

**Levantamento experimental do Ground Penetrating Radar (GPR) no estudo do rio
Aturiaí (planície costeira de Bragança, nordeste do Pará)**
**Experimental survey of the Ground Penetrating Radar (GPR) in the study of the Aturiaí
river (Bragança Coastal Plain, northeast of Pará)**
**Levantamiento experimental del Ground Penetrating Radar (GPR) en el estudio del río
Aturiaí (planície costera de Bragança, noreste de Pará)**

Recebido: 26/09/2020 | Revisado: 08/10/2020 | Aceito: 12/10/2020 | Publicado: 12/10/2020

Clóvis Nivaldo da Costa Sousa Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9343-5019>

Federal University of Pará, Brazil

E-mail: clovissousajr@gmail.com

Maamar El Robrini

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7850-1217>

Federal University of Pará, Brazil

E-mail: robrini@ufpa.br

Pedro Andrés Chira Oliva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-1577>

Federal University of Pará, Brazil

E-mail: chira@ufpa.br

Resumo

Este artigo mostra o experimento do Ground Penetrating Radar (GPR) aplicado no rio Aturiaí (Augusto Corrêa, Pará, Brasil), que é um dos mais importantes da bacia hidrográfica do município de Augusto Corrêa. Este rio tem um comprimento de 15 km e uma largura que varia entre 8 m e mais de 200 m na foz, com profundidade entre 0,8-1 m na cabeceira, 1,2-1,5 m na parte média e 1,6-2 m na foz. Durante o período seco, a salinidade é mais alta e com valores entre 0,05 (parte interna) e 30,9 (foz), bem próximos da salinidade oceânica. O rio atravessa o manguezal na planície costeira Bragantina e deságua no estuário do rio Caeté. Os resultados mostram que com a antena de frequência de 200 MHz, o GPR consegue obter registros (radargramas) da subsuperfície do rio, com mais de 3 m de profundidade, atingindo a sequência transgressiva basal (S1), sendo constituída por areias e lamas de origem marinha/estuarina na

base (3-6 m). A granulometria dos sedimentos revela que a areia é a principal classe dominante (58%) nos fundos do rio, e o tamanho das partículas diminui da montante à foz. Avaliou-se a performance do GPR na detecção dos estratos do subfundo do rio Aturiaí, durante um ciclo sazonal, com salinidade alta e baixa.

Palavras-chave: Augusto Corrêa; Rio Aturiaí; Planície costeira de Bragança; Salinidade; GPR.

Abstract

This article shows the Ground Penetrating Radar (GPR) experiment applied to the Aturiaí river (Augusto Corrêa, Pará, Brazil), which is one of the most important in the hydrographic basin of the municipality of Augusto Corrêa. This river has a length of 15 km and a width varying between 8 m and more than 200 m at the mouth, with depth between 0,8-1 m at the headwater, and 1,2-1,5 m at the middle and 1,6-2 m at the mouth. During the dry period, salinity is higher and registers values between 0,05 (internal part) and 30,9 (mouth), very close to ocean salinity. The river runs through the mangrove on the Bragantine coastal plain. The results show that with the 200 MHz frequency antenna, the GPR is able to obtain records (radargrams) of the river's subsurface, over 3 m deep, reaching the baseline transgressive sequence (S1), consisting of sands and muds of marine/estuarine origin at the base (3-6 m). The granulometry of the sediments reveals that sand is the main dominant class (58%) at the bottom of the river, and the size of the particles decreases from upstream to mouth. The performance of the GPR in the detection of the strata of the Aturiaí river subfund was evaluated during a seasonal cycle, with high and low salinity.

Keywords: Augusto Corrêa; Aturiaí river; Bragança Coastal Plain; Salinity; GPR.

