este é o levantamento batimétrico de maior (melhor) escala de todos os dados levantados por este estudo, devido a tecnologia utilizada no

mapeamento. Porém, este levantamento não contou com uma navegação em áreas muito rasas (coluna de água inferior a 1m), devido às limitações de navegação apresentada pela embarcação utilizada, nem com a integração de dados topográficos da orla.

Figura 3.1 – Ilustração das Cartas batimétricas de 1960, confeccionadas pela DHN cobrindo integralmente o Lago Paranoá na escala de 1:25.000 e da parte central 1:10.000.



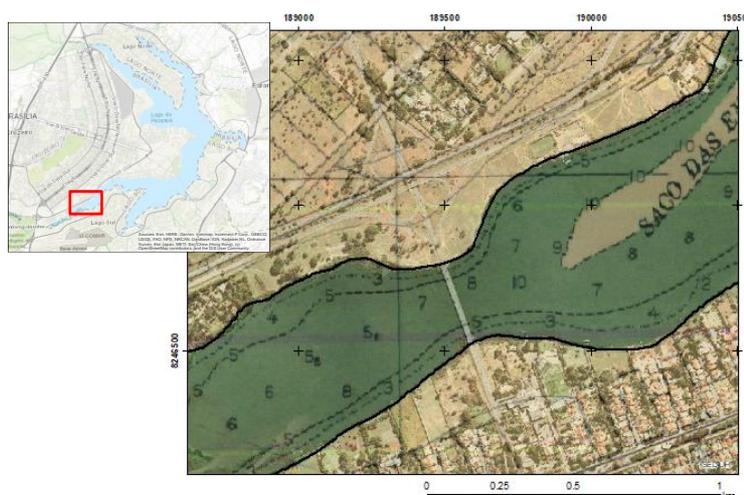
Fonte: produzido pelos autores

Com a finalidade de complementar a base de dados até a cota máxima do reservatório (1000.80m) para o ano de 2009, foram incorporadas as curvas de nível e pontos cotados até a altitude de 1005m. Estes dados foram adquiridos pela TERRACAP no mesmo ano do levantamento batimétrico, utilizando-se de processamento aerofotogramétrico digital, e foram entregues na forma vetorial, curvas de nível e pontos cotados, enquanto o relativo modelo de terreno não foi disponibilizado. Deve-se destacar que os levantamentos topográficos de 2009 não tem a mesma qualidade dos levantamentos a laser realizados em 2018.

3.2.1.2 Georreferenciamento

A carta batimétrica de 1960 foi georreferenciada utilizando-se o software ArcGis 10.3. Para este processo foram utilizadas os pares de coordenados originais com o uso de um total de 25 pontos de controle. O polinômio de transformação utilizado foi o de 1ª ordem (Affine) e para a interpolação o método bi cúbico. Após o 1º georreferenciamento, o mapa foi projetado para o sistema do DF, SICAD (Sistema Cartográfico do Distrito Federal), utilizando pontos de controle e os marcos disponíveis no local e finalmente reprojutados para SIRGAS 2000. Destaca-se que o mapeamento original, à época, foi elaborado sobre um conjunto de marcos topográficos local e diferentes dos existentes na rede estabelecida pelo SICAD. Não foi possível realizar as transformações de projeção devido a distorções inerentes aos dados, por isso foram usados pontos de controle de referência para os ajustes. Buscando solucionar este problema, pontos de controle nas fotos áreas ortoretificadas de 1964 foram utilizados para a área circunvizinha ao lago com vistas a minimizar os erros. Como a posição (coordenadas) de alguns dos pontos de controle é imprecisa, não foi possível determinar a precisão do georreferenciamento, embora os erros residuais dos polinômios de transformações tenham sido inferiores ao PEC da carta padrão B do IBGE. Destaca-se que a carta batimétrica tem um bom ajuste quando sobreposto à ortofoto digital de 2009, que foi a base para o levantamento (Fig. 3.2).

Figura 3.2 – Ilustração da sobreposição da Carta batimétricas de 1960 sobre as ortofotos de 2009 na escala de 1:10.000 da região da Ponte das Garças ASA SUL – Lago Sul.



Fonte: produzido pelos autores

3.2.1.3 Vetorização e Geração do Modelo Digital de Terreno (batimétrico)

A carta batimétrica de 1960 foi vetorizada utilizando-se a ferramenta ArcScan do software ArcGis que permite um processo automático para as feições do tipo linha/arcos (curvas de nível) e manual para os pontos cotados ou batimétricos. Os avanços computacionais e o aprimoramento de técnicas de interpolação fornecem hoje uma vasta gama de algoritmos capazes de gerar superfícies contínuas a partir de dados discretos (pontos e linhas). De modo simplificado, podemos dizer que os interpoladores são divididos em duas categorias: os determinísticos e os estocásticos. Os determinísticos consideram apenas a semelhanças espaciais das amostras circunvizinhas, através de funções matemáticas e não são capazes de analisar as variabilidades espaciais (anisotropia do fenômeno). Por outro lado, os interpoladores estocásticos fazem uso da teoria da probabilidade, e incorporam critérios estatísticos na determinação do peso atribuídos às amostras no processo de cálculo da superfície, podendo incorporar a anisotropia do sistema na análise. Entre os métodos mais utilizados para a geração de superfícies topográficas estão a Krigagem e o algoritmo de ANUDEM (Hutchinson, 1989¹²). Neste trabalho utilizou-se o algoritmo de ANUDEM implementado no ArcGis por meio da ferramenta “*topo to raster*”. O êxito deste método está em permitir o uso de outros dados vetoriais além dos pontos das amostras. Neste processo podem ser incorporados curvas de nível, rede de drenagem, limites (bordas) e outros elementos que auxiliam na determinação da topografia.

3.2.1.4 Cálculo da Cota x Área x Volume batimétrico.

Existem vários métodos para o cálculo do volume de água armazenado no reservatório. Entre eles destacam-se o método da regra do paralelepípedo e de Simpson (Vanoni, 1977; Semmelman, 1981; Carvalho 2000). Outras fórmulas podem ser encontradas em Morris e Fan (1997). Entretanto, com o advento do computador, estes cálculos ficaram mais fáceis e podem ser gerados a partir dos modelos digitais

¹ Hutchinson, M.F. 1989. A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. Journal of Hydrology 106: 211-232.

² <http://fennerschool.anu.edu.au/research/products/anudem-vrsn-53>

de terreno (MDT). Neste trabalho, utilizou-se a ferramenta “*Surface Volume*” disponível na extensão *3D Analyst* do ArcGis (10.3) para a confecção da tabela cota x área x volume.

O Cálculo das áreas assoreadas foram realizados por meio da subtração direta dos valores altímetros dos modelos digitais topo batimétricos, exemplo: batimetria de 2018 – batimetria de 1960. Devemos ressaltar que, variações da espessura dos pacotes sedimentares podem estar associadas à qualidade dos dados de entrada, ou seja, da qualidade cartográfica dos levantamentos batimétricos realizados. Deste modo, o valor absoluto deve ser utilizado com cautela.

3.2.2 Estratigrafia e sedimentologia dos Braços do Lago Paranoá

Para a determinação da estratigrafia e sedimentologia das áreas assoreadas, faz-se necessário o levantamento dos “Perfis Estratigráficos” e sua comparação com os resultados da evolução das áreas assoreadas. Neste contexto, os perfis tiveram como objetivo a caracterização física dos materiais inconsolidados (textura, estruturas e espessura) e se possível identificar os limites entre os depósitos antropogênicos e os solos e/ou alúvios naturais existentes no fundo do lago.

Para alguns destes perfis foram realizadas análises químicas com vistas à determinação das fontes e da periculosidade em função do desassoreamento. Estes dados serão tratados no capítulo IV – Geoquímica

Deve-se destacar que o estudo estratigráfico do lago já estava em andamento em virtude de trabalhos prévios (ex. Ress, 2015 e Araujo, 2012) e pelo desenvolvimento da tese de doutorado de Oliveira (2020). A pesquisa de Oliveira já contava com 7 perfis estratigráficos distribuídos entre os dois principais braços assoreados, o Bananal e o Riacho Fundo. A seguir iremos descrever os procedimentos realizados para aquisição de mais 4 perfis estratigráficos, sendo 1 em cada braço do Lago.

3.2.2.1 Trabalho de campo – levantamento dos perfis

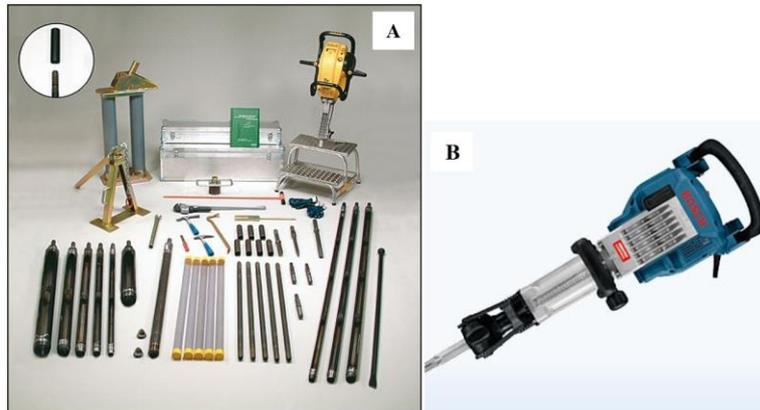
Os testemunhos foram coletados em pontos estratégicos determinados sob os mapas batimétricos e utilizando a série de fotografias aéreas e imagens de satélite históricas existente sobre a região (1964, 1975, 1985, 1997, 2009 e 2018), todas disponibilizadas pela SEGETH e TERRACAP, bem como os perfis já coletados por outros estudos.

Para a coleta dos testemunhos foi utilizado um perfilador do tipo **Core sampler** da empresa Eijkelkamp com camisa de acrílico e martelo pneumático profissional (GSH 16-28) de 45 J (Joules) de potência (Fig. 3.3), com objetivo de minimizar a compactação do material. Neste caso, a amostragem foi realizada com intervalos de 1m (Fig. 3.4 A) onde estes são preservados em um tubo de PVC de 50mm (Fig. 3.4 C) e utilizam uma garra para não permitir que o sedimento saia (Fig. 3.4 B e D).

Nos pontos onde o material era menos coeso ou a amostragem foi feita sobre uma coluna d'água superior a 50cm, os testemunhos foram realizados sem o auxílio do martelo hidráulico. Neste caso, foram utilizados tubos maiores (de 2 a 5m de comprimento) os quais foram vedados, após a perfuração, para evitar o escape do material pela base durante a remoção deste do leito do lago, uma vez que, neste caso não havia como prender a "aranha" como acontece no sistema **Core sampler** (Fig. 3.4 B e C). Ainda com o tubo no local da amostragem, mediu-se a espessura da lâmina d'água para posterior cálculo da espessura da coluna de sedimentos.

Os campos para coleta ocorreram entre os anos de 2017 e 2019 preferencialmente durante o período de estiagem (julho – setembro), no qual o nível do lago estava mais baixo nos principais tributários do Lago Paranoá (Fig. 3.5).

Figura 3.3: Equipamento utilizado para amostragem dos testemunhos (Fotos ilustrativas fornecida pelo fabricante. (A) Peças do **Core sampler** da empresa Eijkelkamp. (B) matelete da Bosh usado nos trabalhos de campo



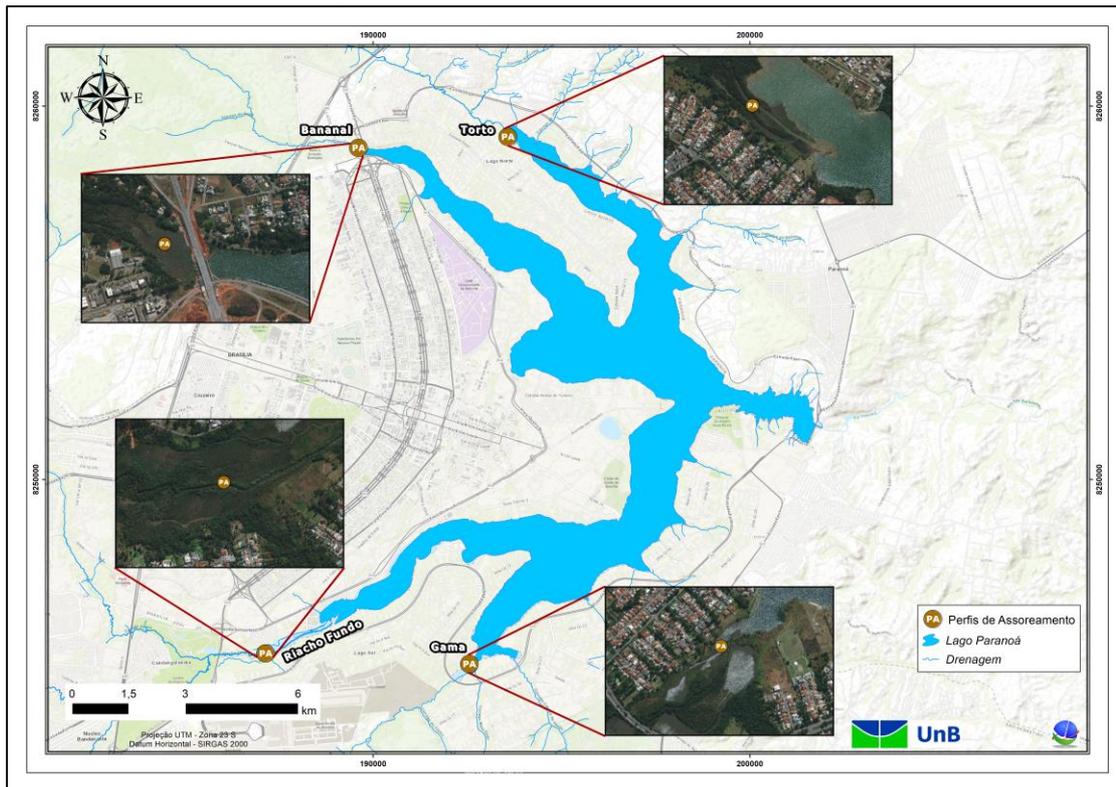
Fonte: manual do equipamento (Eijkelkamp, 2010)

Figura 3.4: Sistema de amostragem (**Core sampler**) dos perfis sedimentológico. (A) Sistema preparado para coleta montado com tubos de 1m e Martelo Hidráulico; (B) Encaixe da “aranha” na boca do tubo para evitar a perda de amostra; (C) detalhe da boca do tubo; e (D) tubo de PVC interno do sistema de amostragem com 50mm de diâmetro.



Fonte: Oliveira (2020).

Figura 3.5: Localização dos pontos de coletas dos perfis estratigraficos. (A) Braço do Bananal; (B) Torto. (C) Gama; e (D) Braço do Riacho Fundo



Fonte: produzido pelos autores.

3.2.2.2 Processamento das amostras

Após a coleta dos testemunhos esses foram acondicionados na vertical imediatamente após a chegada do campo e permaneceram em descanso por até 1 semana a depender da quantidade de água nos sedimentos.

Deste modo, após a secagem o processamento dos testemunhos consistiu no corte dos cilindros de acrílico, descrição das camadas (inspeção visual), composição e determinação das espessuras dos pacotes e preparação das amostras para as análises geocronológica (^{210}Pb) e geoquímica (capítulo IV).

Os perfis foram colocados na horizontal e cortados longitudinalmente com a utilização de uma serra elétrica portátil, apoiada em um sistema construído artesanalmente pela equipe do projeto (Fig. 3.6). Destaca-se que o sistema foi construído para que a serra, à medida do possível, não entrasse em contato com os sedimentos. Assim, algumas vezes a separação das partes teve que ser auxiliada com uma serra manual. Após o corte do tubo, os sedimentos foram cortados com o auxílio

de um fio de nylon que atravessa longitudinalmente o perfil ao longo do tubo cortado. Deste modo, temos duas seções do perfil (Figura 3.6 C e D). Uma foi guarda para estudos futuros e a outra utilizada para este estudo.

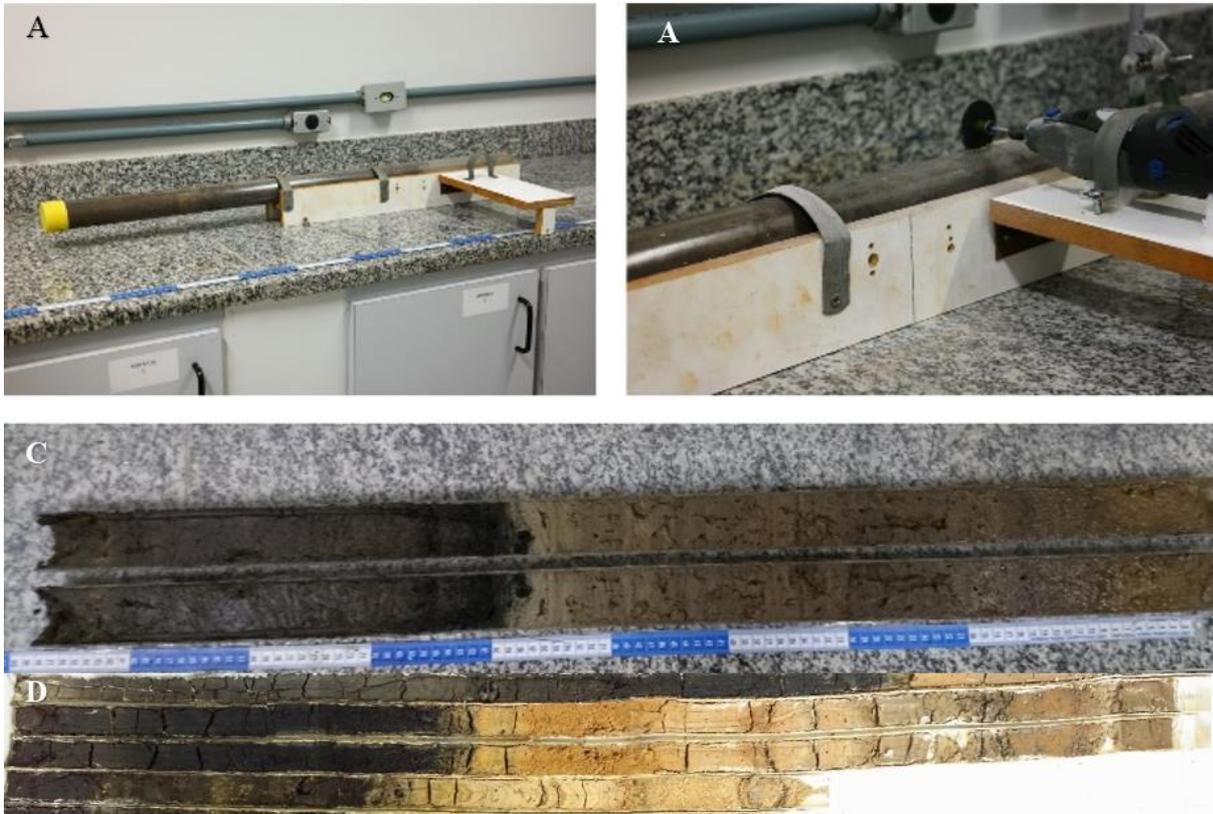
Após o corte dos tubos, foi feita uma descrição sedimentológica, levando em conta aspectos texturais, estruturais e mineralógicos. A descrição foi feita centímetro a centímetro com auxílio de lupa, canivete e escala granulométrica. Com estes dados foi confeccionada a coluna estratigráfica de cada furo em escala de 1:20. Os dados foram organizados e armazenados em planilha para posterior incorporação ao Banco de dados geográfico.

Para a determinação da taxa de assoreamento, fez-se necessário calcular a densidade dos sedimentos. Para isso, posteriormente à abertura dos perfis, foram selecionados horizontes representativos onde amostras foram selecionadas e postas para secar em estufa a temperatura de 110°C por cerca de 2 horas. Com as amostras secas, foi feito o cálculo para estimar a densidade com base na fração granulométrica ao longo do perfil, sendo elas: argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e grânulo.

3.2.2.3 Geocronologia - ^{210}Pb

As taxas de sedimentação de sedimentos recentes (menos de 100 anos) podem ser avaliadas pela datação dos sedimentos com isótopos de chumbo (^{210}Pb). A datação por chumbo 210 é um método radioativo baseado na radioatividade do isótopo de ^{210}Pb , cuja meia-vida é de aproximadamente 20 anos. Essa metodologia, ou abordagem, assume que o ^{210}Pb incorporado no sedimento, trazido pelas águas superficiais, é constante ao longo do tempo. Desta forma é possível medir a taxa de sedimentação pelo decaimento do radioativo do ^{210}Pb nos sedimentos, possibilitando estimar as taxas anuais de sedimentação. Os teores de ^{210}Pb foram determinadas por meio de espectrometria gama realizada no Laboratório do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (USP). A análise foi determinada utilizando o detector hiper-puro coaxial da série GEM, modelo, EG&G ORTEC (25190P), com resolução de 1,9 keV no ^{60}Co de 1332,5 keV. As taxas foram analisadas com base nos níveis de atividades do Pb_{210} ($T_{1/2} = 22,26$ anos).

Figura 3.6. Sistema construído para o corte dos testemunhos. (A) - Perfil de 1 m no suporte para corte; (B) Serra elétrica portátil (Makita) posicionada para a realização do corte; (C) Perfil de 1m exposto após o corte. (DE) Perfil de 2m exposto após o corte.



Fonte: produzido pelos autores.

3.3 Resultados

A compilação dos dados batimétricos e dos perfis estratigráficos serão apresentados a seguir em duas partes. A primeira parte irá tratar da variabilidade da cota-área-volume de todo o lago, de modo a estimar a perda de capacidade de armazenamento do reservatório/lago. Em seguida, iremos abordar as principais áreas assoreadas dos quatro braços em função da análise integrada dos dados batimétricos e estratigráficos com destaque para o Braço do Riacho Fundo o qual sofreu a maior perda tanto em volume como em área.

3.3.1 Bases batimétricas e o assoreamento do Lago - 1960 / 2018

Os Modelos Topo batimétricos para os anos de 1960 e 2009 são apresentados nas fig. 3.7 e 3.8 respectivamente, e o modelo para o ano de 2017/18 foi apresentado no capítulo II, fig. 2.10 e 2.11. Ressalta-se que os modelos não cobrem toda a faixa operacional do Lago Paranoá, estando limitados à cota 1000m, com exceção do levantamento de 2018, que cobre toda a faixa operacional do reservatório, ou seja, até 1000,8m.

Integrando os modelos disponíveis (1960 – 2009 – 2018), foi possível analisar a evolução da perda de armazenamento (volumétrica – tabela 3.1 e Fig. 3.9) ou seja, o assoreamento, bem como a perda da área superficial do Lago, tendo como referência a batimetria de 1960 (tabela 3.2 e Fig. 3.10). Vale ressaltar que, para a geração do modelo batimétrico para o ano de 2009, foi utilizado o limite do lago (cota 1000m) extraído do levantamento topográfico na escala 1:10.000 contratado pela TERRACAP (2009), o qual é compatível com a resolução do levantamento batimétrico de 2009.

Considerando os dados analisados, constatou-se uma perda total do volume do Lago Paranoá em torno de 4,4 % em 2009 e 6,4 % em 2018 (Tabela 3.1). Estes dados apontam para uma taxa média de perda de 0,0084 km³/ano para os 58 anos de vida do Lago e 0,00044 e 0,05 km³/ano para os dois períodos analisados (1960-2009 e 2009-2018). Isso implica em um aumento da taxa de assoreamento na última década quando comparado este valores como a média para o todo o período.

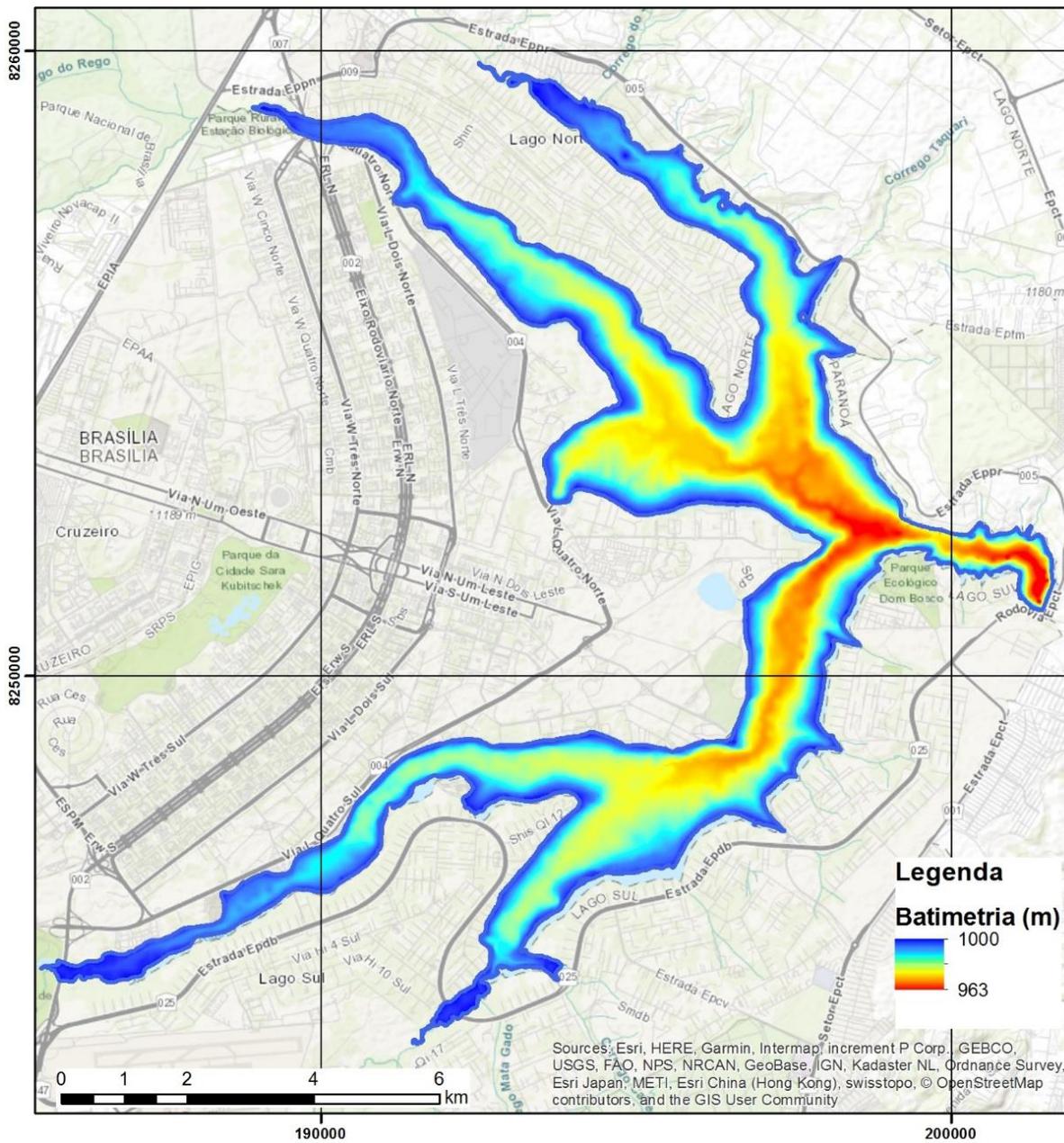
Integrando os dados de perda de volume com a densidade média dos sedimentos, obtida nas análises dos perfis estratigráficos levantados neste projeto, chegamos a um total de 28.127.218 toneladas de sedimentos depositado no lago, o que dá uma taxa de assoreamento de 484.952 t/ano.

Tabela 3.1 – Evolução do volume e da superfície alagada na cota 1000 do Lago Paranoá para as datas de 1960, 2009 e 2018.

ANO	COTA (m)	VOLUME (hm ³)	PERDA VOLUMÉTRICA (Base-1960)	PERÍODO	ANOS	TAXA DE PERDA (km ³ /ano)
1960	1000	492,3	-	1960 - 2009	49	0,00044
2009	1000	470,6	4,4	2009 - 2018	9	0,05224
2018	1000	460,8	6,4	1960 - 2018	58	0,00848

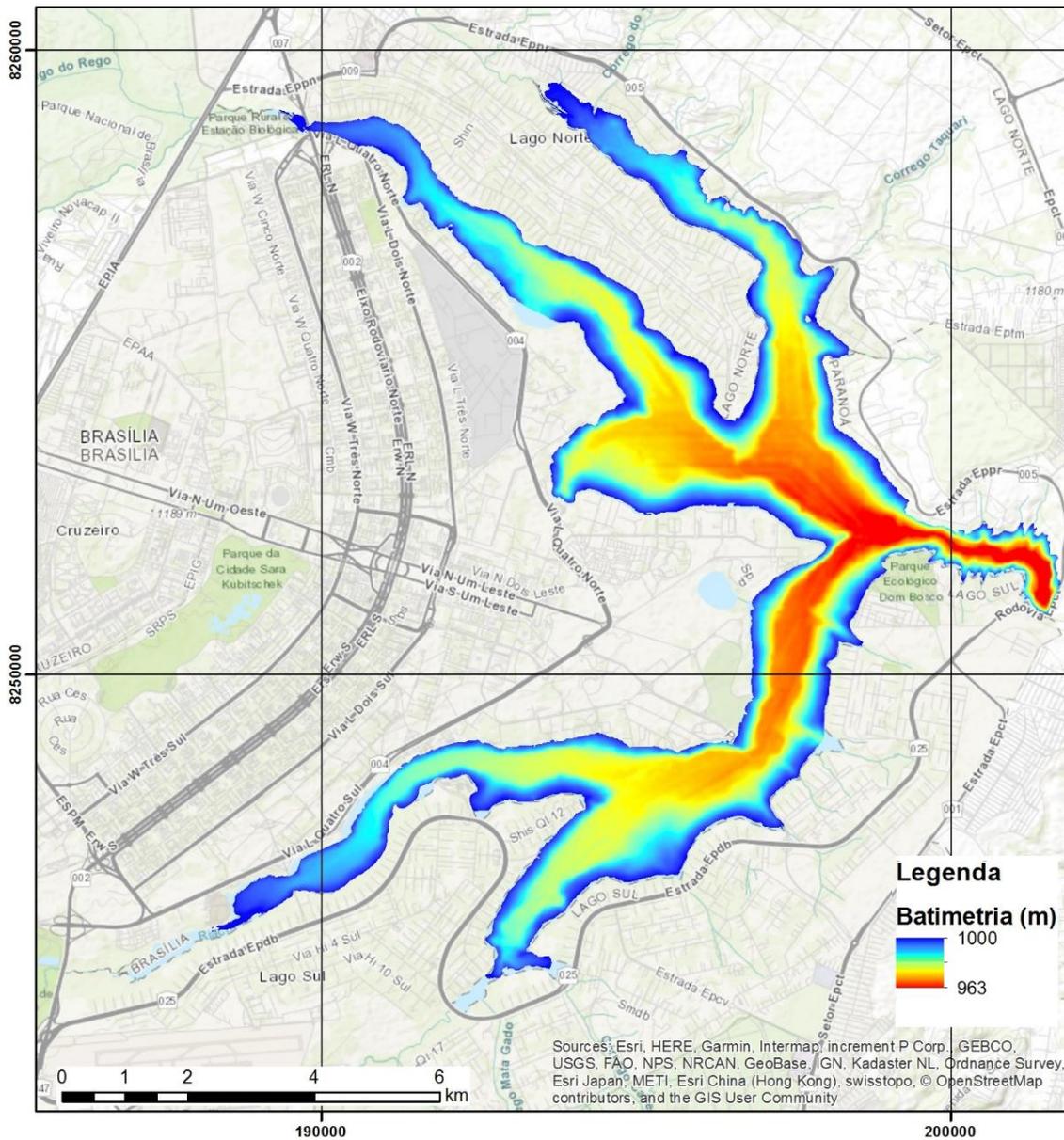
Fonte: produzido pelos autores.

Figura 3.7 – Modelo digital batimétrico do ano de 1960



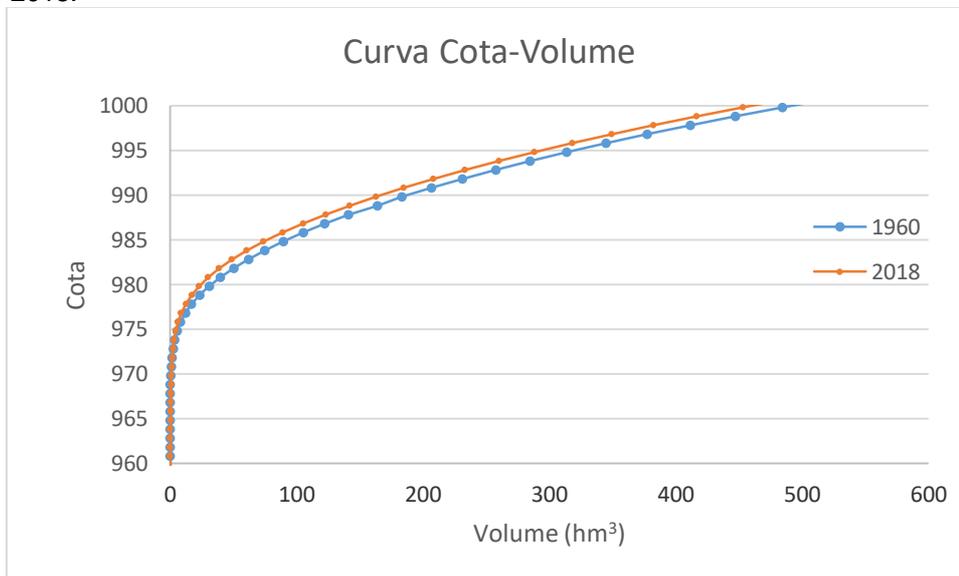
Fonte: produzido pelos autores a partir das cartas náuticas da DHN.

Figura 3.8 – Modelo digital batimétrico do ano de 2009



Fonte: produzido pelos autores.

Figura 3.9 - Curva Cota-Volume (CAV) do Lago Paranoá extraída dos modelos digital topobatimétricos de 1960 e 2018.



Fonte: produzido pelos autores.

Já o espelho d'água do Lago teve uma perda em torno de 1,8% e 2,3% para 2009 e 2018, respectivamente (Fig.3.11, tabela 3.1). Isso indica uma taxa média de 1,4 e 2,6 ha/ano para os períodos analisados e uma média histórica de 1,6 ha/ano.

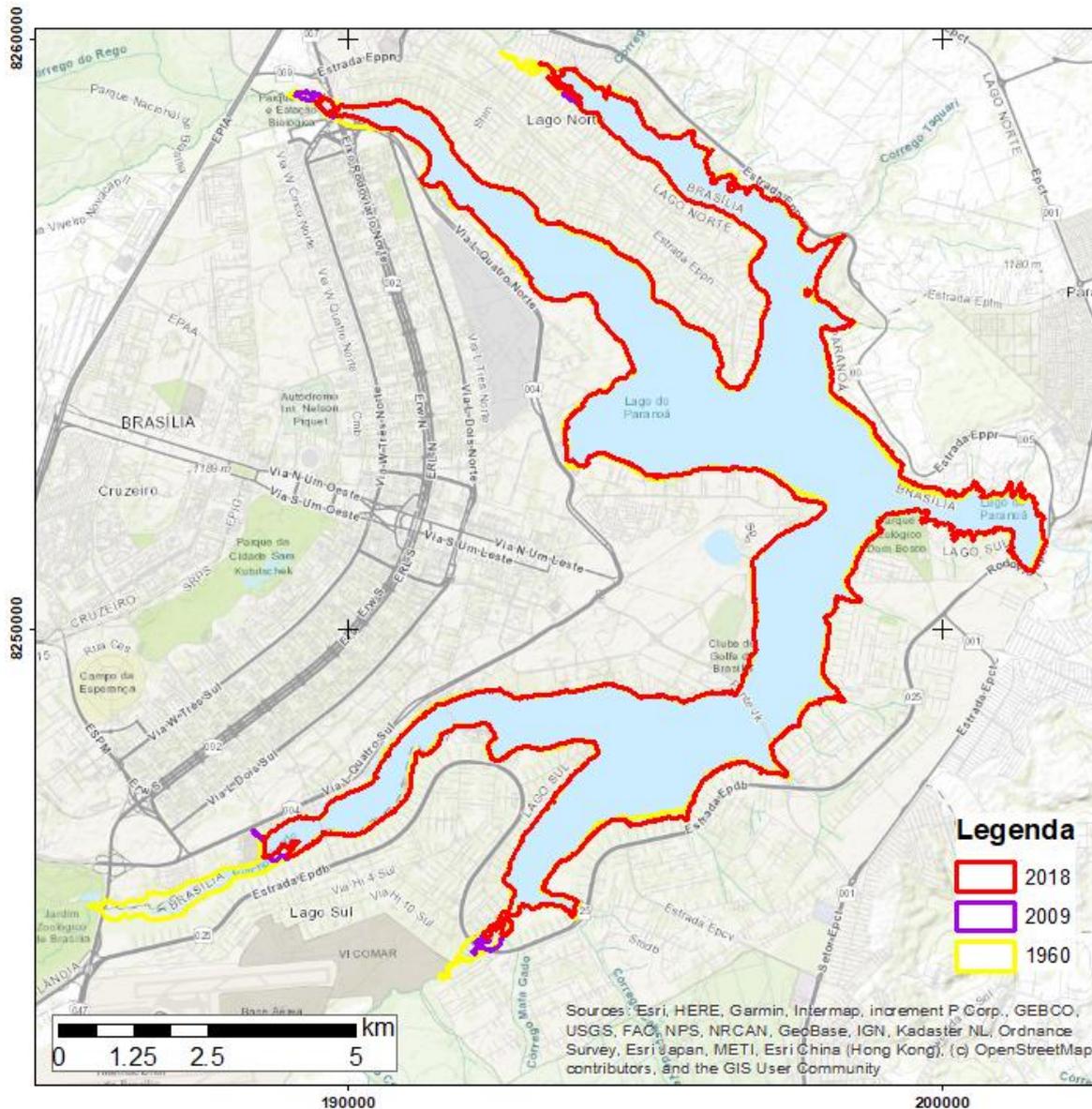
Tabela 3.2 – Evolução do volume e da superfície alagada na cota 1000 do Lago Paranoá para as datas de 1960, 2009 e 2018.

ANO	COTA (m)	ÁREA (ha)	PERDA EM ÁREA (%) (Base-1960)	Período	Anos	Taxa de perda (ha/ano)
1960	1000	3904,9	-	1960 - 2009	49	1,40
2009	1000	3836,2	1,8	2009 - 2018	9	2,56
2018	1000	3813,2	2,3	1960 - 2018	58	1,58

Fonte: produzido pelos autores.

O Braço do Torto foi o que teve a menor perda para ambos os períodos. Por outro lado, o Braço do Riacho Fundo teve a maior perda. Estas análises serão aprofundadas no próximo tópico.

Figura 3.10 – Evolução da perda em área da superfície alagada na cota 1000 do Lago Paranoá para as datas de 1960, 2009 e 2018.



Fonte: produzido pelos autores.

O assoreamento do lago não ocorreu de modo uniforme ao longo de toda a sua margem, principalmente devido ao processo de urbanização com a criação de aterros e muros de contenção. Infelizmente, pela falta de base cartográfica em melhor escala, não foi possível realizar este tipo de análise com maior precisão. Por fim, não podemos deixar de, mais uma vez, destacar que não devemos analisar os valores numéricos em termos absoluto, uma vez que, existem diferenças metodológicas e de precisão nas técnicas utilizadas para os levantamentos, e não houve condições de

avaliar os erros relativos de cada etapa. Mas esses dados podem e devem ser usados para uma análise semiquantitativa com uma boa aproximação, permitindo assim obter uma visão global da evolução do assoreamento do lago.

3.3.2 Assoreamento e Estratigrafia dos principais Braços do Lago Paranoá

Com objetivo de entender o processo de assoreamento, tanto de forma espacial quanto temporal é necessário investigar a natureza dos sedimentos e a propagação dos pacotes sedimentares ao longo dos braços do Lago. Deste modo, como apresentado no item Etapas e Métodos, 4 perfis estratigráficos foram levantados e caracterizados. Acoplado a mais 7 perfis extraídos da literatura (Ress, 2015 e Araujo, 2012), estes dados permitiram a caracterização dos pacotes estratigráficos e sua integração com os dados batimétricos e das fotografias aéreas existente sobre a área. Nesta etapa, pretendia-se usar métodos radiogênicos para a datação dos pacotes sedimentares com o objetivo de ratificar as interpretações estratigráficas. Entretanto, os resultados obtidos com as datações ^{210}Pb não foram conclusivas muito provavelmente devido à resuspensão e redeposição dos sedimentos, o que provoca misturas das camadas. Deste modo, os resultados foram descartados para este estudo.

Considerando o exposto, a seguir apresentaremos os resultados alcançados para cada Braço do Lago, com destaque para o Riacho Fundo e Bananal. Mas, antes de iniciarmos as análises individuais dos braços, devemos destacar que, a implantação de um reservatório, como o Lago Paranoá, provoca mudanças nas condições hidrodinâmica do ambiente. As condições iniciais, anterior ao lago, eram de um ambiente lótico, com planícies de inundação bem desenvolvidas, que passaram para uma ambiente lântico, de águas mais calmas, quase estagnadas (o tempo médio de residência do lago é em torno de 365 dias), com a implantação do reservatório. Esta passagem de um ambiente fluvial para lagunar, causa uma série de mudanças entre elas, a mudança do nível de base, ou seja, modifica as condições de energia (velocidade) do corpo hídrico.

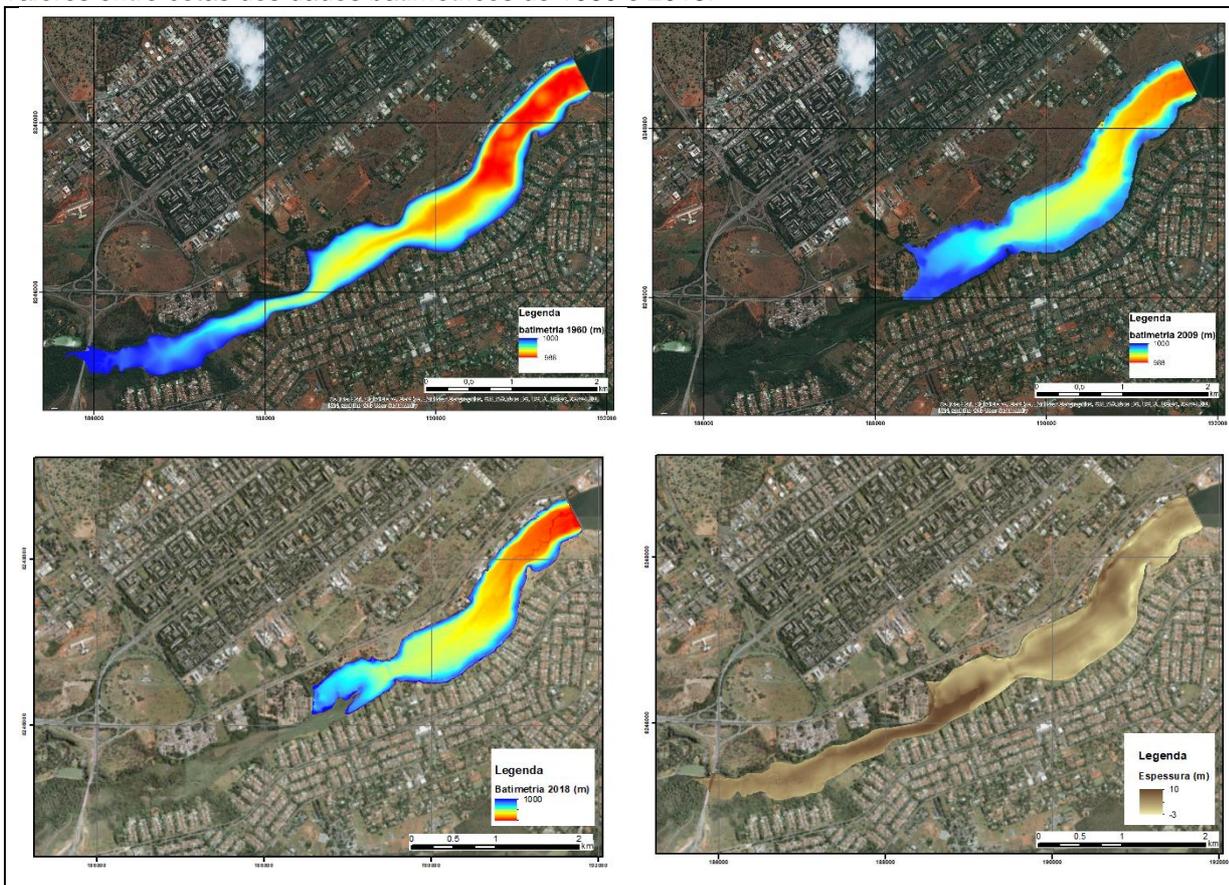
Deste modo, o material que era inicialmente transportado pelo rio Paranoá e seus afluentes, agora encontra uma barreira hidráulica que provoca a sedimentação

desse material sólido na região de transição lóxico/lêntico. Este processo não afeta todo o material transportado da mesma maneira. Os sedimentos arenosos (granulometria maior) irão sedimentar primeiro, logo que atingirem o lago (ambiente lêntico), enquanto que, o material mais fino (silte/argiloso) pode ser transportado para região mais interna do lago. Desta forma, a maioria dos sedimentos arenosos depositam-se nos leques e canais que se formam nos braços, enquanto o material mais fino (argila e silte) vai decantar nas pequenas bacias marginais aos canais ou na parte central do lago. Este comportamento dos sedimentos é um processo “natural” para este tipo de mudança fisionômica da paisagem. Deste modo, podemos considerar que os braços iriam se assorear naturalmente. Porém, como já foi demonstrado por estudo anteriores (Bicalho 2006 e Aquino et al, 2019), este processo de assoreamento é intensificado pelas altas cargas sedimentares transportadas nos córregos do DF durante o período de fortes chuvas, e foi intensificado pelo acelerado processo de urbanização e impermeabilização do solo na Bacia do Paranoá (Meneses *et al.* 2010; Castro 2017 e Castro et al, 2019). De fato, esse processo foi acelerado pelas mudanças do padrão de uso e ocupação do solo que ocorreram no início da implantação da Capital (década de 60 e 70), mas principalmente a partir de meados da década de 90, com a expansão da urbanização para as bacias de contribuição do Lago Paranoá, com destaque para a Bacia do Riacho Fundo como já demonstrado por Menezes et al (2010).

3.3.2.1 Braço do Riacho fundo

Para esta análise, os modelos topo batimétricos foram recortados entre a entrada ao Córrego do Riacho Fundo e a ponte Costa e Silva (Figura 3.11). Esses modelos foram analisados tanto na forma de perfis longitudinais, quanto transversais, conjuntamente com os dois perfis estratigráficos existentes, sendo que o P2 foi coletado neste projeto e o P1 proveniente do estudo de Araujo (2012).

Figura 3.11: Modelo digital do fundo do lago para o braço do Riacho Fundo gerado para 1960 (A), 2009 (B), 2018 (C) e o Mapa da espessura de sedimentos da área assoreada gerado pela diferença de valores entre cotas dos dados batimétricos de 1960 e 2018.



Fonte: produzido pelos autores.

A análise destes dados demonstra uma evolução não uniforme da perda do espelho d'água e conseqüentemente do processo de assoreamento do braço do Riacho Fundo (Fig. 3.12 a 3.15). Para o período entre 1960 e 1975, não é possível verificar exatamente a área assoreada devido à falta de fotos aéreas justamente no limite do lago (Fig. 3.12B).

Entretanto, para a foto de 1964, obtida somente 4 anos após o enchimento do lago, já é possível ver a mancha de sedimento, limitada pela linha pontilhada amarela na fig. 3.13, mesmo com a baixa qualidade da imagem (escala 1:60.000). Nesta figura também são apresentadas as profundidades batimétricas de 1960 e os locais de amostragem dos perfis estratigráficos.

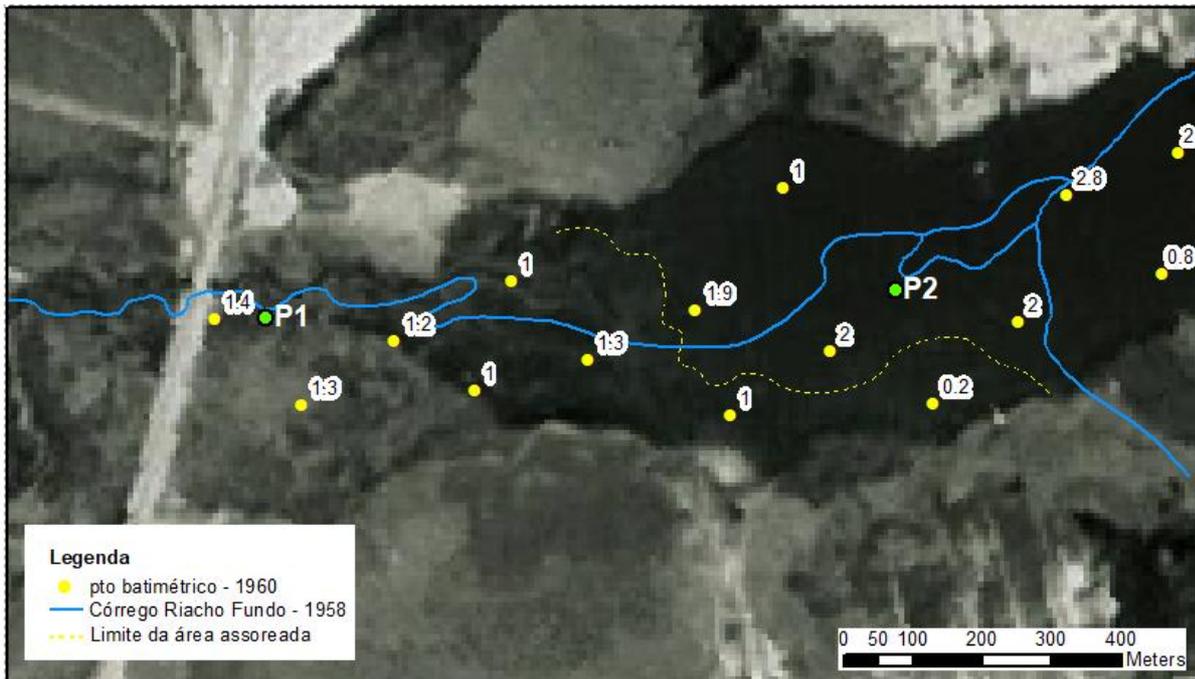
Figura 3.12: Evolução do perda do espelho d'água do Braço do Riacho Fundo para os anos de 1960, 1979, 1988 e 2009.



Fonte: Oliveira (2020)

O Primeiro perfil (P1) localizado aproximadamente a 100m a jusante da ponte do Aeroporto (Fig. 3.13), apresenta dois pacotes sedimentares bem distintos (Anexo 1). O pacote superior, como aproximadamente 1,30 m de espessura apresenta uma intercalação de camadas arenosas e silte-argilosas que se sobrepõe a um pacote homogêneo predominantemente silte-argiloso. Considerando o comportamento dos sedimentos na região de transição do ambiente lótico/lêntico (item 3.2.2), interpretamos estes pacotes da sequência inferior como o resultado da sedimentação na planície de inundação do antigo córrego do Riacho Fundo, i.e. anterior à implantação do lago. Já o pacote superior arenoso é relacionado ao processo de assoreamento do braço associado ao amortecimento dos sedimentos arenosos provenientes da bacia de contribuição.

Figura 3.13 – Foto aérea de 1964 do projeto USAF da região do Braço do Riacho Fundo. Os pontos amarelos representam a profundidade batimétrica de 1960. Os pontos verdes representam a localização dos perfis estratigráficos amostrados e a linha azul o curso do córrego Riacho Fundo antes do enchimento.