Resumen

Este artículo muestra el experimento del Ground Penetrating Radar (GPR) aplicado al río Aturiaí (Augusto Correa, Pará, Brasil), que es uno de los más importantes de la cuenca hidrográfica del municipio de Augusto Correa. Este río tiene una largura de 15 km y una anchura que varía entre 8 m y más de 200 m en la desembocadura, con profundidad entre 0,8-1 m en la cabecera, 1,2-1,5 m en la parte central y 1,6-2 m en la desembocadura. Durante el período seco, la salinidad es mayor y registra valores entre 0,05 (parte interna) y 30,9 (desembocadura), muy cercanos a la salinidad del océano. El río atraviesa el manglar de la planicie costera bragantina. Los resultados muestran que con la antena de frecuencia de 200 MHz, el GPR es capaz de obtener registros (radargramas) del subsuelo del río, a más de 3 m de profundidad, alcanzando la secuencia transgresora basal (S1), consistente en arenas y fangos de

origen marino/estuarino en la base (3-6 m). La granulometría de los sedimentos revela que la arena es la principal clase dominante (58%) en el fondo del río, y el tamaño de las partículas disminuye desde la cabecera hasta la desembocadura. Se evaluó el desempeño del GPR en la detección de los estratos del subfondo del río Aturiaí durante un ciclo estacional, con alta y baja salinidad.

Palabras clave: Augusto Corrêa; Río Aturiaí; Planicie costera de Bragança; Salinidad; GPR.