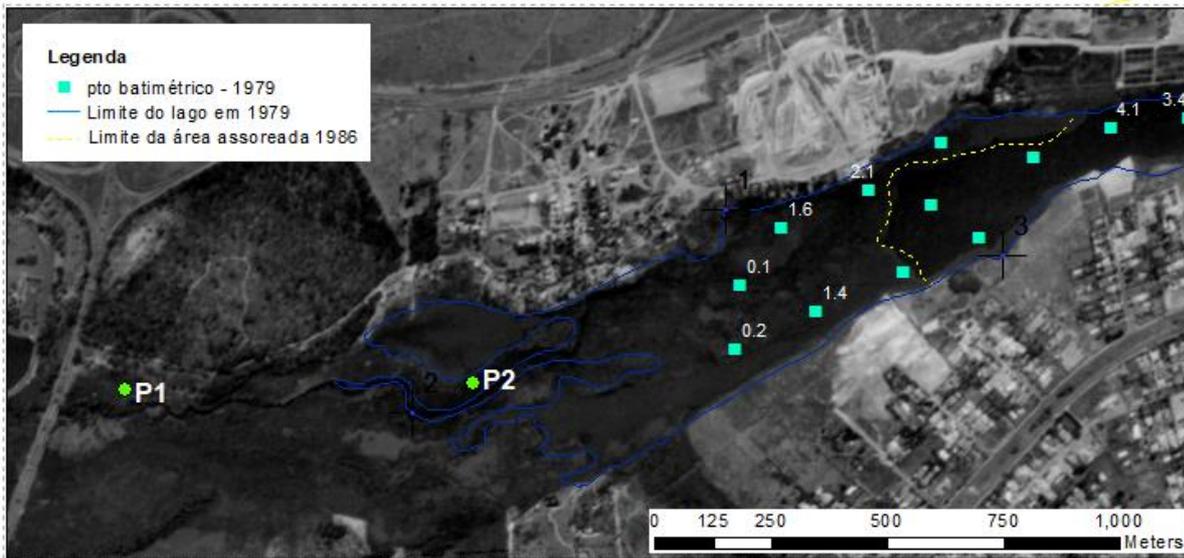
Fonte: Oliveira (2020).

Esta interpretação é sustentada/corroborada pelos dados batimétricos, que demonstraram, que a região em 1960 teria profundidades variando entre 1,4 e 1,2 m, tendo como referência a cota 1000m (DHN, 1960), fig. 3.13.

Continuando neste mesmo raciocínio, as análises extraídas das fotos aéreas de 1986 e dos dados batimétricos, demonstram que na década de 80 o braço já teria perdido mais 1,5km de extensão e apresentaria pacotes sedimentares que poderiam alcançar mais de 2,5 m de espessura a época (Fig. 3.14).

Estes dados batimétricos acoplados, ao perfil estratigráfico (P2) e ao levantamento a laser de 2018 permitem caracterizar e quantificar a evolução do processo de assoreamento que estava evoluindo, na década de 80, para uma planície de inundação, inclusive com o estabelecimento de uma mata exuberante onde antes era o Lago Paranoá (Fig. 3.14).

Figura 3.14 – Foto aérea de 1986 (CODEPLAM) da região do Braço do Riacho Fundo. Os quadrados ciano representam a profundidade batimetria de 1979. Os pontos verdes representam os perfis estratigráficos amostrados e a linha azul o limite do lago em 1979 enquanto que a linha pontilhada amarela o limite a área assoreada exposta em 1986.



Fonte: Oliveira (2020).

A análise do perfil P2 permite identificar, assim como no P1, que na parte mais profunda (abaixo de 4,4m) encontram-se camadas que pertenceriam ao ambiente fluvial natural, anterior à formação do reservatório (lago). Este ambiente é sobreposto por um pacote argiloso, rico em matéria orgânica de aproximadamente 1,1m de espessura, interpretado como a fase alagada devido à formação do lago (ambiente lântico). Estes pacotes são recobertos por uma sequência de intercalações silte-arenosa representando um ambiente mais raso devido à chegada da frente de assoreamento, carreando material de granulometria maior (areia) proveniente da bacia de contribuição. Observa-se o aumento progressivo para o topo das camadas de areia. Este incremento no aporte do material mais arenoso, deve estar atrelado a combinação de chuvas intensas, típicas da região de Brasília no período do verão, com a alta taxa de escoamento superficial e a disponibilidade de material inconsolidado causado pelo estágios iniciais do processo de urbanização. Essa interpretação pode ser comprovada pelo estudo realizado por Aquino *et al.* (2018) que demonstrou que mais de 90% da descarga sólida que passa pela estação fluviométrica Montante Zoológico (Código: 60478200 -15°51'52"S e -47°57'25"W, gerenciada pela CAESB), entre 2016 e 2017, estava associada aos eventos de chuvas intensas.

A partir da década de 90 observa-se a consolidação da área assoreada, com a efetiva implantação de um sistema fluvial, com estabelecimento de um canal principal bordejado por uma ampla planície de inundação (Fig. 3.12 D a E), inclusive com a formação de pequenos lagos remanescente do lago principal e uma expressiva mata ripária (Fig. 3.15). Estas planícies recebem material pela inundação durante as maiores cheias. Este processo tem evoluído rapidamente, e hoje já se encontra em frente da ETE sul a menos de 500 m da ponte das Graças.

Figura 3.15 – Imagem GGeoEye de 2018 (TERRACAP) da região do Braço do Riacho Fundo com o novo sistema fluvial implantado sobre a área assoreada que se expande em direção à ponte das Garças. Toda a região verde onde era o antigo lago é caracterizada por mata ripária com árvores de até 15m de altura.



Fonte: produzido pelos autores.

Considerando o exposto, apesar da diferença de qualidade dos dados originais (grande variação na escala) foi possível compreender o comportamento do processo de assoreamento no braço do Riacho Fundo que ainda continua evoluindo rapidamente em direção à ponte das Garças. A comparação entre a batimetria de 1960 e a de 2018 permite chegar a um cálculo aproximado da área e volume perdidos durante o processo de assoreamento, conforme apresentado na tabela 3.3. Deve-se destacar que, a aparente menor perda em área, quando comparamos à evolução do espelho d'água entre 2009 e 2018 (Fig 3.12D e E) é devido a essa região ser bem mais profunda do que as partes anteriormente assoreadas. A região em frente à ETE

Sul, originalmente tinha profundidades variando de 4 a 6m e hoje não passam de 1,5m. Se analisarmos a perda volumétrica sairemos de uma taxa de 0,6% ao ano para 4%.

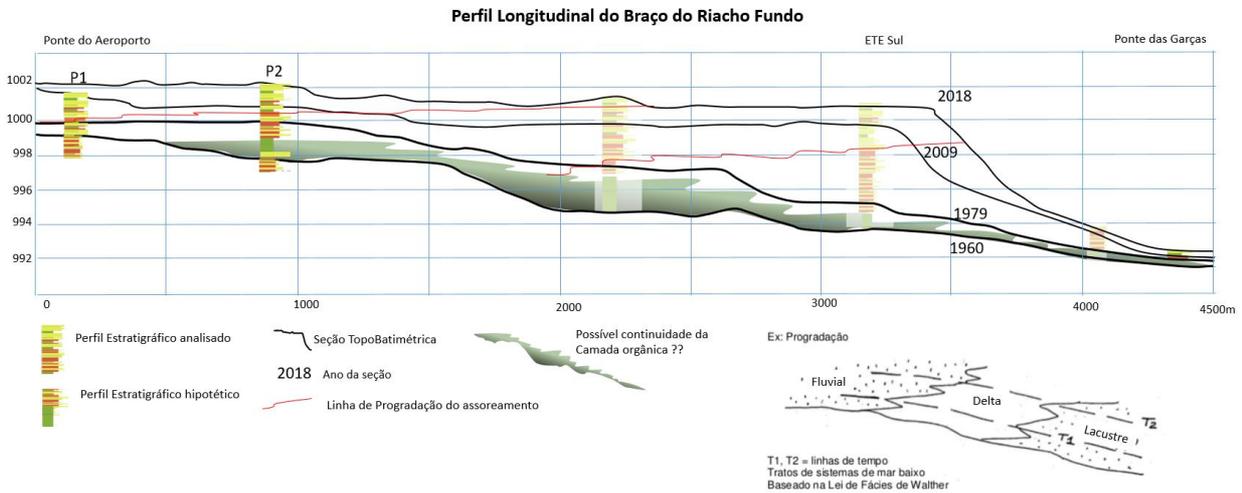
Tabela 3.3 – Cota, área e volume do Braço do Riacho Fundo para as datas de 1960, 2009 e 2018.

Ano	Cota(m)	Área(m ²)	Perda em Área (%)	Volume(m ³)	Perda Volumétrica (%)
			(base - 1960)		(base - 1960)
1960	1000	3.096.593	0	17.554.559	0
2009	1000	2.195.121	29,1	12.190.519	30,6
2018	1000	1.976.121	36,2	11.316.329	35,5

Fonte: produzido pelos autores.

A Figura 3.16 apresenta um perfil transversal esquemático da área assoreada com a proposta de evolução dos pacotes sedimentares. Esse perfil foi construído levando em consideração a variabilidade do fundo do lago para os anos levantados e os perfis estratigráficos como referência. Na interpretação proposta observa-se a propagação dos materiais de granulometria maior (areia), proveniente da bacia de contribuição, leques aluvionares, sobre os sedimentos mais finos do ambiente lântico. Esse perfil também destaca claramente que os sedimentos são depositados rapidamente, gerando uma rampa acentuada na frente de assoreamento. Esta baixa propagação da pluma de sedimentos em suspensão adentrando o Lago também pode ser corroborada pelas imagens de satélite e aéreas, que nos períodos das chuvas não desenvolve grandes plumas que se deslocam para o centro do lago. Outro pontos que ratifica essa ideia, é a presença clara do paleocanal do córrego Riacho Fundo a poucas centenas de metros da principal área assoreada do braço.

Fig. 3.16. Perfil Transversal esquemáticos da área assoreada do Braço do Riacho Fundo entre a ponte do aeroporto até a ponte das Garças. Linha vermelha topobatimetria de 2018. Linha Verde Topobatimetria de 2009 e a linha azul batimetria de 1960. P1 e P2 são os perfis estratigráficos amostrados

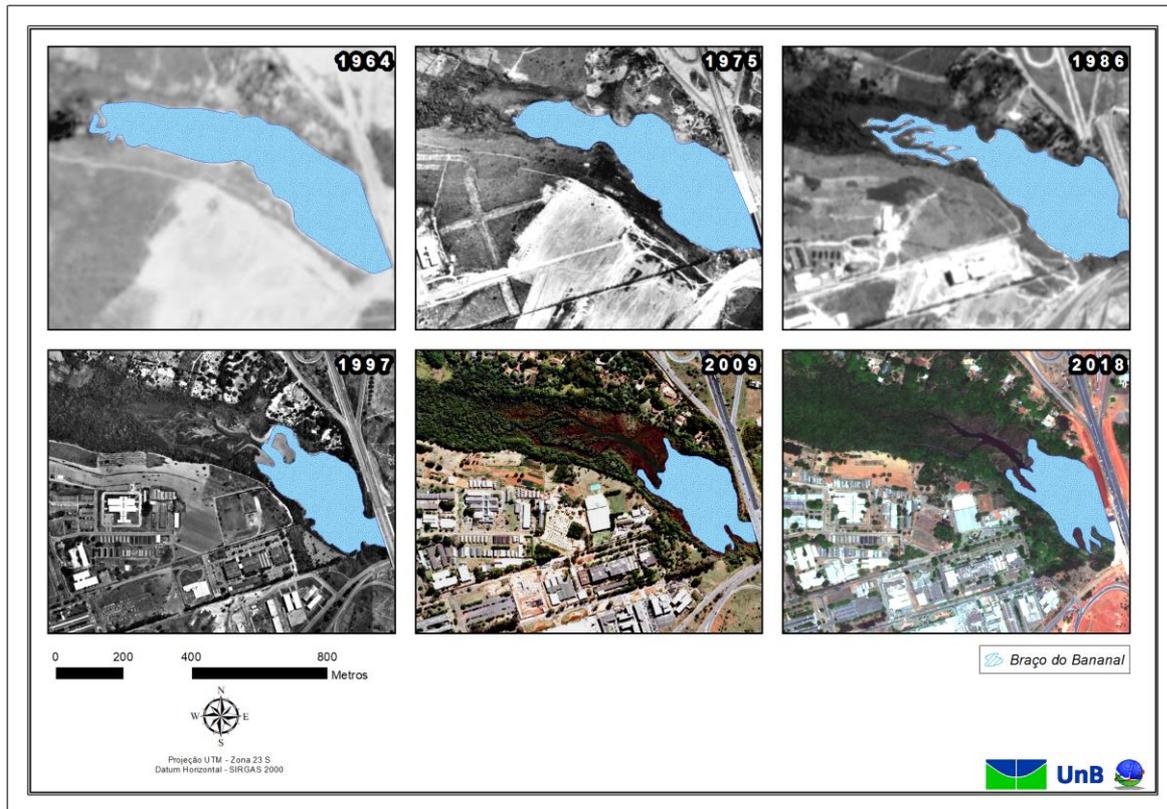


Fonte: Oliveira (2020)

3.3.2.2 Braço do Bananal

Do mesmo modo que no Braço do Riacho Fundo, os dados coletados no Braço do Bananal (batimetria, foto aéreas e perfis estratigráficos) permitiram traçar uma série de considerações sobre a evolução do processo de assoreamento desta região. A análise da série histórica das fotos aéreas apresentada na figura 3.17 demonstra que a principal fonte de sedimentos provém inicialmente do córrego do Bananal com a formação de uma zona úmida caracterizada por vegetação de pequeno porte. Podemos observar que esses sedimentos (leque aluvial) estão, atualmente, sendo moldado pelo novo córrego Bananal, o qual erodiu esta área a fim de recuperar o seu curso natural, anterior à instalação da represa. Podemos apontar que esse processo de sedimentação (assoreamento) atuou com menor intensidade se comparado com o Braço do Riacho Fundo, provavelmente devido à menor urbanização da bacia de contribuição do Bananal. Pelo momento, a área assoreada é bem menor (4,39ha), assim como a sua extensão, que não alcançou 1 km, durante o período analisado, apesar de ser originalmente uma área bem mais rasa do lago, quando comparada ao Braço do Riacho Fundo.

Figura 3.17. Evolução do processo de assoreamento no Braço do Bananal

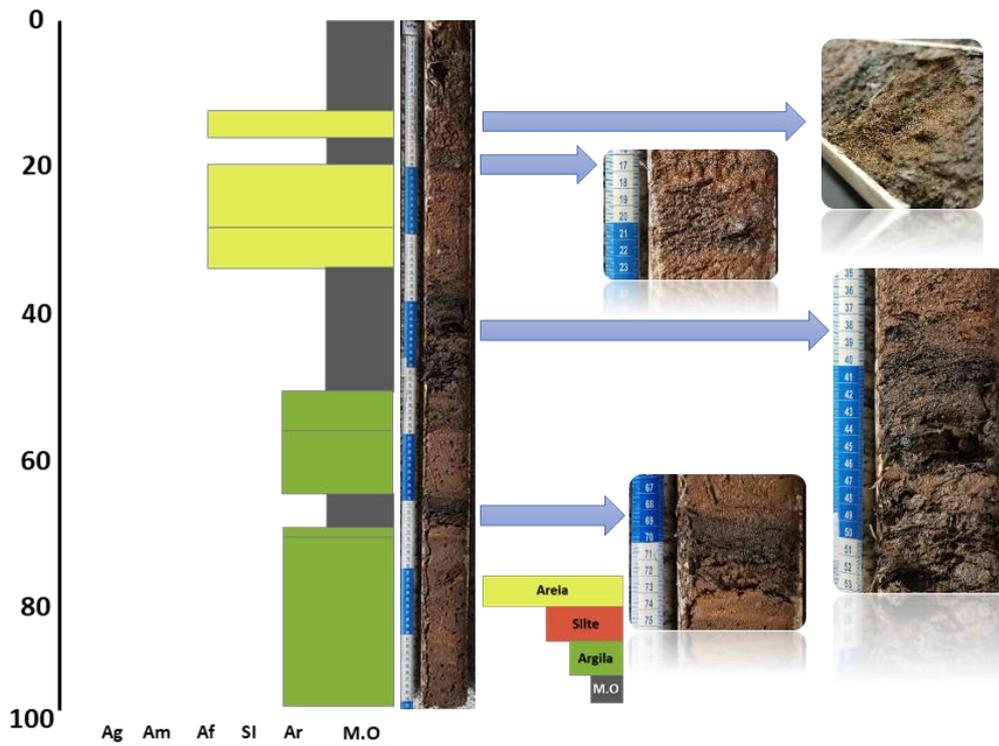


Fonte: Oliveira (2020)

Essa análise é corroborada pela interpretação dos perfis estratigráficos, onde observa-se o predomínio de um material argiloso de coloração cinza escuro muito rico em matéria orgânica na maioria dos perfis (Anexo 1, Fig. 3.18 e Fig. 3.19).

A estratigrafia obtida no perfil da figura 3.18, coletado e analisado no âmbito deste projeto, apresenta uma distribuição das camadas sedimentares que é correlacionável com os 6 perfis amostrados por Ress (2015). Entretanto, a interpretação apresentada aqui, é levemente diferente da proposta do autor supracitado. A integração dos 7 perfis permite compor duas seções estratigráficas uma longitudinal e outro transversal (Figura 3.19A e B).

Figura 3.18. Perfil estratigráfico do ponto BA-7 do Braço do Bananal localizado na fig. 3.19A

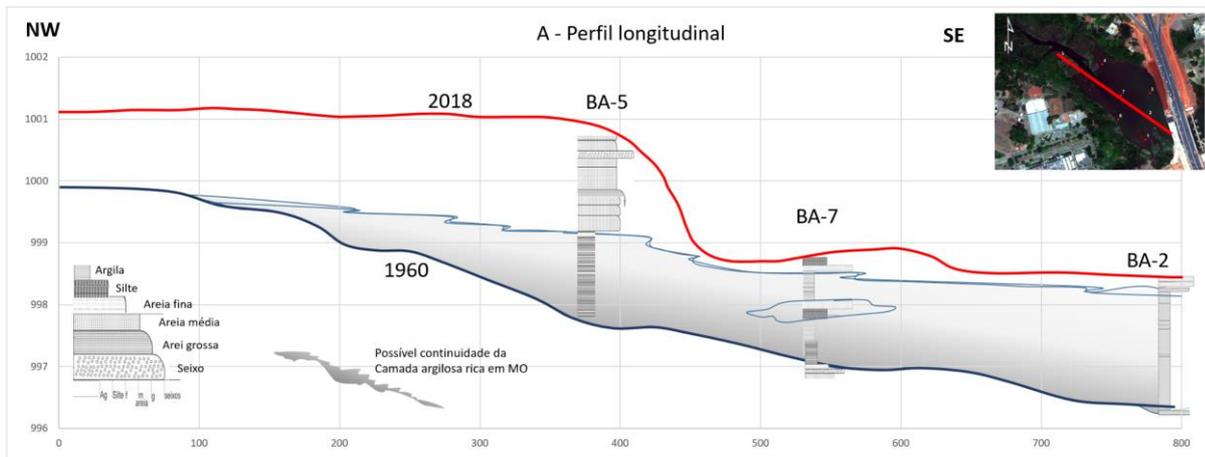


Ag (areia grossa), Am (areia média), Af (areia fina), SI (silte), Ar (argila), M.O (matéria orgânica)

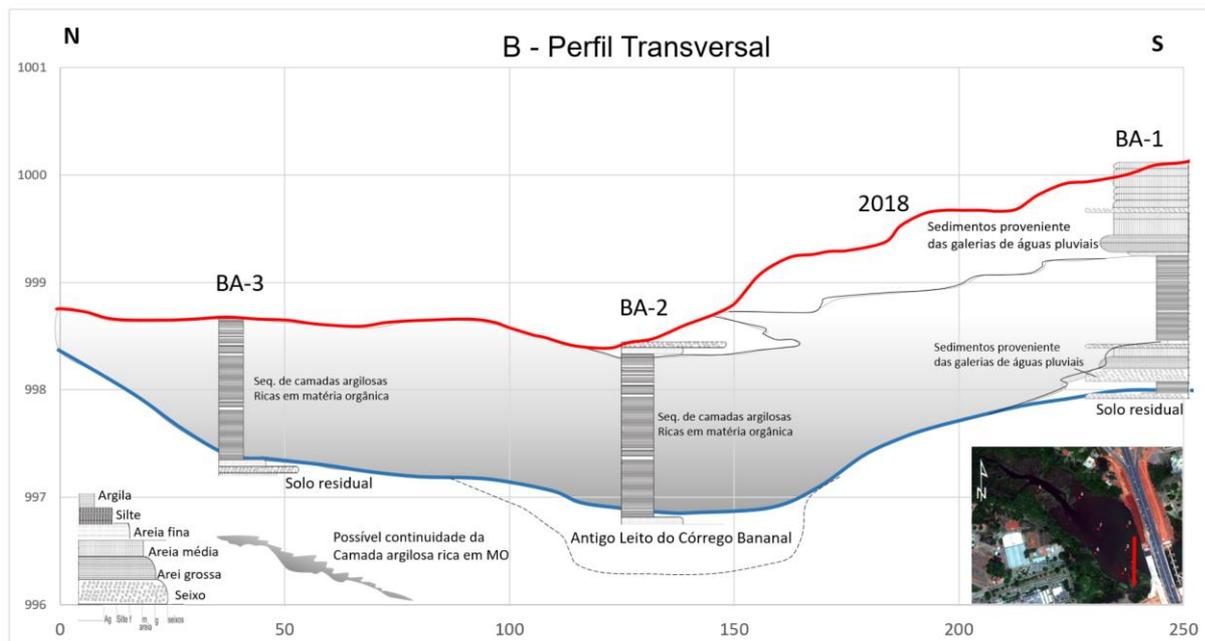
Fonte: Oliveira (2020)

Considerando o exposto, podemos correlacionar os diferentes pacotes sedimentares identificados nos diferentes perfis e assim, entender, de maneira global, o processo de assoreamento que vem ocorrendo no braço do Bananal (Fig. 3.19 A e B). Na região norte do braço, representado pelos furos BA-3 da figura 3.19B (Anexo XX), ocorre basicamente um material argiloso de coloração variando de marrom a preta. Estamos interpretado este material argiloso escuro e rico em matéria orgânica, como depósitos de ambiente lântico, associado à instalação do Lago Paranoá. Este pacote pode atingir mais de 2m de espessura próximo a ponte do Bragueto (Perfil BA-3, fig. 3.19). Nesse mesmo perfil, observa-se que esse pacote está deposito diretamente sobre um material de granulometria areia a silte de coloração avermelhada, rico em óxido de ferro e fragmentos de quartzo, bem como pedaços de raízes, interpretado como sendo o solo original antes da implantação do lago.

Figura 3.19 – Seções esquemáticas mostrando a variação do ambiente de sedimentação e sua relação com a evolução da estratigrafia do lago no braço do Bananal. A – longitudinal (NW-SE); B – transversal (N-S)



Fonte: Oliveira (2020)



Fonte: Oliveira (2020)

Na parte central do Braço observa-se a progradação (avanço) de pacotes de areia média a grossa inconsolidados na forma de lentes com espessuras variadas de 10 a 30cm (perfil BA-5, Fig. 3.19A) que aumentam em quantidade e espessura em direção ao córrego do Bananal. Estes pacotes de areia também contém restos de folhas e gravetos transportados pelo rio. No perfil BA-2 da fig. 3.19A, na sua parte

basal, observam-se níveis de areia fina a média que em conjunto com os dados geofísico foi caracterizado como pertencente ao antigo leito do córrego do Bananal

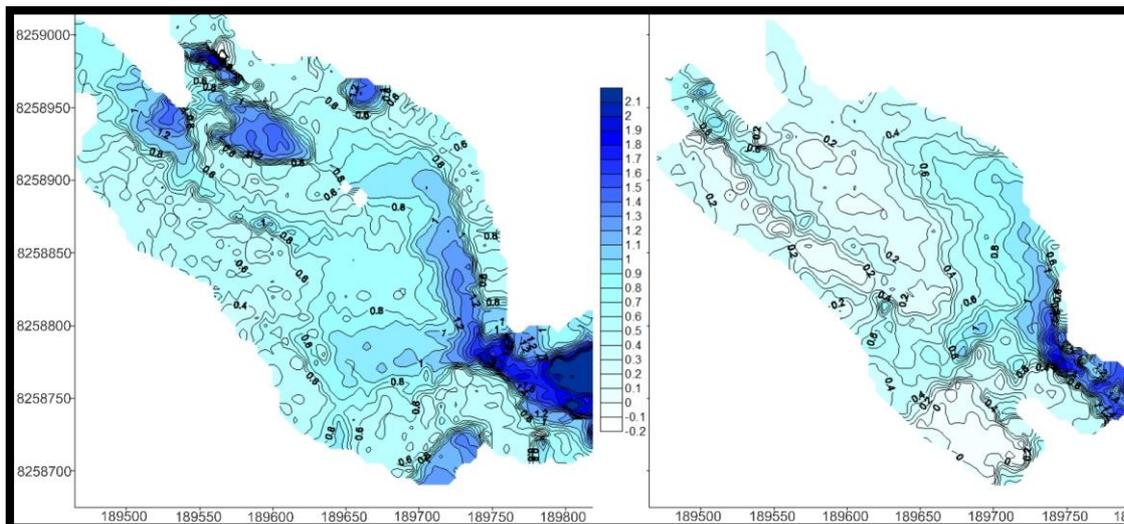
Já na parte sul da área onde desembocam três galerias de águas pluviais a estratigrafia do perfil é completamente diferente (BA-1 da Figura 3.19B). O material descrito na base deste perfil, a cerca de 3m de profundidade (cota 1000m de referência) é constituído do mesmo material da base do perfil BA-3, também interpretado como a camada de solo original anterior a formação do lago. Dois pacotes formados por materiais não coesos de granulometria areia a cascalho, contendo seixos de calcário e pedaços de plástico foram encontrados neste perfil (BA-1 da Figura 3.19B). Estes materiais, de natureza antrópica, são interpretados como pertencentes à fase da urbanização e aos processos de escoamento superficial, os quais lançam materiais de construção e outros materiais diretamente no lago. Considerando estes dois pacotes de granulometria maior, o mais basal, depositado diretamente sobre o solo (BA-1 da Figura 3.19B), deve estar associado à fase inicial de implantação do plano Piloto (década de 60) enquanto o superior, sotoposto ao material argiloso rico em matéria orgânica, sendo mais recente, pode ser associado a empreendimento do Setor Habitacional Noroeste (SHN). De fato, esta parte sul do perfil está alinhada com a galeria pluvial que descarrega material do SHN, que teve sua fase de implantação iniciada em 2009. Estes sedimentos apresentavam, em 2015, 150 cm de espessura (Ress, 2015) e são formados por lentes sedimentares que propagam-se em direção ao meio do braço, formando assim um leque “aluvial” que se sobrepõem ao processo de deposição do lago (Figura 3.19).

Quanto aos dados de batimetria, utilizamos para esta análise, somente o levantamento de 2009 e os dados fornecidos pelos trabalhos de Final de curso da Geofísica (Fred, 2014) foram utilizados, uma vez que, o levantamento de 1960 não tem pontos de profundidade para esta região. Lembrando que o objetivo da DHN com os levantamentos era servir de apoio à navegação.

A análise dos dados batimétricos de 2009 e 2014 (Fig. 3.20) corrobora com a interpretação estratigráfica, onde observa-se o assoreamento da região próxima à entrada das redes pluviais e a formação de “ilhas” de sedimentação nas margens do canal principal do córrego do Bananal.

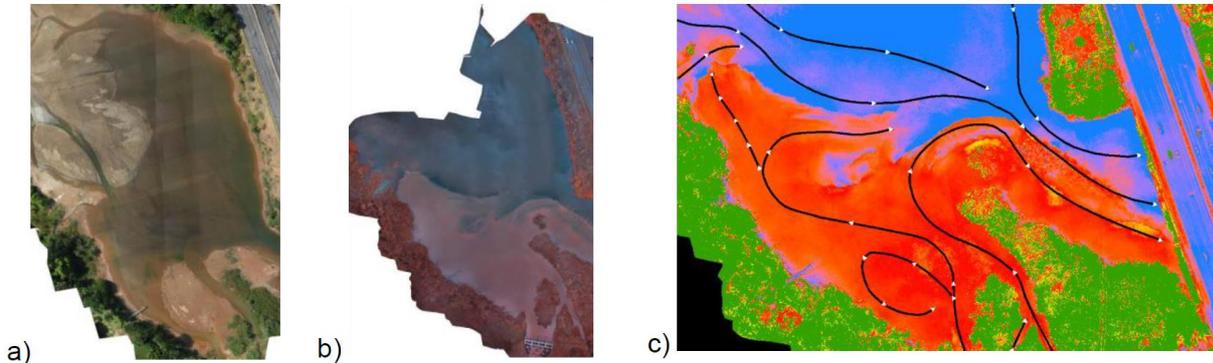
Esta interpretação é corroborada por estudos de sensoriamento Remoto por VANT (Roig *et al.* 2013; Olivetti *et al.*, 2020). As imagens mostram claramente que o principal aporte de material que tem adentrado nos últimos anos ao Braço do Bananal não é mais oriundo do córrego homônimo, mas sim, das águas pluviais do SHN (Fig. 3.21). Considerando que, grande parte desses materiais lançados nas galerias pluviais ocorrem durante o processo de construção e retirada da vegetação, podemos esperar que este aporte diminuirá em intensidade com a consolidação do setor habitacional. Entretanto, vale destacar aqui o papel preponderante dos processos de construção civil sobre os processo de erosão e transporte de sedimentos em direção ao Lago. Se compararmos as imagens de satélite de 1964 com a de 2009 veremos que a estratégia parece não ter mudado ao longo destes quase 60 anos de vida de Brasília, ou seja, é marcada por uma remoção total da vegetação e geração de pilhas de material residual da construção civil. De certo que se faz necessário encontrar procedimentos para minimizar esses efeitos no futuro.

Figura 3.20 Batimetria da região estudada nos anos de 2009 e 2014 (projeto água DF)



Fonte: Fred (2014).

Figura 3.21 Imagem da área assoreada do Braço do Bananal em frente a galeria do Noroeste a) Foto R,G,B no período da seca; b) Foto NIR,G,B no período chuvoso; c) Identificação das correntes e discriminação dos conjuntos de água.



Fonte: (Roig, *et al.* 2013)

3.3.2.3 Braço do Gama

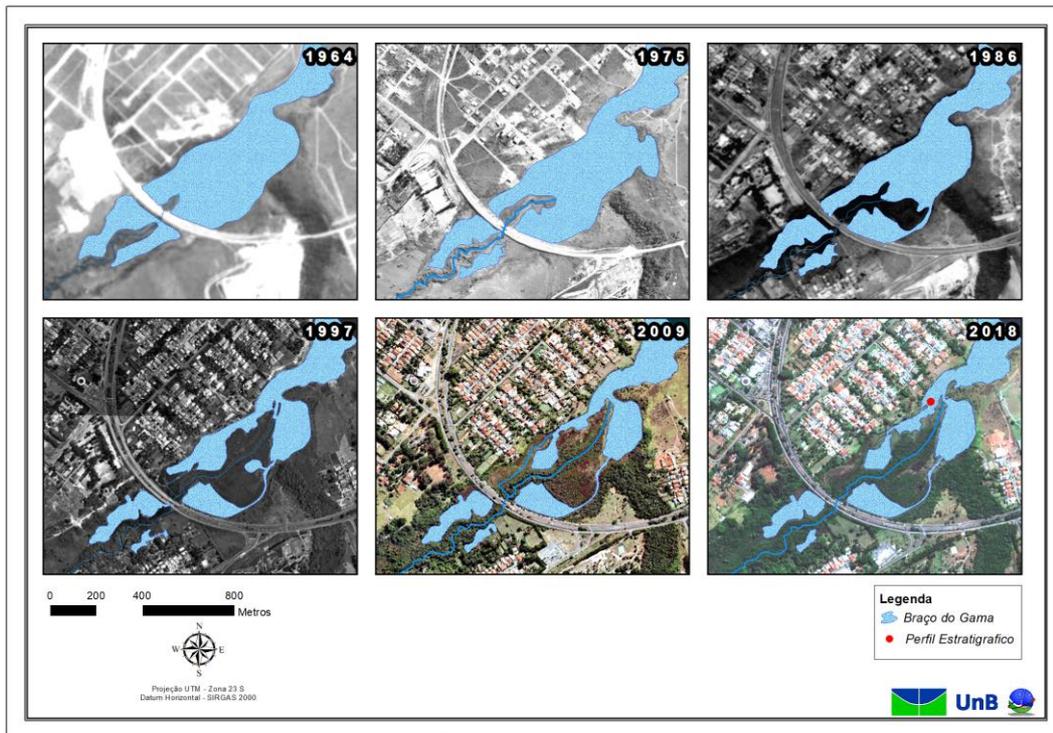
Seguindo a mesma lógica de apresentação dos resultados anteriores, a análise das fotografias aéreas demonstraram que o processo de assoreamento deste braço é bem mais complexo do que os outros. O Acervo fotográfico histórico evidencia uma evolução da recuperação do canal principal do córrego na parte central do lago, deixando nas suas margens, regiões alagadas remanescentes (pequenos corpos d'água - Fig. 3.22). Este fato torna difícil a quantificação deste processo, uma vez que, qualquer um dos métodos de levantamento batimétricos são de difícil execução em áreas com esta configuração, devido à restrições de navegação.

Do mesmo modo, os levantamentos fotogramétricos também têm suas limitações no processo de cartografar adequadamente estas regiões. Normalmente estas áreas são cartografadas como uma área úmida e não são registrados pontos altimétricos. Já os levantamentos com técnicas a laser possibilitam mapear as áreas emersas entre as áreas alagadas, porém sem informação de profundidade das áreas submersas.

Considerando estas restrições, só foi possível calcular a perda em área do braços ao longo do tempo (tabela 3.4), uma vez que o cálculo da perda em volume

(assoreamento) a partir dos modelos de interpolação, devido à carência de dados, não são confiáveis.

Figura 3.22. Evolução do processo de assoreamento no Braço do Gama. O ponto vermelho indica o local de amostragem do perfil estratigráfico



Fonte: Oliveira (2020)

Tabela 3.4 – Cálculo da perda em área do Braço do Gama

Ano	Área (m ²)	Perda em Área (%)
1960	361428.1	0.0
1964	279661.5	22.6
1975	271156.9	25.0
1986	239174.3	33.8
1997	184895.9	48.8
2009	183004.5	49.4
2018	158103.9	56.3

Fonte: produzido pelos autores.

Esta dificuldade de acesso também restringiu a coleta dos perfis estratigráficos, tanto pela dificuldade de acesso como pela presença da vegetação, que necessitaria ser removida, o que não é possível, sem uma autorização dos órgãos ambientais.

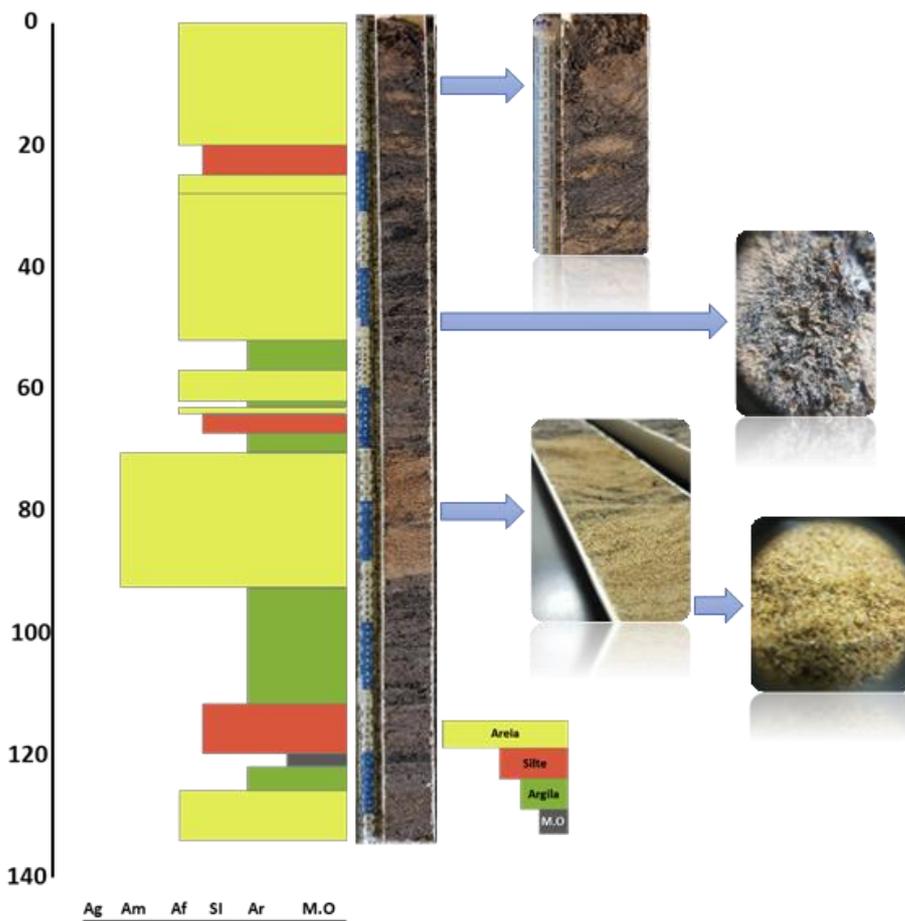
Deste modo, o perfil estratigráfico foi coletado entre a frente de assoreamento e a margem esquerda do lago (Fig. 3.22), ou seja, ainda na área alagada com uma lâmina d'água de 50cm tendo a cota de 1000m como referência (N.A. do dia da Coleta).

Neste caso, para que possamos correlacionar os dados estratigráficos com os dados batimétricos precisamos nivelar os dados à cota 1000m. Assim, o fundo do lago atual, onde a amostragem foi feita estaria na cota 999,5m e o fundo do lago original, segundo a batimetria de 1960, estaria em torno de 997 m, o que daria um pacote de sedimentos em torno de 1,5m de espessura.

Considerando o exposto, o pacote mais basal pode estar relacionado ao ambiente aluvionar do antigo córrego do Gama (Fig. 23). Sobreposto a este, ocorre um pacote silte argiloso com níveis/lâminas ricos em matéria orgânica. Esse pacote pode estar associado ao início do processo de sedimentação em ambiente lântico - lagunar. Por fim, sobrepondo esta sequência ocorrem uma intercalação constituída por banco de areia com intercalações de silte/argila que devem representar a chegada da frente de assoreamento propriamente dita.

Os resultados obtidos mostram que, o assoreamento do braço do Gama é semelhante ao processo descrito nos outros braços, com pelo menos dois pacotes refletindo períodos diferentes: na base um domínio da uma sedimentação mais fina que passa para um material predominantemente arenoso no topo. O processo nesse braço é menos intenso que nos braços do Riacho fundo ou Bananal mas, reflete da mesma forma a interferência antrópica no processo de assoreamento.

Figura 2.23. Perfil estratigráfico do braço do Gama.



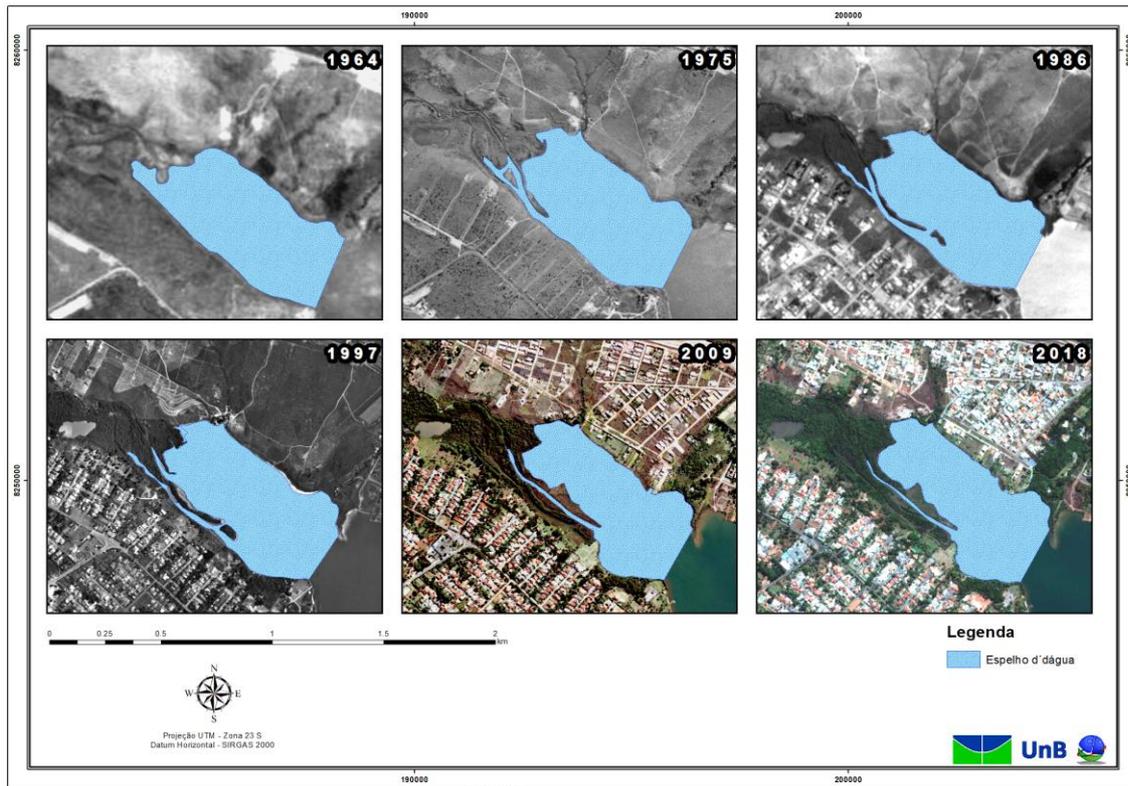
Ag (areia grossa), Am (areia média), Af (areia fina), SI (silte), Ar (argila), M.O (matéria orgânica)

Fonte: produzido pelos autores.

3.3.2.4 Perfil do Torto

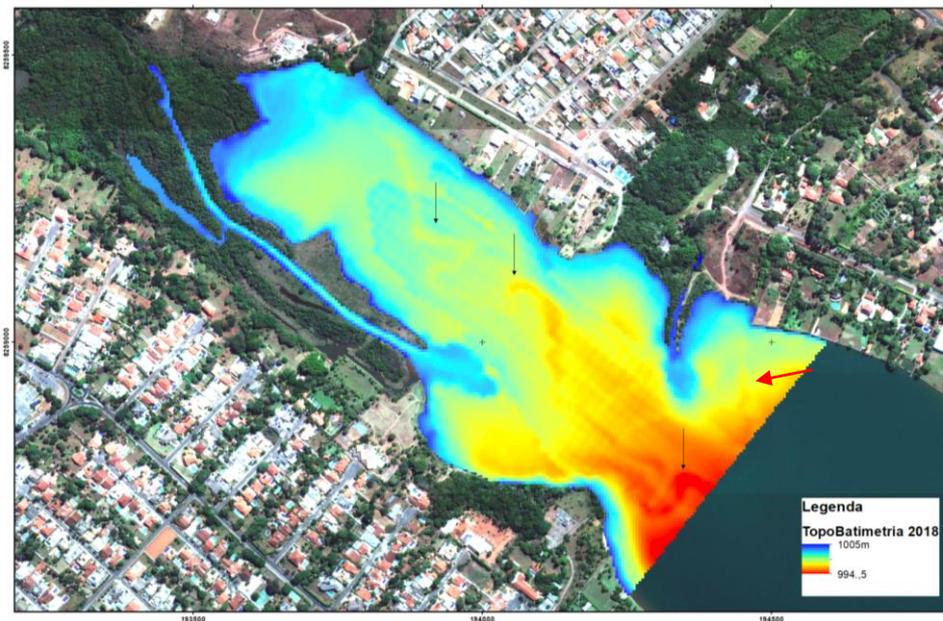
Entre os quatro Braços, o Torto é o que teve a menor variabilidade em área, como pode ser observado na Fig 3.24. Basicamente todo o processo de assoreamento está restrito à margem direita, onde formaram-se dois cordões de sedimentação que separam o canal em formação do Torno do Lago Paranoá (Fig. 3.25). Outra característica que demonstra esta restrição na sedimentação associado a entrada dos córregos é a outra área assoreada próxima ao córrego do Gerivá e a presença do antigo leito do rio na área submersa (setas vermelhar e pretas respectivamente na Fig. 3.250).

Figura 3.24. Evolução do processo de assoreamento no Braço do Torto



Fonte: Oliveira (2020)

Figura 3.26: Modelo digital do fundo do braço do Torto gerado com base nos dados batimétrico de 2018. As setas pretas identificam o paleo canal do córrego do Torto e a seta vermelha a área assoreada devido a chegada de sedimentos no córrego do Gerivá

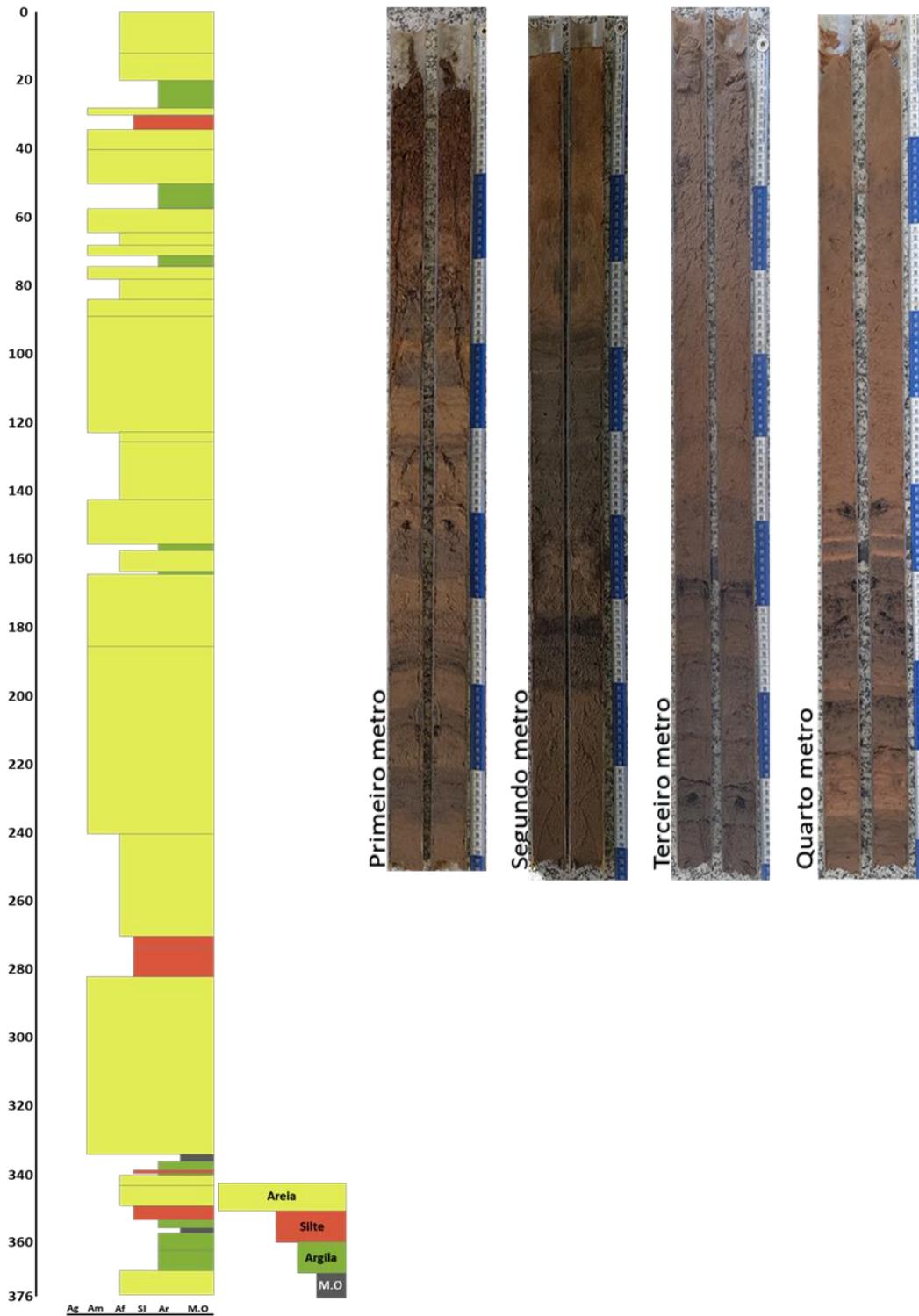


Fonte: produzido pelos autores.

Este comportamento do processo de sedimentação, pode ser explicada pelo tipo de material predominante observado no perfil amostrado (Fig. 3.25), o qual é basicamente constituído por areias fina e média com poucas camadas de silte e argila com ou sem matéria orgânica e deposto de folhas e raízes nos seus mais de 3m de testemunho. Como descrito nos outros perfis, a diminuição da espessura e quantidade de camadas de silte e argila da base para o topo do perfil, em detrimento das partes arenosas pode estar associado à evolução do processo de sedimentação em um ambiente lântico, muito provavelmente em virtude do aumento da interferência antrópica na bacia de contribuição. Já as camadas de silte e argila ricas em folhas na superfície, nos primeiros 60cm, devem corresponder aos períodos de deposição logo após eventos de cheias, processo comum em planícies de inundações.

A maior presença de areia (predominantemente média) no perfil em comparação aos outros braços pode ser explicada, em parte pela características geológicas da área de contribuição desta parte do lago, devido a presença de importantes unidades constituídas de arenitos/quartzitos que geram grande quantidade de solos arenosos (neossolos quaztoarenicos), os quais são carregados para os curso d'água. Vale destacar a proximidade de relevo escarpado com a beira do lago nesta região. De certo que, o processo de urbanização dos arredores do Braço com destaque para as obras de duplicação da BR-020 e a implantação de condomínios possam ter acelerado o processos de remoção e transporte das areias.

Figura 3.24. Perfil estratigráfico do braço do Torto



Ag (areia grossa), Am (areia média), Af (areia fina), SI (silte), Ar (argila), M.O (matéria orgânica)

Fonte: produzido pelos autores.

3.4 Conclusões e considerações finais

Como descrito na introdução do plano de trabalho e desse capítulo, um dos principais objetivos do convênio foi a caracterização das condições das áreas assoreadas e a determinação da perda volumétrica do lago e seu impacto no processo de gestão.

Deste modo, o primeiro grande resultado do projeto foi a construção e organização da base de dados sobre o assoalho do Lago Paranoá, envolvendo tanto o novo MDE gerado para o ano de 2018 (Capítulo II), quanto à bases de dados batimétricos histórica, além dos dados estratigráficos das áreas assoreadas. Também compõem esta base de dados as informações geoquímicas que serão tratadas no capítulo IV.

Deve-se destacar, mais uma vez, a diferença das características cartográficas dos vários levantamentos históricos. Este fato, faz com que os dados obtidos não possam ser usados como valores absolutos, mas como aproximações quantitativas.

Apesar desta limitação (grande variação na escala e acurácia) foi possível compreender o comportamento da dinâmica de assoreamento, principalmente dos braços.

Com base nessas informações foi possível estimar a perda volumétrica do lago para a cota 1000 m, como sendo algo em torno de 4,4 % em 2009 e 6,4 % em 2018. Representando uma taxa média de assoreamento de 0,0084 km³/ano para os 58 anos de vida do Lago e 0,00044 e 0,05 km³/ano para os dois períodos analisados (1960-2009 e 2009-2018). Considerando uma densidade média dos sedimentos depositado de 0,9 g/cm³ (valor calculado), isso representa um montante 28.127.218 toneladas de sedimentos depositados no lago, o que dá uma taxa de assoreamento de 484.952 t/ano.

A análise das fotografias aéreas e dos perfis estratigráficos demonstram que, apesar do processo de assoreamento ter um padrão semelhante de deposição em todos os braços, esse apresenta taxas de sedimentação distintas entre esses braços.

O Braço do Riacho Fundo destaca-se pela maior área assoreada, cerca de 4 km linear, seguido em menor proporção pelos Braços do Gama (~1000 m linear) e Bananal (700 m). O Braço do Torto foi o que teve o menor processo de assoreamento, de modo que podemos considerar que a mudança da morfologia original do Lago nesta região pode ser considerada irrelevante.

Para o caso do Braço do Riacho Fundo, se considerarmos a região original em 1960, entre as pontes do aeroporto e Costa e Silva, teremos uma perda aproximada de 36% (6 vezes maior que a média do lago), tanto em área quanto em volume. Alternativamente, se considerarmos apenas até a ponte das Garças, praticamente todo o Braço está assoreando, já tendo ultrapassado a Região da ETE Sul, a menos de 500 m da ponte, contendo pacotes sedimentares de até 7 m de espessura. A continuar neste ritmo, haverá o assoreamento da região em frente da ETE-Sul, causando problemas para a gestão dos efluentes lançados no lago.