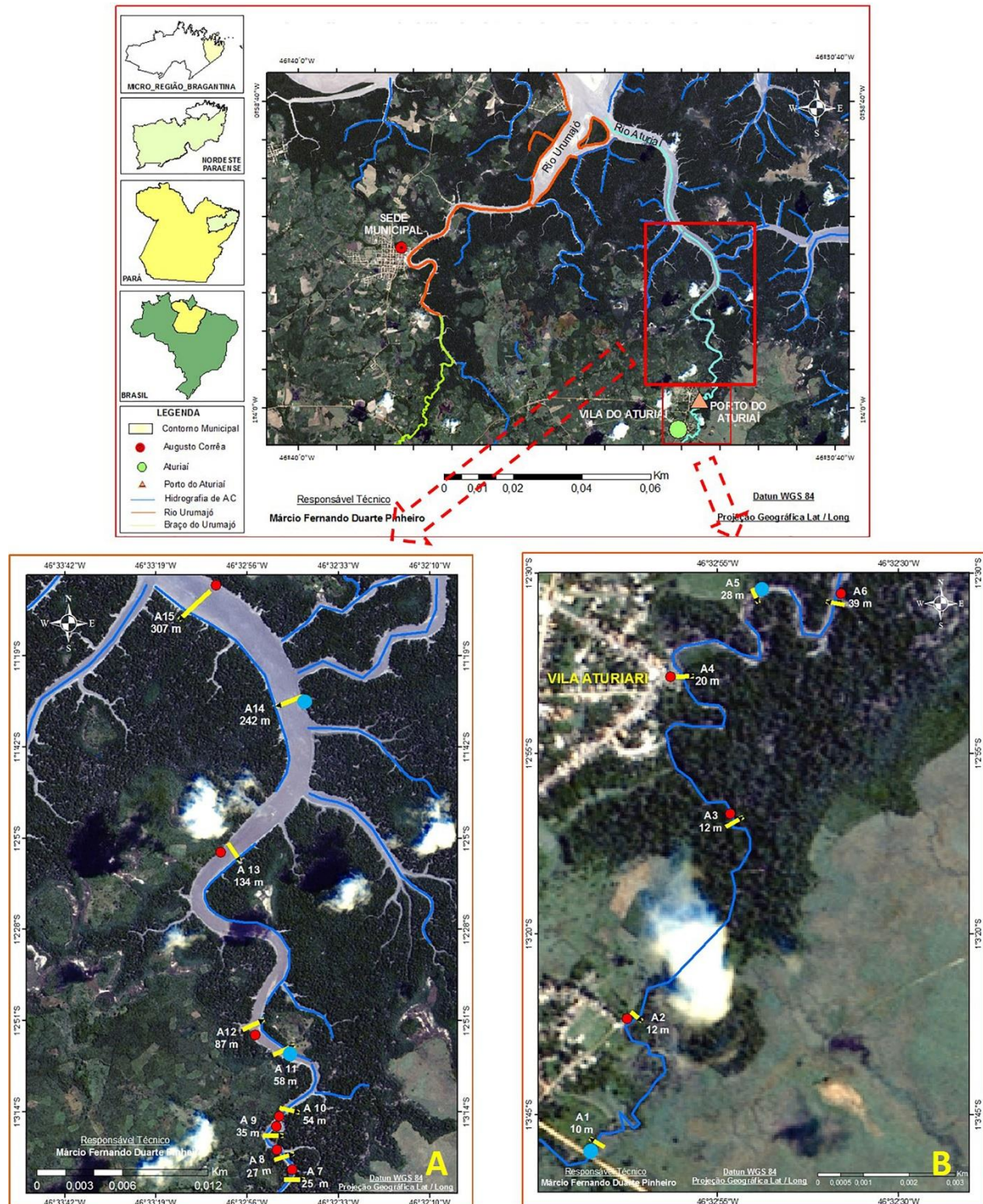
1. Introdução

As oscilações do nível do mar, durante o Quaternário, têm provocado em todo mundo, avanços e recuos das linhas de costa, transferindo sedimentos das regiões costeiras na direção do continente e/ou da plataforma continental interna. Essa interação entre o mar e o continente, resulta na formação de uma série de ambientes costeiros (Pereira, Gamboa, Silva, Rodrigues, & Costa, 2003). Diante disso, os estuários amazônicos vêm sofrendo assoreamento, aliados ainda a desmatamento e erosão das margens (Peixoto, 2019).

Os efeitos da erosão em relação aos recursos hídricos podem se manifestar através do assoreamento dos cursos d'água. Entre as principais causas da erosão estão o desmatamento de áreas vulneráveis, a expansão urbana desordenada, as atividades mineradoras, etc (Aquino & Lopez, 2000). O assoreamento é considerado natural, mas as ações humanas o agravam à medida que alteram as adjacências dos cursos d'água, afetando o transporte sedimentar (Abdon, 2004). As formas de uso e ocupação do solo, que determinam o aumento ou a diminuição do volume do escoamento superficial e, conseqüentemente, o aporte de sedimentos no leito dos rios, contribuindo com o aumento da concentração de sólidos e nutrientes, que podem alterar a qualidade e a disponibilidade da água (Barbosa, 2003).

O rio Aturiaí localiza-se na comunidade do Aturiaí (01°03'47"S, 46°33'75"O) do município de Augusto Corrêa (Pará, Brasil), a 20 km da sede do município (Figura 1). Este rio estende-se da foz, onde se junta ao rio Urumajó (0°59'07"S, 46° 34'31"O), até a localidade de mesmo nome (1°03'51"S e 46°33'01"), com comprimento de 15 km, desembocando no estuário do rio Caeté (Pará).

Figura 1. Mapa de localização da comunidade e rio Aturiaí. São apresentados a localização dos 15 perfis transversais (setas amarelas), os 15 pontos de medição de salinidade (círculos em vermelho e em azul) e os 4 pontos de amostragem de sedimentos coletados (círculos em azul).



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2015) e Google Earth Pro (2019).

O canal de maré de Aturiaí se desenvolve dentro de uma planície aluvial estreita, que deságua ao norte no estuário do rio Caeté. O canal é sinuoso com barras longitudinais e pontuais, e anomalias morfológicas. A planície de inundação é delimitada por “*levées*” e é inundada durante a estação chuvosa.

Uma vez que o assoreamento pode reduzir a capacidade de armazenamento dos cursos d'água e prejudicar o consumo e atividades importantes para o homem (*lazer*, navegação, geração de energia, etc.), torna-se necessário o seu monitoramento. Nesse sentido, as técnicas geofísicas e geológicas podem ser empregadas, cada uma com as suas características, para gerar um resultado integrado do estudo do referido fenômeno.

O *Ground Penetrating Radar* (GPR) é uma ferramenta geofísica, não destrutiva, usada para determinação da geometria do fundo e a espessura dos sedimentos em rios, lagos e canais, para estudos ambientais, hidrológicos e de engenharia. Os estudos de GPR são empregados para detecção de sedimentação e assoreamento de rios (Souza, Porsani, Sousa, & Moutinho, 2002; Aquino, Lopez, Souza, Gandolfo, & Botelho, 1998), reservatórios (Frazão, 2006; Souza *et al.*, 2002), canais de maré, praias (Correia *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2003), dunas (Dantas, 2020; Leite, 2010; Rossetti, Góes, Lena, & Souza, 2001), solos (Campos, 2019; Oliveira & Santos, 2019; Ciampalini *et al.*, 2015; Tran, Bogaert, Wiaux, Vanclooster, & Lambot, 2015; Cezar, Nanni, Chicati, & Oliveira, 2012), entre outras aplicações (Cordeiro, Aranha, Costa, Knauer, & Magalhães, 2020; Soupios & Ntarlagiannis, 2017; Boudreault, Dubé, Chouteau, Winiarski, & Hardy, 2010).

Este artigo mostra a avaliação do GPR no mapeamento da morfologia de fundo e espessura dos sedimentos não consolidados do rio Aturiaí.

2. Caracterização da área

2.1. Geomorfologia

A região de estudo faz parte (interna) do litoral de “falsas *rias*” do Nordeste do Pará, profundamente recortado por estuários, seguindo orientações (controle estrutural), NW-SE e NE-SW (área), e localiza-se no segundo setor de costa baixa, ocupada por uma extensa planície de manguezais, recortada por vales afogados, esculpidas em depósitos holocênicos (Souza Filho & El Robrini, 2000; El Robrini *et al.*, 2018). Na área de investigação, o Planalto Rebaixado da Amazônia ou Planalto Costeiro (colinas de baixa amplitude), esculpido nos sedimentos do

Grupo Barreiras, ocorre recuado. Entretanto, na frente se desenvolve uma planície costeira baixa com 20 km de largura.

De acordo com Souza Filho e El Robrini (2000), a planície costeira estende-se ao norte dos planaltos costeiros por mais de 20 km, ocorrendo com amplas planícies de maré (manguezal), localizada entre o alto de primavera e nível médio das marés. A *Rhizophora sp.* e *Avicennia sp.* são as espécies dominantes, com solo lamacento, rico em matéria orgânica. Esta planície é controlada pela topografia, onde encontram-se manguezal de supramaré, intermaré e inframaré. Ocorrem ainda os pântanos salgados ou "Campos de Bragança", subdivididos em pântanos salgados internos e externos. Os pântanos salinos externos ocorrem sobre antigos depósitos de cristas de praia arenosa (*cheniers*) e são frequentemente inundados durante as marés de primavera.

Nos entornos da planície lamosa, ocorre a planície arenosa ao longo da costa entre os níveis médios das marés e as marés baixas da primavera. Esta planície é formada por cristas de barreira-praia e eles foram subdivididos em zona supratidal (costa), zona intertidal e zona subtidal com base no nível relativo das marés.

Na parte interna, ocorrem dunas costeiras, cobertas por vegetação, e compostas por areia de quartzo muito fina. Ainda, a planície aluvial se estende ao sul do limite das marés, formando a planície de inundação das partes de água doce dos rios Caeté, Taperaçu e Aturiaí.

2.2. Geologia

As unidades litoestratigráficas aflorantes na região de investigação incluem sedimentos siliciclásticos do Grupo Barreiras, formados por litofácies: argilo-arenosa, arenosa e conglomerática (Rossetti, Truckenbrodt, & Góes, 1989). Sobre estes sedimentos, repousam os depósitos da formação Pós-Barreiras (areno-argilosos) (Rossetti & Góes, 2001). Entretanto, a cobertura sedimentar recente é formada por sedimentos da planície estuarina e costeira (Quaternário). A área de investigação está instalada na Bacia Costeira Bragança-Viseu, que representa uma fossa tectônica delimitada por falhas normais de direção NW-SE (Aranha, Lima, Souza, & Marinho, 1990). Durante o paleozóico, a região esteve sujeita a uma tectônica distensiva de direção NW-SE, relacionada à abertura do oceano Atlântico, originando falhas normais de direção N-S e NE-SW e falhas transcorrentes de direção NW-SE (Costa *et al.*, 2002).