Outro ponto importante evidenciado pelos perfis estratigráficos é a existência de uma ou mais camadas compostas de materiais finos (argilosas), ricas em matéria orgânica, a qual é enriquecida em nutrientes, tais como C, N e P. Este ponto será discutido no próximo capítulo.

Embora os dados obtidos sejam pontuais e não permitam afirmações categóricas, eles indicam que esta camada pode ter continuidade por uma extensa área na base do pacote de sedimentos e deve estar associados ao processo natural de decantação dos microrganismos, mas, este processo deve ter sido acelerado durante o período de contenção da eutrofização do lago entre as décadas de 80 e 90.

Considerando o conjunto de resultados, o que se percebe, é o “ambiente” buscando recuperar a sua condição original, devido à mudança do regime hidrológico, de lótico (Fluvial) para um lêntico (Lacustre). Entretanto, não se trata de um processo puramente natural, mas sim, de um processo fortemente impactado pelas ações antrópicas, onde grande parte do material arenoso depositado deve pertencer a materiais de construção exportados de outras bacias e/ou solos removidos, empilhados e mal cuidados durante as atividades de construção civil. Deve-se destacar que outra possível fonte de sedimentos é a própria calha dos rios, os quais

não suportam mais o volume de água que chega durante eventos chuvosos, devido a impermeabilização do solo na áreas urbanas.

Nesse contexto, deve-se destacar que independentemente da existência ou não do planejamento urbano, ou seja, se o local escolhido para a implantação do empreendimento é ou não apropriado, a falta de um regramento adequado do processo de construção, principalmente no que se refere à remoção e armazenamento do solo e o descarte dos materiais durante o processo de construção, estas atividades acabam por maximizar os processos erosivos e de transporte e, conseqüentemente, o assoreamento do Lago Paranoá. Como exemplos recentes, podemos citar, o Noroeste, a obra do Balão do aeroporto e a implantação do sistema de drenagem em Vicente Pires. Todos estes exemplos são atividades regulamentadas pelo estado, mas foram visualmente áreas fonte de sedimentos escoados superficialmente.

Outro ponto, que chamou atenção na análise da série histórica das fotografias aéreas é que, apesar de décadas de distanciamento (1960 – 2018) as empresas de construção civil ainda usam os mesmos *modus operandi* em relação à extração da vegetação, movimentação e empilhamento de terra. Tais fatos podem ser facilmente observados quando comparamos as fotografias aéreas de 1964 das obras de implantação do sistema viário do final da Asa Norte (1964 - <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/>) com as fotos de 2014 da ampliação do balão do aeroporto (google Earth – 28/04/2014 - série histórica), ou na instalação do sistema habitacional da Asa Sul (1964 - <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/>) e Aguas Claras (2002; 15,837°S/48,014°W - google Earth – 02/06/2002 - série histórica) ou Noroeste (2010; 15.742°S/47.912°W - google Earth – 23/04/2019 - - série histórica). Outro exemplo, são imagens e vídeos das ruas de Vicente Pires em obras para a instalação do sistema de galeria pluvial com elevado escoamento superficial transportando altas cargas sedimentares.

CAPITULO IV

4. QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E ÁGUA DO LAGO PARANOÁ

Jérémie Garnier
Henrique Roig
Elton Souza Oliveira

4.1 Contextualização

O Lago Paranoá, desde a sua inauguração, recebe cargas variadas de esgoto doméstico, além de entradas difusas de fósforo que levaram a diferentes períodos de eutrofização e assoreamento dos cursos d'água (Alves *et al.*, 1988; Baptista e Neto, 1994; Angelini *et al.*, 2008; Menezes, 2010; Batista e Fonseca, 2018). Apesar da construção de duas estações de tratamento de esgoto, ainda hoje, a qualidade da água em alguns pontos, como o braço do Riacho Fundo, continua a apresentar eventos de floração de algas (Carvalho, 2013, ADASA, 2016, Batista e Fonseca, 2018). Estudos recentes sobre os sedimentos em suspensão da bacia hidrográfica do Lago Paranoá indicaram que o uso da terra urbana teve uma grande parcela de responsabilidade no processo de assoreamento recente do Lago Paranoá (Menezes, 2010; Aquino, 2018, Aquino et al, 2018). Do mesmo modo, estudos relacionados com a qualidade das águas e sedimentos identificaram anomalias em Pb, Ca, Mg, Na, K e Sr, associadas a fontes de sedimentos urbanos (Franz *et al.*, 2013 e 2014; Oliveira, *et al.*, 2014; Lors, *et al.*, 2016; e Moreira, 2004). Considerando a capacidade limitada de autodepuração de ecossistema / lago tropical, essas descargas de elementos podem contribuir para à alterações geoquímicas dos sedimentos superficiais e da qualidade da água. Essas condições podem ser preocupantes quando se considera que, a partir de 2018, o lago passou a ser utilizado para abastecimento para consumo humano do DF.

Um dos pontos mais polêmicos sobre as condições do Lago Paranoá é o seu estágio de assoreamento. Este problema é de suma relevância, não só pela perda do volume de reservação e da qualidade cênica, mas também, pela influência na qualidade das águas do lago, uma vez que, os sedimentos podem desempenhar diferentes funções dependendo das condições biológicas, físicas e químicas do ambiente. Os sedimentos podem servir tanto como sumidouros (retenção), quanto como fontes de elementos, e assim podem potencializar a disponibilidade desses materiais (Brown Jr. & Calas, 2011).

Deste modo, o entendimento do comportamento geoquímico dos elementos na dinâmica das águas e sedimentos em corpos hídricos é fator preponderante nos

seguintes aspetos: 1- na definição das fontes, sejam estas antrópicas e/ou naturais; 2- no entendimento do comportamento dos elementos, principalmente da possibilidade desses elementos serem liberados para a solução e serem absorvidos pelos organismos. Dependendo da forma (especiação) e da concentração de certos elementos químicos, estes podem ter efeitos adversos aos organismos ou equilíbrio trófico e biodiversidade, podendo assim, comprometer a qualidade da água no ambiente aquático.

Nesse contexto, a interface sedimento-água, faixa de poucos centímetros, pode ser considerada a mais sensível nesses ecossistemas, pois é nesta região que a mobilidade e fluxo vertical de elementos ocorrem com maior intensidade, por isso é denominada de zona crítica (Sparks, 2005; Brown Jr. & Calas, 2011). Nessas interfaces sólido/solução e solução/biota dos sedimentos, ocorrem inúmeras reações e as condições geoquímicas do meio controlam a especiação dos elementos e suas reatividades, mobilidades, biodisponibilidades e toxicidades.

As reações diagenéticas que ocorrem nos sedimentos são induzidas, principalmente, por processos de degradação microbiana da matéria orgânica (Postma e Jakobsen, 1996). Este processo induz forte gradiente *redox* na coluna sedimentar com processos químicos simultâneos que afetam a especiação química de elementos químicos. Estas reações, catalisadas por microrganismos (Postma e Jakobsen, 1996), atuam nos primeiros milímetros abaixo da interface água-sedimento. Esses incluem a redução e a precipitação de sulfuretos, a precipitação de minerais autigênicos a base de Fe e a oxidação de Fe dissolvido. A dissolução, precipitação, adsorção e dessorção podem provocar diversas alterações biogeoquímicas, modificando fortemente a mobilidade e disponibilidade dos metais.

Assim, dados de concentrações totais dos elementos não são suficientes para avaliar a mobilidade, distribuição sólido-líquido dos metais e seu potencial de toxicidade. De fato, mais do que a concentração total, a forma química ou especiação de elementos metálicos e sua distribuição entre os compartimentos líquidos e sólidos, irá determinar a sua mobilidade, biodisponibilidade e toxicidade potencial (McLaughlin *et al.*, 2000). Nesse sentido, surge a necessidade de determinar as formas com que os metais ocorrem nos sedimentos, i.e. sua partição ou especiação sólida.

Considerando o exposto, neste capítulo apresentam-se os resultados referentes à determinação da qualidade dos sedimentos nas áreas assoreadas. Também é apresentada a determinação da disponibilidade biogeoquímica dos elementos nos sedimentos por meio da especiação, que fornecem informações importantes sobre as fases geoquímicas e biodisponibilidade dos metais.

4.2. Justificativa

A partição dos elementos pode oferecer informações importantes sobre o tipo de retenção dos metais nos sedimentos, sobre as fases portadoras inorgânicas e orgânicas e assim, permitir modelar a dinâmica dos metais no meio ambiente possibilitando uma melhor avaliação dos riscos ao meio ambiente, aos seres vivos e ao homem. O conceito de especiação mais aceito é o proposto pela International Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC (2000) que diz: “especiação é a distribuição de uma espécie em um sistema entre seus diferentes estados de oxidação, distribuição eletrônica, estrutura molecular, e/ou composição isotópica”.

Uma das maneiras mais utilizadas para inferir sobre a especiação é por meio de métodos de extração seletiva sequencial (ESSeq), que fornecem informações importantes sobre as fases geoquímicas e biodisponibilidade dos metais. As extrações seletivas sequenciais (ESSeq) têm como base o uso de reagentes de forma a solubilizar as diferentes frações do sedimento, o que simula alterações nas condições ambientais do sedimento. A seleção dos reagentes visa obter informações sobre associação dos elementos (metais) com as fases portadoras: trocável; carbonatos; ligadas a oxi-hidróxidos de Fe ou Mn; associados a compostos orgânicos; e à matriz cristalina (Tessier *et al.*, 1979; Ure, 1993; Rauret *et al.* 1999).

O conceito por trás do método da ESSeq é a extração de elementos químicos associados a diferentes fases e em diferentes formas (ligações) por meio do uso de reagentes seletivos. Neste âmbito, as frações mais lábeis são solubilizadas nas primeiras etapas, enquanto que as frações menos lábeis serão extraídas por último. Dessa forma, as ESSeq oferecem algumas informações sobre especiação: 1) partição dos metais pelas diferentes fases; 2) mobilidade das espécies; 3) avaliação de risco associado à contaminação, uma vez que podem ser estimados os metais facilmente

biodisponíveis e os metais potencialmente disponíveis, no caso de variações nas condições geoquímicas.

Desde o primeiro procedimento elaborado por Tessier et al (1979), uma ampla variedade de métodos de extração sequencial foi desenvolvida utilizando diferentes números de etapas. Os vários métodos de ESSeq foram harmonizados e aperfeiçoados pelo Bureau Communautaire de Reference (BCR) que propôs um procedimento com 4 etapas (Ure, 1993; Rauret *et al.*, 1999). As principais vantagens do método BCR são tornar os vários estudos ambientais comparáveis e validar a qualidade das medições através da criação de material de referência adequado para ser certificado de acordo com o esquema BCR, como o BCR CRM 601 e 701 (Ure 1993; Rauret *et al.*, 1999 e 2001). Conforme Tabela 4.1, o procedimento BCR é semelhante ao procedimento de Tessier, com a principal diferença do agrupamento das duas primeiras frações. As frações trocáveis e associadas a carbonatos do procedimento de Tessier são combinadas e extraídas como uma fração no procedimento BCR.

A fim de quantificar melhor os riscos associados à presença de elementos na fração (bio) disponível (F1 das ESSeq), esta abordagem pode ser acoplada a um estudo dos fluxos dos elementos entre a coluna de água e os sedimentos. A coleta das águas da coluna de água e das águas intersticiais no sedimento, permite quantificar os potenciais gradientes geoquímicos nessa interface sólido-solução e assim estimar os sentidos dos fluxos (trocas) de elementos. Desta forma, esta técnica permite melhorar:

1. As avaliações dos riscos associados à presença de elementos potencialmente tóxicos no sedimento; e
2. Melhorar o conhecimento sobre ciclo dos elementos e verificar se os sedimentos se comportam como fontes difusas ou sumidouros desses elementos.

Tabela 4.1. Comparação das metodologias de Tessier (1987) e BCR (Ure, 1993)

Condições de extrações sequenciais propor por Tessier <i>et al.</i> (1979) e BCR (1993)									
Tessier	Time	Tempo	Vol	Solução de extração (1g)	BCR	Time	Tempo	Vol	Solução de extração (1g)
Trocável	1 hr	Const. Agitação	8 mL	1M MgCl ₂ pH 7.0 or	16 hr		22° C +- 5° Const. Agitação	40 mL	0.11 M HO Ac
			8 mL	1 M NaO Ac pH 8.2					
Associado a Carbonatos	5 hr	Const. Agitação	8 mL	1 M NaO Ac pH 5.0 w/ HO Ac					
Associado a Óxidos de Mn e Fe Matéria Orgânica	6 hr	96° C +- 3° Const. Agitação	20 mL	0.3 M Na ₂ S ₂ O ₄ + 0.175 M Na-citrato + 0.025 M H-citrato	16 hr		22° C +- 5° Const. Agitação	40 mL	0.1 M NH ₂ OH*HC I pH 2 w/HNO ₃
			20 mL	0.04 M NH ₂ OH*HCl in 25% (v/v) HOAc					
Associado ao Matéria Orgânica	2 hr	85° C +- 2 Agitação ocasional	3 mL	0.02 M HNO ₃	1 hr		20° C Const. Agitação	10 mL	8.8 M H ₂ O ₂ pH 2-3
			5 mL	30% H ₂ O ₂ pH 2 with HNO ₃	1 hr				
	3 hr	85° C +- 2 Agitação interna	3mL	30% H ₂ O ₂ pH 2 with HNO ₃	1 hr		85°C	10 mL	reduze vol. To less than 3 mL. H ₂ O ₂ pH 2-3 reduze vol. to 1 mL
	0.5 hr	Const. Agitação	5 mL	3.2 M NH ₄ O Ac in 20% (v/v) HNO ₃ - diluído to 20 mL	16 hr		22°C + 5° Const. Agitação	50 mL	1 M NH ₄ O Ac pH 2 w/HNO ₃
Residual			1 mL Unk	HF-HClO ₄ 5:1 HF-HClO ₄ 10:1 HClO ₄ 12 N HCl					HF, HNO ₃ , HClO ₄

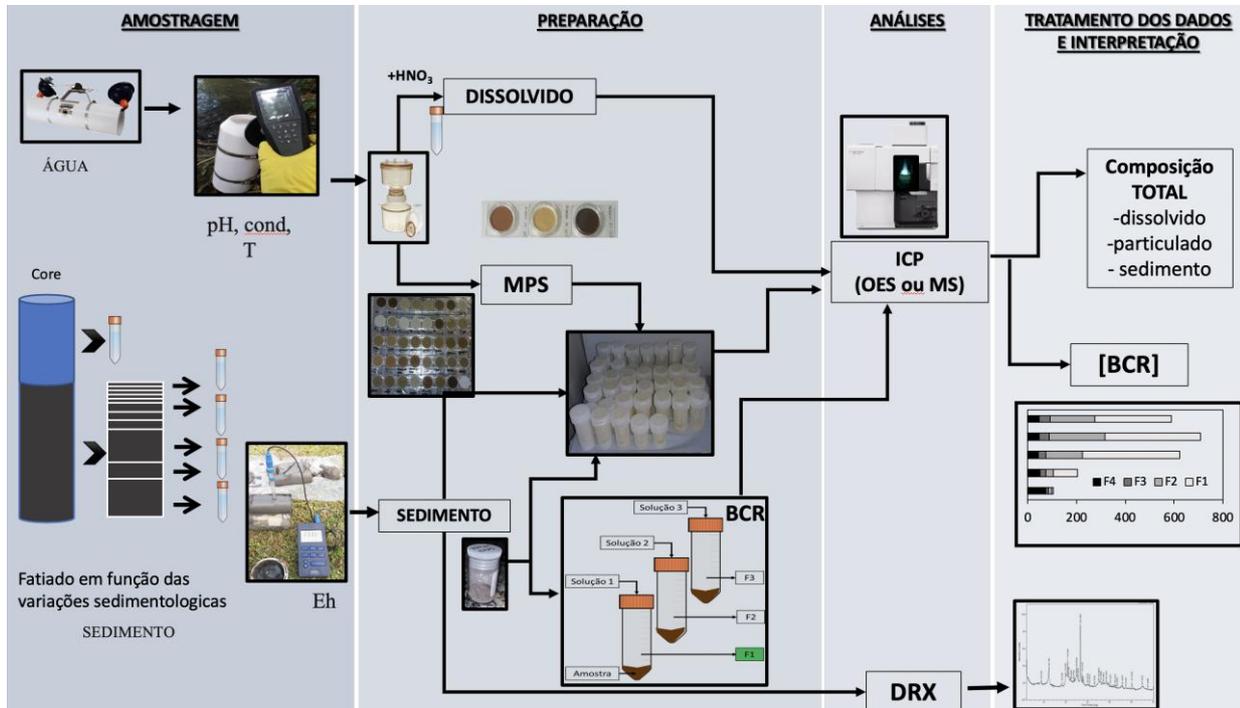
Fonte: construído a partir de Tessier (1987) e BCR (URE, 1993)

4.2 Materiais e Métodos

Para alcançar os objetivos os trabalhos foram desenvolvidos em 4 etapas que envolveram: 1 - Amostragem; 2 - Preparação das Amostras (mineralogia, extração total e sequencial); 3 - Análises (item 2.5); e 4 - Tratamento dos dados. A figura 4.1

resumo as principais etapas de aquisição dos resultados. Os Materiais utilizados que foram de relevância para o entendimento do processo estarão descritos em cada item.

Figura 4.1: Esquema de amostragem, análise e tratamento dos dados.



Fonte: produzido pelos autores.

4.2.1 Amostragem e Análise *in situ*

Neste item iremos descrever os procedimentos e materiais utilizados para a coleta de água e sedimentos (perfis e fundo), solos, bem como dos parâmetros físico-químicos *in situ*.

4.2.1.1 Sedimentos e Solos

Na análise dos sedimentos, foram realizados dois tipos de amostragem: 1- Perfil estratigráfico das áreas assoreadas, nomeado perfil de assoreamento neste relatório, (de 3 a 5m) localizados nas extremidades dos braços do lago, nas planícies de inundação (preferencialmente nas áreas assoreadas emersas); 2- Perfil de

sedimento da zona crítica, i.e. da interface sedimento/água, nomeado sedimento de fundo neste relatório, com no máximo 50cm de perfil de sedimentos mais a água sobrejacente (10-20cm).

Para os perfis de assoreamento os testemunhos foram coletados em pontos estratégicos determinados sob os mapas batimétricos e utilizando a série de fotografias aéreas e imagens de satélite históricas existente sobre a região (1964, 1975, 1981, 1991, 1997, 2009 e 2016), todas disponibilizadas pela SEGETH e TERRACAP. Ao total foram coletados 3 perfis de assoreamento conforme descritos no 1º relatório parcial. Entretanto, para este trabalho foram selecionados 2 perfis de assoreamento (Figura 4.2).

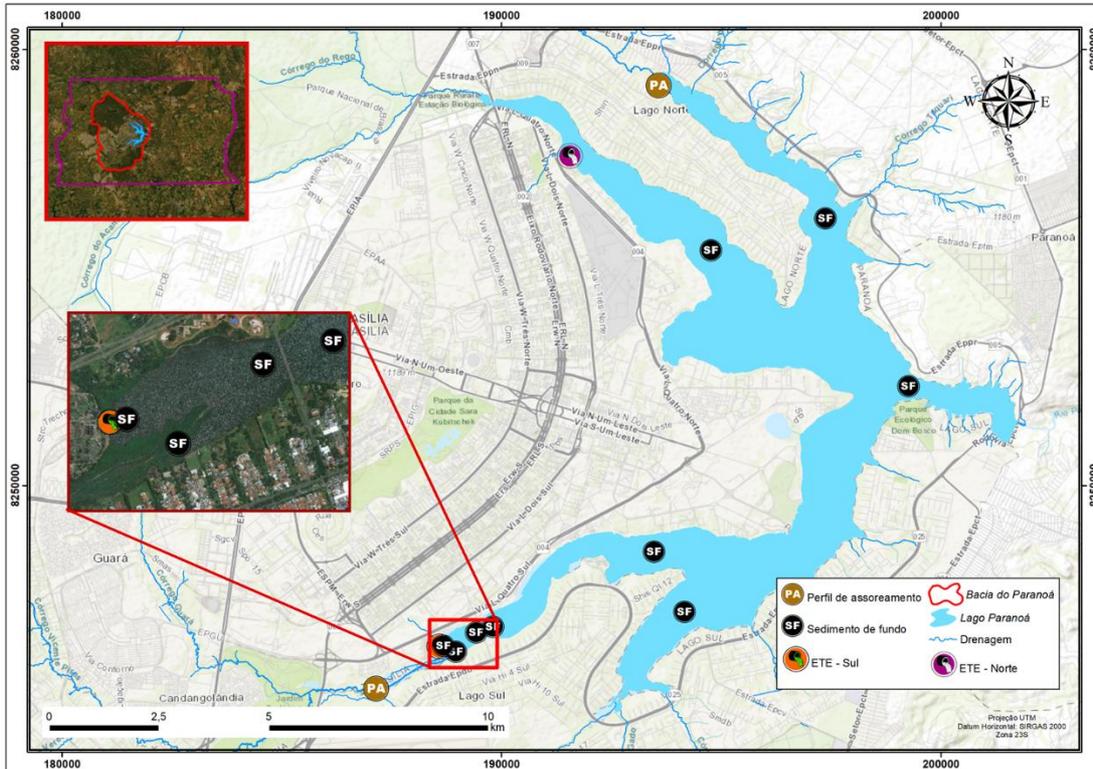
Para a coleta dos perfis de assoreamento foi utilizado um perfilador do tipo Core Sampler da empresa Eijkelkamp com camisa de acrílico, aranha para evitar a perda do material e martelo pneumático profissional (GSH 16-28) de 45 J (Joules) de potência (Fig. 3.3 do capítulo III, pag.42). O objetivo desse arranjo foi minimizar a compactação do material. Neste caso, a amostragem foi realizada com intervalos de 1m no qual esses são preservados em um tubo de acrílico de 50mm.

Nos pontos onde o material era menos coeso ou a amostragem foi feita sobre uma coluna d'água superior a 50cm, os testemunhos foram realizados sem o auxílio do martelo hidráulico. Neste caso, foram utilizados tubos maiores (2 a 5m de comprimento) os quais foram vedados, após a perfuração, para evitar o escape do material pela base durante a remoção deste do leito do lago, uma vez que neste caso não havia como prender a "aranha" como acontece no sistema **Core sampler**. Ainda com o tubo no local amostrado, mediu-se a espessura da lâmina d'água para posterior cálculo da espessura da coluna de sedimentos.

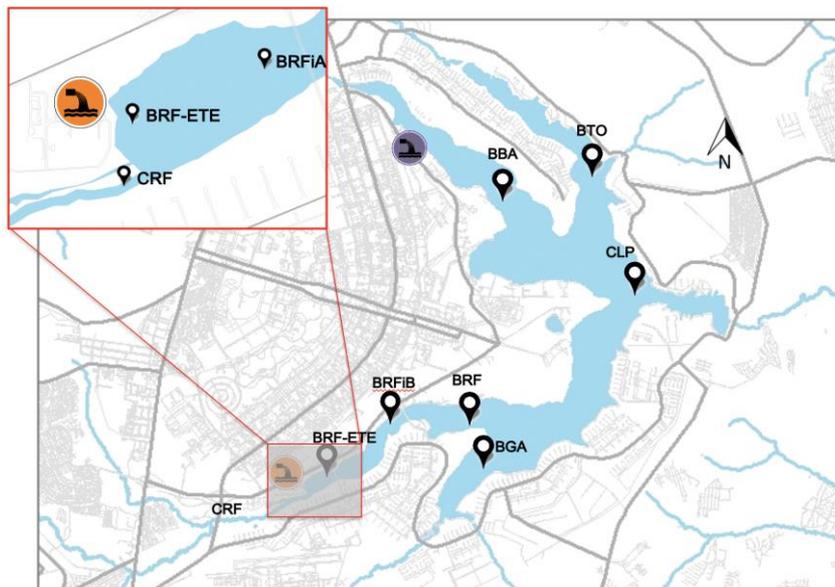
Seguindo a mesma estratégia dos testemunhos estratigráficos (perfis de assoreamento), os perfis geoquímicos (de fundo) foram coletados em locais específicos, de modo a representar a variabilidade da sedimentação no leito do Lago Paranoá. Deste modo, foram escolhidos 7 pontos para amostragem (Figura 4.2). Foi coletado um perfil no meio de cada braço (Gama – BGA, Bananal – BBA, Torto – BTO, Riacho Fundo BRF) e um no meio do Lago Paranoá (CLP). Devido à importância do braço do Riacho Fundo, mais 4 perfis foram coletados, sendo um na desembocadura do córrego do Riacho Fundo (CRF), outro nas proximidades da estação de tratamento

de esgoto – ETE-Sul (BRF-ETE), um terceiro antes da ponte das Garças (BRF-iA) e um quarto logo após a ponte das Garças (BRF-iB), detalhe da Fig. 4.2.

Figura 4.2a: Localização dos perfis de assoreamento e perfis de fundo amostrados.



4.2b



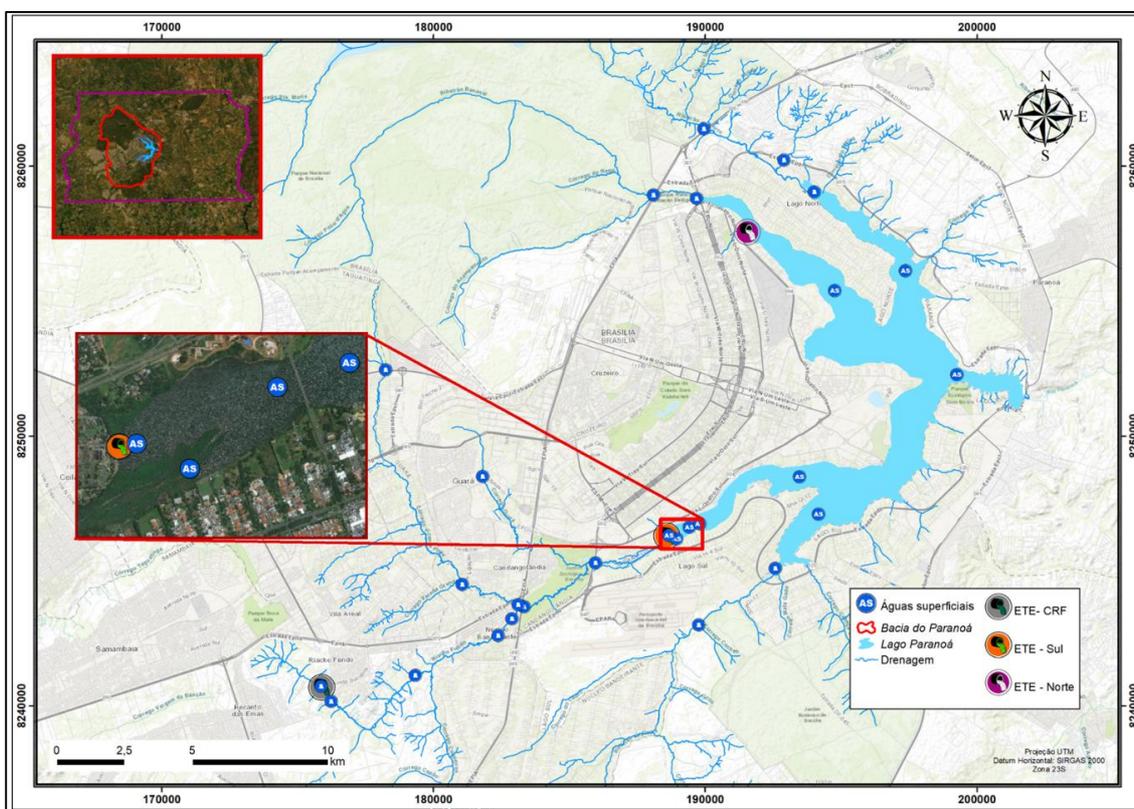
Fonte: produzido pelos autores.

Além de sedimentos, solos característicos da região e materiais de sarjetas foram coletados para definir as composições geoquímicas e mineralógicas das potenciais áreas e fontes dos sedimentos. Nos locais que representam as áreas urbanas foi coletado o material depositado na sarjeta.

4.2.1.2 Águas Superficiais

As águas dos córregos foram coletadas superficialmente em diferentes pontos ao longo da bacia, enquanto que, para a região do lago, as amostragens foram feitas tanto em superfície quanto do fundo da coluna de água (Águas Superficiais – AS; Águas de Fundo - AF), figura 4.3. Os parâmetros físico-químicos de temperatura, pH e condutividade elétrica da água superficial foram medidos diretamente em campo com equipamento multiparâmetro portátil da marca WTW, modelo multi350I. A escolha dos pontos foi baseada principalmente na distribuição do uso e ocupação do solo de modo que elas possam representar diferentes padrões antrópicos.

Figura 4.3: Localização dos pontos de amostragem das águas superficiais e de fundo.



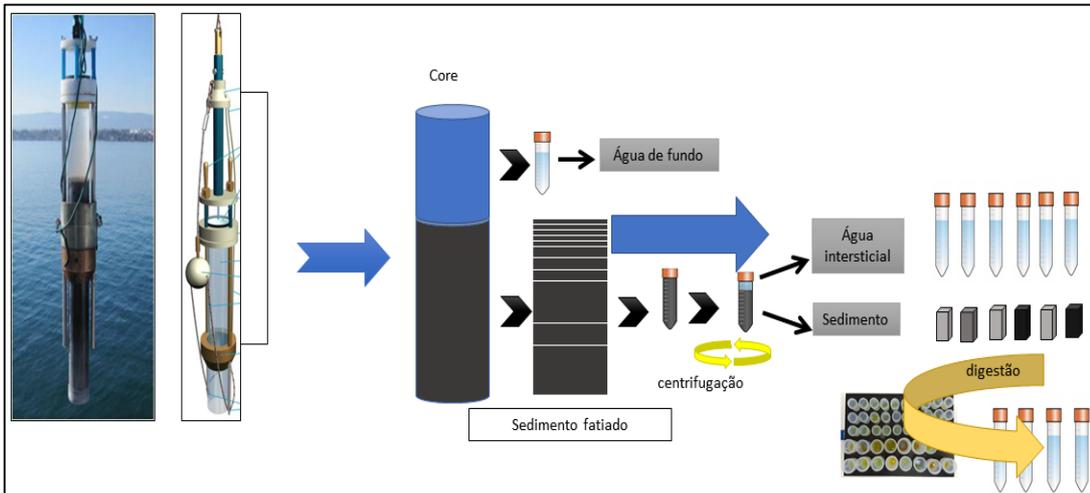
Fonte: produzido pelos autores

Para a realização das coletas foram utilizados frascos de polietileno, com capacidade de 2 litros, previamente lavados com solução ácida (HCL 10%). As amostras superficiais (AS) foram coletadas a uma profundidade média de 10 cm da superfície e as águas do fundo (AF) a 10-20 cm acima do fundo. No momento da coleta os frascos foram ambientados com água do ponto de coleta. Além dos procedimentos utilizados para minimizar qualquer contaminação ou interferência na amostragem foi utilizado uma garra para que as amostras não fossem coletadas próximo da margem. No laboratório, um volume preciso de água foi filtrado com membranas previamente descontaminadas e pesadas (Millipore®, 47 mm, 0,20 µm, éster de celulose misto). As membranas foram secas à 40 °C e pesadas para o cálculo da massa de MPS e posterior digestão ácida. As águas filtradas foram divididas em 2 alíquotas, uma não acidificada e outra acidificada a pH < 2 com HNO₃ bidestilado, e as duas foram armazenadas à 4 °C até posterior análise.

4.2.1.3 Águas Intersticiais

Os tubos de sedimentos superficiais coletados por *Pistoncore* foram transportados para o laboratório, onde o sedimento foi retirado em fatias com sessões horizontais (1 a 2 cm) para representação das características ao longo da profundidade. O sedimento foi imediatamente transferido para tubos de centrifuga (50 ml) e centrifugado (15min a 4000 rpm) para separar a fase sólida e líquida (água intersticiais). A figura 4.4 apresenta o modelo esquemático do procedimento após a coleta do perfil de sedimento.

Figura 4.4: Etapas do processo de separação dos diferentes níveis de sedimentos e das águas intersticiais de sedimentos.



Fonte: produzido pelos autores

4.2.2 Preparação das Amostras

Após a coleta as amostras foram levadas para o Laboratório de Geoquímica (LAGEQ) da Universidade de Brasília (UnB) para tratamento e análises.

Os perfis de assoreamento e de fundo foram fatiados em seções horizontais considerando as variações de características físicas tais como cor, granulometria e textura do sedimento ao longo da profundidade.

Após a descrição e fatiamento, as amostras de sedimentos foram secas em estufa a 50 °C, peneiradas a 2mm e moídas em grau de ágata. As amostras de solos e material de sarjetas foram secas em estufa a 50 °C, peneirados a 2mm e moído em grau de ágata, assim como os sedimentos.

4.2.2.1 Extração Total – Digestão dos sedimentos

Na sala limpa, as amostras de sedimentos foram digeridas com mistura ácida (HF, HCl, HNO₃) e H₂O₂ em savilex® e utilização de chapa quente conforme as etapas apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Protocolo de digestão ácida de amostras.

ETAPA	PROCEDIMENTO
1	Pesa-se a amostra de forma a obter 0,1 g
2	Adição de 4 ml de HF + 1 ml de HNO ₃ à 120 °C por 36 horas
3	Após a evaporação à 90 °C, adição de 3 ml de HCl + 1 ml de HNO ₃ à 120 °C por 48 horas. Após esta etapa, se ainda houver matéria orgânica não dissolvida, adiciona-se 2 ml de H ₂ O ₂ + 2 ml de HNO ₃ à frio por 24 horas e mais 12 horas a 120 °C. Se a dissolução total ocorrer passa-se para a etapa 4. Caso contrário, adiciona-se pequenas alíquotas de 0,5 ml de H ₂ O ₂ em chapa quente à 60 °C com cuidado e atenção para evitar o desprendimento de gases de forma vigorosa. Prossegue-se esta etapa até a completa eliminação da matéria orgânica.
4	Após evaporação à 90 °C, adição de 2 ml de HCl à 120 °C por 24 horas.
5	Após evaporação à 90 °C, adição de 1 ml de HCl à 120 °C por 8 horas.

Fonte: produzido pelos autores.

4.2.2.2 Partição – Extração Seletiva e Sequencial, ESSeq

A extração sequencial das amostras extraídas do perfil de sedimentos foi realizada a partir do procedimento padronizado pela instituição europeia *Bureau Communautaire de Référence* (BCR; Ure, 1993) sobre 2 fatias extraídas das primeiras camadas do perfil de sedimento (0-1cm e 4-5cm). Seguindo o protocolo BCR, foram utilizados agentes oxidantes em quatro etapas para análise dos elementos nas frações (F1, F2, F3 e F4).

A metodologia BCR informa sobre as seguintes frações:

i) fração F1 (fração biodisponível, trocável ou prontamente disponível - CH₃COOH): os metais são adsorvidos no sedimento via atração eletrostática fraca provenientes de carbonatos, sulfatos e cloretos;

ii) fração F2 (fração redutível ou termodinamicamente instável em condições anóxicas - HONH₂-HCl): os metais são apresentados no sedimento como cimento, nódulos e concreções associados, além de colóides de Fe-Mn;

iii) fração F3 (fração oxidável - H₂O₂): fração com metais associados à matéria orgânica e aos sulfetos, que podem ser liberados ao meio ambiente se as condições se tornarem oxidantes e;

iv) fração F4 (residual ou refratária - HNO₃, HCl e HF): é a fração derivada da rocha parental, que contém metais associados à estrutura cristalina de minerais primários e secundários, a exemplo de silicatos e aluminossilicatos.

Do ponto de vista da biodisponibilidade, os metais na fração F1 são mais suscetíveis às mudanças de pH e são considerados mais móveis e biodisponíveis merecendo com isso maior atenção. A fração F2 mostra-se termodinamicamente instável em condições anóxicas e os metais dessa fração são considerados biodisponíveis em condições anóxicas. Por sua vez, a fração F3 apresenta metais biodisponíveis se o meio se tornar oxidante, de forma a degradar a matéria orgânica ou solubilizar os sulfetos.

4.2.3 Análises

A matéria orgânica foi quantificada pelo método gravimétrico de obtenção dos sólidos voláteis por perda ao fogo (Tab. 4.3).

Tabela 4.3 – Protocolo de determinação da Perda a Fogo

Determinação de matéria orgânica e sólidos voláteis
↓
1 - Pesar o cadinho de porcelana vazio (Mcv)+ 1,0000 ± 0,0001g de amostra (Ma);
↓
2 - queimar por 8h em forno mufla a 500°C;
↓
3 - esfriar em dessecador e obter o peso (Mf);
↓
4 - calcular a porcentagem de PF pela fórmula: [(Mcv + Ma) - Mf]*100/Ma;
↓
5 - repetir os passos de 2 a 4. Considerar a PF efetiva caso a diferença de uma queima para outra não ultrapassar 2%. Caso seja maior repetir os passos de 2 a 4.

Fonte: produzido pelos autores.

4.2.4 Determinação Química

A composição das soluções de extrações totais e parciais (BCR) assim como, das águas superficiais e intersticiais foram determinadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado ICP – OES (Agilent Dual-view 5100) no Laboratório de Geoquímica (UnB). Entretanto, para amostras de pequenos

volumes (águas intersticiais) e elementos traços (concentrações baixas) foi utilizado o ICP-MS (ICAP TQ Thermo Scientific) do laboratório HSM da Universidade de Montpellier (serviço contratado). Neste momento, todos resultados das análises de ICP-OES foram obtidos, porém apenas uma parte dos resultados das análises por ICP-MS foram realizadas. Os testemunhos de sedimentos dos braços do Riacho Fundo e do Torto foram amostrados ao longo do segundo semestre de 2019, e na sequência foi iniciado o procedimento de preparação e análise dos materiais coletados.

Uma alíquota das amostras de água superficial e intersticial depois de filtradas nas mesmas condições das amostras para análise de cátions - não acidificadas - foi separada para análise dos ânions F^- , Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- por cromatografia iônica com condutividade suprimida no equipamento Dionex, modelo ICS90, do Laboratório de Geoquímica da UnB.

Os teores de C e N nas amostras de sarjeta, solos e sedimentos foram analisados no analisador CHNS (*Vario Macro, Elementar Analyse systeme*, Hanau). Existem diversos métodos para a determinação do teor de carbono orgânico, que se baseiam em princípios de combustão a seco e combustão úmida. O método por combustão via seca (analisador elementar – CHNS) é considerado uma referência mundial, e é eficiente na determinação de carbono e nitrogênio (Skejmstad; Taylor, 1999).

Para as análises foram separadas 50 mg de amostra. O material analisado foi envolvido em cápsula de estanho para acelerar o processo de combustão. Com isso a amostra é totalmente queimada e em seguida os gases da sua combustão são analisados e os produtos são CO_2 para análise de C e NO para análise de N.

4.2.4.1 Controle e Tratamento do Dados

A fim de verificar a qualidade dos resultados, foram realizados controles por meio de utilização de amostras de referências (padrão de sedimento - *sedimento estuarino 1646a* e *BCR-701*[®], de solo - *San Joaquin Soil SRM 2709a*, de água - *SLRS-6*) nos diferentes procedimentos (digestão e extrações sequenciais, leituras nos diferentes equipamentos).

Para interpretar o conjunto de dados das amostras foram utilizadas ferramentas como estatística descritiva (média, mediana e desvio padrão) e análise multivariada (análise dos principais componentes - ACP) por meio da ferramenta *XLSTAT* presente no *software Excel*. A abordagem multivariada com análise dos componentes principais (ACP) com rotação *varimax* foi utilizada para reduzir o número de variáveis sem perder significância entre elas. (Mulholand *et al.*, 2012; Mar da Costa *et al.*, 2016; Araújo *et al.*, 2017b). O conjunto de dados utilizados, sua situação e tipo de análise constam na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Conjunto de dados utilizados no estudo.

Tipo de amostra	Situação da coleta	Número de amostras	Tipos de Análises				
			Físico-química	Mineralogia	Elementos maiores	C e N	Traços
Material de sarjeta	Coletado	26	granulo	DRX	ICP-OES	Analisado	ICP-MS
Águas intersticiais	Coletado	150	Condutividade e pH	DRX	Cromatografia iônica e ICP-OES	Analisado	ICP-MS
Sedimento de fundo	Coletado	10 perfis (<50cm)	--	DRX	ICP-OES	Analisado	ICP-MS
Sólidos em suspensão	Monitoramento periódico	21	Quantidade	DRX	ICP-OES	--	ICP-MS
Águas superficiais no lago	Coletado	50	Temperatura, Condutividade, pH, CSS e turbidez	--	Cromatografia iônica e ICP-OES	--	ICP-MS
Perfil de assoreamento	100% coletado	4	Estratigrafia	Em análise	ICP-OES	Analisado	Em análise
Águas superficiais nos rios	Monitoramento periódico	50	Condutividade, pH, CSS e turbidez	--	Cromatografia iônica e ICP-OES	--	ICP-MS

Fonte: produzido pelos autores.

4.3 Resultados

Com o objetivo de facilitar o entendimento dos resultados este capítulo foi dividido nos seguintes itens: Composição mineralógica e geoquímica dos sedimentos; Partição dos elementos nos sedimentos atuais; e Qualidade das águas e quantificação dos fluxos de elementos entre os sedimentos e a coluna de água do Lago Paranoá.

4.3.1 Geoquímica dos Sedimentos

Neste capítulo serão abordados os aspectos gerais com relação aos sedimentos e suas possíveis fontes (solos, rochas e materiais oriundos de atividades antrópicas). Inicialmente será apresentada a caracterização física, mineralogia e depois os aspectos geoquímicos.

4.3.1.1 Composição Química dos Sedimentos

Os principais resultados da composição geoquímica dos sedimentos e dos solos encontram-se nas Tabelas 4.5 e 4.6 e Figuras 4.5 e 4.6.

As concentrações em Ca, Mg, Na e K (Tab. 4.5) nos sedimentos estão abaixo dos nível 1 e 2 da Resolução Conama Nº 454 - 11/2012 e estão de acordo com a natureza dos sedimentos (geologia, solos e intensidade do intemperismo). Comparando a composição dos sedimentos do lago com os dos córregos, os teores de SiO_2 no sedimento do Lago Paranoá são menores e os teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e K_2O são maiores. Esses resultados refletem a granulometria menor e a presença de mais argila minerais nos sedimentos do lago comparado aos sedimentos da frente da ETE-SUL (BRF-ETE), mais rico em matéria orgânico (PF maior) e do sedimento do Córrego do Riacho Fundo (CRF), mais rico em SiO_2 e de granulometria maior (mais quartzo). Da mesma forma, podemos destacar teores maiores em P, Zn, Cd e Cu dos sedimentos em frente da ETE-SUL e em menores proporções nos braços do Riacho Fundo (BRF) e do Bananal (BBA, pontos a jusante das ETE) como resultado da provável contribuição do lançamento dos efluentes tratados. Nesta linha,

os valores mais altos de perda ao fogo (PF) dos sedimentos coletados em frente da ETE-SUL estão de acordo com essa contribuição de materiais sólidos mais rica em carbono.

Tabela 4.5 – Concentrações de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn comparados com a resolução CONAMA 454 – 11/2012.

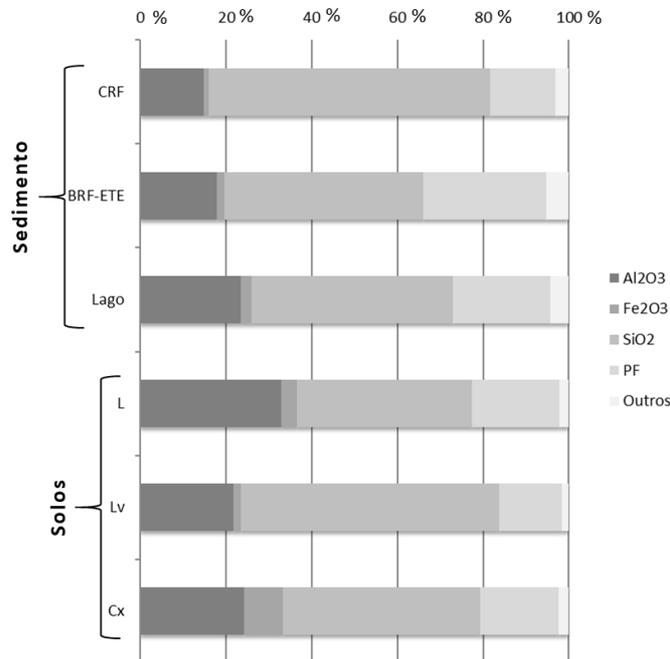
Amostra	Prof. cm	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		mg.kg-1						
Conama Nº 454 - 11/2012	Nível 1	5,9	0,6	37,3	35,7	18,0	35,0	123,0
	Nível 2	17,0	3,5	90,0	197,0	35,9	91,0	315,0
CRF	0-1	5,5	0,1	60,4	23,0	10,4	20,4	49,2
	4-5	5,7	0,1	68,5	23,0	11,7	22,3	49,6
BRF-ETE	0-1	7,7	0,5	78,9	58,1	18,5	36,1	333,1
	4-5	7,4	0,6	83,1	53,3	17,5	38,5	317,2
BRF	0-1	9,5	0,3	112,0	37,5	18,5	35,0	108,3
	4-5	-	-	-	-	-	-	-
BBA	0-1	8,3	0,3	82,5	42,0	23,0	28,1	105,1
	4-5	-	-	-	-	-	-	-
BGA	0-1	8,1	0,1	100,5	34,4	19,0	28,9	62,1
	4-5	-	-	-	-	-	-	-
BTO	0-1	8,5	0,2	86,6	25,3	15,6	26,7	52,3
	4-5	-	-	-	-	-	-	-
CLP	0-1	8,7	0,2	75,4	35,6	17,4	28,0	69,3
	4-5	11,6	0,2	93,9	42,7	20,9	30,0	75,9

Legenda: Nível 1 – limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota; Nível 2 – limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

CRF: Córrego do Riacho Fundo; **BRF:** Braço do Riacho Fundo, **ETE:** Estação de Tratamento de Esgoto, **BBA:** Braço do Bananal, **BGA,** Braço do Gama, **BTO:** braço do Torto, **CLP:** centro do Lago Paranoá. (mapa fig. 4.2)

Fonte: produzido pelos autores.

Figura 4.5: Valores médios (%) dos teores em Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , perda ao fogo (PF) e demais elementos maiores dos sedimentos do córrego do Riacho Fundo (CRF), braço do Riacho Fundo na frente da ETE (BRF-ETE), demais pontos do lago (Lago), Latossolo (L), Latossolo Vermelho (Lv) e Cambissolo (Cx).

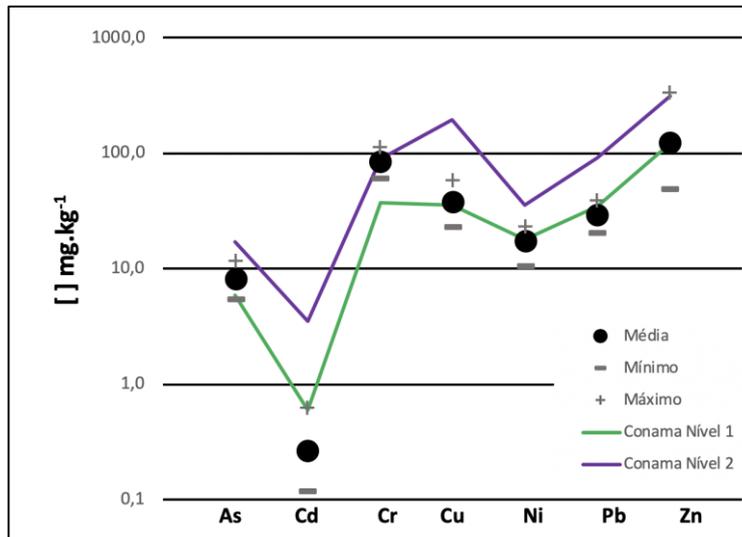


CRF: Córrego do Riacho Fundo; **BRF:** Braço do Riacho Fundo, **ETE:** Estação de Tratamento de Esgoto, (mapa fig. 4.2). **Cx:** Cambissolo, **L:** latossolo, **Lv:** latossolo vermelho.
Fonte: produzido pelos autores.

Chama a atenção os valores de P na frente da ETE-SUL (BRF-ETE). A estação de tratamento de esgoto, mesmo possuindo tratamento a nível terciário, ainda contribui de maneira significativa como fonte de P, que se encontra em alta concentração total nos sedimentos a jusante da ETE-SUL. No sedimento superficial do ponto BRF-ETE (0-1 cm) a concentração em P atinge $7.713,58 \text{ mg.kg}^{-1}$ e próximo dos $10.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ a 4-5 cm de profundidade. Se comparado com sedimento na área de foz do Córrego Riacho Fundo (CRF), considerado um dos braços mais alterados pelas atividades antrópicas (Menezes *et al.*, 2010, Castro *et al.*, 2019) com alta densidade de uso e ocupação do solo, os valores de P nos sedimentos não ultrapassam 900 mg.kg^{-1} , em torno de 10% dos valores identificados no BRF-ETE. Os teores em Co, Cr, Ni, Pb, Sr, V apresentam concentrações semelhantes nos diferentes sedimentos (Tab. 4.6). Apesar da semelhança na concentração dos elementos mencionados vale destacar os teores maiores de Cr e Zn nos sedimentos

amostrados a jusante da ETE-SUL (pontos BRF-ETE e BRF, Tab. 4.6). Podemos destacar que a média das concentração de As, Cr e Zn nos sedimentos do lago ultrapassam o nível 1 da Resolução Conama Nº 454 - 11/2012 (Fig. 4.6).

Figura 4.6 – Valores médios, máximo, mínimo em escala logarítmica de base 10 das concentrações em As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn dos sedimentos comparados com a resolução CONAMA 454 – 11/2012. pontos BRF-ETE e BRF.



Fonte: produzido pelos autores.

Para Cr os valores no BRF se apresentam em torno de 24% acima do valor estabelecido na resolução CONAMA, enquanto que no BGA 11% e no CLP em torno de 4%. Já os valores de Zn se apresentaram acima do limite estabelecido no Nível 2 apenas para o ponto BRF-ETE, com máximo de 5,8% para a primeira profundidade (0-1cm) e menos de 1% para a segunda profundidade (4-5cm). Com exceção do Cr no BRF, os valores se apresentaram próximos do limite estabelecido para o Nível 2 do CONAMA, o que não descarta a importância de se monitorar esses pontos com maior atenção. A anomalia presente de Zn é nitidamente uma consequência do lançamento do efluente tratado da ETE-SUL.