2.3. Clima e Maré

A região de investigação é caracterizada por um clima do tipo AWA'A, ou muito úmido, megatérmico, com deficiência de água moderada nos períodos de julho a dezembro. A temperatura apresenta uma variação anual menor, oscilando entre 18 °C (mínima) e 33 °C (máxima), com média de 27 °C, e valores mais elevados, entre agosto a outubro, com máximo de 42 °C. Os principais ventos são os alísios, com direção preferencial NE, e variações para N e E, constantes e moderados, com velocidade máxima de até 7,5 m/s (Instituto Nacional de Meteorologia [INMET], 2020). A pluviosidade é elevada, com uma média anual de 2.500 mm/ano. Ocorrem duas épocas, uma chuvosa (dezembro a junho), e outra seca (julho a novembro).

O rio Aturiaí não possui fluxo de água durante o ano todo e atinge níveis baixos, chegando até mesmo secar em alguns pontos, no período seco (julho a novembro). Este rio é totalmente influenciado pelas águas do estuário do rio Caeté, onde as macro-marés são semi-diurnas, com altura de 5 m e 3,98 m, respectivamente durante a sizígia e quadratura (Diretoria de Hidrografia e Navegação [DHN], 2020) e correntes máximas de até 1,5 m/s (Cohen, Lara, Ramos, & Dittmar, 1999). Esses fatores, além da pluviosidade, são responsáveis pela variabilidade temporal e espacial de fatores como salinidade e concentrações de nutrientes. Moura e Nunes (2016) notaram uma turbidez alta (> 900 UNT) durante o período chuvoso.

3. Metodologia

A abordagem metodológica deste estudo é de natureza predominantemente quantitativa, onde faz-se a coleta de dados numéricos por meio de medições de grandezas e obtendo-se números com respectivas unidades segundo Pereira, Shitsuka, Parreira, & Shitsuka (2018).

3.1. Ground Penetrating Radar (GPR)

As campanhas para coleta de dados foram realizadas ao longo do ano de 2016, sendo subdivididas em 3 (três) períodos: março de 2016 (estação chuvosa), julho de 2016 (estação intermediária) e novembro de 2016 (estação seca). O levantamento com o GPR foi realizado ao longo de 15 seções transversais (Figura 1), com largura entre 10 m (A1) e 307 m (A15) da cabeceira até a foz do rio Aturiaí (Figuras 1 e 2), a bordo de uma embarcação regional de madeira (Figura 2). A escolha por esta embarcação teve como intuito evitar uma possível

atenuação do sinal eletromagnético do aparelho, que fatalmente ocorreria caso a embarcação fosse de material metálico.

Figura 2. Levantamento de dados geofísicos no rio Aturiaí usando o aparelho GPR da marca GSSI SIR 3000 com a antena de frequência 200 MHz, dispostos no interior de uma embarcação de madeira.



Fonte: Os autores.

O aparelho utilizado para a aquisição de dados GPR foi o equipamento *TerraSIRch SIR* (*Subsurface Interface Radar*) *System-3000*, fabricado pela *Geophysical Survey Systems Inc* (GSSI) (Figura 2). Foram executados testes prévios com as antenas de 200 e 400 MHz, pois ambas antenas se aplicam muito bem aos estudos geológicos e ambientais (Tabela 1). A antena de 200 MHz apresentou melhores resultados e foi a escolhida para ser usada nesta investigação. Na Tabela 1 é apresentada a relação entre a frequência da antena (MHz/GHz) do GPR e a profundidade (m) de alcance das antenas, com suas respectivas aplicações e a janela de tempo (ns) que deve ser considerada na configuração do referido equipamento.

Tabela 1. Relação frequência x profundidade do GPR.