Tabela 4.6 - composição geoquímica dos sedimentos e dos solos

Amostra	Prof. cm	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	P	Pb	Sr	Mo	V	Zn	Zr	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Mn ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₄	TiO ₂	SiO ₂	PF
		mg.kg-1														%									
CRF	0-1	5,45	0,12	2,72	60,40	22,96	10,43	846,81	20,39	27,24	0,75	71,03	49,24	234,54	14,69	0,51	1,18	1,23	0,23	0,02	0,08	0,19	0,87	65,74	15,26
	4-5	5,74	0,13	2,78	68,54	23,02	11,68	779,95	22,29	28,23	0,78	81,24	49,57	301,01	14,36	0,54	1,11	1,39	0,23	0,01	0,08	0,18	0,85	65,48	15,76
BRF-ETE	0-1	7,74	0,51	3,96	78,92	58,07	18,46	7713,58	36,13	40,81	2,27	87,28	333,12	207,28	17,86	1,09	1,73	1,06	0,41	0,01	0,11	1,77	0,90	46,34	28,71
	4-5	7,37	0,62	3,72	83,09	53,35	17,45	9939,84	38,48	47,10	1,84	92,31	317,25	172,03	17,11	1,24	1,67	1,31	0,40	0,02	0,12	2,28	0,87	48,49	26,50
BRF	0-1	9,47	0,29	4,27	112,04	37,47	18,49	1290,14	35,01	39,48	1,40	136,69	108,34	217,37	23,46	0,61	2,04	2,80	0,37	0,02	0,14	0,30	1,22	48,95	20,08
	4-5	-	-	-	-	-	-	1215,78	-	-	-	-	-	187,14	25,06	0,58	2,06	2,66	0,34	0,02	0,13	0,28	1,26	47,44	20,17
BBA	0-1	8,32	0,27	5,11	82,49	41,99	23,03	1058,63	28,15	21,06	1,63	106,50	105,09	236,23	22,39	0,51	2,07	1,07	0,25	0,04	0,05	0,24	1,27	46,20	25,89
	4-5	-	-	-	-	-	-	1021,46	-	-	-	-	-	233,81	21,57	0,38	1,94	1,02	0,21	0,03	0,04	0,23	1,27	47,87	25,43
BGA	0-1	8,15	0,15	4,04	100,53	34,38	19,05	1044,19	28,92	29,50	1,70	143,73	62,09	220,44	24,38	0,41	2,49	2,13	0,24	0,04	0,11	0,24	1,20	44,29	24,47
	4-5	-	-	-	-	-	-	997,44	-	-	-	-	-	215,82	24,09	0,27	2,24	4,23	0,23	0,02	0,14	0,23	1,23	45,14	22,17
BTO	0-1	8,50	0,19	5,01	86,63	25,31	15,60	541,94	26,74	42,93	1,13	114,48	52,32	205,47	20,71	0,35	2,38	2,81	0,35	0,03	0,12	0,12	1,06	56,68	15,39
	4-5	-	-	-	-	-	-	414,73	-	-	-	-	-	209,93	18,34	0,25	2,09	2,77	0,29	0,02	0,11	0,09	0,96	60,18	14,88
CLP	0-1	8,68	0,16	5,08	75,45	35,55	17,35	1103,14	27,98	26,71	2,19	120,57	69,32	149,94	26,25	0,30	3,17	1,70	0,27	0,03	0,09	0,25	1,16	39,37	27,41
	4-5	11,60	0,18	5,18	93,95	42,67	20,91	1162,13	30,05	25,08	2,43	142,33	75,87	200,72	20,42	0,19	2,77	1,90	0,23	0,02	0,10	0,27	1,07	48,19	24,85
Cx	0-4	10,23	0,02	5,23	84,48	46,32	25,82	875,68	21,12	28,42	1,94	154,73	192,78	217,54	23,01	0,35	9,38	0,42	0,16	0,01	0,06	0,25	1,15	46,39	18,81
	0-10	10,36	0,02	6,39	99,23	58,30	28,10	826,17	20,04	25,45	2,09	156,37	186,65	237,02	25,44	0,24	8,55	0,42	0,13	0,02	0,06	0,25	1,24	45,87	17,78
L	0-5	20,48	0,04	1,00	103,78	6,15	10,91	861,14	8,74	11,09	3,68	172,47	16,62	336,32	33,82	0,06	3,64	0,05	0,03	0,01	0,05	0,26	1,87	39,79	20,43
	0-20	21,18	0,03	1,03	116,13	6,45	11,68	910,67	9,00	11,21	4,14	188,58	20,13	287,67	32,05	0,04	3,52	0,04	0,02	0,01	0,05	0,24	1,81	41,90	20,33
Lv	0-20	8,40	0,02	2,48	39,44	8,29	13,37	789,60	10,69	5,11	1,06	71,60	16,19	249,90	21,74	0,01	1,77	0,27	0,11	0,01	0,05	0,22	0,87	60,32	14,64

CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2). Cx: Cambissolo, L: latossolo, LV: latossolo vermelho.

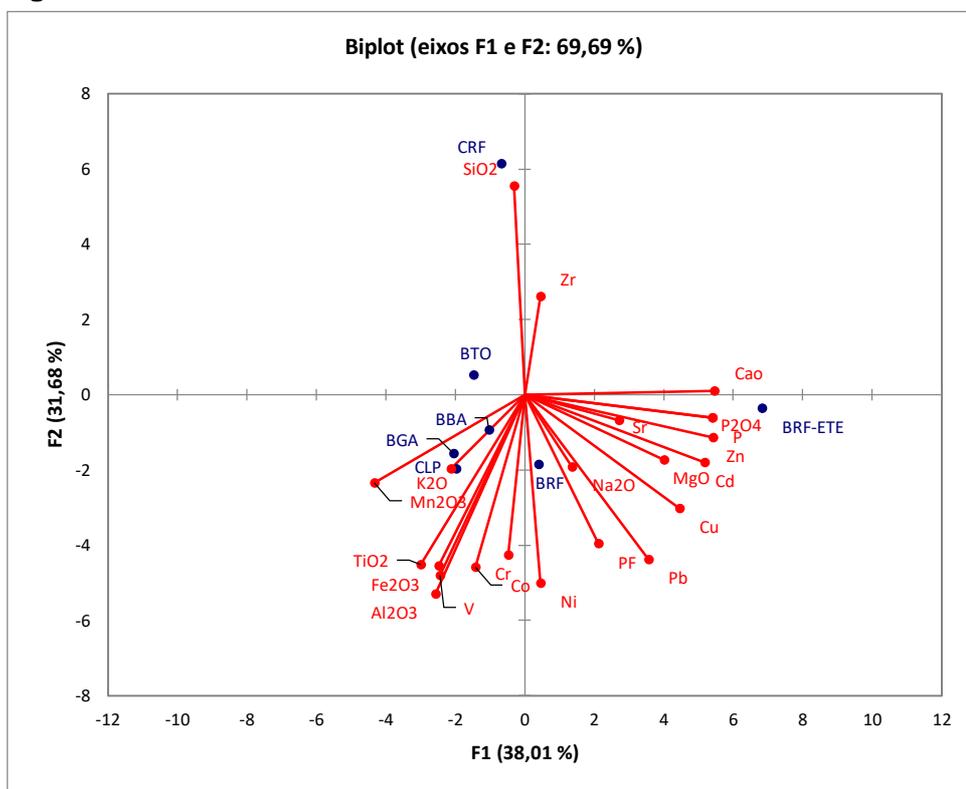
Fonte: produzido pelos autores.

Essas concentrações maiores em elementos potencialmente adversos à fauna e flora (P, Cr e Zn) apontam a necessidade de maiores estudos na gestão desses sedimentos depositados no fundo do Lago Paranoá. O Cr em altas concentrações além de apresentar-se como cancerígeno, pode ocasionar irritações de pele. Entre suas fontes, destacam-se os fertilizantes a base de cromo em mistura com outros minerais, como é o caso dos fertilizantes de fosfato que contém em suas fórmulas o Cr (Campos *et al.*, 2005). Esse resultado condiz com a existência da área agrícola de Vargem Bonita presente na região do BBA. Já o Zn possui como fonte os efluentes domésticos os quais são, pelo menos, parcialmente lançados nos efluentes líquidos das ETEs. Em altas concentrações o Zn apresenta toxicidade, assim como o Cr, o que pode ocasionar problemas a saúde, principalmente no sistema digestivo do ser humano.

Uma das maneiras de avaliar as relações ou agrupamentos das matérias é o uso de técnicas estatísticas como por exemplo, a Análise por Componentes Principais -PCA. Os resultados da PCA considerando elementos maiores e traços da primeira camada de sedimento (0-1cm) estão apresentados na figura 4.7. De acordo com as fontes e comportamento dos elementos discutidos neste capítulo, a PCA mostra:

- Agrupamento do teor em Si e Zr dos sedimentos e relacionados aos sedimentos CRF e BTO;
- Agrupamento do Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Mn_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Cr constituindo um polo terrígeno e posicionamento (relacionado) dos sedimentos CLP, BGA, BBA;
- Agrupamento do CaO, MgO, Sr, Zn, Cd, Cu constituindo um polo antrópico (principalmente aporte da ETE-SUL) e posicionado próximo dos sedimentos BRF-ETE.

Figura 4.7: PCA dos sedimentos 0-1cm.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

Podemos destacar o posicionamento do ponto BRF em uma posição intermediária entre o polo terrígeno (tais como CLP) e antrópico (BRF-ETE), de acordo com a atenuação do caráter antrópico ao longo do transecto ETE-Meio do lago.

4.3.1.2 Perfis Estratigráficos (áreas assoreadas)

Para poder melhor avaliar os efeitos das atividades antrópicas e de alterações do uso e ocupação do solo sobre o lago, tanto de forma espacial quanto temporal é necessário investigar a qualidade dos sedimentos ao longo do tempo. Isso é possível por meio da análise de perfis estratigráficos, pois esses auxiliam no entendimento dos processos ocorridos, ou seja, a história de deposição da região estudada.

Como descrito no Capítulo III, foram coletados 4 perfis nas áreas assoreadas, sendo um em cada braço estudado. A estratigrafia e a interpretação da sedimentação destes perfis já foram realizadas e apresentadas no Capítulo III e serão retomadas aqui quando necessário para facilitar o entendimento das discussões sobre os dados geoquímicos.

No entanto, deve-se destacar que, não serão apresentados os dados geoquímicos dos perfis assoreamentos do braço do Bananal devido a problemas com preparação de amostras, os resultados obtidos perderam sua confiabilidade. Assim, todo o processo de preparação e análise química para estes conjuntos de amostras estão sendo refeitas (reprocessadas), porém em função da pandemia esses não puderam ser concluídos a tempo para serem incorporados neste relatório.

Os perfis estratigráficos coletados no braço do Riacho Fundo e do Torto apresentam predominância do conteúdo arenoso com níveis extremamente ricos em areia fina a média (Fig. 8 e 9). Em linhas gerais pode-se observar uma relação entre a variação geoquímica e a granulometria dos extratos sedimentares, como discutiremos mais à frente. Como exemplo, podemos destacar a forte correlação entre o teor de SiO_2 e a quantidade de areia no perfil do RF, destacado na Fig. 4.10 pelos níveis identificados como A1, A2, A3 e A4.

Apesar desta similaridade entre os perfis do Torto e Riacho Fundo, no contexto geral, existe diferenças significativas quando analisamos em detalhe os perfis estratigráficos, como apresentado no Capítulo III.

Analisando-se o perfil do Riacho Fundo (Fig.4.8) sob o ponto de vista geoquímico, observa-se um relacionamento positivo entre o Zr e Al como o Al, P, C, N (Fig. 4.8). Os níveis mais ricos nestes elementos correspondem aos níveis de granulometria mais fina e escuros, ou seja, correspondem aos níveis de sedimentos mais ricos em Matéria Orgânica (MO) e em argila-minerais.

Outro ponto a se destacar são as altas concentrações/forte excesso em P (entre 1300 a 1500 ppm) em níveis estratigráficos. Tais valores se assemelham aos sedimentos recentes encontrados a jusante da ETE, ponto BRF-ETE (Figura 4.2). Dois destes pacotes sedimentares de granulometria mais fina, localizados respectivamente entre 340 e 360 cm e entre 380 e 440 cm de profundidade (níveis a1

e a2 da Fig. 4.9) se destacam também por apresentarem altos teores (valores) de C, N e provavelmente mais rico em MO. Como destacada na descrição estratigráfica (Capítulo III item 3.3.2.1), estas camadas correspondem a pacotes do período lântico da evolução do assoreamento. Deve-se salientar que no fim da década 70 e nas décadas 80/90, onde esta região ainda estava submersas com profundidades entorno de 2,5 m, foram utilizados flocculante e algicida para mitigar o processo de eutrofização do Lago Paranoá. Deste modo, este processo pode ser o responsável pelo aumento da deposição da matéria orgânica nestes níveis mais finos (argilosos) e enriquecidos em P, N e C.

Com relação ao processo de sedimentação do **braço do Torto**, apesar das altas concentrações de sílica, similar ao perfil do Riacho Fundo, o perfil do Torto (Fig. 4.11) apresenta variabilidade estratigráfica diferente (Capítulo III, item 3.3.2.4). No mesmo ocorre uma intercalação de silte/argila entre pacotes mais espessos de areia, com larguras que variam entre 40 a 50 centímetros nos pacotes mais espessos. A deposição diferenciada também pode ser associada ao padrão de uso do solo que é diferente na bacia do Córrego do Torto. Entre as camadas de areia é possível identificar finos pacotes de argila e matéria orgânica que se relacionam bem com os dados de Perda ao Fogo.

Apesar do padrão distinto do perfil coletado no braço do Riacho Fundo, a relação entre Zr e a perda ao fogo (PF) que se repete também indicando um aporte natural de material terrígeno. Porém, não se observa no presente perfil uma flutuação significativa de P, isso é um indicativo de que apesar dos diferentes períodos de forte eutrofização do Lago Paranoá o processo não afetou as áreas de maneira igualitária no lago. Este resultado demonstra novamente que, a sedimentação no lago não é homogênea. Os sedimentos do braço do Torto foram os menos afetados pelas atividades antrópicas. A menor densidade de uso e ocupação do solo, distância das principais fontes desses elementos (esgotos clandestinos e ETE) e a maior hidrodinâmica do braço podem explicar esse comportamento.

O estudo da composição química dos sedimentos superficiais e de perfis sedimentares destacou a existência de forte heterogeneidade de sedimentação espaço-temporal, com áreas ou período de sedimento dominado por areias e outras

por materiais mais finos e mais ricos em nutrientes e metais. A presença desses elementos podem promover alterações na qualidade dos ecossistemas, principalmente nas proximidades das ETE onde, teores podem ultrapassar os valores estabelecidos como potencialmente tóxicos. De fato, as concentrações em alguns nutrientes e metais ressaltam os potenciais riscos adversos a qualidade das águas ou para fauna e flora aquática, por isso o interesse de estudar a dinâmica desses elementos e principalmente, a potencial disponibilidade destes elementos a partir dos sedimentos.

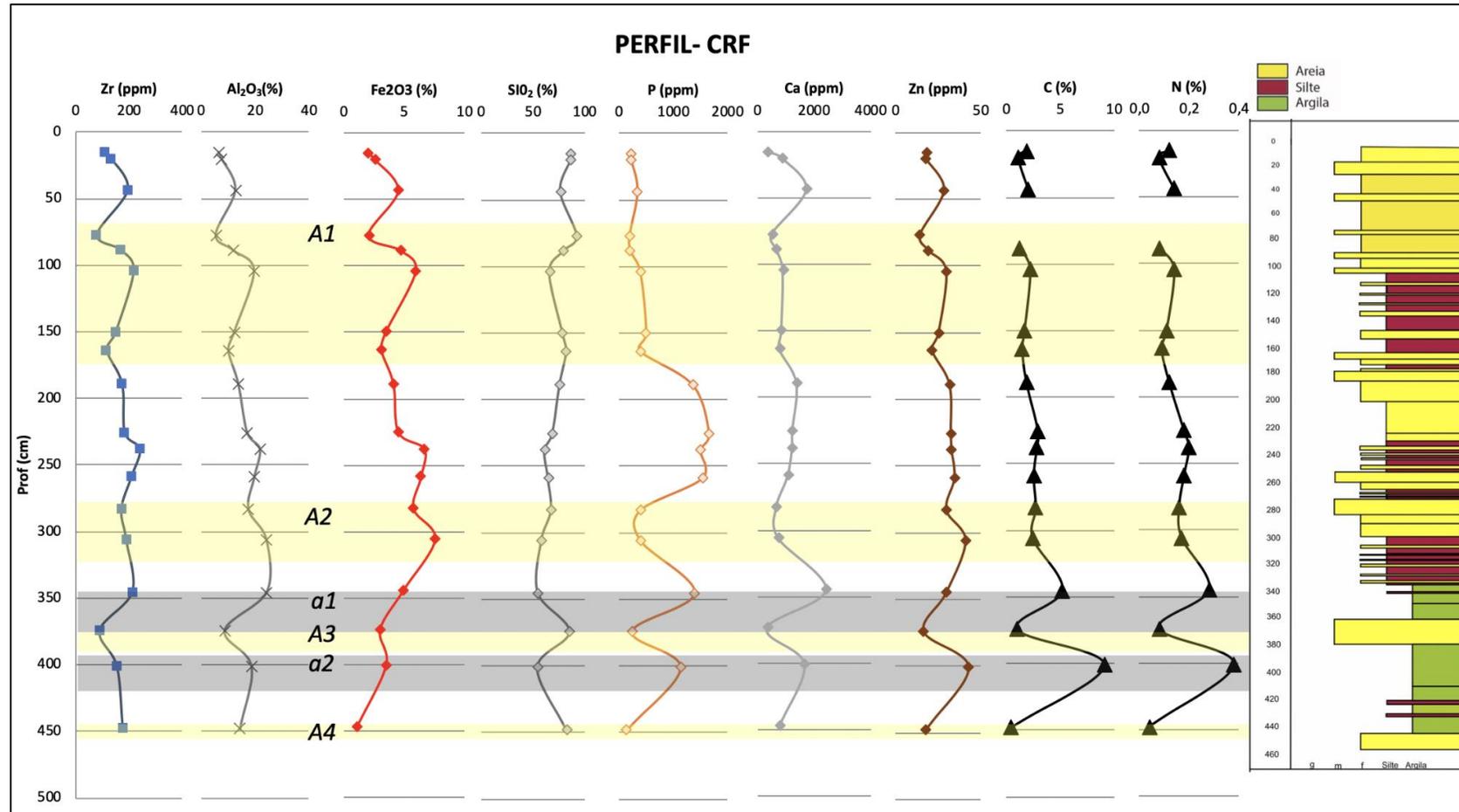
4.3.2 Partição dos Elementos nos Sedimentos Atuais

4.3.2.1 Extrações Seletivas e Sequenciais (ESSEQ) elementos maiores

Como apresentado na introdução, além das concentrações totais, a avaliação da qualidade dos sedimentos e especialmente da mobilidade e toxicidade de elementos químicos presente no sedimento passa pela determinação da forma desses elementos nos sedimentos (sua partição ou especiação). De fato, a partição dos elementos pode oferecer informações importantes sobre o tipo de retenção dos metais nos sedimentos, sobre as fases portadoras inorgânicas e orgânicas e assim permitir modelar a dinâmica.

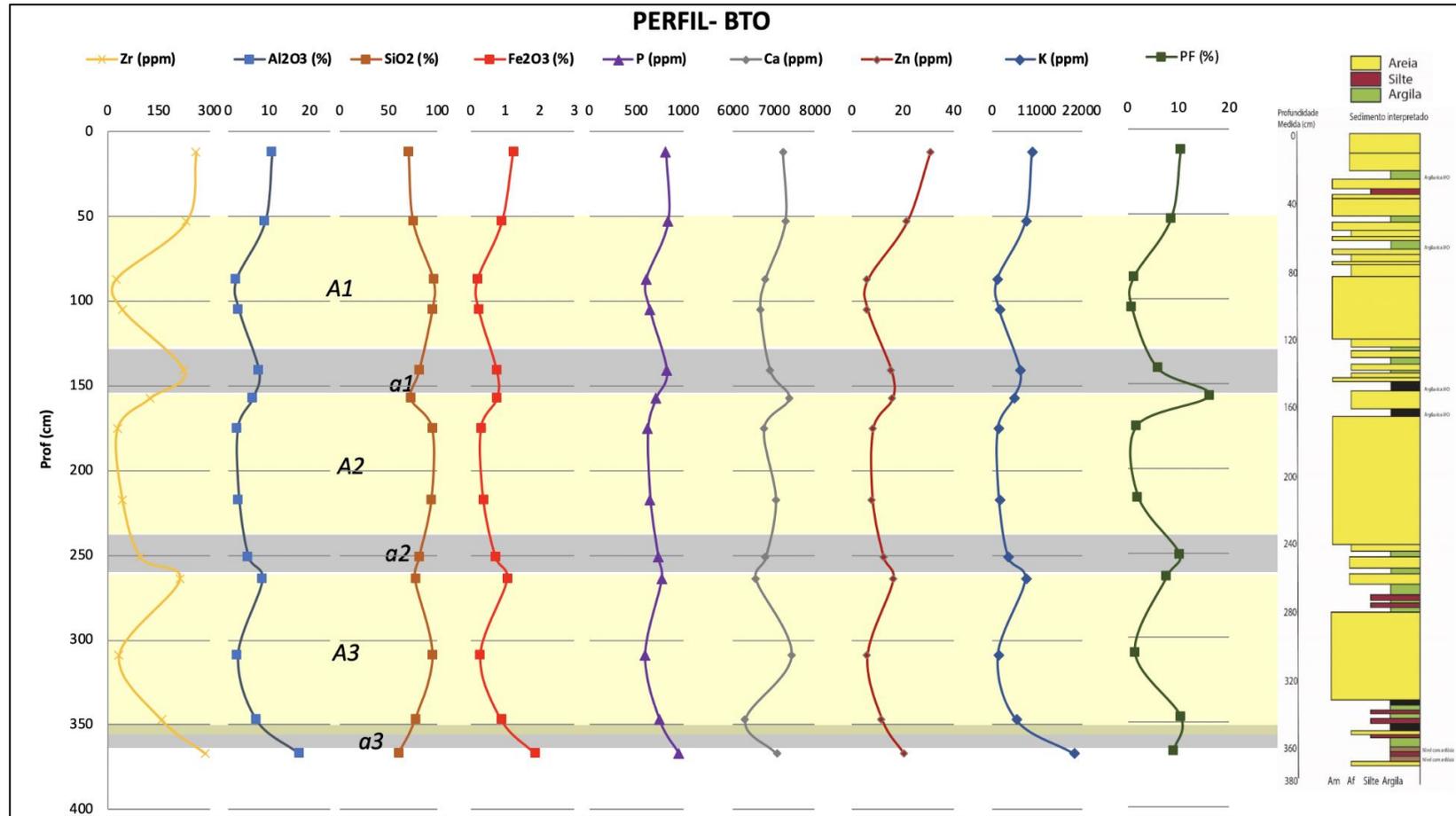
A partição do Al e Fe apresenta um comportamento similar para todas as amostras analisadas, demonstrando que este elemento tem um comportamento e distribuição homogêneo nos sedimentos do Lago Paranoá. Estes elementos estão predominantemente solubilizados na etapa F4 e assim, se encontram na estrutura cristalina de minerais refratários (Fig. 4.10). No caso do Fe, além da predominância da fração F4 também observa-se uma presença significativa na fração F2, demonstrando que parte do Fe está na forma de oxi-hidroxidos de Fe.

Figura 4.9: perfil esquemático sedimentar e geoquímico do braço Riacho Fundo (com distribuição em Zr, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂, P, C e N em função da profundidade). No perfil 4 níveis mais grossos, i.e. A1-4 e dois níveis mais finos, i.e. a1 e a2, são destacados.



Fonte: produzido pelos autores.

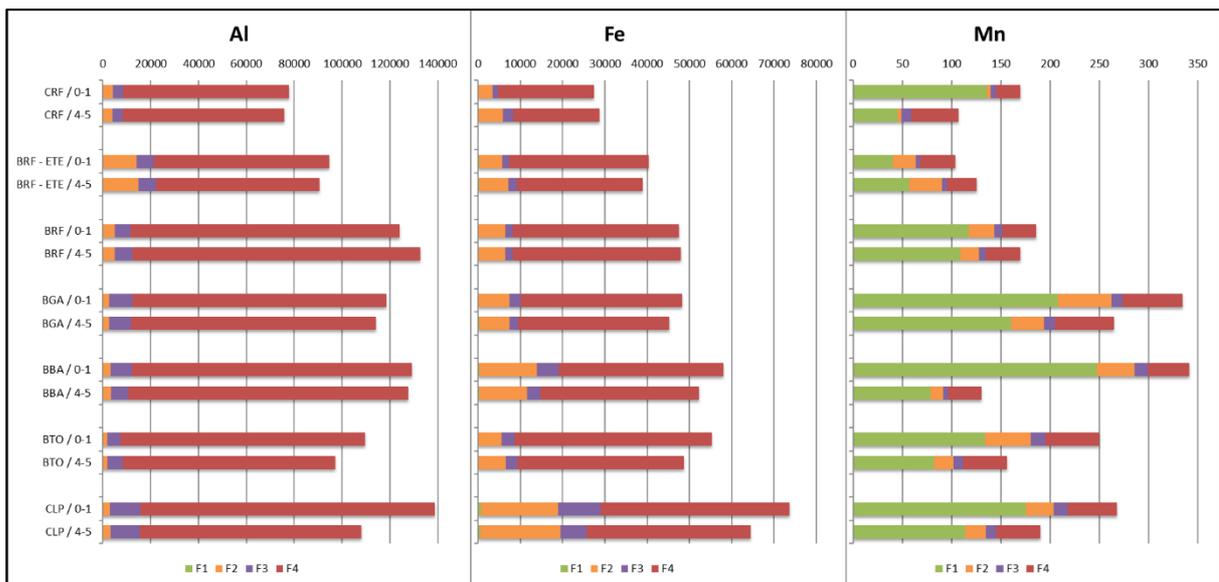
Figura 4.9: perfil esquemático sedimentar e geoquímico do braço do Torto (com distribuição em Zr, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, PF, P, Ca, Zn e K em função da profundidade).



Fonte: produzido pelos autores.

O Mn está associado principalmente à fase F1. Este fato, demonstra a sua condição na forma solúvel ou associado aos carbonatos ou mau cristalizado e assim com maior disponibilidade (fração F1, Fig. 4.10). As concentrações de Mn sendo sempre maior na camada superficial (0-1 cm) sugere a existência de condições anóxicas (redutores) nos sedimentos com migração de Mn solúvel a partir dos sedimentos em zonas anóxicas e a sua precipitação na interface com a coluna de água, como veremos mais à frente. Desta forma, podemos relacionar a grande concentração de Mn na fração F1 como re-precipitação de óxidos de Mn em ambientes levemente mais oxidante na interface com coluna de água oxigenada.

Figura 4.10: Resultados das extrações sequenciais de Al, Fe e Mn, concentração em mg.kg⁻¹ das 4 frações (F1- verde, F2-laranja, F3-roxo e F4-vermelho) dos sedimentos coletados nos diferentes pontos do lago e em função da profundidade.



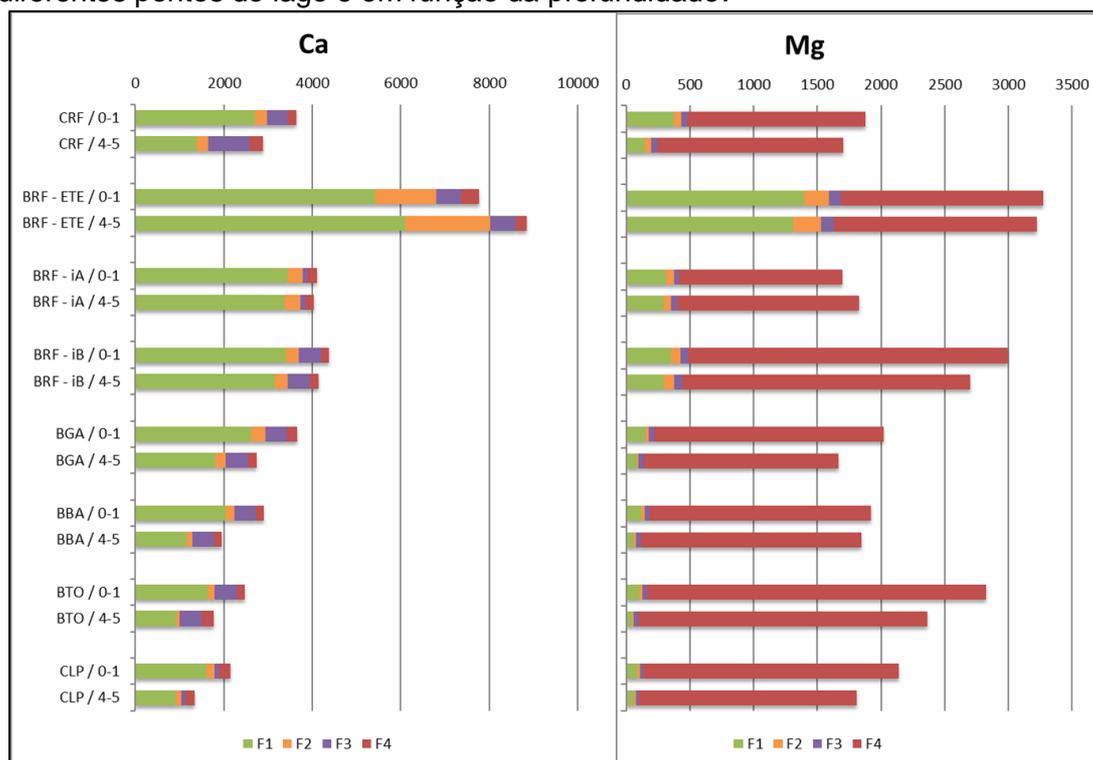
CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

Considerando as partições de Ca e Mg, os resultados das ESSeq dos sedimentos na frente da ETE-Sul se destacam dos demais resultados (Fig. 4.11). Os teores em Ca e Mg dos sedimentos do BRF- ETE são maiores e a partição mostra a presença de Ca em teores mais elevados associado a F1 e F2.

Podemos observar um excesso em P e Ca e em menor proporção de Mg nessas duas frações (F1 e F2) em frente a ETE-Sul. Os resultados mostram que esta anomalia se propaga a jusante da ETE com uma tendência a atenuação em direção ao meio do lago (Fig. 4.12).

Figura 4.11: Resultados das extrações sequenciais de Ca e Mg, concentração em mg.kg⁻¹ das 4 frações (F1- verde, F2-laranja, F3-roxo e F4-vermelho) dos sedimentos coletados nos diferentes pontos do lago e em função da profundidade.



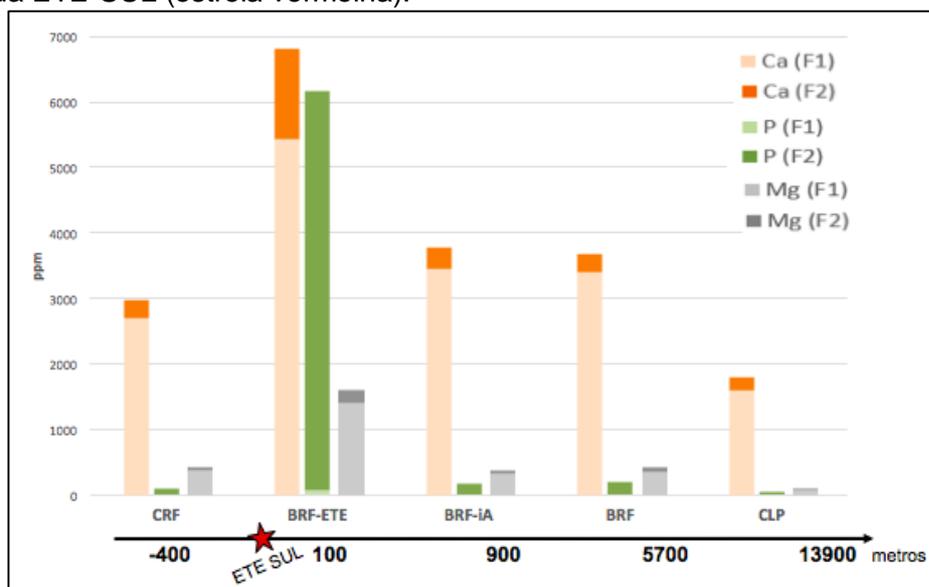
CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

Esses resultados sugerem que a ETE pode constituir como uma fonte significativa de Ca e Mg no Lago Paranoá, visto que não existe, ou se desconhece, a presença de carbonatos nas unidades geológicas da bacia do Lago Paranoá. A boa correlação entre Ca²⁺ e Mg²⁺ sugere também que grande parte desses elementos estão associados a carbonatos de origem antrópica, pois normalmente o processo de calagem e os materiais de construção tem uma boa relação entre estes dois elementos. Os resultados de composição total e de partição sugerem que as águas

pluviais provenientes da lavagem das áreas urbanas e as águas cinzas, ambos transportados pelas redes de águas pluviais, podem contribuir em Ca e Mg. Além dessas fontes, o uso de carbonatos durante o processo de tratamento das águas cinzas nas ETEs pode também constituir outras fontes antrópicas de Ca e Mg. Embora, ainda não tenhamos apresentado os resultados finais com relação ao Braço do Bananal, podemos destacar aqui a presença de “seixos de brita” carbonáticas nos pacotes depositados no lago (Capítulo III, item 3.3.2.2), que estão claramente associados à fase de implantação do plano piloto e da construção do Noroeste, pois este são materiais usados por exemplo, na pavimentação e no concreto usado nas construções.

Figura 12: Resultados das extrações sequenciais de P, Ca e Mg, concentração em mg.kg^{-1} das frações F1 e F2 dos sedimentos coletados nos diferentes pontos do lago e em função da distância da ETE-SUL (estrela vermelha).



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, IA: intermediar, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

Da mesma forma, pode-se observar que teores de P e Zn estão mais altos nos sedimentos da E-SUL (estação de tratamento de esgoto sul) e a jusante. De acordo com resultados de composição total, os resultados de partição destacam concentrações pelo menos 5 vezes maiores em P nos sedimentos na frente da ETE-SUL que dos demais sedimentos encontrados no lago e nos córregos contribuintes.

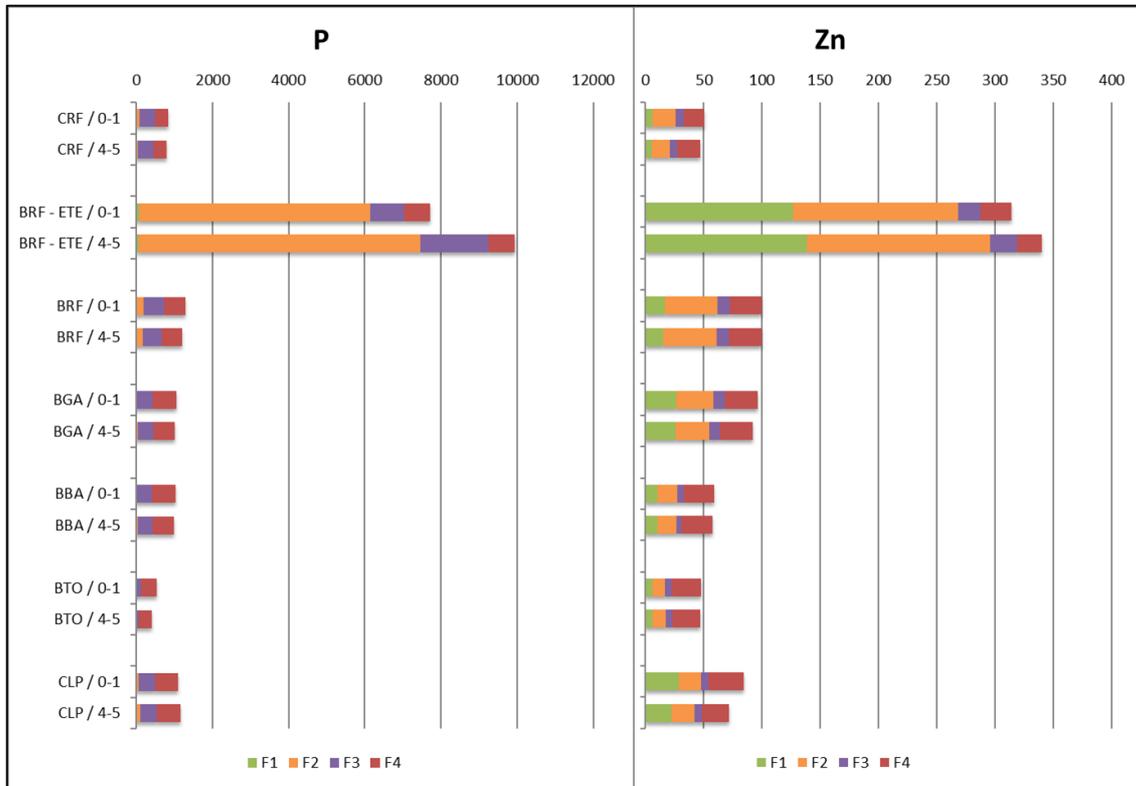
O BCR permite destacar que o P está principalmente associado a F2 e F3 e no caso do Zn na F1 e F2 (Fig. 4.13). As ESSeq destacam a anomalia em P e Zn nos sedimentos na frente da ETE-SUL e especialmente nas frações F2 e F3 (Fig. 4.13). Esses resultados estão de acordo com a natureza dos sedimentos (mais rico em Matéria Orgânica e nutrientes) em detrimento de materiais terrígenos. Demonstrando novamente que, apesar do tratamento do esgoto, ainda é lançado grandes quantidades de P no Lago Paranoá. A forte afinidade de P para os óxidos de ferro e do Zn para compostos orgânicos pode explicar estas partições. Essas duas anomalias estão bem localizadas e sugerem que além da contribuição em P e Zn, a ETE é fonte para os demais nutrientes, alterando assim, o ciclo dos elementos de maneira essencialmente local.

Os resultados da partição de Pb, Cu e V dos sedimentos mostram certa uniformidade em termo de composição e partição nos diferentes braços do Lago Paranoá (Fig.4.14). Podemos destacar a parte significativa de Pb associado à fração F2, os óxidos de Fe e Mn. Podemos destacar a maior contribuição de Cu na fração F3 dos sedimentos BRF-ETE. Este resultado pode ser explicado pela afinidade do Cu com a matéria orgânica.

Os resultados de análise de principal componente considerando elementos da primeira camada de sedimento (0-1cm) associados a F1 do BCR estão apresentados na figura 4.15. De acordo com a discussão da partição dos elementos nos sedimentos, a PCA dos resultados da fração F1 mostra:

- Agrupamento do teor em Al, Fe e As e posicionamento dos sedimentos CLP e BBA;
- Elementos como Mn, e Pb, Cu, Ti em posição intermediária;
- Agrupamento do Ca, Mg, P, Zn e V e posicionamento do sedimento BRF-ETE constituindo um polo antrópico (principalmente aporte pela ETE-SUL).

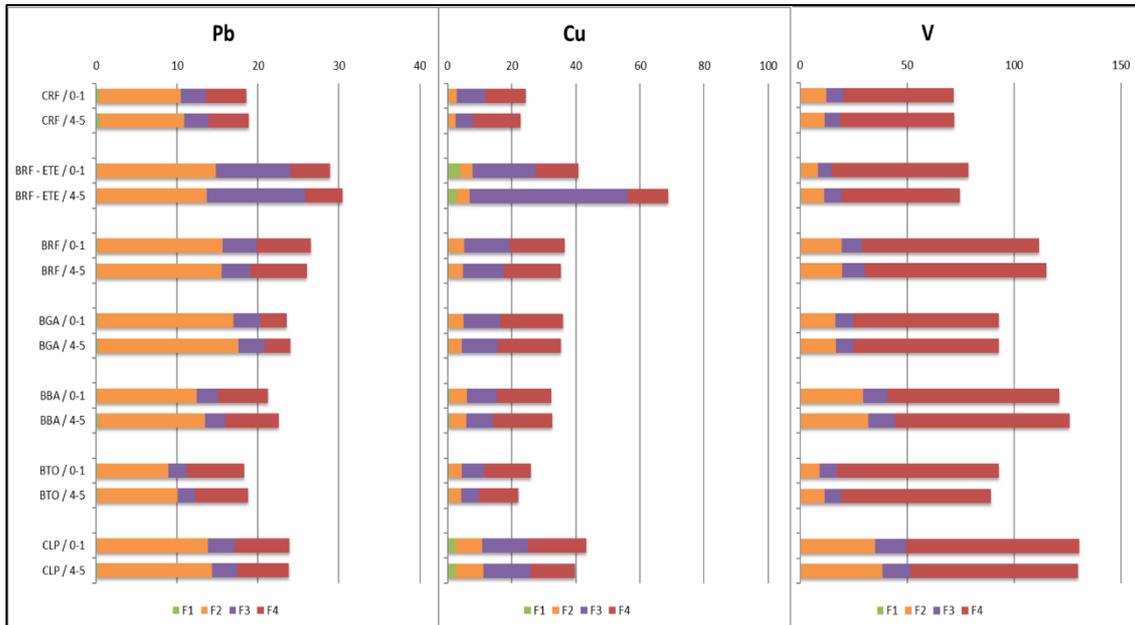
Figura 4.13: Resultados das extrações sequenciais de P e Zn, concentração em mg.kg⁻¹ das 4 frações (F1- verde, F2-laranja, F3-roxo e F4-vermelho) dos sedimentos coletados nos diferentes pontos do lago e em função da profundidade.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

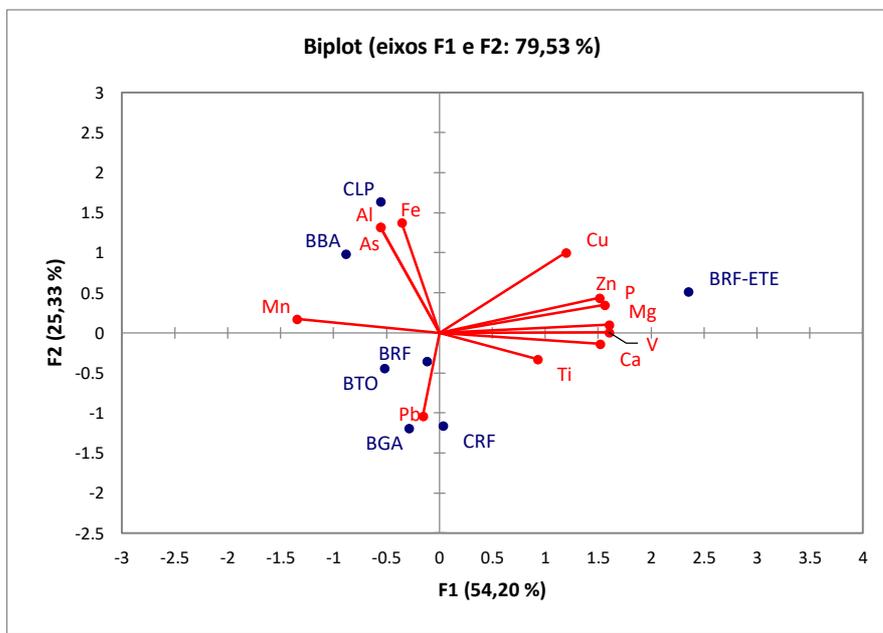
Figura 4.14: Resultados das extrações sequenciais de Pb, Cu e V, concentração em mg.kg⁻¹ das 4 frações (F1- verde, F2-laranja, F3-roxo e F4-vermelho) dos sedimentos coletados nos diferentes pontos do lago e em função da profundidade.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

Figura 4.15: PCA dos resultados da fração F1 dos sedimentos 0-1cm.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

4.3.3 Qualidade das águas e quantificação dos fluxos de elementos entre os sedimentos e a coluna de água do Lago Paranoá

Em vista de avaliar os fluxos de elementos entre as camadas de sedimento e a coluna de água, precisamos primeiramente determinar a composição química das águas do Lago Paranoá. O entendimento e quantificação dos elementos presentes no meio auxiliam no processo de gerenciamento das águas bem como no entendimento dos fluxos de elementos existentes. Assim, a determinação da qualidade das águas superficiais e dos presentes entre os sedimentos é uma etapa necessária.

4.3.3.1 Qualidade das Águas Superficiais

A composição química das águas superficiais coletadas na estação chuvosa e seca [(N>100) – número de amostras] foram analisadas para as amostras coletadas nos mesmo pontos dos sedimentos recentes (sedimento de fundo) e completado por outros pontos no lago (exemplo os pontos a jusante da ETE-SUL: BRF-iA e BRF-iB localizados entre BRF-ETE e BRF – Fig. 4.4) e pontos nos córregos da bacia do Lago Paranoá. A escolha dos novos pontos visou principalmente o entendimento das fontes de elementos dissolvido. As médias da concentração e os valores de máxima e mínima, dos elementos químicos das águas superficiais são apresentados em detalhes (Tab. 4.8).

Vale destacar que, a partir dos primeiros resultados obtidos sobre a concentração das águas superficiais (AS – 10-20 cm prof.) e profundas (AF – 20 cm a cima do fundo) de cada ponto de coleta, observou-se que não há diferença significativa (i.e.: coluna de água), sendo os resultados bem semelhantes, demonstrando que não há estratificação significativa na coluna d'água do lago, nesta faixa amostrada. Dessa forma, para este relatório, foram utilizados apenas as águas mais superficiais.

As concentrações de Si, K, Na, Ca, Mg e Gd, em frente a ETE-SUL, são maiores se comparados com os outros pontos de amostragem. Por exemplo, podemos observar os valores mais altos em Na (63 mg.L⁻¹) e K (18 mg.L⁻¹), dois elementos que segundo Singh (2005), são oriundos tanto de efluentes domésticos

quanto industriais, o que reforça a influência da ETE-SUL sobre as águas do Lago Paranoá, uma vez que esta região não apresenta atividades industriais importantes.

Os resultados foram comparados com os parâmetros presentes no Anexo XX da PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO Nº 5, DE 28 DE SETEMBRO DE 2017 onde se estabelece os padrões para potabilidade da água e com a RESOLUÇÃO CONAMA nº 357 de 17/03/2005, que estabelece os parâmetros para as águas de classe 2. As águas de classe 2 são destinadas ao abastecimento doméstico, após o tratamento convencional; proteção aquática; recreação de contato primário; à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas e criação natural e/ou intensa (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

Os dados possibilitaram identificar a influência das estações de tratamento de esgoto na bacia do Lago Paranoá a partir dos resultados de P e Gd, dois elementos que estão associados ao lançamento de esgoto e águas cinzas.

Tabela 4.8: Composição química das águas superficiais, com o valor médio, máximo e mínimo encontrado nas águas coletadas nos córregos da bacia e no Lago Paranoá:

		Si	K	Na	Ca	Mg	P	
		mg.L ⁻¹						
Córregos	Max.	4,2	4,5	21,4	27,2	2,1	0,2	
	Med.	2,6	1,3	5,0	8,6	0,8	0,0	
	Min.	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Lago	Max.	5,0	18,0	63,0	20,5	2,4	0,3	
	Med.	2,5	4,0	15,1	9,6	1,1	0,0	
	Min.	1,1	0,2	0,3	1,8	0,2	0,0	
Portaria de Consolidação nº 5, de 28/09/2017	Potabilidade	--	--	200	--	--	--	
	localização do valor max.	BRF-ETE					Frente ETE Norte	

Fonte: produzido pelos autores.

Tabela 4.8 (continuação): Composição química das águas superficiais, com o valor médio, máximo e mínimo encontrado nas águas coletadas nos córregos da bacia e no Lago Paranoá:

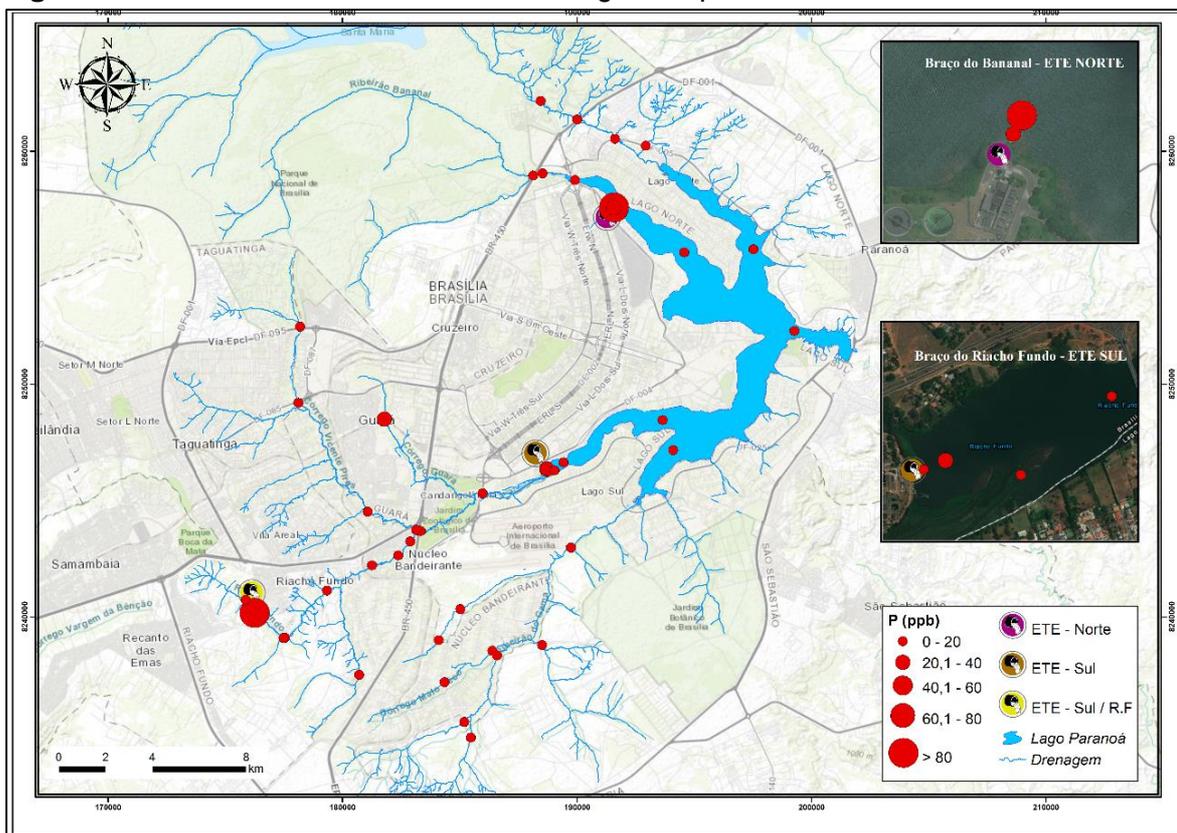
		Mn	Fe	Al	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Gd	Pb
		ug.L ⁻¹														
Córregos	Max.	44,37	7,48	38,30	2,13	0,72	0,20	2,88	38,04	15,43	0,53	131,72	4,94	0,02	0,03	0,04
	Med.	4,29	3,42	5,62	0,62	0,07	0,03	0,25	1,88	1,61	0,15	32,07	0,39	0,00	0,01	0,02
	Min.	0,01	1,19	0,18	0,01	0,01	0,00	0,02	0,09	0,05	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
Lago	Max.	296,51	284,20	79,44	1,22	0,20	0,78	2,43	2,83	16,18	0,46	94,97	0,56	0,01	1,01	0,45
	Med.	30,13	21,68	16,39	0,39	0,09	0,06	0,49	0,45	2,21	0,20	39,90	0,11	0,00	0,12	0,07
	Min.	0,01	0,06	0,82	0,02	0,02	0,00	0,05	0,09	0,22	0,09	6,10	0,02	0,00	0,00	0,00
Portaria de Consolidação nº 5, de 28/09/2017	Potabilidade	100	300	200	--	50	--	70	2000	5000	10	--	--	5	--	10
localização do valor max.	CLP	CLP	BRF-ETE e BRF	CRF	SI-CRF	CLP	SI-CRF	SI-CRF	CLP e SI-CRF	SI-CRF	SI-CRF	SI-CRF	SI-CRF	BRF-ETE	BRF-ETE	

CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: braço do Riacho fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, SI: setor Industrial, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores.

Por meio da distribuição das concentrações de P dissolvido das águas superficiais, figura 4.16, é nítido a influência da ETE Norte, ETE Sul e ETE do Riacho Fundo.

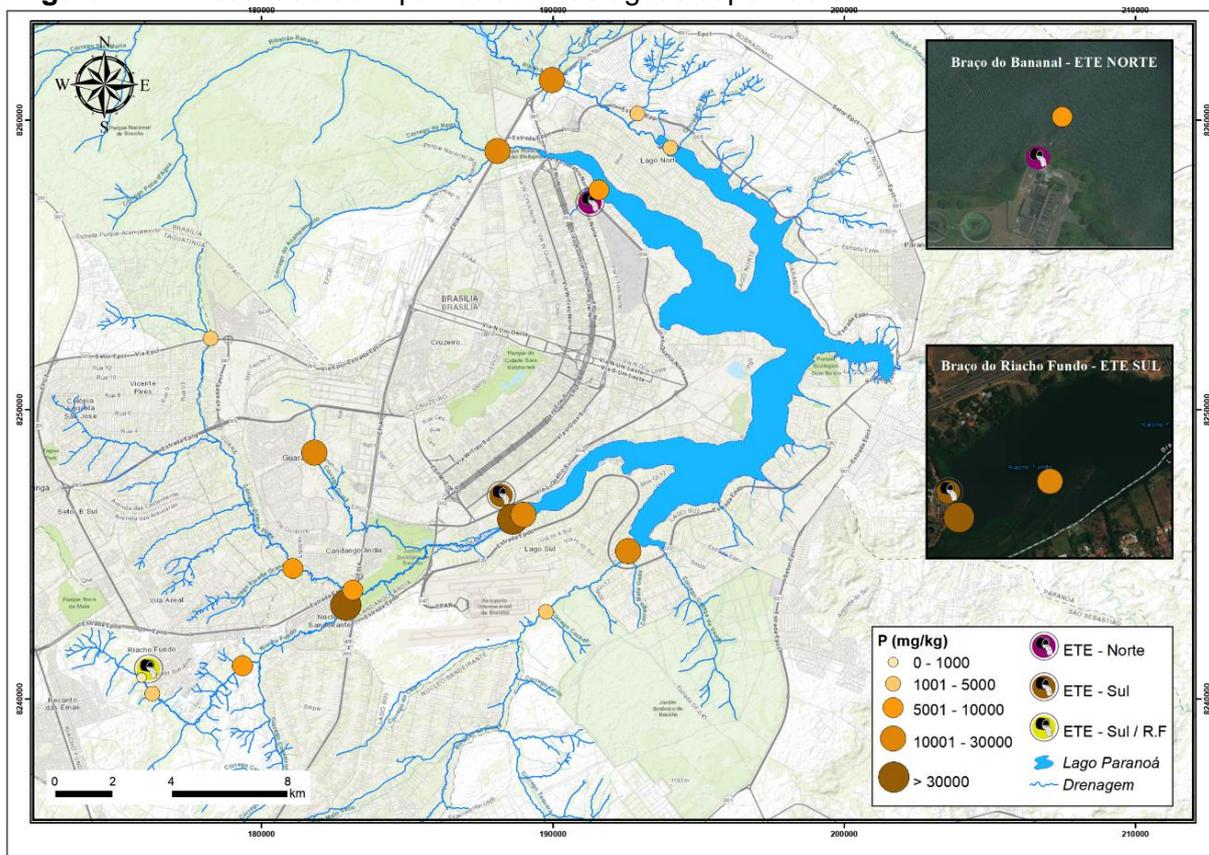
Figura 4.16: Resultado de P dissolvido nas águas superficiais.



Fonte: produzido pelos autores.

Considerando o P particulado (fig. 4.17) podemos observar um rápido aumento da concentração na sub-bacia do RF, assim como altas concentração nos 4 principais tributários do Lago Paranoá. Os resultados sugerem que o P lançado, provavelmente pelos esgotos clandestinos, é rapidamente adsorvido sobre partículas sólidas, tais como matéria orgânica. A forte afinidade do P para fases sólidas carregadas positivamente é bem conhecida (HOLTAN; KAMP-NIELSEN; STUANES, 1988; FERREIRA, 2003; BERBEL, 2008; SILVA, 2014

Figura 4.17: Resultado de P particulado nas águas superficiais.

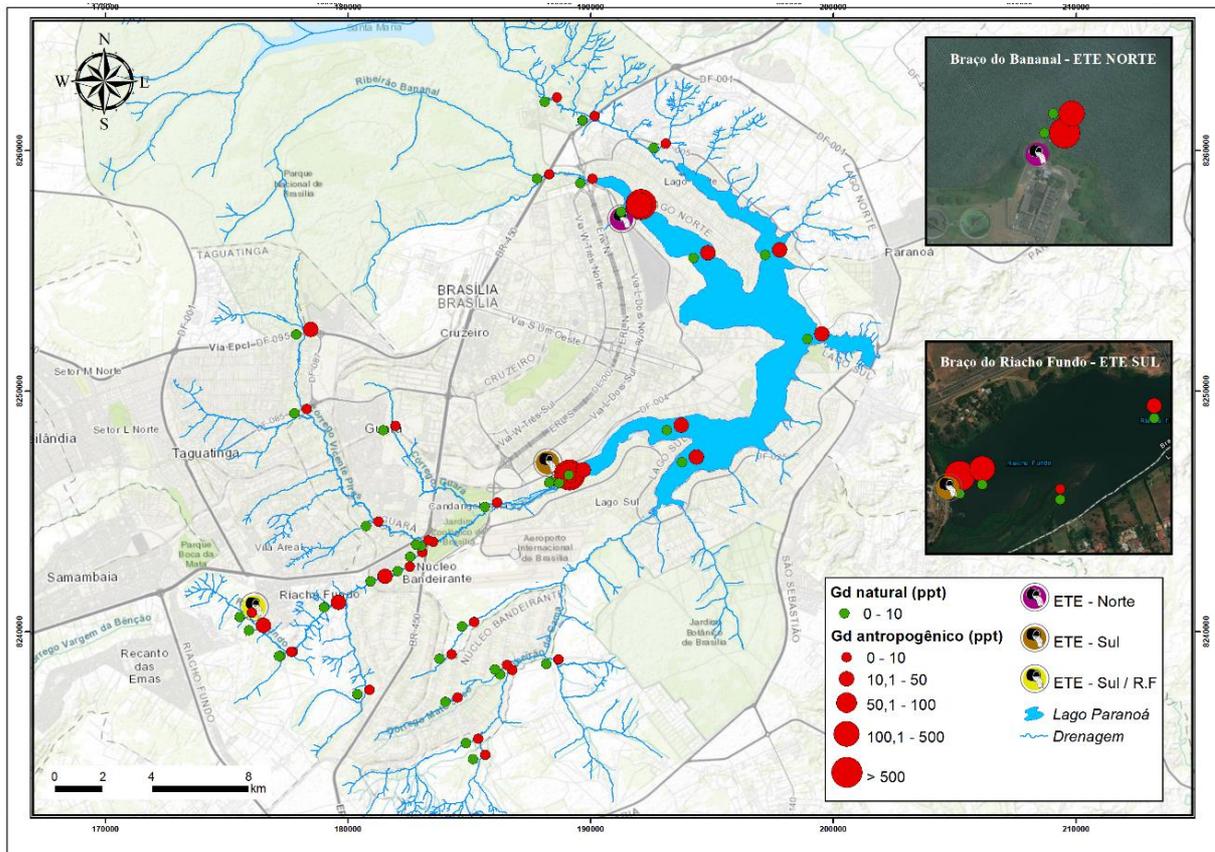


Fonte: produzido pelos autores.

Os resultados de Gd, figura 4.18, também convalidam os resultados apresentados de P, uma vez que demonstram a influência das duas ETEs presentes no Lago Paranoá. Para a análise foi realizada a exploração na concentração do Gd antropogênico corresponde às contribuições antrópicas desse elemento, descartando os valores naturais presentes no meio. Outros estudos já demonstraram a relação Gd antrópico, em águas superficiais, tendo como fonte os efluentes de estações de tratamento de esgoto (BAU; DULSKI, 1996; KNAPPE *et al.*, 2005; KULAKSIZ; BAU, 2007; RAJU *et al.*, 2010).

Segundo Tepe *et al.*, (2014) o Gd está associado a agentes de contraste utilizados em procedimentos de imagiologia de ressonância magnética e seu transporte se dá por meio emissão de efluentes hospitalares. Devido ao Gd dissolvido antropogênico ser estável e possuir meia-vida ambiental longa (KULAKSIZ e BAU, 2007), faz com que o mesmo não fique retido em ETEs.

Figura 4.18: Resultado de Gd nas águas superficiais

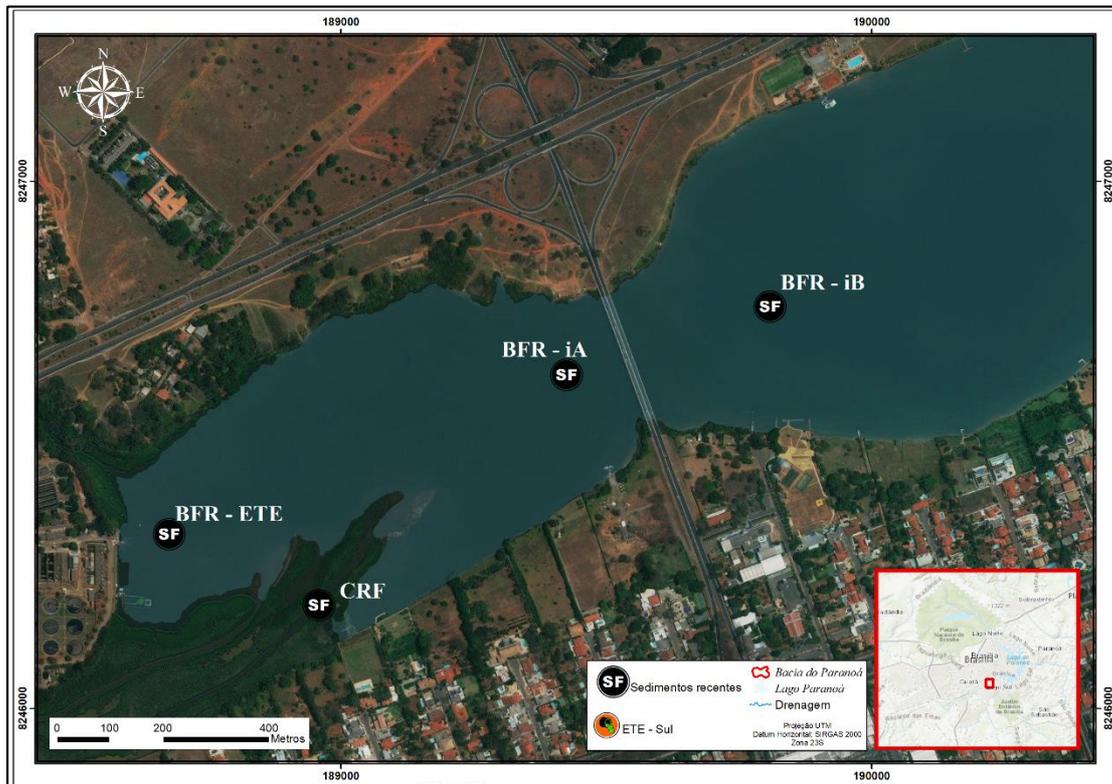


Fonte: produzido pelos autores.

4.3.3.2 Análise da sub-bacia do Riacho Fundo:

Para avaliar os efeitos ocasionados pela ETE-Sul sobre as águas do Lago Paranoá, um trabalho de detalhamento foi realizado comparando a composição das águas lançadas pelo córrego (CRF), na frente da ETE-SUL e as águas após da ponte das Garças (Fig. 4.19).

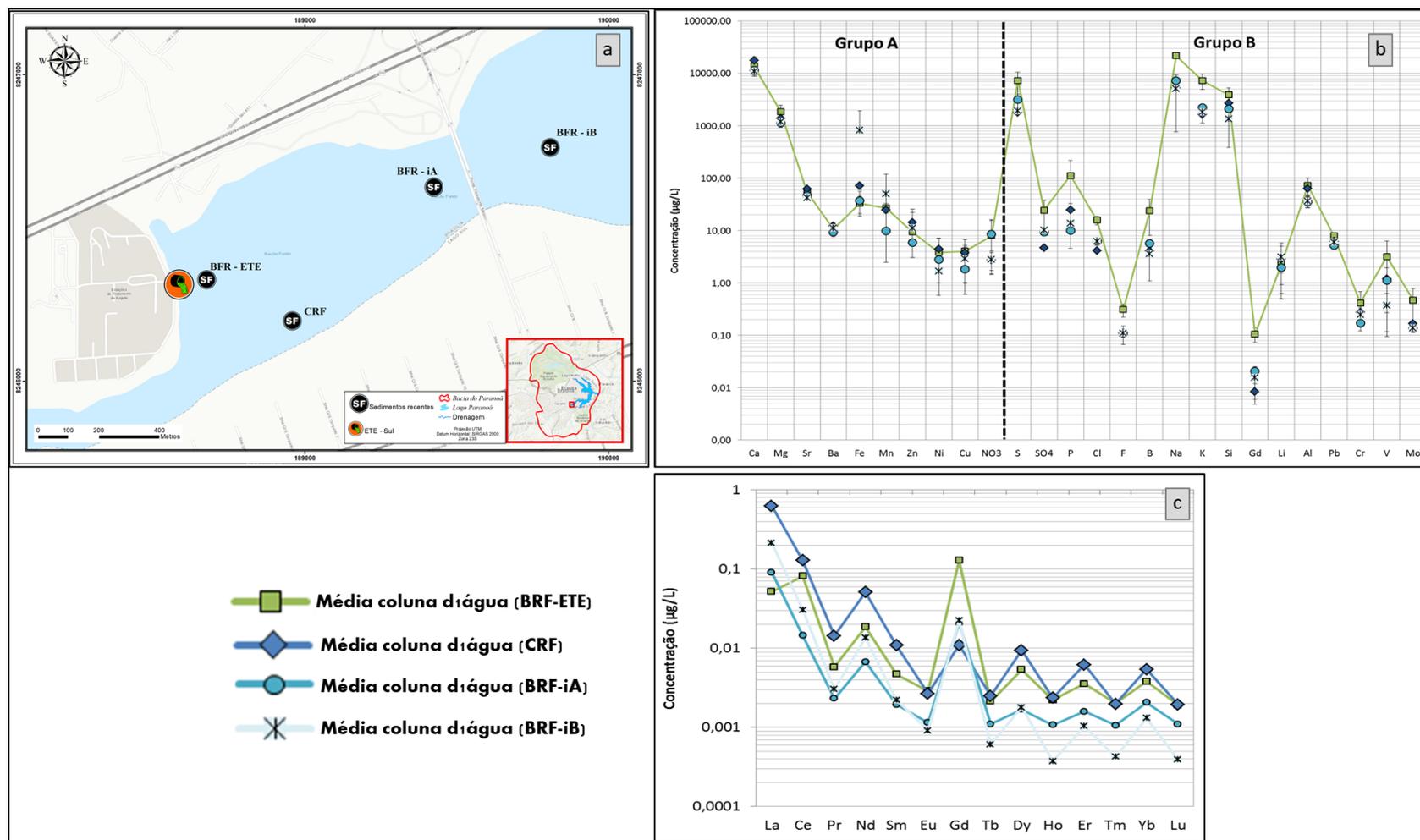
Figura 4.19: Detalhamento da sub-bacia do Riacho Fundo



Fonte: produzido pelos autores.

Nesta comparação entre os pontos foi possível separar os elementos nos grupo-A e grupo-B (Fig. 4.20b). A partir desses agrupamentos podemos observar que alguns elementos apresentam maior concentração, como os que caracterizam a contribuição da ETE-SUL no ponto BRF-ETE: nutrientes característicos de áreas de despejo de efluentes domésticos S, SO₄, P, Cl, F (Singh *et al.*, 2005; Vallejuelo *et al.*, 2014); o Na e K também são encontrados em efluentes domésticos e industriais (Singh, 2005). Já o Gd é encontrado em efluentes onde há o tratamento de águas residual provenientes de hospitais e fármacos (Bau *et al.*, 2006; Kulaksiz & Bau, 2011; Tepe *et al.*, 2014).

Figura 4.20 - Composição química das águas superficiais do braço do Riacho Fundo, a- mapa de amostragem, b- distribuição em escala logarítmica das concentrações, c- distribuição em escala logarítmica das concentrações dos elementos das terras raras.



Fonte: produzido pelos autores.

A variabilidade espacial da composição em elementos maior e traço das águas de superfícies do braço RF estão apresentadas na Figura 4.20b como exemplo de rastreamento das fontes dos elementos dissolvidos realizada no âmbito desse estudo. Foi possível verificar que a concentração das águas superficiais (AS) e mais profundas (AF) de cada ponto é bem semelhante, demonstrando que não há estratificação significativa na coluna d'água (Fig. 4.20b). Dessa forma, para as interpretações das concentrações foram utilizados os dados médios da coluna d'água (média da AS e AF).

As concentrações dos elementos da coluna d'água nos pontos CRF, BRF-iA e BRF-iB apresentam um comportamento muito parecido, gerando uma assinatura particular e, portanto, foram comparados com as concentrações do ponto BRF-ETE. Nesta comparação entre os pontos, foi possível dividir o comportamento dos elementos químicos em dois grupos, i.e. A e B (Fig. 4.20b). No grupo-A, é possível observar que a concentração dos elementos (Ca, Mg, Sr, Ba, Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, NO₃) no ponto BRF-ETE e CRF, BRF-iA e BRF-iB segue um comportamento parecido, com algumas exceções, como por exemplo, o Fe no ponto BRF-iB. No grupo-B é possível observar que as concentrações dos elementos (Na, K, Si, S ou SO₄, P, Cl, F, B, Gd, Li, Al, Pb, Cr, V, Mo) no ponto BRF-ETE, i.e. destacado pela linha verde, estão acima dos demais pontos. Esses agrupamentos permitiram observar que alguns elementos apresentam maior concentração no ponto BRF-ETE, caracterizando a contribuição da ETE-Sul no Braço e no lago de maneira mais geral.

Podemos separar os nutrientes característicos de áreas de despejo de efluentes domésticos S, SO₄, P, Cl, F (Singh *et al.*, 2005; Vallejuelo *et al.*, 2014). O Na e K também são encontrados em efluentes domésticos e industriais (Singh, 2005). Já o Gd é encontrado em efluentes onde há o tratamento de águas residuais provenientes de hospitais e fármacos (Bau *et al.*, 1996 e 2006; Kulaksiz & Bau, 2011; Franz *et al.*, 2013 e 2014; Tepe *et al.*, 2014). A presença do Gd se justifica devido ao fato de que a ETE-SUL receber o esgoto da região do Setor Hospitalar Sul. A Figura 4.20c, destaca as concentrações dos ETR (Elementos de Terras Raras) das águas superficiais (AS) do braço Riacho Fundo. As concentrações obtidas nesse projeto estão na mesma faixa de concentrações que observadas por Merschel *et al.*, (2015).

Na análise dos ETR podemos notar uma forte anomalia positiva de Gd nas águas superficiais, especialmente no ponto BRF-ETE e em importância menor em BRF-iA e BRF-iB. A principal fonte das anomalias de Gd antropogênicas em sistemas aquáticos são os agentes de contraste à base de Gd solúveis em água, como Gd (DTPA), que são utilizados em diagnósticos médicos em ressonância magnética (MRI) devido às propriedades paramagnéticas de Gd (III) íons.

Como os íons livres de Gd (III) são altamente tóxicos, o Gd deve primeiro ser complexado com fortes quelantes orgânicos (por exemplo, agentes quelantes de ácidos poliaminocarboxílicos) para ser considerado seguro para ser administrado a pacientes submetidos à ressonância magnética. Nos Estados Unidos, seu uso começou em torno de 1988, quando os agentes de contraste baseados em Gd foram introduzidos pela primeira vez no mercado. Os agentes de contraste são injetados na corrente sanguínea humana e excretados através dos rins. Devido à alta estabilidade destes compostos, eles passam facilmente através dos corpos humanos e, em seguida, através de plantas convencionais de tratamento de águas residuais, resultando em anomalias Gd positivas em sistemas aquáticos que recebem efluentes tratados (Bau *et al.*, 1996; Hatje *et al.*, 2016).

4.3.3.3 Águas Intersticiais

As águas intersticiais ao longo do perfil de sedimento de 25 a 50 cm dos 8 pontos de coleta de sedimento do Lago Paranoá são apresentados e comparados aos dados obtidas pela mesma equipe durante um estudo preliminar (Tab.4. 9).

A partir da análise dos agrupamentos das concentrações dos de elementos nos perfis (Fig. 4.21) é possível distinguir prováveis processos e fontes dos principais elementos. Os elementos do grupo-A possuem água intersticial enriquecidas com metais Fe, Mn, Cu e Zn. Além de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , que apresentaram alta correlação ($R^2 > 0,91$), para os pontos CRF, BRF-iA e BRF-iB. Isto indica que esses elementos estão fortemente associados e podem ser liberados conjuntamente pela dissolução de carbonato $[(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Sr}, \text{Ba})\text{CO}_3]$ e gesso (CaSO_4), seguindo a

acidificação das águas durante a diagênese precoce (Wang & Cappellen, 1996). Aqui vale destacar o uso de carbonatos no tratamento das ETE.

Tabela 4.9: Localização e períodos de coleta das águas intersticiais.

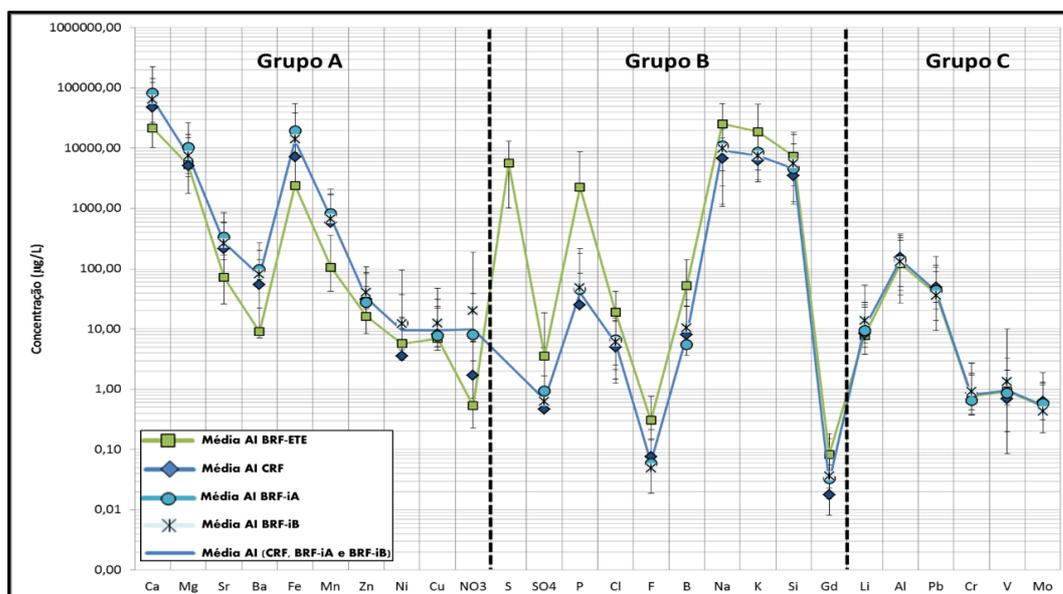
Amostras	A	B	C
CRF	2016*	fev/18	jul/18
BRF-ETE	2016*	fev/18	jul/18
BRF-iA	2016*	fev/18	jul/18
BRF-iB	Amostras coletadas nas últimas campanhas		jul/18
BRF			jul/18
BBA			jul/18
BTO			jul/18
BGA			jul/18
CLP			jul/18

* Os dados de 2016 são dados de literatura (Dias, 2017) com objetivo de complementar base de dados e verificar histórico e potenciais evoluções temporais.

CRF: Córrego do Riacho Fundo; **BRF:** Braço do Riacho Fundo, **ETE:** Estação de Tratamento de Esgoto, **BBA:** Braço do Bananal, **BGA,** Braço do Gama, **BTO:** braço do Torto, **CLP:** centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2 e 4.19).

Fonte: produzido pelos autores

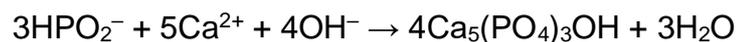
Figura 4.21 - Comparação das concentrações médias de água intersticial (AI) entre o grupo-A, grupo-B e grupo-C.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, iA e iB: pontos intermediários, (mapa fig. 4.19).

Fonte: produzido pelos autores

Na bacia hidrográfica, os carbonatos estão associados aos materiais de uso urbano e industrial e sugerem as diferentes fontes e distintos processos biogeoquímicos. Há uma concentração maior de Mg^{2+} se comparado com Ca^{2+} no BRF-ETE. A ausência de correlação entre o Ca^{2+} , Mg^{2+} no ponto BRF-ETE indica que o Mg^{2+} ou parte dele não vem da dissolução de carbonatos, e devido ao fato de haver correlação entre o Mg^{2+} e K^+ no BRF-ETE pode-se sugerir que eles são liberados junto a matéria orgânica. O excesso de Mg na zona da ETE-Sul, é relacionado a uso de carbonato de Ca rico em Mg usado para tratamento terciário de P (por precipitação de PO_4). Nas estações de tratamento de efluente doméstico, uma das técnicas usadas é a adição de cal nas águas residuais para precipitar os ortofosfatos principalmente na forma de hidroxiapatita $Ca_5(PO_4)_3OH$ com uma razão molar teórica de Ca/P de 1,67.



Durante a precipitação "natural" (precipitação de fosfatos sem adição de reagentes), os principais compostos fosfatos precipitados também são encontrados na forma de hidroxiapatita $Ca_5(OH)(PO_4)_3$, estruvita, $MgNH_4PO_4$ e vivianita $Fe_3(PO_4)_2$.

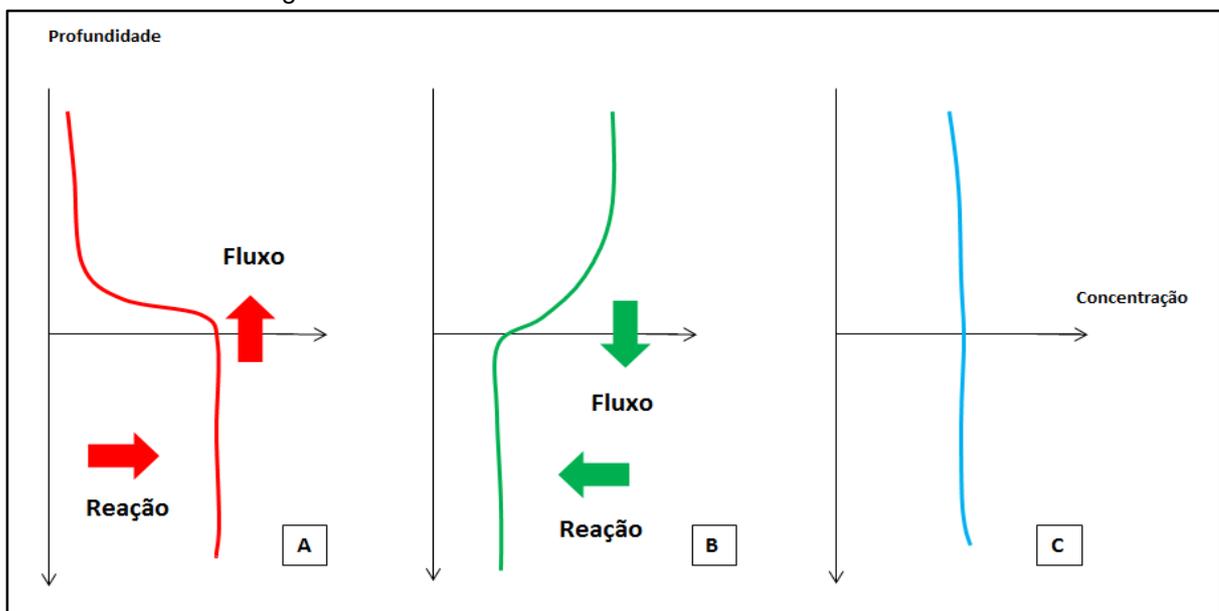
O grupo-B é enriquecido principalmente pelos elementos Na^+ , K^+ e Cl^- , que segundo Singh (2005) são encontrados em efluentes domésticos, sendo que o Mg^{2+} e K^+ tiveram boa correlação ($R^2 = 0,98$) para este grupamento. Também tiveram destaque os elementos P, S (total), SO_4^{2-} e NO_3^- , nutrientes que provavelmente não foram removidos pelos processos de tratamento do esgoto. O Gd também aparece em maior quantidade nesse grupamento. Estes elementos não tem uma correspondência com o material geológico natural da Bacia (solos e rochas) reforçando a sua relação com outra fonte, ou seja, associado ao tratamento dos efluentes.

Portanto, a partir da análise dos grupos, foi possível observar que as concentrações das águas intersticiais têm influências relacionadas a diferentes processos da diagênese precoce e existe diferença de comportamento entre os dois grupos analisados. A natureza do sedimento nesta área, os quais apresentam teores

maiores de compostos orgânicos, podem explicar as diferenças observadas. Os gradientes de concentração e assim os fluxos de elementos são, por consequência, diferentes entre os sedimentos na frente da ETE-Sul do restante do braço Riacho Fundo.

A análise mais detalhada de fluxo de elementos da água intersticial para coluna d'água foi feita a partir da análise dos gráficos dos perfis da profundidade (eixo y) *versus* concentração (eixo x), para os quatro pontos estudados (Fig.4. 22). O formato dos gráficos fornece informações sobre variação de concentrações ao longo do perfil. Dessa forma, nos perfis com concentração menor na água superficial e maior nas águas intersticiais aumentando com a profundidade é considerado que há fluxo ascendente do elemento da água intersticial para a coluna d'água (Fig. 4.22a) e inversamente quando a concentração é maior na coluna d'água e menor na água intersticial há fluxo descendente (Fig. 4.22b). Por fim, no caso que as concentrações são semelhantes não exista gradientes químicos, e conseqüentemente também não há fluxo (fig. 4.22c).

Figura 4.22 - Modelos de gráficos para interpretação do comportamento dos elementos químicos na interface sedimento - água.

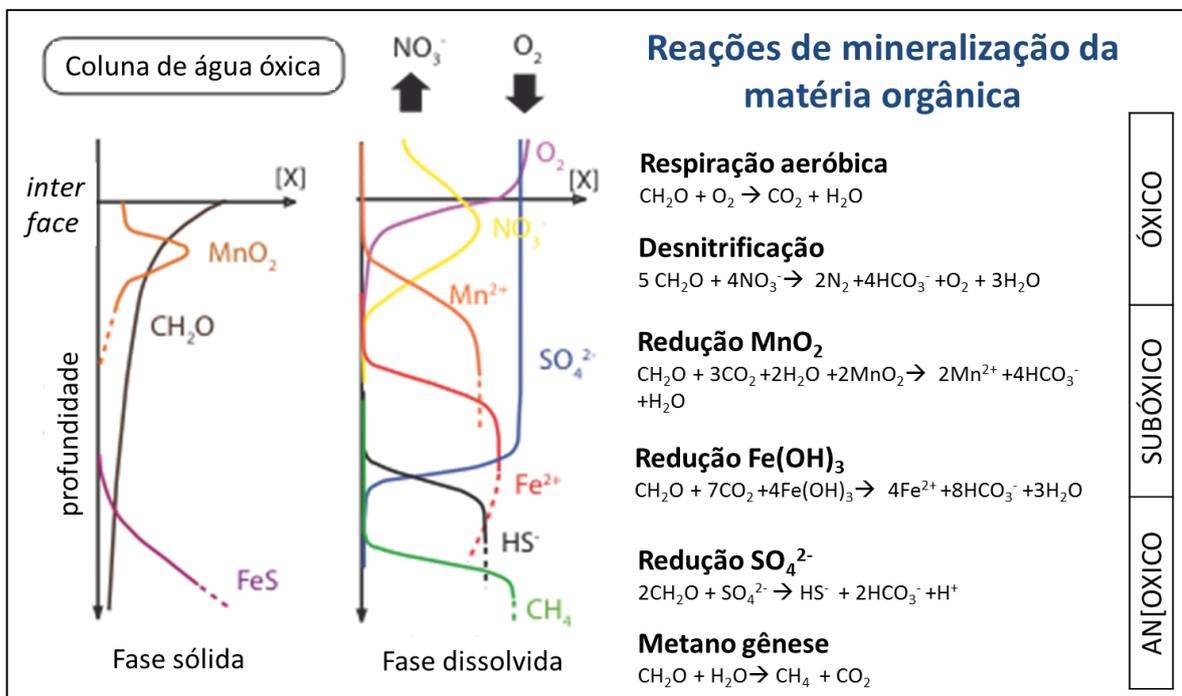


Fonte: produzido pelos autores

Vale aqui ressaltar que estas reações na interface sedimento-água são integradas no processo de diagênese precoce e bastante controlado pela disponibilidade de matéria orgânica e pelas atividades dos microrganismos.

Como apresentado na introdução, as reações associadas ao processo de diagênese precoce (Fig. 3.23) podem conduzir a criar forte gradientes de concentração de O_2 , NO_3^- , Mn^{2+} , Fe^{2+} e de SO_4^{2-} ao longo do perfil, nesse sentido o gráfico da distribuição desses elementos foi gerado para apresentação desses processos.

Figura 4. 23 – Processos de diagênese precoce.



Devido à complexidade constituindo por tantos resultados, vários gráficos (perfis de concentração, relação entre elementos, e ACP: Análise em componentes Principal) estão apresentados com intuito de destacar a dinâmicas de diversos elementos (nutrientes, maiores, metais, contaminantes emergentes).

Desta forma, analisando o processo de diagênese precoce que acontece nos sedimentos recentes, podemos organizar o entendimento dessas concentrações da seguinte forma:

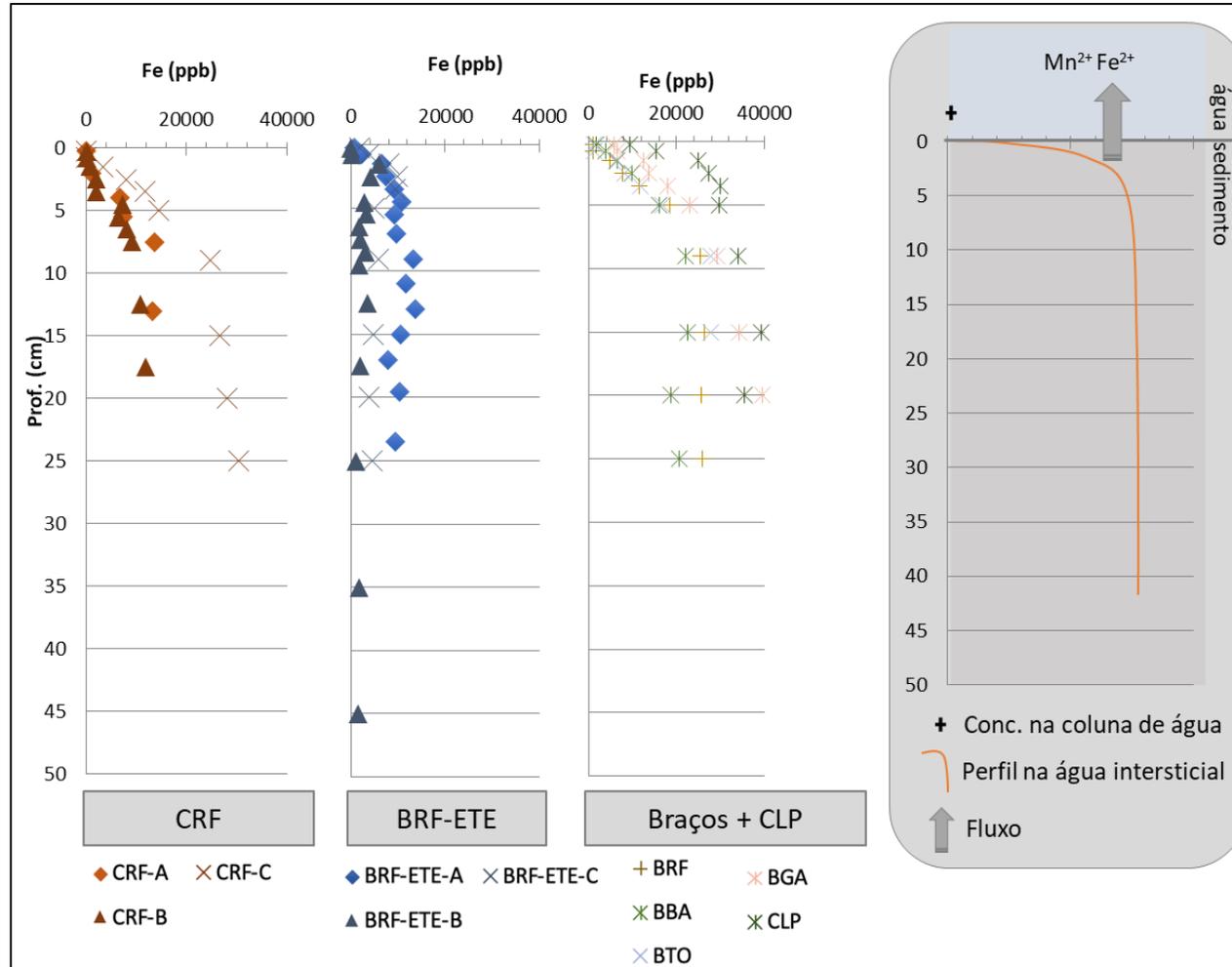
1. **Oxidação da matéria orgânica** com o consumo de O_2 (reação aeróbica). Esta reação conduz a consumo do oxigênio e assim a condições anóxicas (identificada por presença de Mn e Fe em solução). O início da degradação da matéria deve conduzir a liberação de uma parte dos elementos associados, nutrientes, mas também metais como demonstrado pelas extrações sequenciais. Esta reação não é ilustrada neste trabalho, entretanto, não haveria as reações seguintes se não houvesse essa primeira reação;
2. **Desnitrificação**. Essa parte da sequência de reações associadas a diagênese precoce é a menos visível, provavelmente devido às baixas concentrações de nitrato. Podemos destacar que perto da ETE Sul, onde as concentrações estão maiores, o gradiente de concentração entre a água superficial e intersticial demonstra fluxo descendente desse nutriente, conforme esperado nesta etapa e consumo dos nitratos nos sedimentos;
3. Dissolução **redutiva dos óxido-hidróxidos de Mn e depois de Fe** e a liberação de Mn e Fe em solução (Mn^{2+aq} e Fe^{2+aq}), no qual alguns metais associados podem ser liberados junto gerando gradiente de concentração e fluxos ascendentes (Fig. 4.24). As correlações entre Fe e Mn confirmaram o processo de dissolução de fases de oxi-hidróxidos de Fe e Mn medida pelos micro-organismos durante a diagênese precoce, lembrando que esses processos permitem que os micro-organismos obtenham energia para degradação das matérias orgânicas em ausência de oxigênio;
4. **Redução de SO_4** onde é possível observar um gradiente de concentração da água intersticial e coluna d'água num fluxo descendente associado ao consumo de sulfato no sedimento (Fig. 4.25). A relação de diminuição das concentrações em SO_4^{2-} associado a aumento da concentração em Fe^{2+} ilustra bem as condições cada vez mais redutor no sedimento e a sequência de redução dos óxidos de Mn depois de Fe e por fim de sulfato associado a diagênese precoce;
5. **Equilíbrio minerais-solução**: a **dissolução de carbonatos** não está destacada dentre as reações do modelo de diagênese precoce, entretanto pode ser aqui associada à diagênese precoce. Os carbonatos, i.e. matérias de construção tais como concreto, vão sofrer de dissolução depois a

sedimentação no lago. As reações minerais-soluções sendo mais avançada no sedimento, conduzem à dissolução dos carbonatos e liberação nas águas intersticiais de grande quantidade de Ca e Mg. Esta é uma etapa importante nas análises de fluxos de Ca e Mg no qual é possível observar um gradiente de concentração ascendente da água intersticial para a coluna d'água. Podemos observar nas figuras 26a e 26b que as concentrações em Ca (mas também em Mg) nas águas intersticiais são maiores nas águas intersticiais dos sedimentos do Riacho Fundo que nos outros braços do lago (CRF > BBA, BTO, BGA e CLP). Além disso, podemos observar na figura 21b relação entre Ca e Mg nas águas intersticiais ((tendência 1, $R^2=0,96$) que ilustra a dissolução de carbonatos nos sedimentos recentes do lago. Os pontos fugindo desta relação (tendência 2) correspondem às águas intersticiais do sedimento na frente da ETE Sul, aonde podemos observar um excesso em Mg se comparamos ao comportamento dos outros pontos de coleta. Esse excesso de Mg pode ser explicado por aporte de Mg pelo lançamento de efluentes da estação de tratamento de água rico em Ca, Mg.

6. **Caso do P:** a concentração na coluna de água é baixa, o que se espera devido ao rápido consumo do P pela biota. Comparando os resultados obtidos entre os diferentes pontos do lago analisados, verifica-se uma discrepância entre eles, com a ETE apresentando uma concentração superior nas águas superficiais ao dos outros locais (Fig. 4.27). Analisando a Figura 3.27 verifica-se que há um maior teor de fósforo na água intersticial do que na água superficial no caso do ponto da ETE, mas no caso das águas intersticiais dos sedimentos do Córrego do Riacho Fundo ou do centro do lago não há diferenças significativas de concentração. No caso das áreas na frente da ETE, ocorre um fluxo ascendente da água intersticial para a coluna d'água de modo que o sedimento funciona como fonte desse elemento. Para os demais pontos as concentrações nas águas intersticiais e superficiais sendo semelhante não há fluxo significativo de P. A maior concentração de P nos sedimentos na frente da ETE (seção 4.1.2, P sedimento da ETE > 7500 mg.kg⁻¹ quando nos demais sedimentos analisados < 1000 mg.kg⁻¹), acoplado com as condições redutores

dos sedimentos, explica este fluxo de P a partir dos sedimentos da ETE. Esse P pode ser liberado por fenômenos de dessorção ou a dissolução/degradação de fase portadoras de P, tais como óxidos e matéria orgânica. Vale destacar que nos sedimentos de todos os pontos analisados tem condições redutoras, as quais podem propiciar a maior disponibilidade e mobilidade do P. A área a jusante da ETE-Sul, encontra-se um sedimento pouco consolidado, muito orgânico e enriquecido em P, essas condições redutoras favorecem a liberação e mobilidade de P. O sedimento se comporta assim como fonte local de P, gerando localmente condições adversas à manutenção da qualidade das águas, principalmente em relação ao problema de eutrofização das águas.

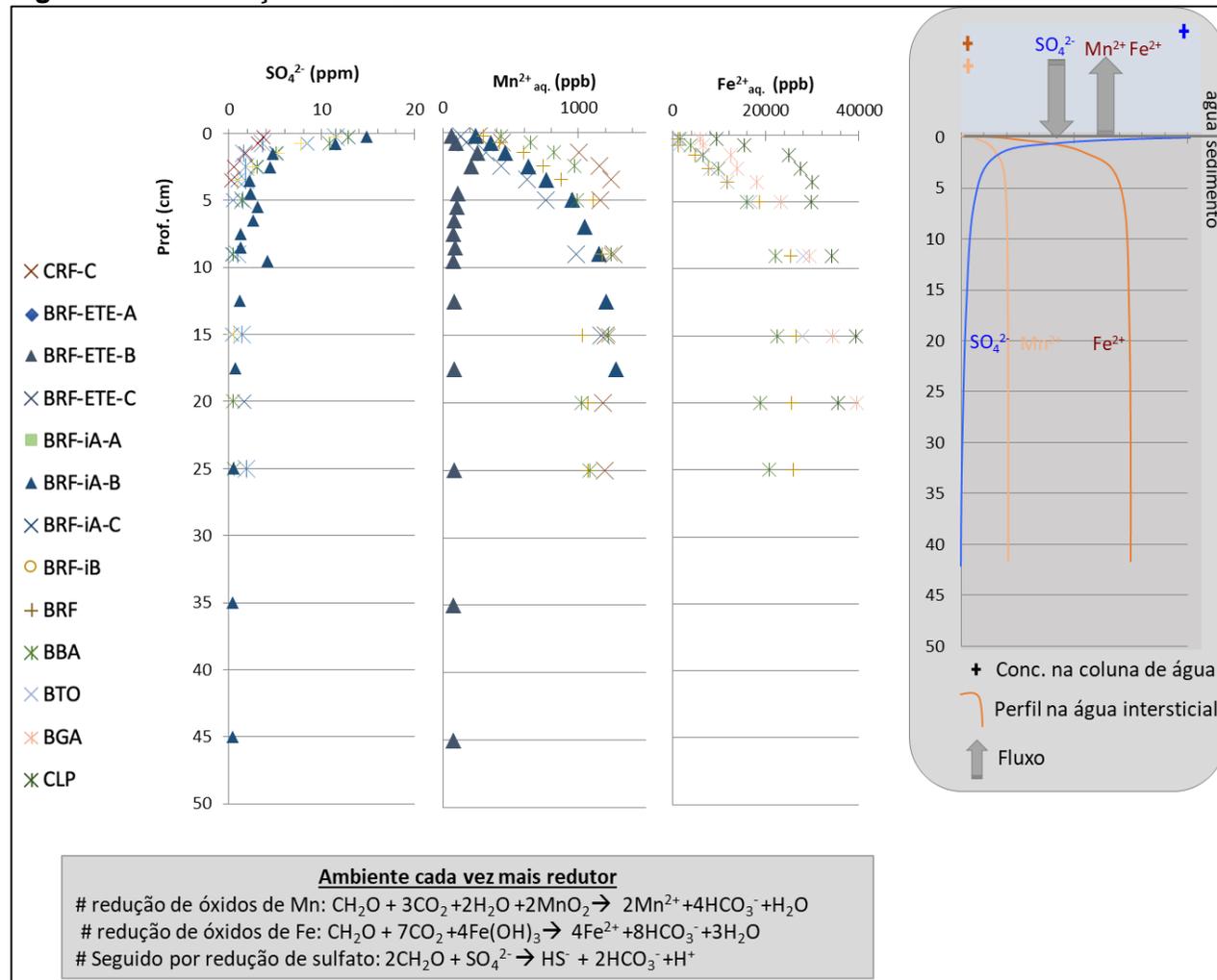
Figura 4.24 – dissolução redutiva dos oxido-hidróxidos de Mn e Fe no sedimento.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores

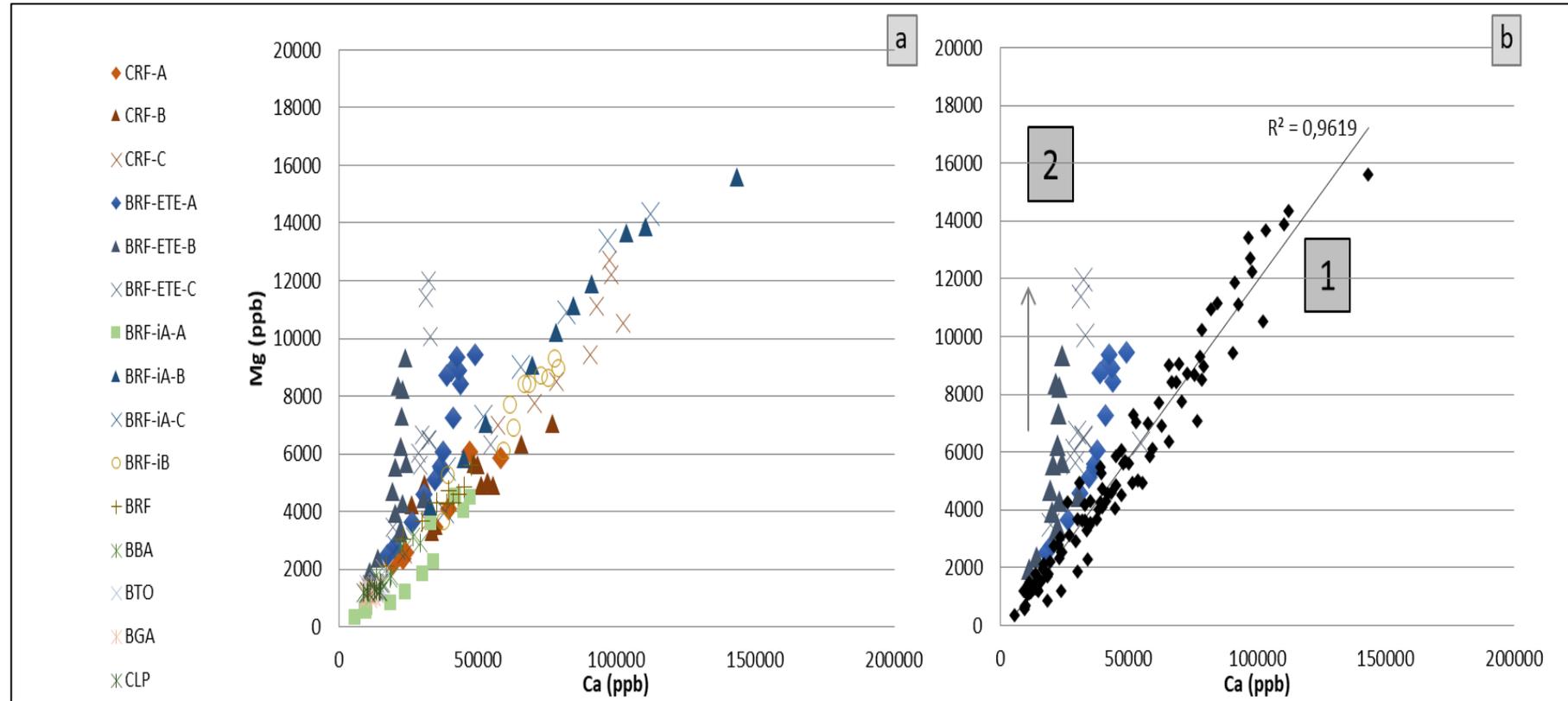
Figura 4.25 – Redução de SO₄ no sedimento.



CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores

Figura 4.26 – Relação Ca e Mg em ppb nas águas intersticiais



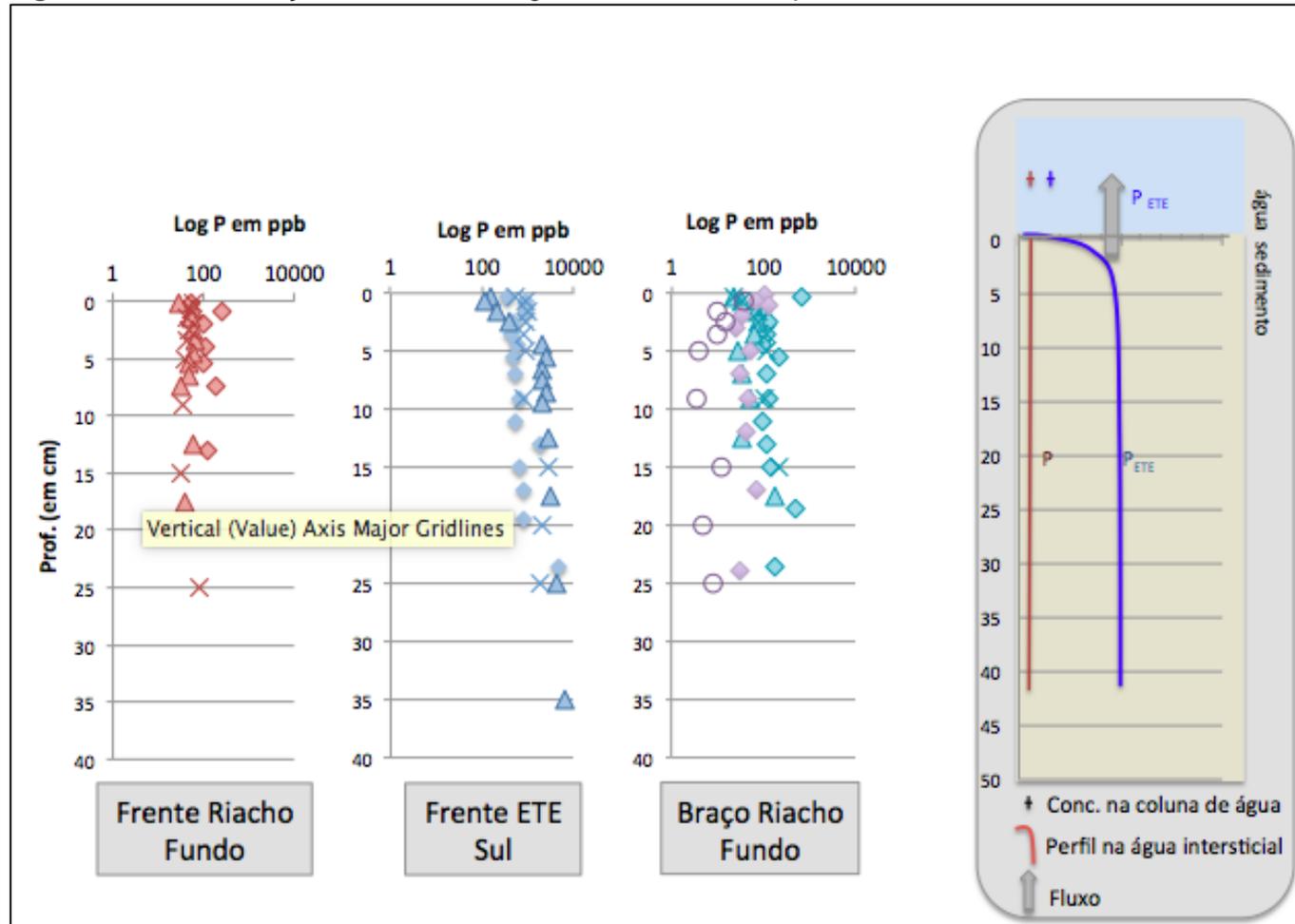
Legenda: (1) – Concreto $(Ca,Mg)CO_3 + CaSO_4 \leftrightarrow (Ca^{2+},Mg^{2+}) + 2 HCO_3^-$;

(2) - Mg em excesso no efluente da ETE Sul (uso de carbonatos rico em Mg).

CRF: Córrego do Riacho Fundo; BRF: Braço do Riacho Fundo, ETE: Estação de Tratamento de Esgoto, BBA: Braço do Bananal, BGA, Braço do Gama, BTO: braço do Torto, CLP: centro do Lago Paranoá, (mapa fig. 4.2).