Frequência Central	Aplicações	Profundidade aproximada de penetração (m)	Janela de tempo (ns)
2,6 GHz	Concreto, estradas e pontes	0,3	10
1,6 GHz	Concreto, estradas e pontes	0,5	10-15
900 MHz	Concreto, solos rasos e Arqueologia	1	10-20
400 MHz	Geologia, estudos ambientais e Arqueologia	3	20-100
200 MHz	Geologia e estudos Ambientais	8	70-300
100 MHz	Geologia e estudos Ambientais	20	300-500

Fonte: *Geophysical Survey Systems, Inc* (GSSI) (2011).

O princípio de funcionamento do GPR baseia-se na propagação e reflexão de ondas de altas frequências ao longo de um perfil. Um pulso de onda eletromagnética é transmitido ao solo, por meio da antena transmissora, e se propaga pelo meio, tendo parte de sua energia refletida e outra transmitida sempre que ocorrem variações nas propriedades do meio. O pulso refletido é recebido, amplificado e registrado pela antena receptora para que seja posteriormente visualizado e processado. Os sinais do GPR são registrados em nanossegundos (ns), que representam o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno da onda (Davis & Annan, 1989).

As imagens obtidas como resultado da aplicação do GPR são os radargramas, com o eixo horizontal, representando a distância do levantamento, enquanto o eixo vertical representa o tempo de trânsito (ida e volta) das ondas eletromagnéticas.

Neste levantamento foi utilizada a configuração afastamento fonte-receptor constante (*Common-Offset*, CO) e foi adotada uma janela de tempo de 150 ns para os radargramas deste estudo.

A interpolação de marcas para os pulsos eletromagnéticos foi feita a cada 1m para os perfis com até 20 m de comprimento. Para os perfis maiores que 20 m, as marcas foram interpoladas a cada 10 m.

De acordo com o manual do aparelho (GSSI, 2011), a antena de 200 MHz tem um alcance de 8 m de profundidade. Entretanto, deve-se levar em consideração a natureza do ambiente, os tipos de sedimentos no qual o sinal do aparelho está atravessando, já que dependendo destas características, esse alcance pode variar. Em ambientes salinos ou com presença de sedimentos de alta eletronegatividade, o GPR sofre muita influência no seu desempenho.

Os dados GPR levantados ao longo do rio Aturiaí foram processados utilizando o *software* de processamento de dados *ReflexW* (Sandmeier, 2008). Inicialmente um processamento básico foi aplicado com a finalidade de melhorar os radargramas através da análise das frequências que, removeram os ruídos de alta e baixa frequência dos sinais eletromagnéticos adquiridos. Na sequência foi realizada a etapa do pré-processamento que consiste na edição, reamostragem espacial e interpolação de traços para remover traços duplicados e corrigir a reamostragem espacial dos mesmos (Yelf, 2004; Rocha, Silva, Marques, & Leite Filho, 2015). O processamento consistiu das seguintes etapas:

- Correção estática do tempo zero: esta etapa corrige o efeito do desalinhamento em tempo, dos traços de um radargrama. A correção é realizada aplicando um deslocamento linear, para cima ou para baixo, nos traços do radargrama de modo a corrigir o desalinhamento entre traços adjacentes;

- Ganho: essa função é usada para intensificar a amplitude dos sinais registrados para uma melhor interpretação, já que o mesmo decai exponencialmente ao se propagar no meio estudado;

- Filtragem temporal (1-D): nessa etapa são retirados os ruídos ou reverberações para destacar o sinal de interesse. Com esse filtro é possível eliminar as frequências espúrias, que se encontram em faixas de alta ou baixa frequência e que eventualmente podem mascarar estruturas no radargrama;

- Filtragem Espacial (2-D): os filtros espaciais (2-D) realçam ou removem tipos de variações espaciais diferentes, atenuando ruídos provocados pelo deslocamento horizontal das antenas. Os filtros 2-D utilizados foram:

- *Background Removal*: este filtro (passa alta) remove as reverberações das antenas de baixa frequência e realça os refletores pontuais e inclinados;
- *Running average*: este filtro (passa baixa) atua efetuando uma média móvel em um número de traços escolhidos e o mesmo, foi utilizado com o objetivo de enfatizar os refletores e a continuidade lateral dos refletores horizontais.