Fonte: produzido pelos autores

Figura 4.27 – Distribuição do P entre as águas intersticiais e superficiais.



Fonte: produzido pelos autores

4.4 Conclusões e considerações finais

Os trabalhos realizados ao longo desse projeto sobre a qualidade dos sedimentos e águas da bacia do Lago Paranoá permitiram distinguir alterações no comportamento geoquímico destes materiais devido à mudança nos padrões de uso e ocupação do solo no tempo e no espaço. Destacando principalmente a influência do processo de urbanização (materiais de construção e efluentes domésticos clandestinos ou após tratamento) e de maneira mais suave as atividades agrícolas e industriais.

1.1 Fontes dos elementos na forma particulado e dissolvido

- O estudo constatou que os sedimentos que aportam o Lago Paranoá, em geral, são ricos, principalmente em, SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 constituintes básicos dos solos da bacia. Porém, esses elementos também são constituintes básicos dos materiais utilizados e remanejados na construção civil, como relatado nas conclusões do capítulo III. De certo que, o processo de urbanização foi responsável pela aceleração do processo de assoreamento do Lago Paranoá;
- A boa correlação entre Ca, Mg, Sr e Ba, na composição geoquímica dos sedimentos, demonstra que grande parte desses elementos estão associados a carbonatos de origem antrópica (calagem, materiais de construção, tratamento/remoção do P nas ETE) importados de outros locais para a bacia, uma vez que a geologia da bacia não contém rochas com estes materiais. Essa contribuição é particularmente visível no braço Riacho Fundo devido à forte urbanização da sua bacia e pela presença de duas ETE;
- A Bacia do Riacho Fundo pode ser vista como importante fonte de alguns contaminantes tais como nitratos, sulfatos, cloreto, sódio e potássio. O projeto demonstrou que teores de elementos tais como Cl, NO_3 , SO_4 , PO_4 , Zn estão intimamente relacionados ao tipo de fonte. Assim, estes elementos podem constituir indicadores de contaminação e na identificação das atividades antrópicas ou áreas associadas como fontes destes elementos;

- A ETE-Sul, mesmo possuindo tratamento em nível terciário ainda é a principal fonte de nutrientes e matéria orgânica nos sedimentos e água superficial que aportam o Lago. Além disso, em relação aos pontos estudados nesse trabalho, as águas superficiais próximas à ETE-Sul são mais ricas em Na, K, NO₃, Cl, P, SO₄, Mn, Pb, Cu, V. Esses elementos podem constituir indicadores da qualidade das águas e das alterações associadas à urbanização;
- Os sedimentos da área próxima a ETE-Sul também são fonte de elementos, na forma dissolvida, para as águas superficiais, com concentrações maiores de P, Fe e Zn, comparados com os provenientes do Riacho Fundo e dos efluentes líquido da ETE-Sul. Nas águas intersticiais dos sedimentos, os elementos mais representativos com relação à mobilização e fluxos dos sedimentos para a coluna d'água são P, Ca, Mg, Sr, Ba, Fe, Mn, Zn e Cu.

1.2 Qualidade do sedimento e seu papel sobre qualidade das águas:

- O estudo da composição química dos sedimentos superficiais (na parte mais central do lago) e dos perfis estratigráficos (das áreas assoreadas) destacou a existência de forte heterogeneidade da sedimentação espaço-temporal. Em linhas gerais, os perfis de sedimentos das áreas assoreadas são compostos por alternância de camadas e/ou lentes dominadas por areias (transporte e deposição) com sedimentos de granulometria mais finos e mais ricos em nutrientes (C, N e P). A presença desses elementos pode promover alterações na qualidade dos ecossistemas. Os sedimentos superficiais, da parte central Lago Paranoá, apresentam uma certa homogeneidade geoquímica. Entretanto, uma análise mais detalhada permite identificar claramente a influência da ETE-Sul como fonte material mais rico em nutrientes. É possível também identificar diferenças entre os sedimentos encontrados nos diferentes braços, refletindo a diferença das bacias de contribuição, seja no que diz respeito à quantidade de elementos disponíveis, seja no que diz respeito ao processo de assoreamento;

- No caso dos sedimentos próximos das ETE, foram encontrados teores em Zn ou Cr que podem ultrapassar valores estabelecidas por lei e serem considerados como potencialmente adversos ao equilíbrio e funcionamento biogeoquímico do Lago Paranoá. Os valores de Zn e em menor proporção de Cr acima dos valores de referência da Resolução Conama n. 454 de 11/2012 é um indicativo de que se deve continuar o monitoramento da qualidade dos sedimentos visto que, discussões sobre processos de desassoreamento são constantemente ventilados, porém sem a devida preocupação com a qualidade dos sedimentos depositados e como os mesmos podem interagir com a coluna d'água;
- A partir do estudo da partição dos elementos (Bureau Communautaire de Reference BCR), demonstra-se que:
 1. Existe uma fração significativa de P, Zn e Mn na forma potencialmente (bio)disponíveis nas águas intersticiais e/ou solubilizado na fração F1 dos sedimentos;
 2. Nos sedimentos do lago existe uma associação de metais (Cr, Mn, Cu, Zn e Pb) com os compostos orgânicos (F3) e os oxi-hidróxidos de Fe e Mn (F2). Vale destacar que reações de diagênese precoce podem conduzir à solubilização dessas fases e assim aumentar a mobilidade destes;
 3. Estes resultados reforçam a necessidade de se monitorar e discutir quaisquer ações que possam vir a serem feitas caso seja realmente necessário a movimentação/retirada dos sedimentos no fundo do Lago Paranoá. Nesta linha, devemos também destacar as camadas de sedimentos mais orgânicas apresentando altos teores de P (mais de 1000 mg.kg^{-1}).
- Por meio da análise das águas intersticiais dos sedimentos, refletindo as interações sedimento-coluna de água (processos de diagênese precoce), pode-se notar a existência de:

1. Desnitrificação nos sedimentos e assim redução de NO_3^- na forma dissolvido nos sedimentos;
2. Dissolução redutiva dos óxi-hidróxidos de Mn e Fe e liberação dos metais associados nas águas intersticiais dos sedimentos;
3. Sulfato redução nos sedimentos e assim redução de SO_4^{2-} na forma dissolvido nos sedimentos;
4. Liberação de P nas águas intersticiais dos sedimentos a jusante das estações de tratamento de efluentes domésticos;
5. Dissolução de carbonato (calcita/dolomita) e liberação de Ca e Mg nas águas intersticiais dos sedimentos;
6. Por fim, todas essas reações conduzem à formação de gradientes químicos nessa interface sedimento coluna de água e assim a fluxos de elementos da coluna de água para os sedimentos (tais como nitratos e sulfatos) e vice-versa (Tais como Fe, Mn, Ca e Mg).

Finalizando, devemos olhar para as áreas assoreadas com outros olhos. Talvez hoje estas regiões, que têm um comportamento de *wetlands* (áreas úmidas) tenham um papel fundamental na manutenção da qualidade do lago como vemos nas discussões do próximo capítulo. Não somente pelo soterramento de materiais potencialmente poluidores, mas também, pelo papel de filtro que este novo ecossistema pode exercer.

Perspectivas

A partir dos novos dados (análises mais detalhadas dos resultados de elementos maiores dos matérias em suspensão – MPS e dos ETR dos sedimentos e MPS) que estão sendo processados em conjunto com as informações descritas neste relatório e os precedentes espera-se aprimorar o entendimento sobre as fontes.

O presente relatório destacou existência de forte anomalia em elementos tais como P e Gd nas regiões próximas das ETEs. Estes resultados ressaltam a necessidade de um estudo mais aprofundado dos ciclos desses elementos na bacia do Lago Paranoá e como a especiação desses elementos ao longo de seus ciclos podem impactar o meio. Assim, espera-se que novos estudos sejam realizados para

aprimoramento do banco de informações para gestão dos recursos hídricos e também estudos mais detalhados sobre os impactos que as ETEs possuem sobre o Lago Paranoá e potencial impacto atual e futuro desses elementos no ecossistema.

CAPITULO IV
5. BALANÇO HÍDRICO DO LAGO PARANOÁ

Gilliard Nunes
Ricardo Tezini Minoti
Sergio Koide

5.1 Introdução

A determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá foi realizada a partir da integração entre a análise das sub-bacias afluentes ao Lago, incluindo a modelagem hidrológica dessas unidades hidrológicas com a utilização do modelo *Soil and Water Assessment Tool - SWAT* (Arnold *et al.*, 1998), e a análise específica do Lago.

A análise das sub-bacias afluentes resultou na geração do balanço hídrico de cada unidade. A aplicação do modelo SWAT exigiu o agrupamento de informações fisiográficas, climatológicas e hidrológicas em uma base de dados robusta, uma vez que seus módulos de cálculo simulam os processos ocorridos na bacia hidrográfica, gerando uma estimativa dos principais processos de movimentação da água na bacia hidrográfica. Os itens 4.2 e 4.3, apresentados na sequência deste documento, trazem a descrição do conjunto de dados que foi agrupado em uma base de dados e utilizado na modelagem das sub-bacias afluentes ao Lago Paranoá.

O SWAT é um modelo matemático capaz de realizar simulações de um variado conjunto de processos ocorrentes em uma bacia hidrográfica com o objetivo de diagnosticar ou prever os impactos das alterações sobre o escoamento superficial e subterrâneo, a produção de sedimentos e a qualidade da água em bacias que dispõem de dados monitorados ou, até mesmo, bacias não instrumentadas. Os principais componentes do modelo são: hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola. Uma descrição geral do modelo apresentada por Arnold *et al.* (2012b) será mostrada a seguir.

A aplicação do modelo SWAT a partir de interfaces que associam o modelo a softwares de geoprocessamento (ArcSWAT ou QSWAT) permite que a “bacia hidrográfica” seja delineada, compondo uma primeira unidade hidrológica que pode ser definida. Além disso, a utilização dessas interfaces permitem discretizar a bacia em outras duas unidades, as “sub-bacias”, segundo tipo de unidade hidrológica que o modelo permite criar, e as “Unidades de Resposta Hidrológica” (HRU’s – acrônimo utilizado na representação dos termos em inglês – *Hidrologic Response Units*), terceiro e último tipo de unidade hidrológica que pode ser formada no processo sequencial de discretização da bacia hidrográfica.

A sub-bacia é o primeiro nível de subdivisão da bacia hidrográfica, sendo formada a partir do encontro entre cursos d'água ou podendo ser criada a partir de pontos que sejam necessários para determinada análise ou estudo.

As HRU's correspondem a uma combinação única entre uso da terra, solos e declividade em todas as áreas da bacia hidrográfica, ou seja, as HRU's são as partes da bacia, ou uma sub-bacia, que possuem uma única combinação de uso da terra/solo/declividade. Um aspecto importante do modelo SWAT é que não existe interação entre as HRU's localizadas, por exemplo, em uma sub-bacia. Logo, se a interação entre duas áreas diferentes é importante para a análise realizada, em vez de adotar as áreas como HRU's, elas deverão ser definidas como sub-bacias.

A compreensão do processo de discretização das unidades do relevo, do delineamento da bacia hidrográfica, das sub-bacias e das HRU's com o uso do SWAT e suas interfaces é fundamental para o entendimento sobre como foram calculados os valores relacionados aos processos hidrológicos das sub-bacias afluentes ao Lago Paranoá.

O balanço hídrico é a força motriz que impulsiona a execução de todos os processos no SWAT porque influencia no crescimento da vegetação e no movimento dos sedimentos, nutrientes, pesticidas e patógenos. A simulação da bacia hidrológica é separada em fase terrestre, que controla a quantidade de água, e cargas de sedimentos, nutrientes e pesticidas para o canal principal em cada sub-bacia, e fase aquática, que é o movimento da água, sedimentos, etc., através da rede de canais (cursos d'água em geral, tais como canais interminentes, ribeirões, córregos, rios) até o exutório da bacia.

O clima, caracterizado no SWAT por um conjunto de variáveis (precipitação diária, temperaturas máxima e mínima, radiação, velocidade do vento e umidade relativa do ar), é o que impulsiona o ciclo hidrológico. Os dados climáticos são acessados por meio de arquivos dados de estações locais. Quando não existem dados disponíveis, o SWAT dispõe de um gerador de clima que permite construir a série de dados necessária para a simulação a partir de valores mensais regionais das variáveis. Como a bacia do Lago Paranoá dispõe de muitas estações climáticas, isso permitiu que os dados locais fossem adicionados.

De acordo com Arnold *et al.* (1998, 2012a), o SWAT possui 8 componentes principais: hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola.

A utilização do SWAT ao redor mundo se popularizou pela sua versatilidade e capacidade de simular diferentes componentes hidrológicos e de qualidade de água. Dentre as várias vertentes pesquisadas utilizando o modelo SWAT, destaques são a avaliação da poluição difusa, impacto do uso e gestão do solo na qualidade da água e avaliação do ciclo hidrológico.

No Brasil, o modelo SWAT tem sido amplamente utilizado na avaliação hidrológica e de qualidade das águas. Gassman *et al.* (2011) relatam que o primeiro estudo documentando uma aplicação do modelo SWAT ocorreu em 1999, e que até 2010 esse número já ultrapassava 70 estudos. Logo mais, Bressiani *et al.* (2015) atualizam esse número constando em sua revisão mais de 100 estudos aplicando o modelo SWAT no Brasil.

No Centro-Oeste do Brasil, o modelo SWAT vem sendo aplicado desde 2010 tendo se mostrado eficiente e robusto na descrição do ciclo hidrológico em bacias do Cerrado brasileiro. Vale destacar os trabalhos desenvolvidos exclusivamente em bacias do Distrito Federal, que a base de conhecimento para a aplicação do SWAT na região: Sarmiento (2010) na bacia do Lago Descoberto, Salles (2012) na bacia do Pipiripau, Monsalve-Herrera (2013) na bacia do Riacho Fundo, Ferrigo (2014) em bacias afluentes ao Reservatório Descoberto e Nunes (2016) em bacias afluentes ao Lago Paranoá. A realização desses trabalhos contribuiu para o estabelecimento do modelo SWAT como importante ferramenta para a caracterização das bacias hidrográficas, geração de séries hidrológicas, diagnóstico e avaliação dos impactos de fontes de poluição da água, geração de cenários futuros e definição de medidas como forma de suporte ao processo de tomada de decisão. No presente estudo, o SWAT foi utilizado, especificamente, para a simulação hidrológica quantitativa das sub-bacias afluentes ao Lago Paranoá, incluindo bacias urbanas não monitoradas.

5.2 Construção da base de dados

A base de dados necessária para a aplicação do modelo SWAT nas bacias afluentes ao Lago Paranoá constituiu-se do modelo digital de terreno, mapa de uso e ocupação do solo, dados climatológicos (precipitação, temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação diária) e mapa de solos, além dos dados observados de vazão relacionados às bacias monitoradas, utilizados na calibração de cada uma das bacias.

5.2.1 Modelo digital de elevação

O modelo digital de terreno (MDT) foi utilizado como dado de entrada para a interface do modelo SWAT com geoprocessamento utilizada no desenvolvimento do estudo. A utilização do MDT teve o objetivo de promover uma representação do relevo da bacia do Lago Paranoá, sendo possível calcular as declividades, estabelecer a convergência do escoamento superficial e o mapeamento da rede de drenagem.

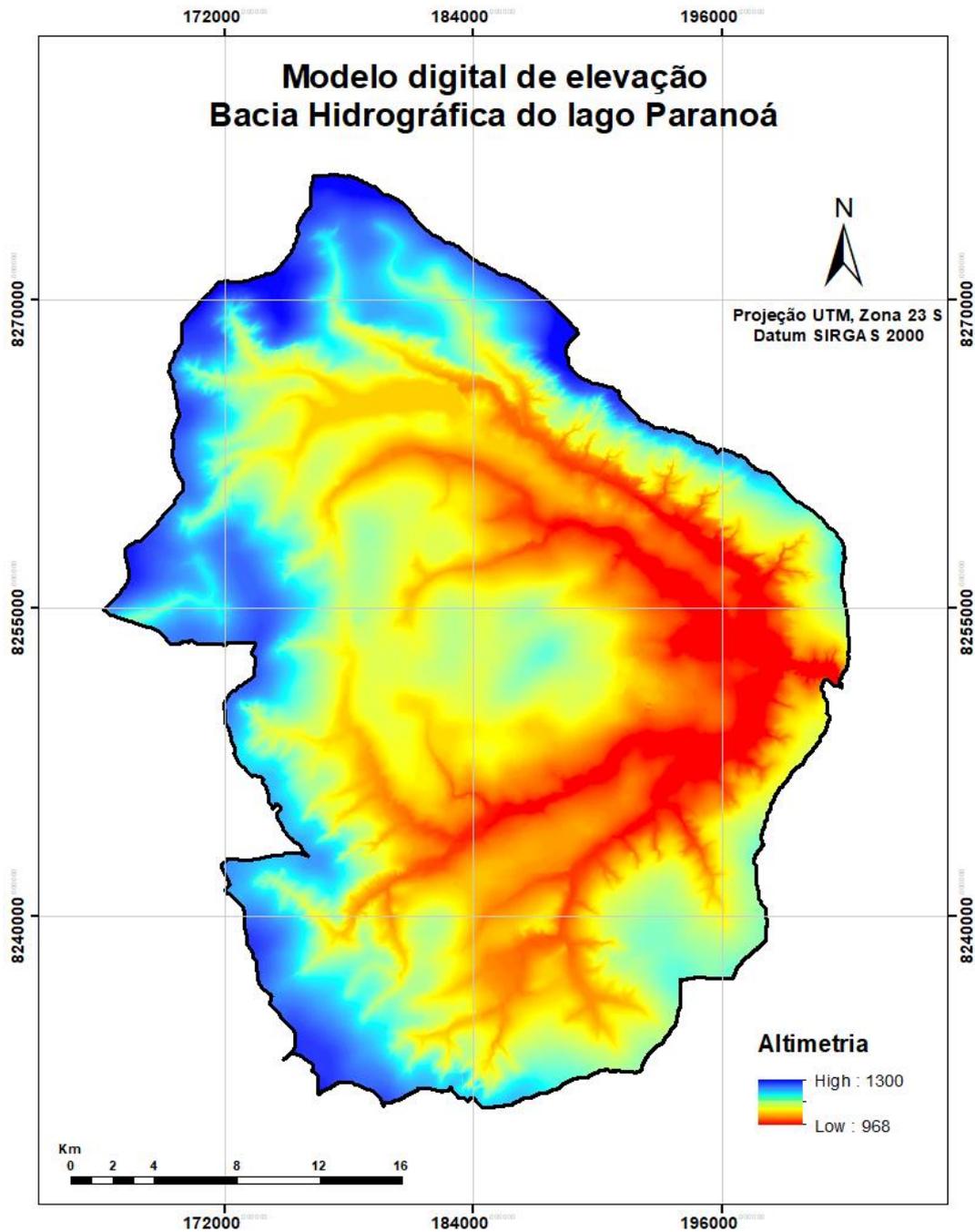
O MDT utilizado na modelagem (Figura 5.1) foi gerado a partir do levantamento topográfico do Distrito Federal realizado em 2009 com curvas de nível com equidistância 5 metros. O plano de informações contendo o levantamento topográfico foi obtido no Sistema de Informações Territoriais e Urbanas do Distrito Federal (SITURB), da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEDUH). Para o download dos dados, utilizou-se o visualizador do SITURB, o Geoportal, no seguinte endereço:

https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/static/shapes_download/CurvasdeNivelde5mde2009.zip.

5.2.2 Base cartográfica de solos.

A classificação da bacia do Lago Paranoá quanto ao tipo de solos, se deu em primeira etapa segundo a adotada pela EMBRAPA, através de uma atualização da base cartográfica da pedologia do Distrito Federal realizada por Reatto *et al.* (2004). Em seguida, foi realizada uma compatibilização entre a base de dados desenvolvida pela autora e a desenvolvida por Lima *et al.* (2013), que teve como objetivo a aplicação do modelo SWAT no bioma cerrado. Dessa maneira, a bacia do Lago Paranoá foi reclassificada como é apresentada na Figura 5.2.

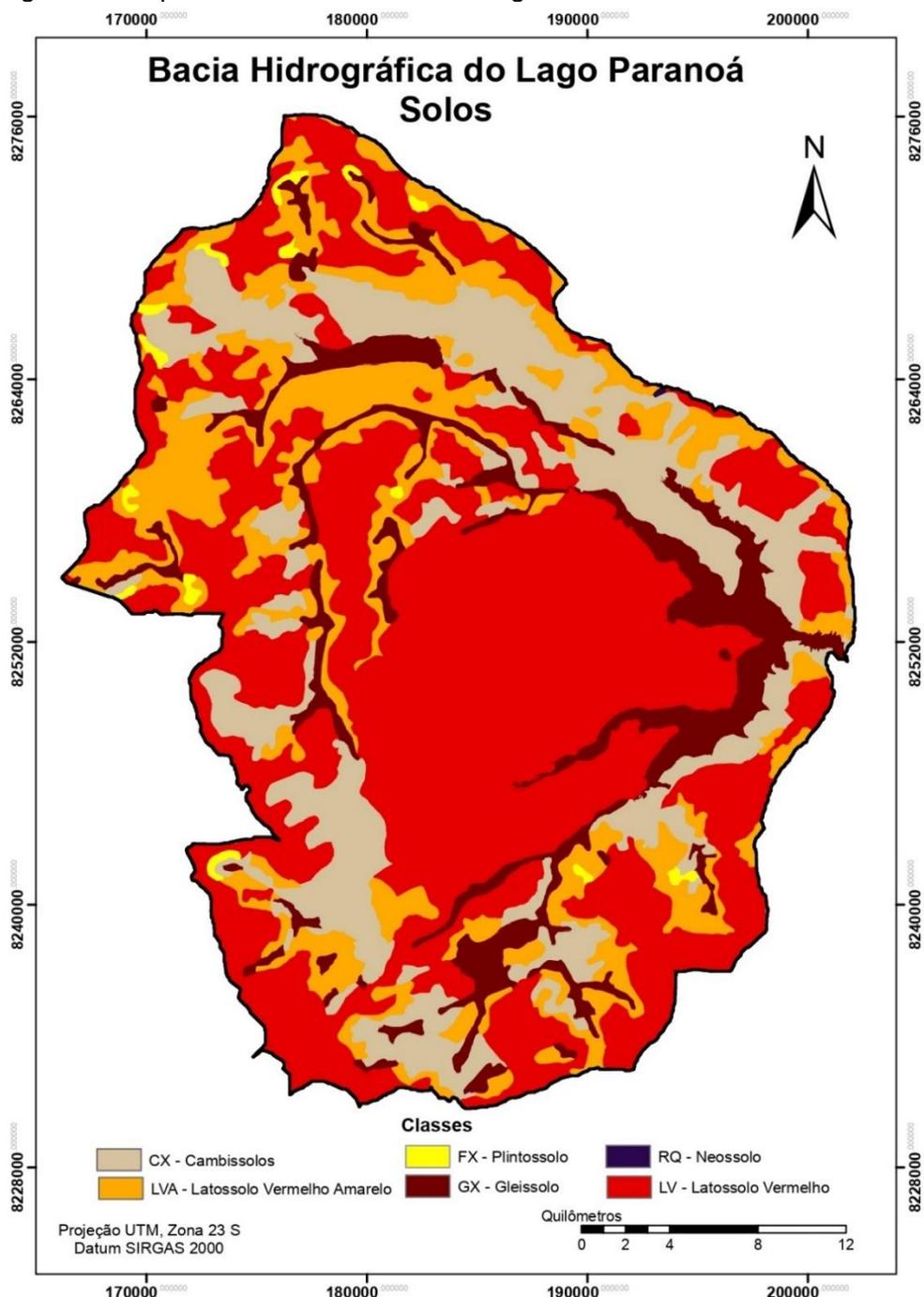
Figura 5.1 – Modelo digital de elevação, bacia hidrográfica do Lago Paranoá.



Fonte: produzido pelos autores a partir de GDF (2009).

Com a nova classificação adotada, a bacia do Lago Paranoá passa a contar com cerca seis tipos de solo, o latossolo vermelho (LV), o latossolo vermelho amarelo (LVA), o cambissolo (CX), o gleissolo (GX), plintossolo (FX) e o neossolo (RQ).

Figura 5.2: Tipos de Solos da bacia do Lago Paranoá.



Fonte: produzido pelos autores a partir de Reatto *et al.* (2004) e modificações de Lima *et al.* (2013).

O latossolo vermelho (LV) é o predominante e ocorre ao longo de toda a bacia do Lago Paranoá, ocupa cerca de 51% da área da bacia, em seguida com áreas aproximadamente semelhantes aparecem o latossolo vermelho amarelo (LVA) com aproximadamente 19% da área da bacia. São caracterizados com solos bem estruturados e com boa drenagem, no entanto, são susceptíveis à erosão quando sem cobertura.

Os cambissolos (CX), com aproximadamente 19% da área da bacia, se caracterizam pela ocupação de áreas mais elevadas e terrenos acidentados. De maneira diferente o gleissolo (GX), com cerca de 10% da área da bacia, possui características hidromórficas e está presente em geral em depressões e locais susceptíveis a inundação. Com as menores representações aparecem o plintossolo (FX) e o neossolo (RQ) que juntos não chegam a ocupar 1% da área da bacia.

5.2.3 Base cartográfica de uso e ocupação do solo.

Um levantamento prévio foi realizado para identificar mapeamentos de uso e ocupação do solo já realizados para o Distrito Federal, como resultados foram identificados alguns produtos elaborados em anos anteriores:

- Levantamentos de uso e ocupação do solo da bacia do Lago Paranoá foram realizados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB (2003) e durante a elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal – ZEE-DF (2012), ambos utilizando imagens do satélite Landsat TM 5, com resolução espacial de 30 m, seis bandas espectrais e uma banda termal. A área de abrangência da imagem é de 185 km² e a resolução temporal é de 16 dias.
- Outro levantamento de uso e ocupação do solo do Distrito Federal foi realizado pela empresa ECOPLAN, no ano de 2009, como um dos produtos do ZEE-DF (GDF, 2010). Esse mapeamento foi realizado a partir de imagens ALOS, sensores PRISM (*Panchromatic Remoting-Sensing Instrument for Stereo Mapping*); tal sensor é dotado de uma banda pancromática com resolução espacial de 2,5 m, AVNIR (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer*), bandas 1,2,3 e 4, com resolução espacial de 10 m.

Comparando-se as escalas dos mapas de uso e ocupação do solo gerados para o Distrito Federal, verificou-se o maior detalhamento das características de uso do solo no mapa elaborado em 2009 pela ECOPLAN. No entanto, tal mapa refere-se ao ano de 2009. Logo, fez-se necessária sua atualização e adequação ao padrão utilizado pelo modelo SWAT para que fosse integrado à base de dados utilizada no presente estudo.

O mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Lago Paranoá foi atualizado manualmente através da vetorização sobre imagens aéreas ortorretificadas do Distrito Federal, para o ano de 2013, obtidas junto a Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN), disponível no seguinte endereço:

<http://ortofoto.mapa.codeplan.df.gov.br/mapcache>

Por fim, a última etapa associada à preparação dos dados de entrada consistiu na compatibilização dos tipos de uso e ocupação do solo da base cartográfica gerada pela ECOPLAN com a tipologia dados disponíveis nas bases de dados do SWAT.

Os padrões tipológicos integrados ao banco de dados do modelo SWAT para o Distrito Federal foram atualizados por Ferrigo (2014). A tipologia foi dividida em 18 classes, as características de cada uma delas podem ser observadas na Tabela 5.1.

A base cartográfica de uso e ocupação do solo, desenvolvida segundo os critérios e métodos citados anteriormente, é apresentada na Figura 5.3.

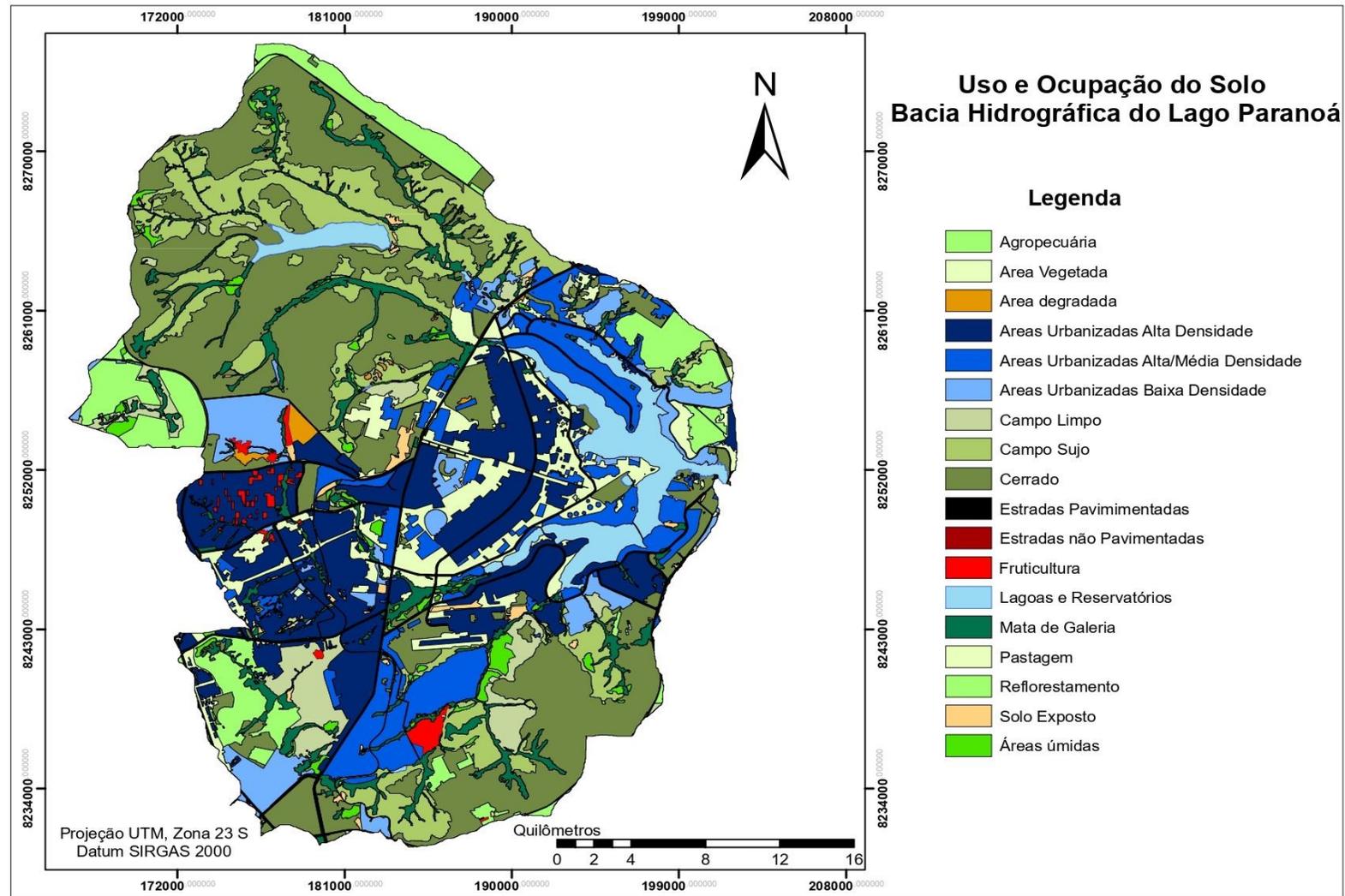
A classificação da bacia do Lago Paranoá foi realizada em 18 classes, o percentual de cada classe é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Tipologia de classes de uso e ocupação do solo integradas ao banco de dados do modelo SWAT.

Classe	Características
Áreas Urbanizadas Alta Densidade	Áreas de urbanização que apresentam mais de 70% de impermeabilização.
Áreas Urbanas de Alta/Média Densidade	Áreas de urbanização que apresentam entre 50 e 70% de impermeabilização.
Áreas Urbanizadas Baixa/Média Densidade	Áreas de urbanização que apresentam entre 30 e 50% de impermeabilização.
Áreas Urbanizadas Baixa Densidade	Áreas de urbanização que apresentam menos que 30% de impermeabilização.
Vias Pavimentadas	Rodovias e vias urbanas que apresentam sua superfície de rolamento com pavimento asfáltico ou de concreto.
Vias Não Pavimentadas	Rodovias, vias urbanas e vias rurais que não apresentam pavimento asfáltico ou de concreto.
Áreas Preservadas/Cerrado	Áreas de cerrado e cerrado, de vegetação nativa com predomínio de espécies arbustivas e herbáceas, e vegetação nativa de porte arbóreo apresentando dossel contínuo.
Reflorestamento	Áreas de plantio de árvores (silvicultura) com finalidade comercial ou de preservação, com espécies do gênero Eucaliptus
Fruticulturas	Área de cultura de plantas frutíferas, de ciclo perene
Mata de Galeria	Áreas de vegetação típica ao longo das linhas de drenagem, localizando-se geralmente nos fundos dos vales, não apresentando caducifolia durante a estação seca e que apresenta uma superposição das copas.
Campo Limpo	Áreas com vegetação predominantemente herbáceo-arbustiva, com arbustos e subarbustos esparsos e algumas árvores.
Áreas vegetadas	Áreas de vegetação com altura média do estrato arbóreo entre 10 e 30 m, apresentando uma superposição das copas de modo a fornecer cobertura arbórea de 60 a 100%.
Solo Exposto	Áreas com retirada total da cobertura vegetal, incluindo solos em pousio.
Pastagem	Áreas com vegetação predominantemente herbáceo e algumas árvores esparsas.
Áreas Degradadas	Áreas degradadas por intervenção antrópica. As cascalheiras são áreas de exploração de materiais de origem mineral
Lagos ou Reservatórios	Áreas que contêm permanentemente uma quantidade variável de água.
Áreas úmidas	Áreas predominadas por murundus (pequenas porções mais elevadas com espécies vegetais típicas do cerrado) e a porção rebaixada topograficamente, predominada por uma vegetação graminóide que sofre influência de inundações periódicas.

Fonte: produzido pelos autores.

Figura 5.3: Classificação da bacia do Lago Paranoá - Uso e Ocupação do Solo



Fonte: produzido pelos autores a partir de CODEPLAN (2013).

Tabela 5.2: Uso e Cobertura do Solo - Áreas e percentuais Fonte: produzido pelos autores.

Uso/Ocupação do Solo	Área (Km ²)	(%)
Campo Sujo	123,39	12,05
Campo Limpo	37,89	3,7
Cerrado	276,77	27,02
Áreas Degradadas	3,84	0,37
Solo Exposto	7,79	0,76
Pastagem	2,24	0,22
Áreas Umidas	15,36	1,5
Lagoas ou Reservatórios	46,68	4,55
Estradas Pavimentadas	23,19	2,26
Reflorestamento - Eucalipto	36,25	3,54
Agropecuária	34,96	3,41
Área Urbana de Baixa Densidade	48,23	4,71
Áreas Urbanas de Média/Baixa Densidade	87,85	8,57
Fruticultura	6,73	0,65
Áreas urbanas de Alta Densidade	146,69	14,32
Mata de Galeria	62,08	6,07
Área Vegetada	63,69	6,22
Estradas não Pavimentadas	0,84	0,08
TOTAL	1024,47	100,00

Fonte: produzido pelos autores.

5.2.4 Uso da água

A bacia do Lago Paranoá, frente aos variados usos e ocupações da terra, apresenta usos múltiplos das águas superficiais, consuntivos e não-consuntivos, tais como irrigação, abastecimento, fins industriais, geração de energia, navegação, lazer e proteção das comunidades aquáticas. A maior demanda da bacia é para o abastecimento humano.

A Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA) outorga uma vazão de aproximadamente $2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com destaque para a outorga da captação de água na sub-bacia do Torto/Santa Maria que é de aproximadamente $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Essa fonte abastece o Sistema produtor de água

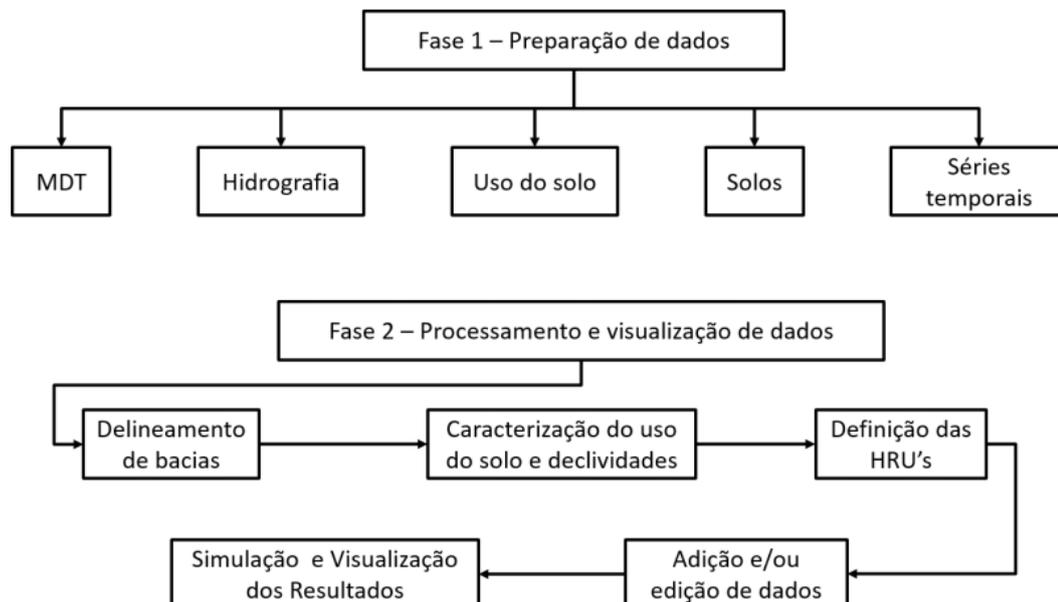
potável Santa Maria/Torto (GDF, 2012a). A CAESB possui, ainda, a autorização para a captação de água do Ribeirão Bananal ($0,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a $0,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e do Lago Paranoá com a previsão de captação de $2,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até 2020 e $2,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até 2040.

No que se refere às vazões outorgadas para abastecimento público, na bacia do Lago Paranoá sabe-se que há duas fontes selecionadas para o incremento na produção de abastecimento para abastecimento público.

5.3 Modelagem hidrológica das bacias afluentes ao Lago Paranoá

A modelagem hidrológica foi realizada com a utilização do modelo SWAT, através da interface QSWAT, plugin integrado ao software de gerenciamento de informações geográficas Quantum GIS (QGIS). Após a composição da base de dados, procedeu-se com a manipulação desses dados para a construção do modelo para as bacias do Lago Paranoá, como apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4: Fluxograma ilustrativo das etapas de modelagem no modelo SWAT. Fonte: produzido pelos autores.



Fonte: produzido pelos autores.

Após a modelagem inicial, realizada na interface ArcSWAT, foram realizadas as etapas de análises de sensibilidade, calibração e verificação das simulações de cada sub-bacia.

Com o desenvolvimento dos modelos conceituais para cada sub-bacia do lago foram efetuados ajustes dos parâmetros do modelo. Nas etapas de calibração, em que os parâmetros eram sistematicamente alterados e comparados aos dados monitorados de vazão e na etapa de verificação, quando se observa a capacidade do modelo na representação de um período para o qual não foi calibrado.

Os ajustes do modelo foram realizados utilizando o *SWAT-Cup* (Abbaspour *et al.*, 2007), uma interface que permite realizar de maneira automática estudos de análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo na modelagem hidrológica e de qualidade de água.

Para a calibração foi adotada como função objetivo o coeficiente de Nash-sutcliffe. Como avaliação de desempenho o PBIAS também integrado a análise e os resultados gerados foram avaliados conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Métricas para a avaliação do modelo hidrológico.

Performance	NSE	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,75 \leq NSE \leq 1$	$PBIAS \leq 10$
Bom	$0,65 \leq NSE \leq 0,75$	$10 \leq PBIAS \leq 15$
Satisfatório	$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	$15 \leq PBIAS \leq 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq 25$

Fonte: Produzido pelos autores, adaptado de Moriasi *et. al.* (2007).

Os modelos das sub-bacias foram calibrados no período 1982-2000, e verificado no período 2001-2010 e 2011-2017. Além disso, houve uma avaliação sobre todo o período modelado, desde 1982 até 2017, essa avaliação foi realizada para verificar o desempenho geral de cada modelo calibrado ao longo de toda a séries de dados.

5.3.1 Dados Meteorológicos e Hidrológicos.

Os dados climatológicos foram coletados da estação INMET Brasília, dela foram obtidos os dados diários de chuva, temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa, insolação e vento. O grupo composto pelo conjunto de dados citados foram utilizados como *inputs* do modelo SWAT. Além disso, dados de estações pluviométricas operadas pela CAESB foram adicionados ao banco de dados meteorológicos.

Os dados de evaporação de Tanque Classe A, foram obtidos a partir de diferentes fontes. No período entre 1982 e 2000 a base de dados foi alimentada pela Estação Meteorológica da Universidade de Brasília localizada na Estação Experimental da Biologia – Universidade de Brasília, as margens do Lago Paranoá, com coordenadas 191154,67m e 8258182.29m. Entre 2000 e 2017 dados de Evaporação de Tanque Classe A da estação agrometeorológica da Fazenda Agua Limpa, de coordenadas 185934,54m e 8234678,34m, da Universidade de Brasília foram utilizados.

Para a calibração do modelo, foram disponibilizados dados de vazão pela CAESB que possui estações de monitoramento nas sub-bacias de estudo. O monitoramento das vazões possui frequência diária e pode ser acessado no endereço <https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/>.

A CAESB também cedeu os dados de vazão das ETES e a CEB os dados referentes as vazões vertidas e/ou turbinadas, esses dados foram necessários a determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá. A escala temporal dos dados utilizados no estudo é mostrada a seguir na Tabela 5.4.

5.3.2 Áreas não monitoradas.

Em virtude da inexistência de dados monitorados em algumas regiões da bacia (Regiões Administrativas de Brasília, lago Norte, lago Sul e a vertente leste do Lago Paranoá), tornou-se necessária a adoção de medidas especiais para a estimativa das variáveis em análise.

Tabela 5.4: Escala temporal dos dados climáticos, hidrológicos utilizados.

Região monitorada/Operador	Variável monitorada	Período de dados
Bananal/CAESB	Vazão	1979-2017
Gama/CAESB	Vazão	1979-2017
Riacho Fundo/CAESB	Vazão	1979-2017
Torto/Santa Maria/CAESB	Vazão	1979-2017
Cabeça de Veado/CAESB	Vazão	1979-2017
ETEs Norte/Sul/CAESB	Vazão	1982-2017
Barragem Lago Paranoá/CEB	Vazão (vertida, turbinada)	1979-2017
BLP*/INMET	Precipitação	1979-2017
	Temperaturas (máxima, mínima)	
	Umidade relativa	
	Vento	
	Insolação	
BLP*/UnB	Evaporação TCA	1982-2000
BLP*/UnB-FAL	Evaporação TCA	2000-2017

*Bacia do Lago Paranoá

Fonte: produzido pelos autores.

A região composta pelas RA's citadas acima contribui em sua totalidade para o Lago Paranoá, dessa forma realizou-se a modelagem de uma microbacia dentro da área localizada sobre o plano piloto de Brasília que pudesse de melhor forma representar as características de toda a área. Como a região se caracteriza pela presença de áreas com altos percentuais de impermeabilização, procurou-se dentro dessa área uma região que pudesse representar tais características.

Após a seleção da bacia, foi realizada com o modelo SWAT a modelagem inicial e em seguida aplicados os parâmetros calibrados em outras sub-bacias. A utilização dos parâmetros calibrados em outras sub-bacias obedeceu ao critério de similaridade entre as características dominantes como uso do solo e declividades.

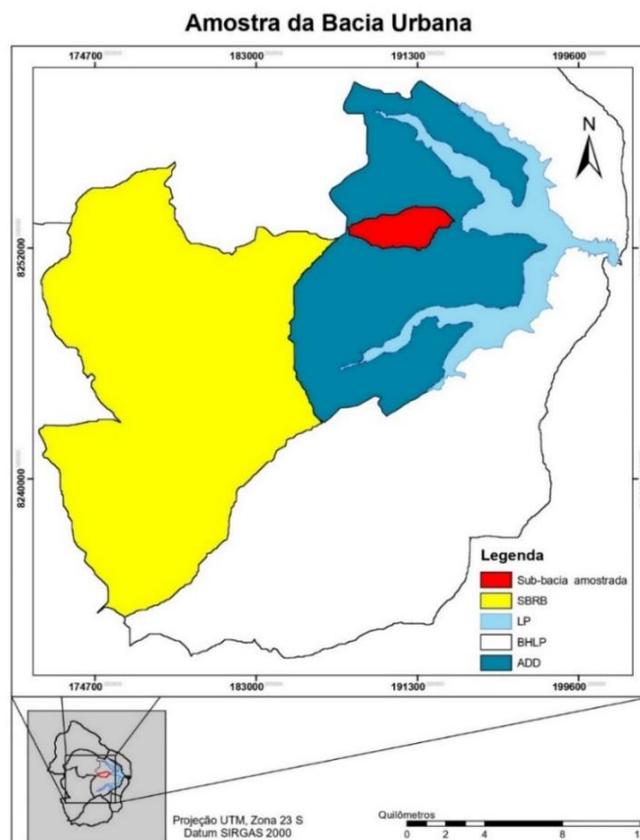
A utilização de parâmetros calibrados em uma sub-bacia para a simulação de outras foi também realizado por Ferrigo (2014) quando utilizou parâmetros calibrados na sub-bacia do Rio Descoberto e aplicou nas sub-bacias dos córregos Chapadinha, Olaria, Rodeador, Capão Comprido e no Ribeirão das Pedras, verificando em seu estudo a aplicabilidade de tal procedimento. De forma semelhante, a determinação das cargas de nutrientes da sub-bacia do Córrego Cabeça de Veado (SBCV), foram

estimados utilizando os parâmetros calibrados na sub-bacia Ribeirão do Gama (SBRG).

A determinação da contribuição oriunda da área de drenagem direta (ADD) correspondente a região do Plano Piloto de Brasília e dos Lagos Norte e Sul representou um desafio na confecção deste estudo. A estratégia adotada foi a de realizar a simulação de uma microbacia de contribuição direta ao lago utilizando os parâmetros calibrados na sub-bacia do Riacho Fundo e a partir dos resultados obtidos para esta microbacia determinar, através dos valores de vazões específicas e cargas específicas, a contribuição dessa região ao Lago Paranoá.

Para que isso fosse possível tomou-se como amostra uma microbacia com representatividade das principais características da Região composta pelo Plano Piloto de Brasília e pelos Lagos Norte e Sul. A Figura 5.5 evidencia a área retirada como amostra para a simulação.

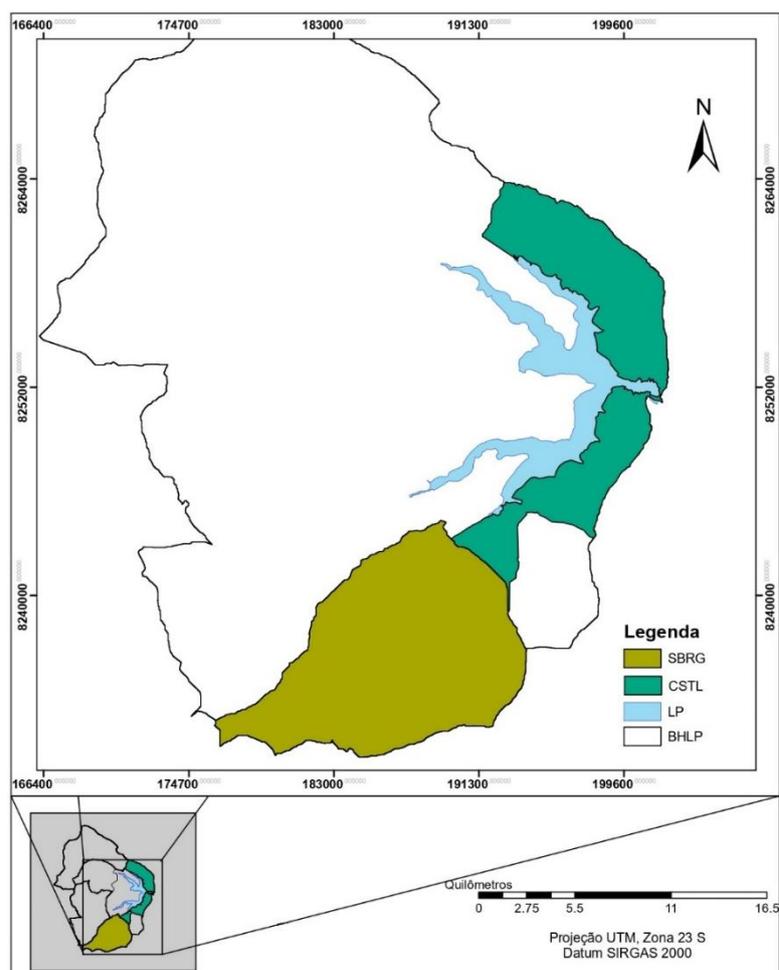
Figura 5.5: Localização da sub-bacia no Plano Piloto de Brasília, utilizada como amostra na modelagem e para a estimativa das variáveis estudadas. Fonte: produzido pelos autores.



Fonte: produzido pelos autores.

Para que toda a área da Bacia do Lago Paranoá estivesse incluída no estudo, mesmo as áreas de drenagem direta ao Lago Paranoá, foram aplicadas e estas áreas a extrapolação da vazão específica e cargas específicas oriundas da modelagem de bacias com características semelhantes, que para este caso foram declividades e tipos de uso e ocupação do solo. Dessa maneira, optou-se estimar a contribuição dessa área em função da vazão específica calculada pelo modelo SWAT para a sub-bacia do Ribeirão do Gama (SBRG). Os resultados fornecidos em função da área de contribuição (Figura 5.6) possibilitaram a estimativa da contribuição da vertente leste (CSTL) ao Lago Paranoá no que se refere as análises em destaque.

Figura 5.6: Localização da sub-bacia Ribeirão do Gama (SBRG), de onde foram utilizados os resultados de vazão específica para a estimativa da contribuição da vertente leste (CSTL) ao Lago Paranoá.



Fonte: produzido pelos autores.

5.4 Balanço Hídrico

Realizada a modelagem das sub-bacias do Lago Paranoá, efetuou-se a interpretação e análise da estimativa média gerada pelo modelo SWAT para as variáveis que compõem o ciclo hidrológico de cada sub-bacia. Com a realização dessas análises a etapa seguinte configura a determinação do balanço hídrico da bacia do Lago Paranoá. Para que isso fosse realizado foram consideradas as devidas entradas e saídas do sistema, o Lago Paranoá. O balanço hídrico foi então calculado utilizando da equação da continuidade:

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} + Q_{entrada(t)} - Q_{saida(t)} - E_{reservatorio(t)} + PPT_{direta(t)}$$

Em que $S_{(t+1)}$ é o armazenamento período $t + 1$ a ser determinado, $S_{(t)}$ é o armazenamento do período t , $Q_{entrada(t)}$ é a vazão afluyente no reservatório no período t , $Q_{saida(t)}$ é a vazão efluente no período t , $E_{reservatorio(t)}$ é a evaporação da área superficial do espelho d'água no período t e $PPT_{direta(t)}$ é a precipitação direta no espelho d'água no reservatório no período t .

Os dados utilizados para a determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá foram:

- Vazões mensais das sub-bacias fornecidas através da modelagem com SWAT;
- Vazões mensais das áreas de drenagem direta (Área de drenagem direta - Plano Piloto, Lago Norte, Lago Sul; Vertente leste), estimadas indiretamente a partir da extrapolação da vazão por unidade de área a partir dos resultados da modelagem com SWAT em bacias de características semelhantes;
- Precipitação direta fornecidas através dos dados coletados na estação INMET Brasília;
- Vazões mensais de lançamento de efluentes tratados das ETEs Brasília Norte e Sul;
- Batimetria do Lago Paranoá.

As vazões de saída utilizadas para a determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá são:

- Vazões mensais de defluência na barragem do Lago Paranoá por vertimento ou turbinamento;
- Evaporação direta do espelho d'água dada a partir dos dados coletados nas estações climatológicas da UnB (Estação Experimental da Biologia e Fazenda Água Limpa).

5.5 Balanço hídrico quantitativo a partir de cenários formulados

A finalização do trabalho relacionado ao balanço hídrico do Lago Paranoá foi realizada com a proposição de possíveis cenários futuros, uma situação hipotética, a fim de contribuir com o planejamento de uso dos recursos hídricos no desenvolvimento de ações preventivas.

A formulação dos cenários foi baseada na adição de possíveis alterações futuras que possam ocorrer nas áreas das sub-bacias afluentes ao Lago Paranoá, nas áreas de drenagem direta, alterações climáticas e alterações nos usos do próprio Lago. A simulação das alterações propostas para a construção dos cenários foi possível, apenas, em função de o trabalho ter sido realizado a partir da digitalização do uso e ocupação da terra e da modelagem das sub-bacias afluentes ao Lago.

Em função da imprevisibilidade das situações que possam ocorrer na área analisada, a bacia do Lago Paranoá, é possível imaginar possibilidades cada vez mais complexas de gerenciamento dos recursos hídricos. Dessa forma, o intuito da análise foi elaborar cenários exploratórios baseados, em parte, em comportamentos verificados no passado, mas com a adição de outras variações, tendenciais ou imprevisíveis (comportamentos não verificados e imprevisíveis até o momento), que pudessem gerar, em síntese, condições de "maior criticidade" para a gestão. Por essa razão, o conjunto de cenários elaborados neste estudo foi intitulado "cenários exploratórios críticos".

Com base nessas premissas, a construção do cenário ocorreu a partir de um conjunto de três fatores:

1. Simulação de alterações "previstas", tendenciais, no uso e ocupação da terra das bacias afluentes ao Lago Paranoá.
2. Alterações nas outorgas previstas e/ou instaladas na bacia do Lago Paranoá.
3. Alterações nos padrões de precipitação na bacia associadas a grandes estiagens (comportamento verificado no passado) ou padrões mais críticos (comportamento não verificado, imprevisível).

Para a simulação das alterações no uso e na ocupação da terra, foram consideradas as mudanças previstas nos dispositivos legais de planejamento de uso do solo desenvolvidos pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEDUH). A partir das regiões indicadas para expansão e regularização de áreas urbanas consolidadas, a análise foi realizada de forma a utilizar nos cenários apenas as áreas dentro dos limites da bacia. As áreas consideradas são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Área de drenagem direta ao Lago Paranoá.

DIUR	Diretrizes urbanísticas vigentes	Área (ha)
DIUR 06/2017	Setores habitacionais jôquei clube e	272,56
DIUR 11/2017	Região do setor JK	85,96
DIUR 02/2011	Faixa de domínio do metrô	161,00
DIUR 02/2015	Setor habitacional Vicente Pires	2770,33
DIUR 16/2018	PUI Granja Modelo I	9,94
DIUR 01/2015	Setor Habitacional Bernardo Sayão	351,00
DIUR 10/2018	Arine - Sucupira	148,22
DIUR 03/2015	Setor habitacional Arniqueiras	1233,73
DIUR 03/2018	Eixo de dinamização da via	1487,79
DIUR 01/2016	Setor Habitacional do Torto	341,50
DIUR 20/2018	Vargem Bonita	34,18
DIUR 07/2011	Expansão do Paranoá	140,00
DIUR 03/2019	Arine Porto Seguro	91,80
DIUR 04/2019	Setor habitacional taquari - etapa II	2062,00

Fonte: produzido pelos autores.

Considerando que o estudo foi realizado para o período compreendido entre os anos de 1982 e 2017, durante esse período as captações de água mais relevantes na bacia do Lago Paranoá localizavam-se na sub-bacia do Torto/Santa Maria, com as captações no reservatório de Santa Maria e no reservatório do Torto.

No entanto, a partir de 2018 novas demandas foram implementadas na Bacia do Lago Paranoá, como as outorgas no Ribeirão Bananal e no Lago Paranoá. Estas foram incorporadas na elaboração do cenário considerando o uso da água para o balanço hídrico das sub-bacias e do Lago.

Para avaliar uma possível produção de água crítica nas sub-bacias afluentes, assim como alterações no balanço hídrico do Lago, foram adotadas duas abordagens

associadas às entradas por precipitação em toda a área. A primeira considera o ano de menor total pluviométrico registrado ao longo da série de dados pluviométricos. Na segunda abordagem adotou-se uma queda da ordem de 20% das precipitações no ano de menor total pluviométrico registrado na série.

Uma síntese do processo de cenarização é apresentada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Critérios para estruturação dos cenários exploratórios críticos associados às bacias afluentes e áreas de drenagem direta ao Lago Paranoá e ao balanço hídrico do Lago.

Sub-bacias afluentes e áreas de drenagem direta ao Lago Paranoá	
Cenário	Critérios considerados
1 Exploratório tendencial	Utilização da precipitação observada no ano crítico (2003) na bacia do Lago Paranoá*.
2 Exploratório hipotético	Redução de 20% no total da precipitação observada no ano crítico (2003) na bacia do Lago Paranoá*.
Balanço hídrico do Lago Paranoá	
Cenário	Critérios considerados**
1 Exploratório tendencial (de referência)	Utilização da precipitação observada no ano crítico (2003) na bacia do Lago Paranoá.
2 Exploratório hipotético	Redução de 20% no total da precipitação observada no ano crítico (2003) na bacia do Lago Paranoá.
3 Exploratório hipotético crítico	Redução de 20% no total da precipitação observada no ano crítico (2003) na bacia do Lago Paranoá, considerando a retirada total do Lago referente à outorga concedida.

*Especificamente para a bacia do ribeirão Bananal houve, também, a simulação dos cenários 1 e 2 com o acréscimo da outorga de captação de água para abastecimento público.

**Os valores associados à outorga na bacia do ribeirão Bananal foram considerados nos 3 cenários.

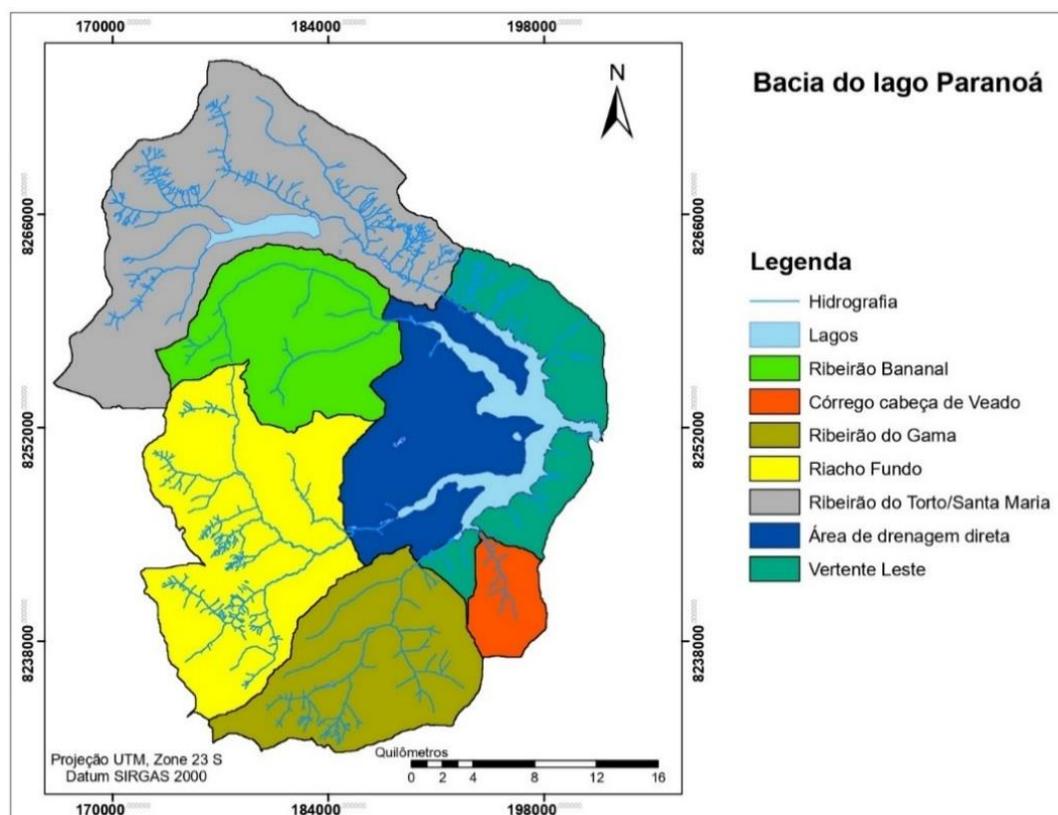
Fonte: produzido pelos autores.

5.6 Resultados

5.6.1 Calibração e verificação das vazões das sub-bacias afluentes monitoradas do Lago Paranoá e estimativa das vazões afluentes de áreas de drenagem direta e sub-bacias não monitoradas.

Com o objetivo de padronizar a apresentação de resultados, adotou-se a divisão apresentada na Figura 5.7.

Figura 5.7 - Áreas objeto do estudo. Fonte: produzido pelos autores



Fonte: produzido pelos autores.

Os resultados dos estudos de modelagem hidrológica para as sub-bacias afluentes ao Lago Paranoá, unidades hidrográficas monitoradas, são apresentados nas Figuras 5.8 a 5.12. Os hidrogramas e a estimativa de cada processo hidrológico que compõe o balanço hidrológico de cada sub-bacia modelada são apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.11. A Tabela 5.12 apresenta o resumo estatístico de todos os dados obtidos para as sub-bacias monitoradas.

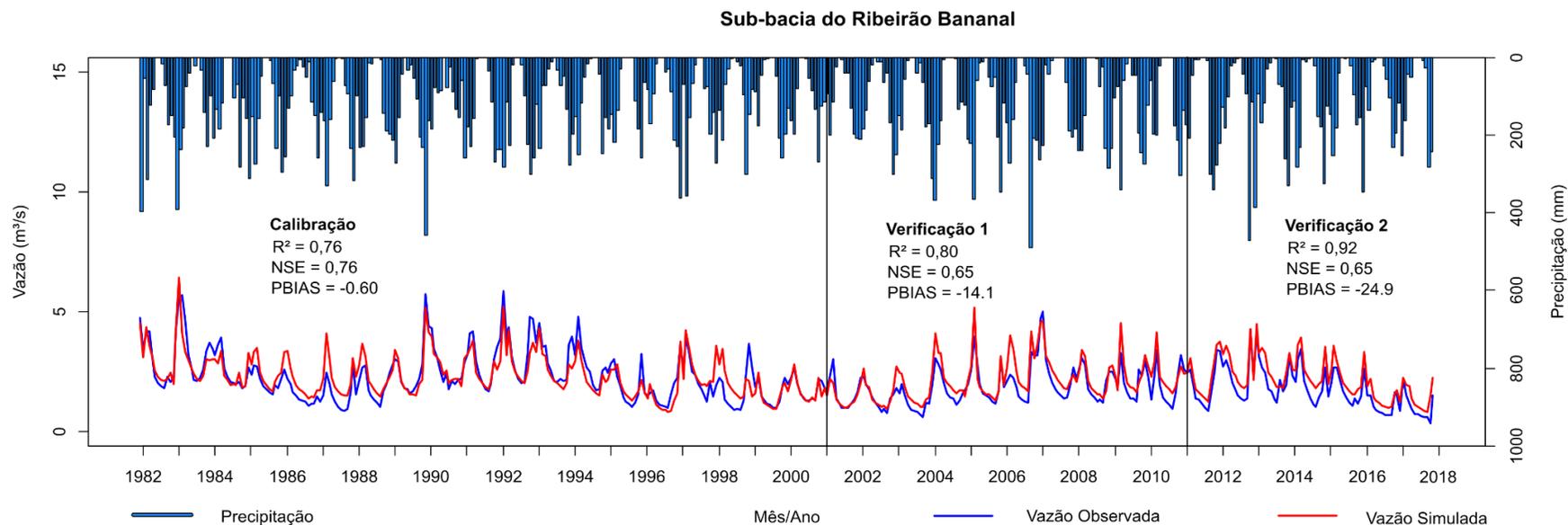
As estimativas geradas pelos modelos de cada sub-bacia foram avaliadas utilizando como métricas o coeficiente de Nash-Sutcliffe e o PBIAS, amplamente utilizadas na literatura para a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos e sugeridos por Moriasi *et al.* (2007).

Os resultados obtidos com a calibração do modelo foram avaliados pelas métricas R^2 , NSE e PBIAS, inicialmente, em três períodos, apresentados a seguir:

1. Calibração do modelo – de 1982 a 2000 – período em que efetivamente os parâmetros foram ajustados para cada sub-bacia afluente ao Lago Paranoá.
2. Primeira verificação – de 2001 a 2010 – com os parâmetros dos modelos de cada sub-bacia ajustados para o primeiro período, o modelo foi rodado para o período seguinte a fim de averiguar se o ajuste continuaria adequado para outro conjunto de dados monitorados.
3. Segunda verificação – de 2011 a 2017 – com os parâmetros dos modelos de cada sub-bacia ajustados para o primeiro período, o modelo foi novamente rodado para o último período de dados disponíveis, dados reais, a fim de averiguar se o modelo continuaria gerando resultados adequados para as análises propostas.

A realização dessas análises, com a fase de calibração do modelo SWAT para cada sub-bacia monitorada afluente ao Lago Paranoá, associada a verificação em duas etapas, procurou observar o desempenho do modelo em diferentes momentos do período estudado. As análises foram motivadas pelo fato de várias unidades hidrográficas apresentarem, ao longo de todo o período, alterações constantes no processo de uso e ocupação da terra, com intensa expansão urbana em algumas áreas.

Figura 5.8 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas – Ribeirão Bananal. Fonte: produzido pelos autores.

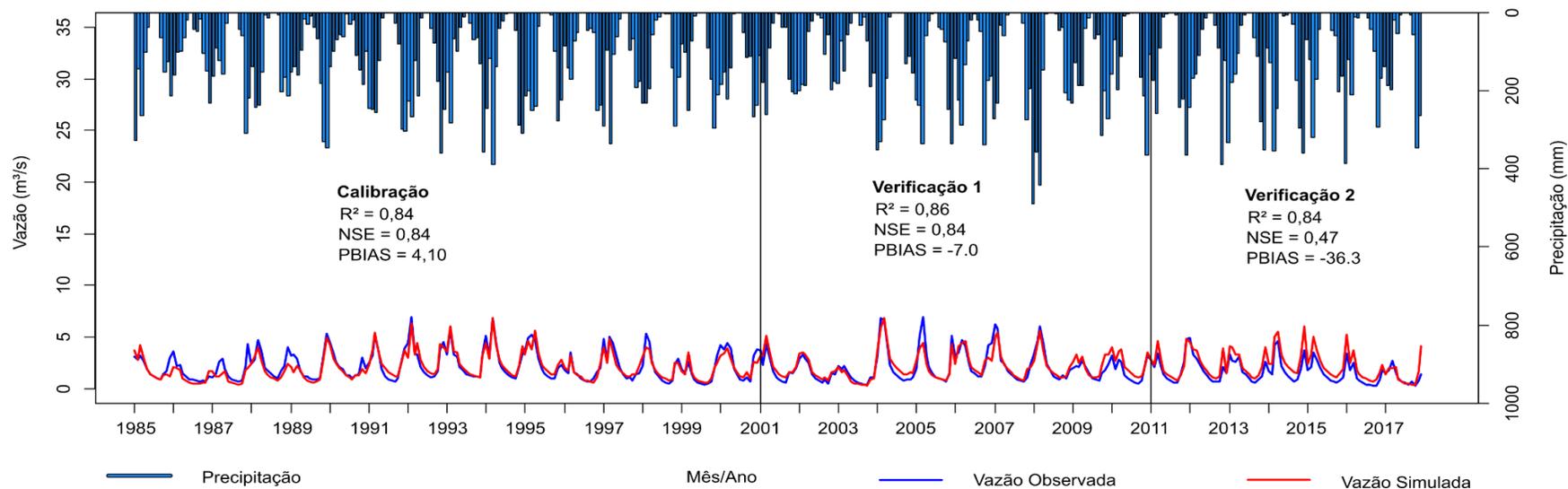


Fonte: produzido pelos autores.

Tabela 5.7: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Bacia do Ribeirão Bananal (1982-2017).

Processo Hidrológico	(mm)	(m ³ /s)
Precipitação	1337,2	5,33
Evapotranspiração	782,5	3,12
Escoamento Superficial	90,83	0,36
Vazão Lateral	60,57	0,24
Percolação ao aquífero raso	410,49	1,64
Ascensão por capilaridade do aquífero raso	227,66	0,91
Vazão de retorno	390,0	1,56
Recarga ao aquífero profundo	20,52	0,08
Área: 125.79 Km ²	Bacia do Bananal	

Figura 5.9 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas – Ribeirão do Gama. Fonte: produzido pelos autores.
Sub-bacia Ribeirão do Gama

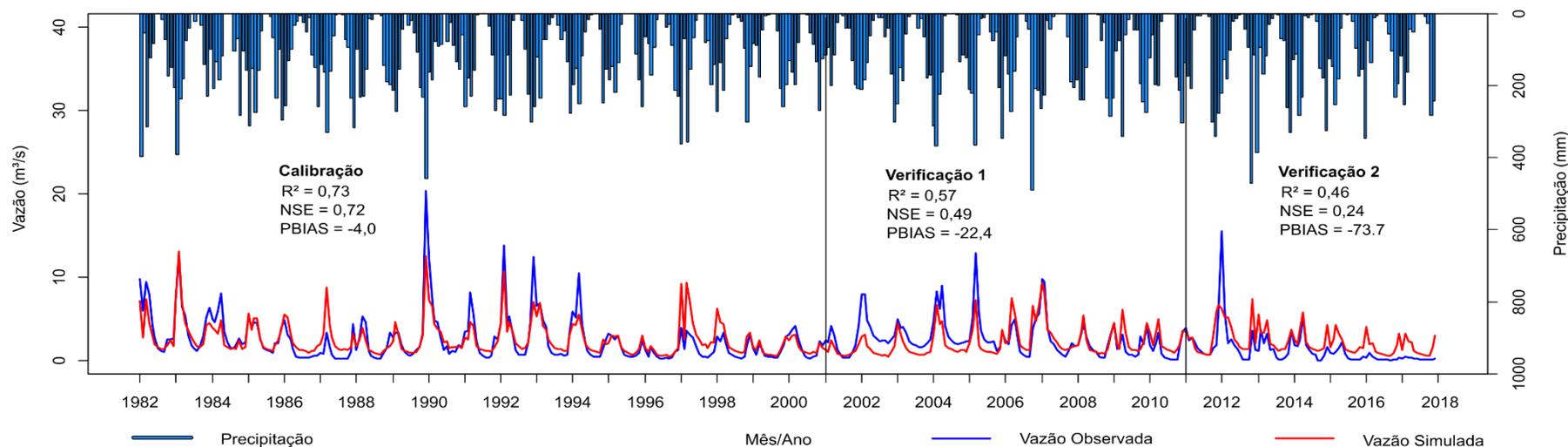


Fonte: produzido pelos autores.

Tabela 5.8: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Bacia do Ribeirão do Gama (1985-2017).

Processo Hidrológico	(mm)	(m³/s)
Precipitação	1392,2	6,03
Evapotranspiração	894,8	3,87
Escoamento Superficial	138,06	0,6
Vazão Lateral	87,13	0,38
Percolação ao aquífero raso	270,26	1,17
Ascensão por capilaridade do aquífero raso	85,15	0,37
Vazão de retorno	256,74	1,11
Recarga ao aquífero profundo	13,51	0,06
Área: 136,55 Km²	Bacia do Gama	

Figura 5.10 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas – Ribeirão do Torto/Santa Maria. Fonte: produzido pelos autores.
Sub-bacia do Torto/Stª Maria

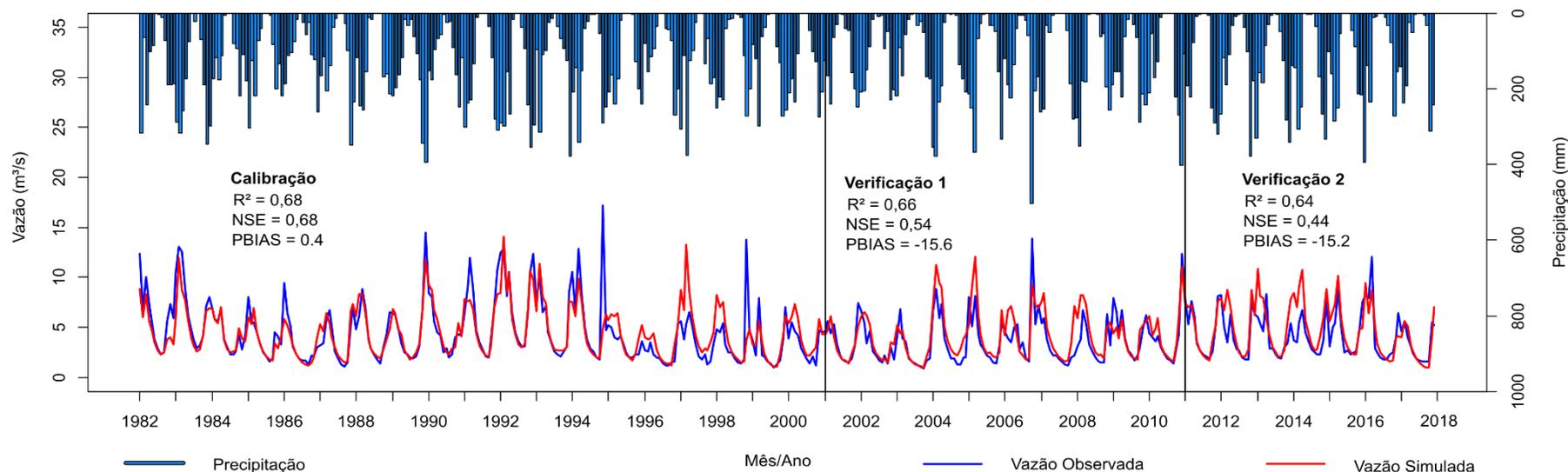


Fonte: produzido pelos autores.

Tabela 5.9: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Bacia do Ribeirão do Torto/Santa Maria (1982-2017).

Processo Hidrológico	(mm)	(m³/s)
Precipitação	1271,0	9,41
Evapotranspiração	863,4	6,39
Escoamento Superficial	31,94	0,24
Vazão Lateral	137,9	1,02
Percolação ao aquífero raso	256,47	1,9
Ascensão por capilaridade do aquífero raso	74,94	0,55
Vazão de retorno	243,65	1,8
Recarga ao aquífero profundo	12,82	0,09
Área: 233,49 Km²	Bacia do Torto/Stª Maria	

Figura 5.11 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas – Riacho Fundo. Fonte: produzido pelos autores.
Sub-bacia do Riacho Fundo

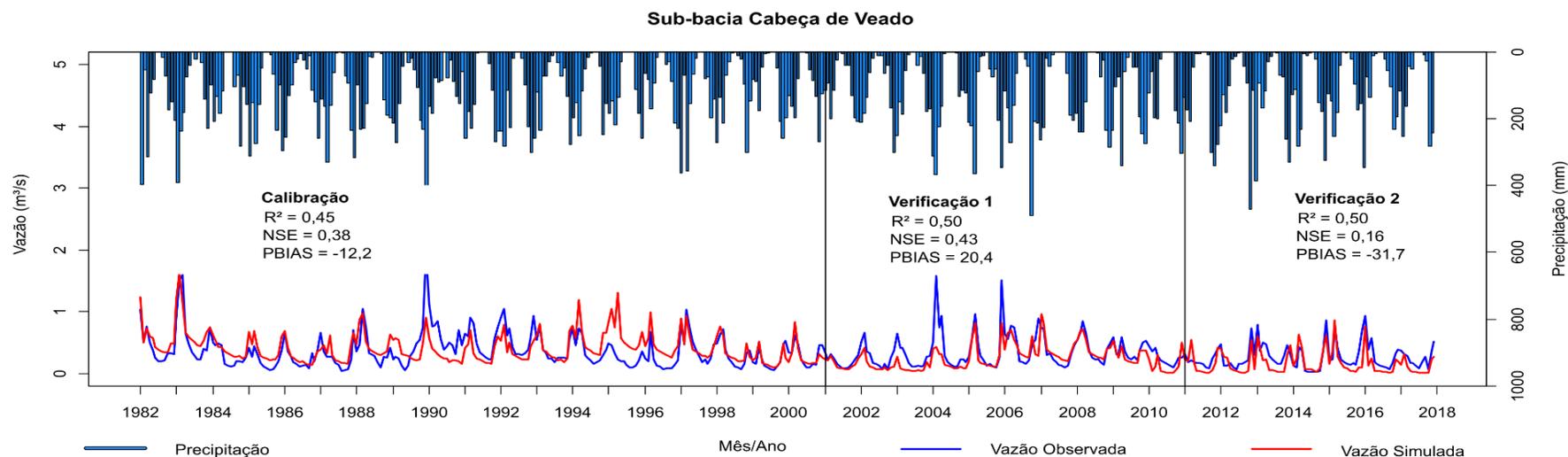


Fonte: produzido pelos autores.

Tabela 5.10: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Bacia do Riacho Fundo (1982-2017).

Processo Hidrológico	(mm)	(m³/s)
Precipitação	1449,4	9,81
Evapotranspiração	790,9	5,35
Escoamento Superficial	404,68	2,74
Vazão Lateral	11,65	0,08
Percolação ao aquífero raso	244,55	1,65
Ascensão por capilaridade do aquífero raso	132,27	0,9
Vazão de retorno	232,33	1,57
Recarga ao aquífero profundo	12,23	0,08
Área: 213.41 Km ²	Bacia do Riacho Fundo	

Figura 5.12 - Hidrograma de vazões observadas e simuladas – Cabeça de Veado. Fonte: produzido pelos autores.



Fonte: produzido pelos autores.

Tabela 5.11: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Bacia do Córrego Cabeça de Veado (1982-2017)

Processo Hidrológico	(mm)	(m ³ /s)
Precipitação	1438,3	1,41
Evapotranspiração	934,8	0,92
Escoamento Superficial	42,09	0,04
Vazão Lateral	104,77	0,1
Percolação ao aquífero raso	373,06	0,37
Ascensão por capilaridade do	333,14	0,33
Vazão de retorno	354,41	0,35
Recarga ao aquífero profundo	18,65	0,02
Área: 30.92 Km ²	Bacia do Córrego Cabeça de Veado	

Quando se observa as bacias que foram submetidas às alterações mais intensas no uso da terra e apresentam pontos de captação de água para abastecimento humano, nota-se que a capacidade de representação do modelo é reduzida. Isso pode ser observado na sub-bacia do Ribeirão do Torto e na do córrego Cabeça de Veado.

A sub-bacia do Ribeirão do Torto, possui uma dinâmica de captação que considera retiradas no reservatório de Santa-Maria e, a jusante, no reservatório do Torto. Considerando-se que a inserção de dados de captação de água no modelo SWAT ocorre a partir de médias mensais, os resultados são afetados em anos de maior e menor demanda. Fatores como esses implicam diretamente na representatividade dos dados de entrada, o que pode levar a divergências entre as curvas simuladas e observadas, além de um decréscimo nas métricas de avaliação do desempenho do modelo.

A sub-bacia do Córrego Cabeça de Veado é pequena se comparada às demais, assim como o valor total de produção de água. Dessa forma, a utilização de valores médios de captação possui impacto ainda maior. Mesmo apresentando o mais baixo desempenho de todas as unidades simuladas, em função da vazão produzida, mesmo com métricas que podem ser consideradas como de baixo desempenho, a divergência entre vazões simuladas e observadas não possui magnitude suficiente para afetar significativamente a determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá.

No que se refere à sub-bacia do Riacho Fundo, observou-se o bom desempenho do modelo na representação das vazões. As maiores diferenças se relacionaram aos picos das vazões observadas e calculadas pelo modelo. Notadamente, a sub-bacia do Riacho Fundo apresenta elevado grau de urbanização. Essa característica pode estar associada às diferenças relacionadas aos picos. Quando a bacia apresenta elevada urbanização, o escoamento superficial possui maior magnitude e a velocidade do escoamento também é maior. Dessa forma, é possível que nem sempre as ondas de cheia provocadas por cada evento sejam registradas nos dados monitorados, principalmente no que se refere ao período de monitoramento baseado em dados visuais.

De forma geral, considerando todas as sub-bacias modeladas, os resultados podem ser considerados satisfatórios, pois apresentaram de forma gráfica e

estatística resultados robustos na representação da vazão, principalmente na etapa de calibração, etapa em que os parâmetros foram especialmente determinados.

Pôde-se observar que na etapa de verificação os resultados das simulações foram considerados razoáveis em quase todas as sub-bacias. Vale dizer que quanto maior a distância do período de calibração a eficiência do modelo diminui. Este é um comportamento considerado normal na modelagem hidrológica, visto que a bacia hidrográfica é um ambiente submetido à mudanças variadas, sejam no uso e na ocupação da terra, sejam no manejo do solo, nos usos da água ou em função de flutuações climáticas. Um melhor desempenho do modelo poderia ser alcançado se etapas de calibração fossem estendidas para os demais períodos.

A partir dos resultados obtidos para as sub-bacias monitoradas afluentes ao Lago Paranoá, foram estimadas as parcelas do balanço hídrico para as regiões não monitoradas do restante da bacia do Lago, identificadas nesta análise como “Área de Drenagem Direta” e “Vertente Leste”, conforme foi apresentado na Figura 5.7. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Área de drenagem direta ao Lago Paranoá (1982-2017). Fonte: produzido pelos autores.

Processo Hidrológico	(mm)	(m³/s)
Precipitação	1449,40	5,82
Evapotranspiração	790,90	3,18
Escoamento Superficial	404,68	1,63
Vazão Lateral	11,65	0,05
Percolação ao aquífero raso	244,55	0,98
Ascensão por capilaridade do aquífero	132,27	0,53
Vazão de retorno	232,33	0,93
Recarga ao aquífero profundo	12,23	0,05
Área: 126,07 Km ²	Área de drenagem direta	

Tabela 5.14: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para a Vertente Leste (1982-2017). Fonte: produzido pelos autores.

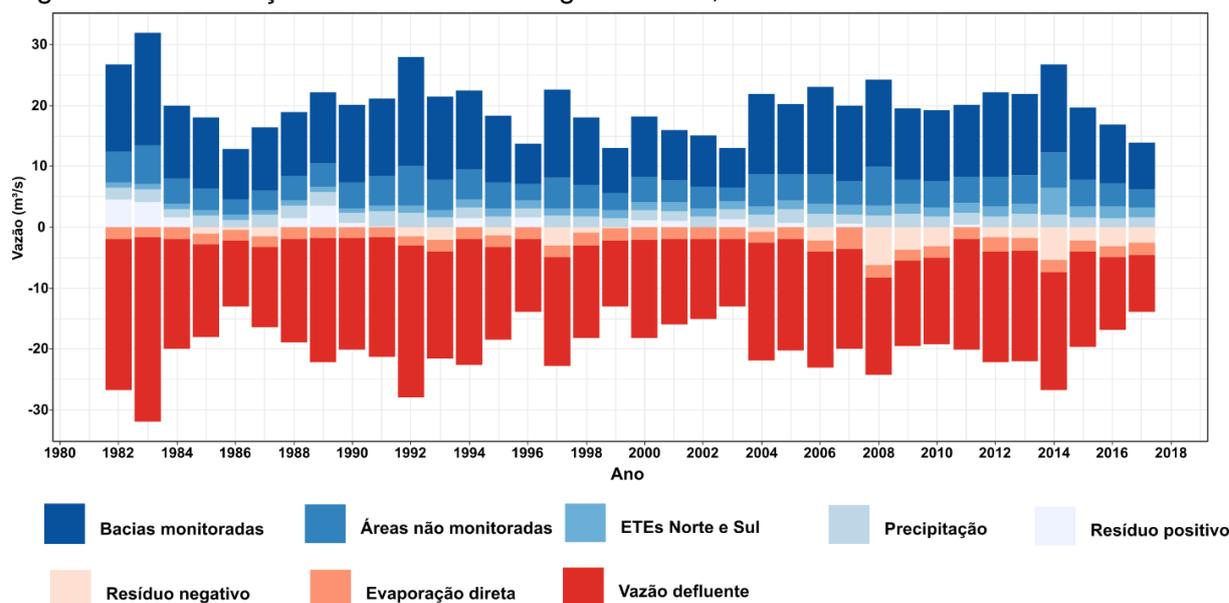
Processo Hidrológico	(mm)	(m ³ /s)
Precipitação	1392,20	4,12
Evapotranspiração	894,80	2,65
Escoamento Superficial	138,06	0,41
Vazão Lateral	87,13	0,26
Percolação ao aquífero raso	270,26	0,80
Ascensão por capilaridade do aquífero	85,15	0,25
Vazão de retorno	256,74	0,76
Recarga ao aquífero profundo	13,51	0,04
Área: 93.29 Km ²	Vertente Leste	

5.6.2 Determinação do balanço hídrico médio do Lago Paranoá no período compreendido entre 1982 e 2017.

Após a obtenção de todos os dados relacionados às vazões afluentes ao Lago Paranoá, referentes aos modelos calibrados e verificados das sub-bacias afluentes monitoradas ao Lago e às estimativas de áreas de drenagem direta e sub-bacias não monitoradas, foi possível completar a base de dados para o cálculo do balanço hídrico do Lago.

Analisando-se os resultados do balanço hídrico anual do Lago Paranoá, relacionado ao período compreendido entre os anos de 1982 a 2017 (Figura 5.13), pode-se notar que as parcelas de contribuição (áreas das colunas em tons de azul no gráfico da Fig. 5.13) compreendem a vazão de aporte das bacias com vazão monitorada, vazão proveniente de áreas de drenagem direta e bacias não monitoradas, as estações de tratamento de esgotos – ETEB Norte e ETEB Sul – e a precipitação direta no espelho d'água do Lago Paranoá. A perda de água do sistema (áreas das colunas em tons de vermelho no gráfico da Fig. 5.13) foi obtida a partir das vazões defluentes, turbinadas ou vertidas, e pela evaporação direta da área superficial do lago.

Figura 5.13 - Balanço Hídrico anual do Lago Paranoá, 1982-2017.



Fonte: produzido pelos autores.

5.6.3 Balanço hídrico quantitativo das sub-bacias afluentes e do Lago Paranoá a partir de cenários formulados – cenários exploratórios críticos

Os cenários elaborados neste estudo consideraram fatores de interferência na bacia, sendo eles as alterações do uso do solo previstas para a bacia do Lago Paranoá, as outorgas do uso da água; um ano crítico (ano com menor total pluviométrico de toda a série histórica) em relação aos totais pluviométricos (comportamento verificado no passado) e a possibilidade de um ano ainda mais crítico (comportamento não verificado, imprevisível até o momento, cenário 1 – hipotético), com redução de 20% nos totais pluviométricos mensais a partir do ano crítico.

Para a identificação do ano crítico foram calculados os totais anuais de precipitação de cada estação ao longo de toda a série temporal e identificados os anos com menor pluviosidade nas estações. O ano que apresentasse o menor total acumulado de chuva em todas as estações (ou na maioria), a fim de se preservar o caráter espacial de distribuição da chuva, seria definido como ano crítico (cenário tendencial relacionado aos dados observados na série histórica). Seguindo esse

critério, o ano de 2003 foi definido como ano crítico. A Figura 5.14 é mostrada a seguir com os totais pluviométricos anuais, com destaque para o ano de 2003 em vermelho.

Os totais pluviométricos para o ano de 2003, o ano crítico, podem ser observados na Tabela 5.15

Tabela 5.15: Totais pluviométricos anuais para o ano de 2003, selecionado como ano crítico, para as estações localizadas na bacia do Lago Paranoá.

Estação	Totais Pluviométricos (mm)
ETE Norte	1044,2
INMET	1305,8
Santa Maria	987,3
Área Alfa	947,4
Cabeça de Veado	975,7
ETE Sul	887,3
Jockey	1134,8
Riacho Fundo	948,2
Contagem	1254,3

Fonte: produzido pelos autores a partir de dados CAESB (Estações – ETE Norte, Santa Maria, Área Alfa, Cabeça de Veado, ETE Sul, Jockey, Riacho Fundo, Contagem) e INMET (Estação INMET).

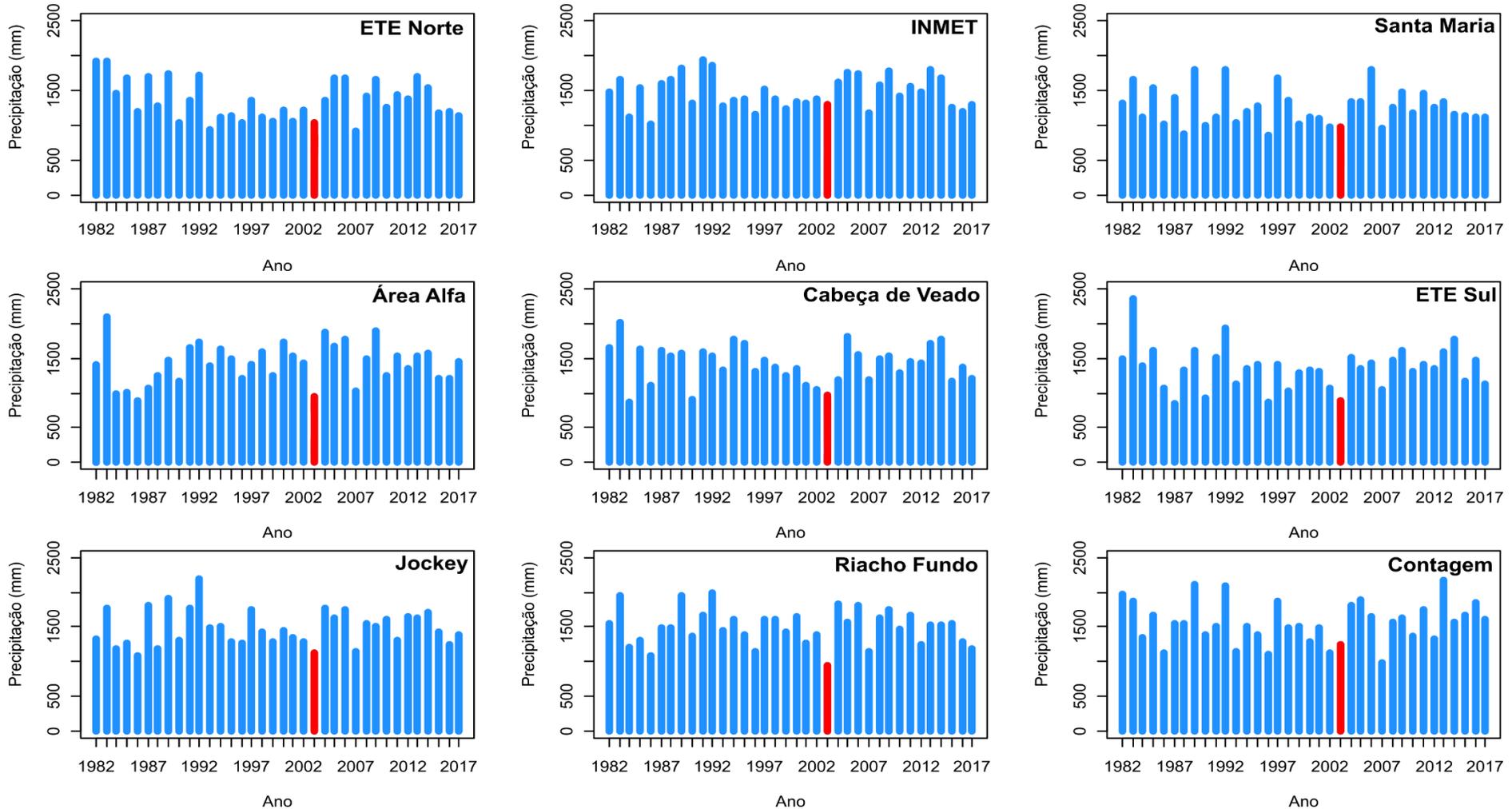
O cenário associado às flutuações meteorológicas (cenário 2 – hipotético) considerou, ainda, uma redução em 20% do montante anual de precipitação observado no ano crítico, gerando os totais observados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Totais pluviométricos anuais para o ano de 2003 com redução de 20% para as estações localizadas na bacia do Lago Paranoá.

Estação	Totais Pluviométricos (mm)
ETE Norte	835,36
INMET	1044,64
Santa Maria	789,84
Área Alfa	757,92
Cabeça de Veado	780,56
ETE Sul	709,84
Jockey	907,84
Riacho Fundo	758,56
Contagem	1003,44

Fonte: produzido pelos autores a partir de dados CAESB (Estações – ETE Norte, Santa Maria, Área Alfa, Cabeça de Veado, ETE Sul, Jockey, Riacho Fundo, Contagem) e INMET (Estação INMET).

Figura 5.14 – Totais pluviométricos anuais nas estações climáticas localizadas na bacia do Lago Paranoá de 1982 a 2017. Ano de 2003 em destaque (em vermelho), ano com menor precipitação em praticamente todas as estações, considerado como ano crítico para a simulação de cenários.



Fonte: produzido pelos autores a partir de dados CAESB (Estações – ETE Norte, Santa Maria, Área Alfa, Cabeça de Veado, ETE Sul, Jockey, Riacho Fundo, Contagem) e INMET (Estação INMET).

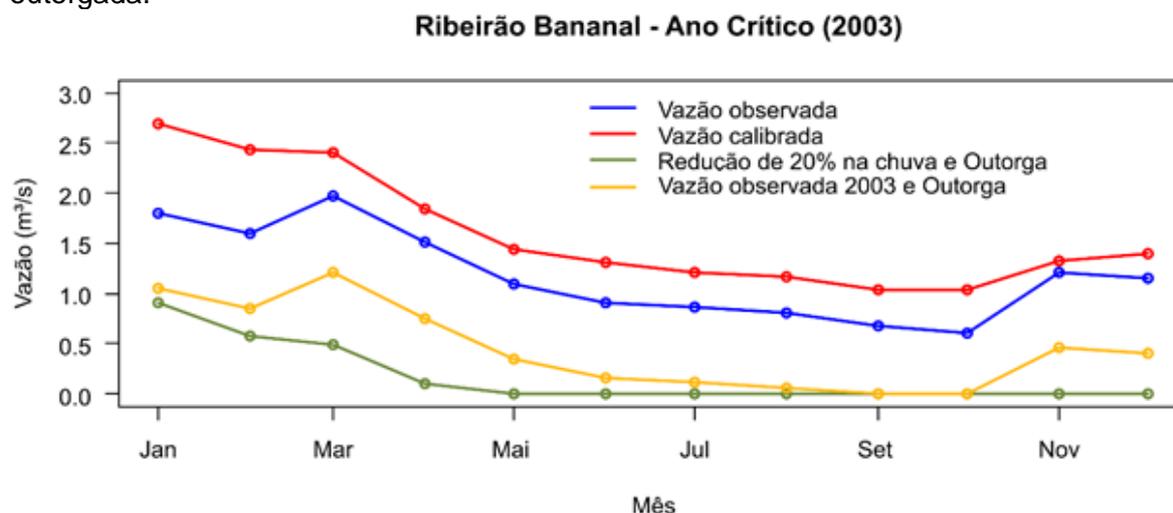
5.6.3.1 Sub-bacia hidrográfica do ribeirão Bananal

Os resultados apresentados na Figura 5.15 mostram quatro séries de dados: a vazão observada; a vazão calibrada (cenário 1 – tendencial); o cenário 2 (hipotético) considerando as outorgas de uso da água com captação de 750 l/s, mudanças no uso do solo e redução de 20% no total pluviométrico para o ano crítico. Uma terceira simulação apresentada refere-se ao cenário 1, vazão calibrada para o ano crítico, com a redução da vazão outorgada.

As simulações com a vazão outorgada apresentam uma abstração importante a ser ressaltada. Apesar de a vazão captada ser variável ao longo do ano, em função da capacidade de produção de água da bacia, no presente estudo a outorga foi fixada em valor constante de 750 L/s. A motivação foi gerar uma condição extrema para a bacia na construção do cenário exploratório crítico.

Os resultados observados para o cenário 1, cenário crítico tendencial, apontam para o completo exaurimento do fluxo de água no exutório da sub-bacia nos meses de setembro e outubro. No cenário 2, hipotético, o mais crítico, o exaurimento das vazões ocorre a partir do mês de maio, se prolongando até o mês de dezembro. Em ambos os casos, o fato de a outorga de 750 l/s ter sido considerada como constante em todo o período de simulação influenciou os resultados gerados.

Figura 5.15 – Cenários quantitativos de vazão na sub-bacia do ribeirão Bananal para o ano hidrológico crítico (2003). A vazão calibrada refere-se ao ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação) foi considerado com a captação outorgada.

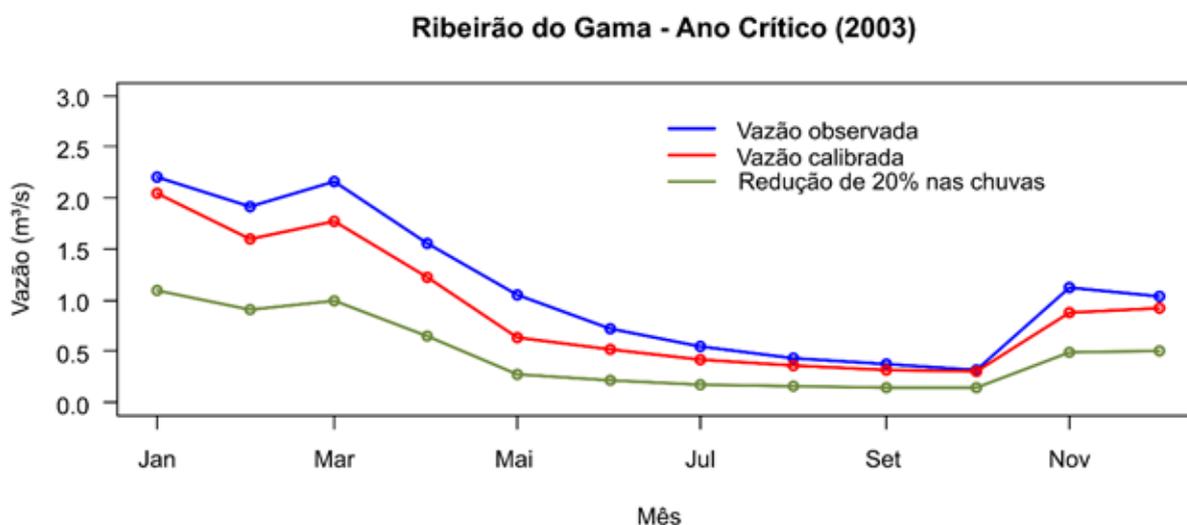


Fonte: produzido pelos autores.

5.6.3.2 Sub-bacia hidrográfica do ribeirão do Gama

A análise dos resultados das vazões observada e simuladas para a bacia do ribeirão do Gama (Figura 5.16) indicou que, apesar de a bacia hidrográfica não apresentar outorgas, com a redução de 20% nos valores de precipitação (cenário 2) em relação ao ano crítico (vazão calibrada – cenário 1), houve uma queda substancial nas vazões, atingindo o mínimo em outubro com vazão de 0,14 m³/s.

Figura 5.16 – Cenários quantitativos de vazão na sub-bacia do ribeirão do Gama para o ano hidrológico crítico (2003) – Vazão calibrada no ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação).



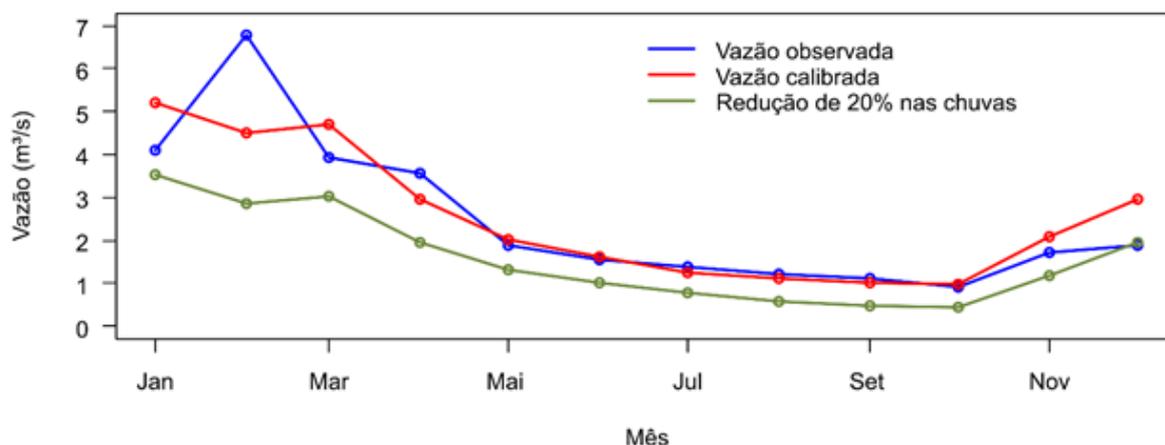
Fonte: produzido pelos autores.

5.6.3.3 Sub-bacia hidrográfica do riacho Fundo

Os resultados relacionados à sub-bacia do riacho Fundo (Figura 5.17) indicaram que o cenário mais crítico de vazões (Cenário 2) apresentou valores mais baixos no mês de outubro, com 0,44 m³/s. Neste mês, a diferença entre o valor do cenário 2 e os valores de vazões calibrada e observada correspondeu a aproximadamente 0,5 m³/s, diferença que se apresenta relativamente constante nos meses de maio a novembro.

Figura 5.17 – Cenários quantitativos de vazão na sub-bacia do riacho Fundo para o ano hidrológico crítico (2003) – Vazão calibrada no ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação).

Riacho Fundo - Ano Crítico (2003)



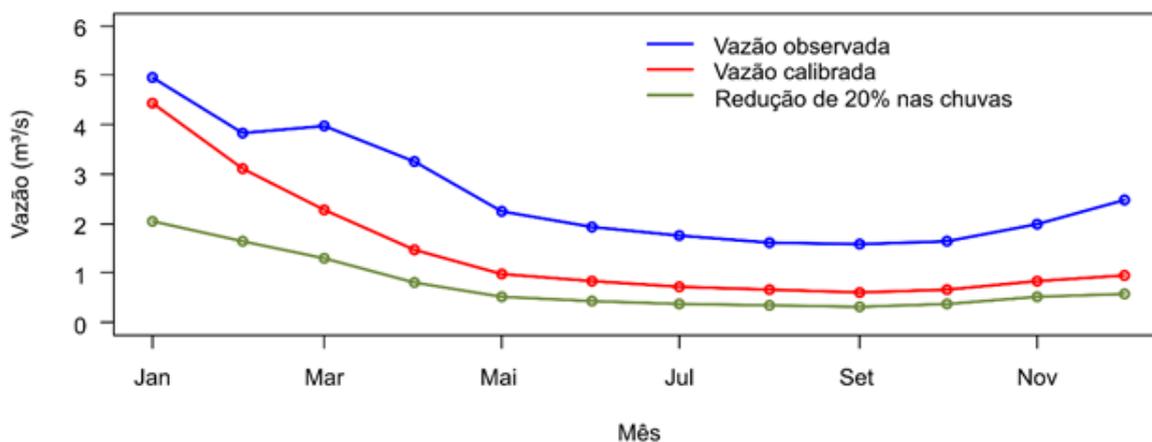
Fonte: produzido pelos autores.

5.6.3.4 Sub-bacia hidrográfica do ribeirão do Torto

A análise dos resultados das vazões observada e simuladas para a bacia do ribeirão do Torto (Figura 5.18) indicou que o cenário mais crítico de vazão (cenário 2) apresentou a maior discrepância entre as vazões observada e calibrada no mês de janeiro, apresentando decaimento mais suave que a vazão calibrada (cenário 1). A diferença entre as curvas alcança um valor constante a partir de junho, aproximadamente 0,3 m³/s, mantendo essa diferença até o mês de dezembro.

Figura 5.18 – Cenários quantitativos de vazão na sub-bacia do ribeirão do Torto para o ano hidrológico crítico (2003) – Vazão calibrada no ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação).

Ribeirão do Torto - Ano Crítico (2003)



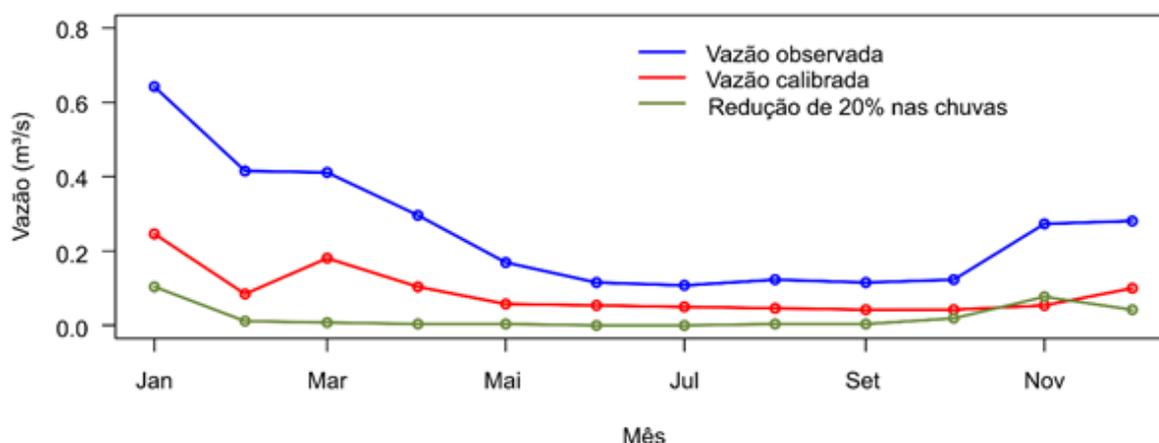
Fonte: produzido pelos autores.

5.6.3.5 Sub-bacia hidrográfica do córrego Cabeça de Veado

Os resultados relacionados às vazões da sub-bacia do córrego Cabeça de Veado (Figura 5.19) indicaram que o cenário mais crítico de vazão, cenário 2, mostra o exaurimento das vazões na sub-bacia a partir do mês de fevereiro, seguindo até setembro. A partir de outubro o fluxo é retomado alcançando 0,076 m³/s em novembro e 0,04 m³/s em dezembro.

Figura 5.19 – Cenários quantitativos de vazão na sub-bacia do córrego Cabeça de Veado para o ano hidrológico crítico (2003) – Vazão calibrada no ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação).

Córrego Cabeça de Veado - Ano Crítico (2003)



Fonte: produzido pelos autores.

5.6.3.6 Área de drenagem direta (urbana)

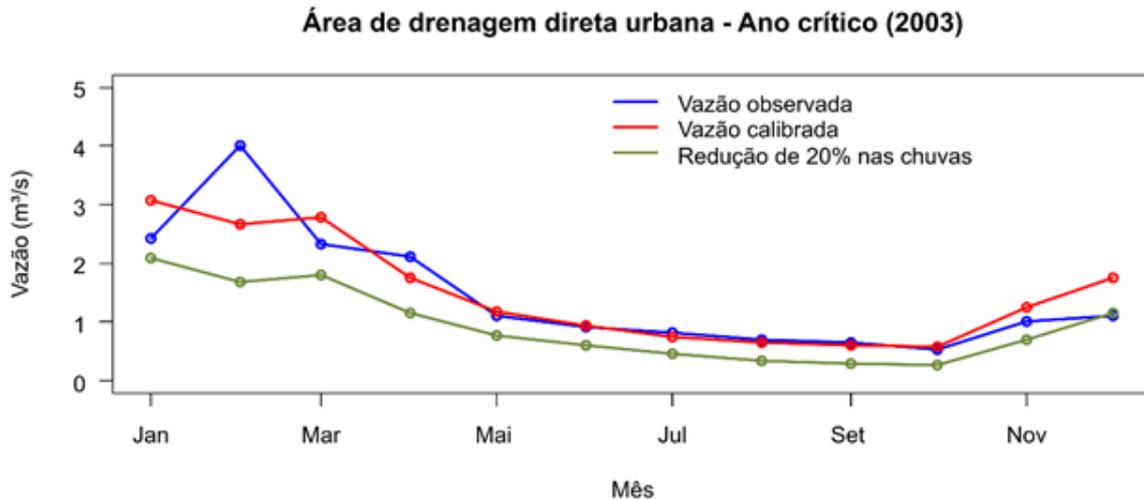
O cenário mais crítico de vazão (cenário 2) para a área de drenagem direta urbana (Figura 5.20) mostra que as principais diferenças ocorrem entre janeiro e abril. A partir de maio a diferença entre as vazões se mantém constante, em torno de 0,3 m³/s. A vazão mínima para o cenário ocorre em outubro com valor aproximado de 0,6 m³/s.

Vertente Leste

Para a vertente leste (Figura 5.21), o cenário mais crítico (cenário 2) apresenta o valor mínimo de vazão no mês de outubro, com 0,11 m³/s. As maiores diferenças entre vazões do cenário 2 e as vazões observada e calibrada (cenário 1) ocorrem

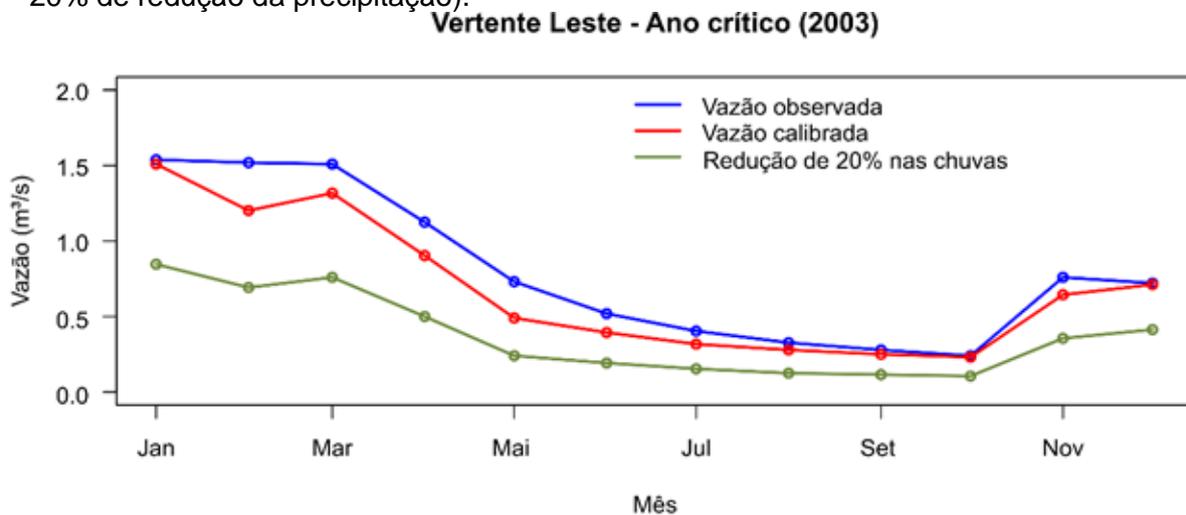
entre janeiro e março. A diferença cai gradativamente até alcançar patamares aproximadamente constantes. No mês de outubro as diferenças entre as vazões começam a aumentar novamente.

Figura 5.20 – Cenários quantitativos de vazão na Área de Drenagem Direta Urbana para o ano hidrológico crítico (2003) – Vazão calibrada no ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação).



Fonte: produzido pelos autores.

Figura 5.21 – Cenários quantitativos de vazão na área Vertente Leste para o ano hidrológico crítico (2003) – Vazão calibrada no ano crítico (cenário 1 - tendencial). O Cenário 2 (hipotético – 20% de redução da precipitação).



Fonte: produzido pelos autores.

Um resumo da estimativa dos componentes hidrológicos para o cenário de escassez hídrica é mostrado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17: Valores médios para os processos hidrológicos do balanço hídrico para o cenário do ano crítico - 2003 (cenário 1 – tendencial) em cada sub-bacia afluente ou área de contribuição direta ao Lago Paranoá. Fonte: produzido pelos autores.

Processo Hidrológico	Bananal		Gama		Riacho Fundo		Torto		Cabeça de Veado		Área de drenagem urbana		Vertente Leste	
	(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)
Precipitação	875,60	3,493	751,00	3,252	857,40	5,802	798,30	5,908	780,70	0,765	857,40	3,445	764,41	2,261
Evapotranspiração	76,90	3,039	719,80	3,117	671,50	4,544	775,40	5,739	781,50	0,766	671,50	2,698	713,71	2,111
Escoamento Superficial	45,30	0,181	46,44	0,201	186,82	1,264	10,61	0,079	13,11	0,013	186,82	0,751	64,14	0,190
Escoamento Lateral	26,22	0,105	21,81	0,094	3,83	0,026	63,79	0,472	9,28	0,009	3,83	0,015	19,54	0,058
Percolação ao aquífero raso	124,92	0,498	40,11	0,174	39,53	0,268	77,78	0,576	41,06	0,040	39,53	0,159	40,04	0,118
Ascensão do aquífero raso	235,91	0,941	87,77	0,38	137,11	0,928	77,63	0,575	146,48	0,144	137,11	0,551	93,99	0,278
vazão de retorno	118,68	0,473	21,81	0,094	37,59	0,254	73,88	0,547	0,00	0,000	37,59	0,151	23,80	0,070
Recarga ao aquífero profundo	6,25	0,025	2,11	0,009	1,98	0,013	3,89	0,029	20,15	0,020	1,98	0,008	2,09	0,006
Área (Km²)	125,79		136,55		213,14		233,40		30,92		126,70		93,29	

Os cenários construídos consideraram a superposição de três fatores: as demandas por água na bacia, as mudanças no uso e ocupação do solo e as flutuações climáticas. Notavelmente, o fator de maior influência foi a precipitação. A possibilidade de recorrência dos valores de precipitação observados no ano de 2003 (cenário tendencial), ou mesmo valores mais baixos como os que foram utilizados no cenário hipotético, caracterizam-se como possíveis leituras de futuro, e devem ser consideradas.

Quando se trata das mudanças no uso e ocupação do solo provocado pelas diretrizes urbanísticas previstas para a bacia do Lago Paranoá, ha dois aspectos relevantes a serem estudados. O primeiro diz respeito ao efeito global que mudanças no uso e ocupação do solo poderão gerar. O segundo aspecto tem a ver com os impactos locais das mudanças.

Em relação ao primeiro aspecto, os impactos gerais na bacia, nota-se que esses efeitos são pequenos, principalmente porque algumas dessas áreas já estão implementadas e incluídas no balanço hídrico das sub-bacias afluentes ao Lago. Levando isso em consideração, percebe-se que a implementação de novas áreas teria influência reduzida no balanço hídrico global da bacia.

No entanto, mesmo apresentando impacto reduzido, de forma global, não devem ser considerados desprezíveis, em função dos efeitos locais que essas mudanças podem provocar. A mudança dos padrões do uso e ocupação da terra, principalmente a conversão de áreas naturais em urbanas, alteram os processos hidrológicos naturais. Considerando a vulnerabilidade já observada no Distrito Federal no que se refere ao planejamento urbano, tomando-se como exemplo os eventos de inundações, recomenda-se que ocorra a realização de estudos hidrológicos em escalas maiores para a implantação das novas diretrizes urbanísticas; seja para a adequação e implementação de medidas estruturais ou não-estruturais para regiões urbanas já consolidadas, que ainda sofrem com essa problemática ou, ainda, para novas áreas urbanas previstas, a fim de mitigar e reduzir os efeitos da mudança nos padrões de uso do solo.

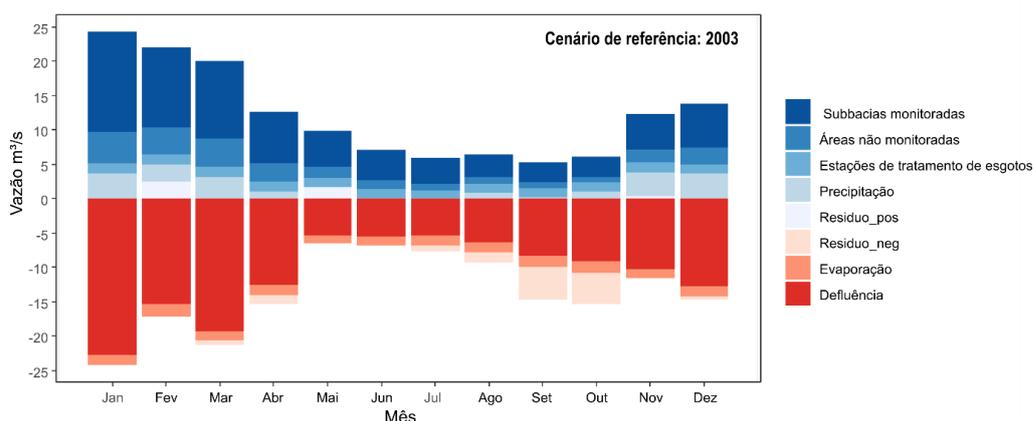
5.6.4 Análise dos cenários para o Lago Paranoá

A construção dos cenários para o Lago Paranoá acompanhou as mesmas hipóteses admitidas nos cenários para as sub-bacias. O ano de referência, ano crítico, foi o de 2003 (cenário tendencial) e para ele determinou-se o balanço hídrico do lago (Figura 5.22). A partir desse ano criou-se o cenário 2 (hipotético), com a redução de 20% do total de chuva na bacia. Por último foi elaborado o cenário 3 (hipotético crítico), com a redução de 20% nos valores de precipitação de toda a bacia afluyente e inserção da vazão total outorgada de captação direta no Lago Paranoá, de 2,8 m³/s (Figura 5.23). As retiradas de água associadas ao turbinamento permaneceram as mesmas utilizadas no cálculo inicial do balanço hídrico.

Analisando-se as diferenças entre os volumes totais de entradas e saídas de água do Lago Paranoá para os três cenários gerados, foi possível calcular a evolução do balanço volumétrico do Lago ao longo dos anos (Figura 5.24).

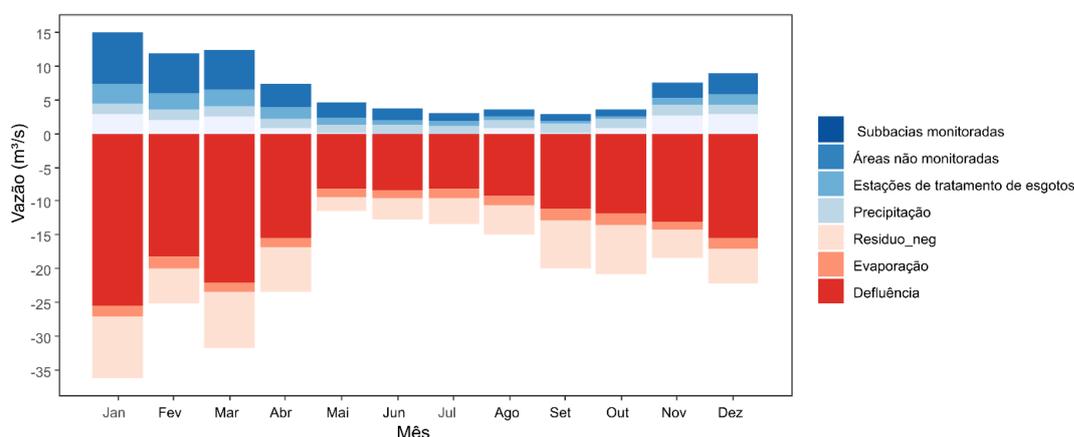
Observando-se a linha do cenário de referência (Cenário 1 – tendencial – linha azul), nota-se que existe uma tendência de acompanhamento da média, e o cálculo da diferença de vazões sugere o ganho de 24 hm³ em volume, o que representa cerca de 5% do volume máximo do lago (à cota 1000,80), mesmo em um ano com as menores precipitações de todo o período de análise (1982-2017).

Figura 5.22 – Balanço Hídrico do Lago Paranoá para o ano crítico de referência - 2003 (Cenário 1 - tendencial).



Fonte: produzido pelos autores.

Figura 5.23 – Balanço Hídrico do Lago Paranoá para o ano crítico com redução de 20% nas chuvas e implementação das outorgas previstas (Cenário 3 – hipotético crítico).



Fonte: produzido pelos autores.

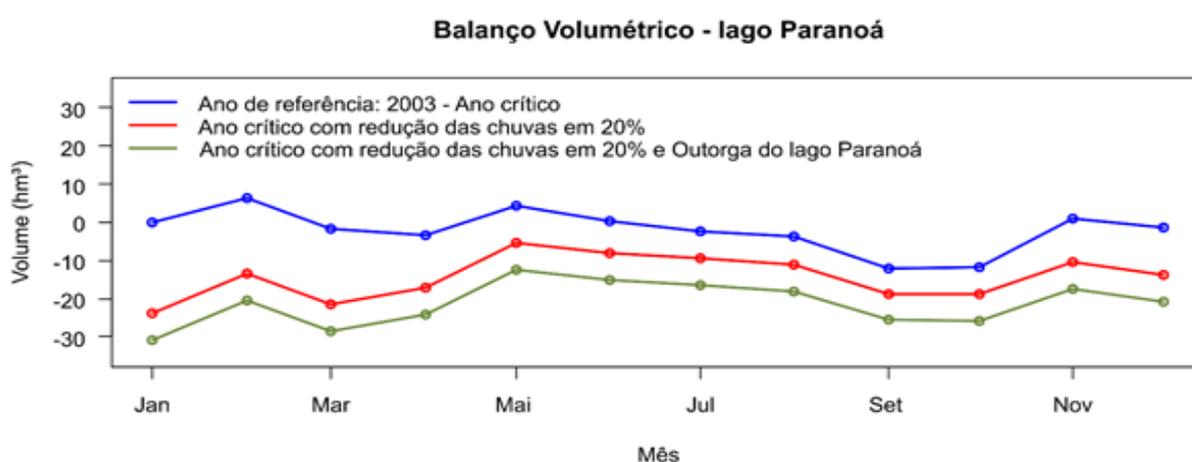
No que se refere ao balanço hídrico com 20% de redução das chuvas em relação ao ano crítico (Cenário 2 – hipotético – linha vermelha), com a permanência das demandas observadas no ano de 2003, observou-se que nessas condições o reservatório teria um déficit de volume de 171 hm³, que em termos percentuais representaria uma perda de 37,6% do volume do Lago, assumindo seu volume máximo de 455 hm³ à cota 1000,80.

Por último, observando-se a linha do cenário do balanço hídrico mais crítico, com 20% de redução das chuvas em relação ao ano crítico e subtração do volume total outorgado de captação direta no Lago Paranoá (Cenário 3 – hipotético crítico – linha verde), é possível notar que há um deslocamento vertical descendente em relação aos valores do ano de referência e aos valores do cenário com redução das chuvas, provocados pela implantação dos valores totais de captação direta outorgados. Quanto ao valor acumulado no ano, o reservatório sofre uma queda no armazenamento de aproximadamente 255 hm³, cerca de 56% de sua capacidade total.

Ressalta-se que o cenário mais crítico analisado, foi construído sob condições hipotéticas severas de flutuações climáticas e sem mudanças nas demandas por água, o que o torna um cenário para condições extremas de operação do reservatório. Numa situação de escassez hídrica, modelos de gestão da água devem ser implementados de forma a garantir os principais serviços ambientais fornecidos pelo

Lago e, nesse caso, a adoção dessas medidas pode e deve ser introduzida no modelo de forma a estimar, além do cenário crítico, cenários tendenciais positivos na busca pelas melhores alternativas na gestão de toda a bacia do Lago Paranoá.

Figura 5.24 – Balanço Volumétrico do Lago Paranoá para o ano mais crítico de toda a série temporal analisada no estudo, 1982 a 2017, ano de 2003 (Cenário 1 - de referência – em azul), com redução de 20% da precipitação relacionada ao ano crítico (Cenário 2 – Hipotético – em vermelho) e com redução de 20% da precipitação relacionada ao ano crítico e implementação das outorgas previstas para o Lago (Cenário 3 – Hipotético Crítico – em verde)



Fonte: produzido pelos autores.

5.7 Considerações Finais

O desenvolvimento dos trabalhos relacionados ao balanço hídrico do Lago Paranoá trouxe uma série de avanços importantes referentes ao entendimento das condições atuais e possíveis condições futuras relacionadas a toda a bacia afluyente e ao Lago. Esses avanços deverão contribuir com o aprimoramento do gerenciamento do Lago e de seus múltiplos usos.

Primeiramente, houve a consolidação da base de dados associada às bacias afluentes e ao Lago Paranoá, dados monitorados pelos variados órgãos governamentais do Distrito Federal relacionados ao período compreendido entre os anos de 1982 e 2017.

Um dos avanços relacionados ao trabalho refere-se à forma de cálculo das entradas do Lago provenientes das bacias afluentes e áreas de drenagem direta. Utilizou-se o que existe de mais avançado em termos tecnológicos para a representação de todas as complexas unidades hidrológicas afluentes, a união entre a modelagem hidrológica dessas unidades, baseada na aplicação da ferramenta Soil and Water Assessment Tool – SWAT, em sua interface associada ao geoprocessamento, com uma robusta base de dados hidrometeorológica que foi constituída a partir da união das séries de dados monitorados.

A análise das sub-bacias afluentes monitoradas resultou na geração do balanço hídrico de cada unidade a partir de dados recentes de uso da terra das bacias e, também, da inclusão das outorgas existentes para captação de água.

A partir dos resultados obtidos, foi possível estimar, também, as entradas provenientes das unidades hidrográficas não monitoradas, áreas urbanas de drenagem direta ao Lago ou pequenas bacias não instrumentadas. Foi a primeira vez que os cálculos do escoamento relacionado a essas áreas foi realizado a partir de resultados obtidos por modelagem hidrológica, atribuindo maior confiança aos resultados gerados associados às entradas do Lago.

Além da estruturação dos dados para a análise de toda a bacia afluente ao Lago, houve, também, a estruturação dos dados relacionados ao Lago Paranoá, associada aos dados de entrada e dados de saída de água. A partir dessa estruturação foi possível gerar o balanço hídrico atualizado relacionado ao Lago. Devido à extensão temporal da análise, foi possível observar e avaliar a variação do balanço hídrico anual do Lago, principalmente a ocorrência dos anos de maior criticidade.

A etapa final do trabalho incluiu a estruturação de cenários relacionados ao balanço hídrico das sub-bacias afluentes e do Lago Paranoá. Os cenários quantitativos relacionados às sub-bacias afluentes foram possíveis em função do enfoque de análise adotado no trabalho, a modelagem das unidades hidrográficas. Os modelos permitem que alterações no uso da terra sejam realizadas e o impacto das alterações, a partir de simulações com os modelos calibrados para cada sub-bacia,

sejam observados nos dados de saída das bacias, em termos de modificação nos valores de vazão afluente ao Lago.

Os cenários construídos, tendencial e hipotético, mostraram situações críticas para a sub-bacia do ribeirão Bananal e para o Lago Paranoá em vários dos resultados gerados. Um fator chave para a obtenção desses resultados foi a variação dos dados de precipitação. Se os valores anuais de precipitação na bacia do Lago Paranoá observados no ano de 2003, considerado como ano crítico de todo o período histórico, voltarem a ocorrer, ou valores ainda mais baixos, em função das outorgas existentes na atualidade, relacionadas às bacias afluentes e ao próprio Lago, situações críticas podem ocorrer impactando severamente no balanço hídrico do Lago Paranoá.

No entanto, os trabalhos de cenarização associados à bacia do Lago Paranoá e ao balanço hídrico do Lago foi apenas iniciado. Torna-se necessário o aproveitamento de toda a base de dados que foi estruturada, relacionada ao período compreendido entre 1982 e 2017, os modelos construídos e o balanço hídrico do Lago, para a continuidade das análises realizadas, de fundamental importância para o planejamento do uso de recursos hídricos em toda a Bacia.

Na continuidade dos trabalhos, sugere-se que os mapas de uso de solo da bacia afluente ao Lago sejam atualizados. Além disso, torna-se importante a atualização das bases de dados hidrológicos até o ano de 2020.

Considera-se, como de fundamental importância, a incorporação de todos os dados, métodos e análises pela equipe técnica da ADASA para que os trabalhos realizados tenham continuidade.

CAPITULO VI

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Jeremie Garnier
Henrique Licer Roig
Marco Ianniruberto
Ricardo Tezini Minoti
Sergio Koide

6.1 Conclusões

Este capítulo traz uma síntese não só das conclusões descritas nos capítulos anteriores, mas também das reflexões realizadas em conjunto com a equipe e coordenação do convênio da ADASA, que ocorreram durante as várias reuniões técnicas, mas principalmente durante os *Workshops* Técnicos, conforme definido no plano de trabalho do convênio.

Talvez um dos resultados mais esperados, embora não necessariamente o mais importante, foi a determinação da cota – área – volume (CAV) para o Lago Paranoá até a cota de 1000,8 m. Até então, não se tinha conhecimento de qual era volume máximo e mínimo operacional do Lago. Todas as análises no processo de gestão do lago eram baseadas unicamente na cota, sem a certeza do volume disponível. Este fato é importante uma vez que o lago tem uso múltiplo, com destaque para o abastecimento de água para consumo humano.

O MDE do Lago entregue tem resolução espacial de 5m, porém pode ser reconstruído com uma resolução até submétrica, caso seja necessário.

Ainda com relação à batimetria, o projeto estabeleceu um protocolo para o levantamento batimétrico e sua integração com dados topográficos que poderá ser usado pela ADASA ou outro órgão governamental para a realização de novos levantamentos.

Com base neste novo MDE e com os dados batimétricos históricos foi possível estimar a perda volumétrica do lago para a cota 1000m. A estimativa inicial para o lago em 1960 era de 492.3 hm³ e atualmente é de 460 hm³, o que resulta em uma perda aproximada de 6,4 % do seu volume total e uma taxa média de assoreamento de 0,0084 km³/ano para os 58 anos de vida do Lago.

Este processo de assoreamento não ocorreu de forma igualitária no lago. O Braço do Riacho Fundo foi o mais impactado pelo assoreamento. Sua taxa de assoreamento é até 6 vezes maior que a do Lago como um todo. Os braços do Braços do Gama (~1000 m linear) e Bananal (700 m) também sofreram com o assoreamento, porém em proporções bem menores. O Braço do Torto foi o que menos sofreu com o

processo de assoreamento, podendo até ser considerado sem grandes impactos, onde a modificação da morfologia original do lago nesta região pode ser considerada irrelevante.

Do ponto de vista pedo-geomorfológico, o que se percebe, pela análise dos perfis estratigráficos das áreas assoreadas, é o “ambiente” buscando recuperar a sua condição original após a construção da barragem. O que observa-se é a propagação do material mais arenoso sob sedimentos mais finos e estes sob camadas argilosas ricas em matéria orgânica. Os dois primeiros pacotes devem estar associados ao estabelecimento de um ambiente flúvio-deltaico e o pacote mais basal provavelmente proveniente da decantação dos microrganismos da fase lântica. Estas camadas ricas em matéria orgânica são enriquecidas em nutrientes, tais como C, N e P e necessitam de estudos mais detalhados sobre a sua extensão na zona assoreada, principalmente se cogitado o desassoreamento de parte destas áreas.

Embora este seja um processo natural, a intensidade da taxa de assoreamento está, em grande parte, associado a variabilidade da taxa de urbanização das áreas de contribuição do lago, ou seja bacias mais urbanizadas tem maiores taxas de assoreamento. Deste modo, grande parte da quantidade de sedimentos arenosos depositado nas áreas assoreadas tem origem antrópica, i.e., materiais de construção exportado de outras bacias e/ou materiais removidos e empilhados e mal cuidados durante as atividades de construção civil. Neste contexto, deve-se destacar que, independentemente da existência ou não do planejamento urbano, ou seja, se o local escolhido para a implantação de determinada construção está ou não em uma área permitida por lei (ex PDOT), a falta de um regramento adequado do processo de construção, principalmente no que se refere a remoção e armazenamento do solo e descarte dos materiais durante o processo de construção, acabam por maximizar os processos erosivos, o transporte destes materiais e conseqüentemente o assoreamento do Lago Paranoá.

Neste mesmo caminho, as análises geoquímicas e a modelização dos fluxos de elementos na interface sedimento/solução (materiais em suspensão carregados até lago e associados às reações de diagêneses precoces dos sedimentos), apontam para uma forte atuação dos componentes de origem antrópica na ciclagem dos

elementos do Lago Paranoá. Deste modo, é importante considerar esses fluxos (particulado e dissolvido) para melhorar a caracterização e quantificação dos ciclos dos elementos na bacia de contribuição, bem como do Lago Paranoá. De fato, para uma boa gestão do lago, principalmente considerando o potencial de contaminação por elementos metálicos e o fenômeno de eutrofização das águas do lago (ciclo C, N e P), deve-se considerar o papel dos sedimentos (materiais em suspensão/particulado e fundo), e não apenas os fluxos de elementos dissolvidos pelos diferentes *input* no lago. Isso porque, os materiais particulados podem ser um importante vetor de transporte de elementos (nutrientes e metais). Esses materiais, além de afetar o compartimento sólido, podem chegar a modificar a qualidade das águas devido a alteração (dissolução, degradação) durante os processos de diagênese precoce, assim como, pela alteração dos equilíbrios frágeis entre elementos adsorvidos nos particulados e elementos dissolvidos. As alterações das condições biogeoquímicas ao longo do curso (córregos), nas interfaces de ambientes lótico para lântico e após a sedimentação podem assim levar a liberar elementos a partir desses materiais sólidos para compartimento líquidos (elementos dissolvidos).

O estudo da composição química dos sedimentos superficiais e dos perfis estratigráficos (assoreamento) destacou a existência de forte heterogeneidade de sedimentação espaço-temporal com camadas, lentes ou áreas dominadas por areias e outras por materiais mais finos e mais ricos em nutrientes (C, N e P). A presença desses elementos pode promover alterações na qualidade dos ecossistemas e constitui um indicativo da necessidade de um monitoramento contínuo da qualidade dos sedimentos que aportam o lago. Este estudo destaca a necessidade de integrar estes resultados e promover um estudo mais detalhado da qualidade dos sedimentos previamente a realização de um possível processos de desassoreamento;

Por fim, os dados de cota-área -volume foram utilizados para a geração de um novo balanço hídrico para a bacia do Paranoá.

O conhecimento do balanço hídrico de toda a bacia do Lago Paranoá, resultante do somatório entre o balanço hídrico de toda a bacia afluenta ao Lago e o balanço hídrico do Lago, é de fundamental importância para o Distrito Federal, e de interesse direto da comunidade acadêmica, da sociedade civil e do governo do Distrito

Federal, pois o Lago Paranoá, situado na região central de Brasília, proporciona usos importantes e indispensáveis à toda a população.

Um dos avanços relacionados ao trabalho refere-se à forma de cálculo das entradas do Lago provenientes das bacias afluentes e áreas de drenagem direta. Utilizou-se o que existe de mais avançado em termos tecnológicos para a representação de todas as complexas unidades hidrológicas afluentes, a união entre a modelagem hidrológica dessas unidades, baseada na aplicação da ferramenta Soil and Water Assessment Tool – SWAT, em sua interface associada ao geoprocessamento, com uma robusta base de dados hidrometeorológica que foi constituída a partir da união das séries de dados monitorados.

A partir dos resultados obtidos, foi possível estimar as entradas provenientes das unidades hidrográficas não monitoradas, áreas urbanas de drenagem direta ao Lago ou pequenas bacias não instrumentadas. Foi a primeira vez que os cálculos do escoamento relacionado a essas áreas foi realizado a partir de resultados obtidos por modelagem hidrológica, atribuindo maior confiança aos resultados gerados associados às entradas do Lago.

Após o balanço, cenários tendenciais e hipotéticos foram construídos demonstrando as situações críticas da sub-bacia do ribeirão Bananal e do Lago Paranoá em vários dos resultados gerados. Um fator chave para a obtenção desses resultados foi a variação dos dados de precipitação. Se os valores anuais de precipitação na bacia do Lago Paranoá observados no ano de 2003, considerado como ano crítico de todo o período histórico, voltarem a ocorrer, ou valores ainda mais baixos, em função das outorgas existentes na atualidade, relacionadas às bacias afluentes e ao próprio Lago, situações críticas podem ocorrer impactando severamente no balanço hídrico do Lago Paranoá.

No entanto, devemos ressaltar que os trabalhos de cenarização associados à bacia do Lago Paranoá e ao balanço hídrico do Lago são apenas uma visão inicial. Torna-se necessário o aproveitamento de toda a base de dados que foi estruturada, relacionada ao período compreendido entre 1982 e 2017, os modelos construídos e o balanço hídrico do Lago, para a continuidade das análises realizadas, de fundamental importância para o planejamento do uso de recursos hídricos em toda a Bacia.

Considera-se, como de fundamental importância, a incorporação de todos os dados, métodos e análises pela equipe técnica da ADASA para que os trabalhos realizados tenham continuidade.

6.2 Contribuição desses resultados na gestão dos recursos hídricos

As áreas completamente assoreadas, mapeadas neste estudo, principalmente no Braço do Riacho Fundo, mas também no Bananal, ilustram um dos principais problemas ambientais ocorrendo na região: a intensificação dos processos de erosão e escoamento superficial na bacia de contribuição associado à desenvolvimento urbano. Porém, vale destacar que estas áreas assoreadas podem se comportar como área úmida (wetland) – “rios” com planície de inundação contendo pequenos lagos residuais. Sabe-se que estes tipos de ambiente podem desempenhar um importante papel de retenção de sedimentos oriundos da bacia de contribuição e também pode vir a servir como agente de “filtração” natural das águas e armazenamento de elementos, o que pode gerar um papel importante para a melhoria da qualidade da água do Lago Paranoá por estes ambientes. Assim, reforçamos a necessidade de um estudo mais aprofundado destas áreas, pois atualmente elas podem estar servindo com um sumidouro de elementos potencialmente adversos à qualidade do ecossistema e retenção de sedimentos, além de manter retido/sequestrado nos pacotes sedimentares soterrados, elementos químicos que, se liberados, podem degradar a qualidades das águas do lago.

Além disso, o que podemos observar comparando-se as fotos aéreas anteriores (1953 e 1964) da região do Braço do Riacho Fundo com as imagens atuais do lago assoreado, é que onde antigamente existia uma pequena mata ciliar, hoje encontra-se instalada uma exuberante mata ciliar com várias fases/sucessão da vegetação típica deste ambiente “Fúlvio-deltaico” que entre outros benefícios exerce a função de sequestrar o carbono de forma mais efetiva do que as áreas circunvizinhas (talvez até em relação ao ambiente original), sendo uma ambiente “natural” para o desenvolvimento da vida na interface terra/água.

6.3 Perspectivas

Apesar dos avanços no conhecimento do comportamento morfológico do lago e de suas áreas assoreadas, este estudo também vislumbrou novos passos que podem melhorar ainda mais o conhecimentos sobre este ambiente dinâmico e de grande uso pela população e órgãos públicos.

Considerando a necessidade de um melhor entendimento da estratigrafia dos sedimentos, em particular da existência de camadas ricas em matéria orgânica soterrada, vislumbramos estudos geofísicos do tipo sonografia acoplados a novos perfis estratigráficos para a detecção da continuidade destes corpos. Este dados estratigráficos também corroborarão para a melhoria do entendimento geoquímico deste ambientes.

O presente relatório destacou existência de forte anomalia em elementos tais como P, Zn e Gd nas regiões próximas das ETE. Estes resultados ressaltam a necessidade de um estudo mais aprofundado dos ciclos desses elementos na bacia do Lago Paranoá e como a especiação desses elementos ao longo de seus ciclos podem impactar o meio. Assim, espera-se que novos estudos sejam realizados para aprimoramento do banco de informações para gestão dos recursos hídricos e também estudos mais detalhados sobre os impactos que as ETEs possuem sobre o Lago Paranoá e potencial impacto atual e futuro desses elementos no ecossistema.

Outra frente de trabalho que pode se abrir com os resultados deste projeto é determinar a real importância das áreas assoreadas (atuais *wetlands* - áreas unidas) no processo de retenção e reciclagem de nutrientes e do ciclo do carbono, nitrogênio e fosforo, pois este é um contra ponto em relação à visão negativa das áreas assoreadas já consolidadas e em estágio de consolidação.

Embora o ponto aqui apresentado não tenha sido objeto direto deste convênio, mas o seu desenvolvimento deu-se em paralelo devido à realização da tese de doutorado de Diogo Olivetti (Olivetti, 2019, Olivetti *et al.*, 2020) e de outros estudos em andamento no programa de pós-graduação em Geociências, é a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) para o estudo da qualidade das águas, em especial a turbidez e a presença de algas (bloom associado a fenômeno de eutrofização). Novas frentes tem aparecido para caracterização de outros componentes além dos tradicionais (sedimentos e algas), como por exemplo, a

possibilidade de determinação de modo indireto (SR) da variabilidade espaço temporal do fósforo.

Por fim, no que tange ao balanço hídrico é fundamental a continuidade dos trabalhos. Como próximos passos sugere-se que os mapas de uso de solo da bacia afluyente ao Lago sejam atualizados. Além disso, torna-se importante a atualização das bases de dados hidrológicos até o ano de 2020.

7. Referências Bibliográficas

- ADASA. 2016. Poluição difusa deu origem à mancha verde e à morte de peixes no Paranoá. <http://www.adasa.df.gov.br/587-poluicao-difusa-deu-origem-a-mancha-verde-e-a-morte-de-peixes-no-paranoa>
- ADASA. 2018. **Decreto 39.555/2018 - Zoneamento Usos** Lago Paranoá. Diário Oficial do Distrito Federal. Nº 245, quinta-feira, 27 de dezembro de 2018
- Altafin, I. G., Mattos, S. M., Cavalcanti, C. G. B. & Estuqui, V. R. (1995). **Paranoá lake – limnology and recovery program**, pp. 325-349. In: J. G. Tundisi, C. E. M. Bicudo & T. Matsumura-Tundisi (eds.), *Limnology in Brazil*. BAS/SBL, Rio de Janeiro, 384p.
- Angelini, R.; Bini, L.M.; Starling, F.L.R.M. (2008). **Efeitos de diferentes intervenções no processo de eutrofização do Lago Paranoá (Brasília - DF)**. *Oecologia Brasiliensis*, 12(3):564-571.
- Aquino, I.G.; Roig, H.L.; Oliveira, E.S.; Garnier, J.; Guimarães, E.M.; Koide, S. (2018). **Variação temporal da descarga sólida em suspensão e identificação de minerais a partir de aperfeiçoamento de método de amostragem automática no Córrego Riacho Fundo, Brasília, Distrito Federal**. *Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, 18(2): 111-185.
- Araujo, D. (2012). **Isótopos de Cu e Zn: metodologia e aplicação como traçadores de fontes e processos biogeoquímicos na bacia do Lago Paranoá- DF**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geologia. UnB. 152p.
- Araújo, D. F. *et al.* (2017b). **Assessing man-induced environmental changes in the Sepetiba Bay (Southeastern Brazil) with geochemical and satellite data**. *Comptes Rendus - Geoscience*, 349(6–7):290–298.
- Batista, B. D.; Fonseca, B. M. (2018). **Fitoplâncton da região central do Lago Paranoá (DF): uma abordagem ecológica e sanitária**. *Eng Sanit Ambient.* 23(2): 229-241.
- Bau, M.; Dulski, P. (1996). **Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters**. *Earth Planet. Sci. Lett.* 143(1–4):245–255.
- Bau, M.; Knappe, A.; Dulski, P. (2006). **Anthropogenic gadolinium as a micropollutant in river waters in Pennsylvania and in Lake Erie, northeastern United States**. *Chemie der Erde* 66(2006):143–152
- Berbel, G. B. B. (2008). **Estudo do fósforo sedimentar e de suas especiações químicas em dois sistemas costeiros e Plataforma Continental Sudeste (Brasil) e Baía do Almirantado (Região Antártica) considerando suas relações biogeoquímicas**. 2008. [s. l.].

- Branco, C.W.C.; Senna, P.A.C. (1994). **Factors influencing the development of *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Microcystis aeruginosa* in the Paranoá Reservoir, Brasília, Brazil.** *Algological Studies*, 75:85-96.
- Branco, C.W.C.; Senna, P.A.C. (1996a). **Phytoplankton composition, community structure and seasonal changes in a tropical reservoir (Paranoá Reservoir, Brazil).** *Algological Studies*, 81:69-84.
- Branco, C.W.C.; Senna, P.A.C. (1996b). **Relations among heterotrophic bacteria, chlorophyll-a, total phytoplankton, total zooplankton and physical and chemical features in Paranoá reservoir, Brasília, Brazil.** *Hydrobiologia*, 337:171-181.
- Brown, G.E., Calas, G. (2011). **Environmental mineralogy – Understanding element behavior in ecosystems.** *Comptes Rendus Geosci.* 343:90–112.
- Burnett, J. A. B.; Mattos, S. P. & Azzolin, N. M. P. (2001). **Intervenções da Companhia de Saneamento.** pp. 199-212. In: F.O. Fonseca, (org). *Olhares sobre o Lago Paranoá.* Ed. SEMARH Brasília. 420p.
- Campos, M. L.; Silva, F. N.; Neto, A. E. F.; Guilherme, L. R. G.; Marques, J. J.; Antunes, A. S. (2005). **Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha.** *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 40(4):361-367.
- Castro, K. B.; Roig, H. L.; Neumann, M. R. B.; Rossi, M. S.; Seraphim, A. P. A. C. C.; Júnior, W. J. R.; Costa, A. B. B.; Hofer, R. (2019). **Nem perspectives in land use mapping based on urban morphology: A case study of the Federal District, Brazil.** *Land Use Policy.* 87:104032.
- CODEPLAN (2013). **Imagens aéreas ortorretificadas do Distrito Federal.** Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2013. Fotografia aérea. Escala 1:1.000. Disponível em: <http://ortofoto.mapa.codeplan.df.gov.br/mapcache>. Acesso em: 19 de março de 2019.
- Costa, B.F. (2019). **Análise dos Serviços Ecossistêmicos para Segurança Hídrica da Bacia Hidrográfica do Paranoá.** PIBIC. UnB. 25p.
- Costa, B.F.; Brito, L. K. S. ; Costa, M. E. L.; Koide.S; Roig. L.R. (2019). **Evaluation of the Impact of Residential Urban Patterns on Water Ecosystem Services in Federal District, Brazil. 10 years advancing ecosystem services science, policy and practice for a sustainable future.** Hannover,Alemanha. 5p
- Costa, M. E. L.; Souza, F. P.; Koide, S. (2017). **Nutrientes nas águas urbanas do Lago Paranoá.** In: *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis: SC.
- Dias, D.F.R. (2017). **Processo geoquímicos na interface sedimento-água no braço Riacho Fundo do Lago Paranoá – DF.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Ferreira, C. J. (2003). **BioGeoQuímica do Fósforo e Eutrofização – Os Ecossistemas Lênticos em Particular.** 2003. [s. l.].

- Franz, C.; Abbt-Braun, G.; Lorz, C.; Roig, H.L.; Makeschin, F. (2014). **Assesment and evaluation of metal contents in sediment and water samples within an urban watershed: an analtsis of antropogenic impacts on sediment and water quality in Central Brazil**. *Environ Earth Sci*, 72:4873-4890.
- Franz, C.; Makeschin, F.; Weiß, H.; Lorz, C. (2013). **Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil-using the fingerprinting approach**. *Sci Total Environ*, 466–467:513–523.
- Felizola, E.R.; Lago, F.P. de L.S.; Galvão, W.S. (2001). **Avaliação da dinâmica da paisagem do Distrito Federal. Projeto da Reserva da Biosfera Cerrado – Fase I**. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu: INPE, p. 1593-1600.
- _____. Ministério da Saúde. (2011) Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Diário Oficial da União, Brasília.
- Governo do Distrito Federal (2009). **Levantamento Topográfico do Distrito Federal**. Sistema de Informações Territoriais e Urbanas do Distrito Federal. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEDUH). GDF, Brasília. Disponível em: https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/static/shapes_download/CurvasdeNivelde5mde2009.zip. Acesso em: 13 de março de 2019.
- Holtan, H.; Kamp-Nielsen, L.; Stuanes, A. O. (1988). **Phosphorus in soil, water and sediment: an overview**. *Hydrobiologia*, [s. l.], 170(1):19–34.
- IUPAC: Guidelines for terms related to chemical speciation. *Clinical Chemistry*. (2000). 72(8):1453–1470.
- Kulaksiz, S.; Bau, M. (2011). **Anthropogenic gadolinium as a microcontaminant in tap water used as drinking water in urban areas and megacities**. *Applied Geochemistry* 26(2011):1877–1885.
- Knappe, A. *et al.* (2005). **Positive gadolinium anomaly in surface water and ground water of the urban area Berlin, Germany**. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 65(2):167–189.
- Kulaksiz, S.; Bau, M. (2007). **Contrasting behaviour of anthropogenic gadolinium and natural rare earth elements in estuaries and the gadolinium input into the North Sea**. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(1-2):361–371.
- Lima, L. (2009). Avaliação e monitoramento do potencial de prestação de Serviços Ecosistêmicos no Distrito Federal. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Unb. 215p.
- Lima, J.E.F.W.; Silva, E.M.; Strauch, M.; Lorz, C. (2013) **Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado**. In. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17 a 22 de novembro de 2013, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 8 p.

- Mar da Costa, N.Y. *et al.* (2016). **Biogeochemical mechanisms controlling trophic state and micropollutant concentrations in a tropical artificial lake.** *Environ Earth Sci* 75:854.
- Mclaughlin, M.J. (2000). **Bioavailability of metals to terrestrial plants.** In: Allen, H.E. (Ed.), *Bioavailability of Metals in Terrestrial Ecosystems. Importance of Partitioning for Bioavailability to Invertebrates, Microbes and Plants*. SETAC Press, Pensacola, FL, pp. 39-68.
- Menezes, P. H. B. J. (2010). **Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do Lago Paranoá.** Dissertação de Mestrado. IG-UnB; 158 pag.
- Menezes, P. H. B. J.; Roig, H. L. ; Almeida, T. ; Neto, G. B. S. ; Isaias, F. B. (2012). **Análise da evolução do padrão de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição do Lago Paranoá - DF.** *Estudos Geográficos (UNESP)*, 8. p. 88.
- Menezes, P. H. B. J.; Roig, H. L.; Almeida, T.; Neto, G. B. S.; Isaias, F. B. (2010). **Análise da evolução do padrão de uso e ocupação na bacia de contribuição do Lago Paranoá – DF.** *Estudos Geográficos*, 8(1):88-106.
- Mulholland, D. S.; Boaventura, G. R.; Araújo, D.F. (2012). *Environ Earth Sci*.67:1307.
- Nardini, M. J; Nogueira, I.S. o processo antrópico de um lago artificial e o desenvolvimento da eutrofização e florações de algas azuis em goiânia. *Estudos, Goiânia*, v. 35, n. 1/2, p. 23-52, jan./fev. 2008.
- Padovesi-Fonseca, C. & Philomeno, M. G.(2004). **Effects of algicide (Copper Sulfate) application on short-term fluctuations of phytoplankton in Lake Paranoá, Central Brazil.** *Braz. J. Biol.*, 64(4):819-826.
- Postma, D. and Jakobsen, R., (1996). **Redox zonation: Equilibrium constraints on the Fe(III)/SO₄-reduction interface.** *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(17):3169-3175.
- Raju, C. S. K. *et al.* (2010). **A novel solid phase extraction method for pre-concentration of gadolinium and gadolinium based MRI contrast agents from the environment.** *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(10):1573–1580.
- Rauret, G., López-Sánchez, J. F., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A., & Quevauviller, P. (1999). **Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials.** *Journal of Environmental Monitoring*, 1(1):57–61.
- Rauret, G.; Lopez-Sanchez, J. F.; Luck, D.; Yli-Halla, M.; Muntau, H.; Quevauviller, P. (2001). **The certification of extractable contents (mass fractions) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn in freshwater sediment following a sequential extraction procedure.** BCR-701; EUR 19775EN: p. 77.
- Reatto, A., Martins, E. S., Cardoso, E. A., Spera, S. T., Carvalho Jr., O. A. C., Silva, A. V. E Farias, M. F. R. (2003). **Levantamento de reconhecimento de solos**

- de alta intensidade do alto curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento N° 92. EMBRAPA Cerrados, Distrito Federal, 2004.
- Ress. C. B.; Roig. H. L. (2013). **Efeitos colaterais e assoreamento do Paranoá em virtude da implementação do setor habitacional Noroeste.**
- Rocha, A.J.A. (1994). **Caracterização limnológica do Distrito Federal.** In: PINTO, M.N. (Ed.) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas* EDUnB, Brasília, Brasil. p. 469-492.
- Roig, H. L.; Ferreira, A. M. R.; Menezes, P. H. B. J.; Marotta, G. S. (2013). **Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE
- Singh, A. K.; Mondal, G. C.; Singh, P. K.; Singh, S.; Singhh, T. B.; Tewary, B. K. (2005). **Hydro-chemistry of reservoirs of Damodar River Basin, India: weathering processes and water quality assessment.** Environmental Geology, 48:1014–1028.
- Silva, D. (2014). **Avaliação espaço-temporal da distribuição de fósforo na água e nos sedimentos de fundo das sub-bacias dos rios Cuiabá e São Lourenço e em algumas baías do Pantanal Matogrossense.** 2014. [s. l.].
- Slavinić, P.; Cvetković, M. (2016). **Volume calculation of subsurface structures and traps in hydrocarbon exploration – a comparison between numerical integration and cell based models.** Open Geosciences, in press, DOI: 10.1515/geo-2016-0003
- Sparks, D.L. (2005). **Toxic Metals in the Environment: The Role of Surface Elements.** (4):193–97.
- Starling, F.L.R.M. & Lazzaro, X. (1997). **Experimental investigation of feasibility of improving water quality by controlling exotic planktivore overpopulation in the eutrophic Paranoá Reservoir no Brasilia, Brazil.** Verh. Internat. Verein. Limnol., 26:789-794.
- Starling, F. L. R. M., (1993). **Análise experimental dos efeitos da tilápia-do-congo (*Tilapia rendalli*) e carpa-prateada (*Hypophthalmichthys molitrix*) sobre a estrutura da comunidade planctônica do Lago Paranoá, Brasília (DF).** *Acta Limnol. Brasil.*, 4:144-156.
- Starling, F. L. R. M. ; Lazzaro, X. (1997). **Experimental Investigation Of The Feasibility Of Improving Water Quality By Controlling Exotic Planktivore Overpopulation In Eutrophic Paranoá Reservoir (Brasília-Df, Brazil).** **Proceedings of the International Association of Theoretical and Applied Limnology** , Alemanha, v. 26, p. 789-794
- Starling, F.L.R.M.; Pereira, C.E.B.; Angelini, R. (2002). **Modelagem Ecológica da Dinâmica do Fósforo e Avaliação da Capacidade Suporte do Lago Paranoá Frente à Ocupação da sua Bacia de Drenagem.** Brasília: Companhia

- Energética de Brasília, Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. 162 p.
- Svirčev, Z., Krstić, S., Marković, S. B., Plavša, J., Lazić, L. (2008) Methods for Management of Eutrophication in Freshwater Ecosystems in Vojvodina. **Geographica Pannonica**, 12:4-11.
- Tessier, A. *et al.* (1979). **Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical chemistry, United States**, 51(7):844-851.
- Tepe, N.; Romero, M.; Bau, M. (2014). **High-technology metals as emerging contaminants: Strong increase of anthropogenic gadolinium levels in tap water of Berlin, Germany, from 2009 to 2012.** Applied Geochemistry, 45:191-197.
- UNESCO. (2002). **Vegetação do Distrito Federal. Tempo e Espaço: Uma avaliação multitemporal da perda de cobertura vegetal no DF e da diversidade**
- Merschel, G.; Bau, M.; Baldewein, L.; Dantas, E. L.; Walde, D.; Buhn, B. (2015). **Tracing and tracking wastewater-derived substances in freshwater lakes and reservoirs: Anthropogenic gadolinium and geogenic REEs in Lake Paranoá, Brasília.** Comptes Rendus Geoscience.
- Ure, A. M.; Quevauviller, Ph.; Muntau, H.; Griepink, B. (1993). **Speciation of heavy metals in solids and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities.** International Journal of Environmental Analytical Chemistry; 51:135.
- Vallejuelo, S. F.; Gredilla, A.; Diego, A.; Arana, G.; Madariaga, J. M. (2014). **Methodology to Assess the Mobility of Trace Elements between Water and Contaminated Estuarine Sediments as a Function of the Site Physico-Chemical Characteristics.** Science of The Total Environment 473-474. Elsevier B.V.: 359–71.
- Wang, Y.; Cappellen, P. V. (1996). **A multicomponent reactive transport model of early diagenesis: Application to redox cycling in costal marine sediments.** Geochimica et Cosmochimica Acta 60(16):2993-3014.