Na última etapa foi aplicada a conversão tempo-profundidade. A velocidade utilizada no

processamento para a conversão de tempo em profundidade foi determinada por meio de ajustes das hipérbolas de difração, identificadas nos radargramas.

3.2. Análise da salinidade da água

A salinidade é o parâmetro que define a quantidade de sais existentes em massas de águas. Este parâmetro é de grande importância, pois está relacionada com outras propriedades físico-químicas da água, além de condicionar a fisiologia da maioria dos organismos que vivem no meio aquático (Bollmanh & Marques, 2000).

A propriedade da salinidade da água é um parâmetro que é utilizado como uma informação complementar, que pode contribuir para explicar o desempenho do GPR em estuários, com influência da salinidade. Os níveis de salinidade tendem a variar de acordo com fatores como: relação entre evaporação e precipitação, tipo de ambiente (oceanos, mares e estuários possuem teores de salinidade bem maiores do que os encontrados em rios, por exemplo), a dinâmica das correntes do ambiente estudado (Borella, 1986).

A salinidade da água foi medida *in situ* nos perfis GPR (15 pontos, Figura 1), utilizando-se o medidor multi-paramétrico HANNA HI 9828, que pode ser usado para medições em lagos, rios e mares, podendo alcançar até 10 m de profundidade.

3.3. Análise dos sedimentos

A amostragem de sedimentos de fundo foi realizada em 4 pontos: A1, 1°4'31.35"S, 46°33'9.13"O; A5, 1°3'45.44"S, 46°32'53.73"O; A11, 1°3'0.17"S, 46°32'45.47"O; A14, 1°1'31.05"S, 46°32'41.54"O (Figura 1), para verificar a natureza do fundo, perfazendo, um total de 20 amostras (5 amostras em cada um dos pontos selecionados). As amostras de sedimentos (500 g) foram realizadas em uma campanha única, na estação chuvosa (março de 2017), mediante uso de uma draga do tipo busca fundo.

No laboratório, estas amostras foram homogeneizadas e lavadas com a finalidade de retirar os sais solúveis e o sobrenadante, sendo que este processo foi repetido três vezes após a decantação do sedimento.

Após esse procedimento, a amostra (100 g) foi submetida a uma solução com peróxido de hidrogênio (H₂O₂), para eliminação da matéria orgânica, que em seguida, foi lavada, secada em estufa a 100 °C, e quarteada para peneiramento a seco.

A separação (via úmida) das frações de silte e argila foi realizada por meio da técnica de pipetagem. Posteriormente foi feita a homogeneização do material fino em uma suspensão aquosa e iniciou-se a contagem de tempo, onde, o material foi deixado em repouso durante 30 s. Em seguida, foi extraído um volume de 10 ml, utilizando uma pipeta na profundidade de 20 cm, a partir da superfície. Esse material foi colocado em um *becker* e levado para a estufa.

Mais uma vez a amostra foi homogeneizada e iniciou-se novamente a contagem de tempo, ficando o material em repouso durante 1 h e 51 min. Em seguida, fez-se a segunda coleta de um volume de 10 ml com a pipeta na profundidade de 10 cm a partir da superfície. O material foi novamente colocado em um *becker* e levado para a estufa, permanecendo lá por um período de 24 h cada. Após isso, foi obtido o peso do sedimento.

4. Resultados

4.1. Condições ambientais do rio Aturiaí

O rio Aturiaí é um canal de maré afluente do estuário do rio Caeté, localizado no baixo estuário (Baía do Caeté), com 15 km de comprimento, 8 m a 200 m de largura, e profundidade de 0,8-1 m (cabeceira), 1,2-1,5 m (parte média) e 1,6-2 m (foz), fortemente influenciado pelas águas do oceano Atlântico, através das marés (Figura 3).

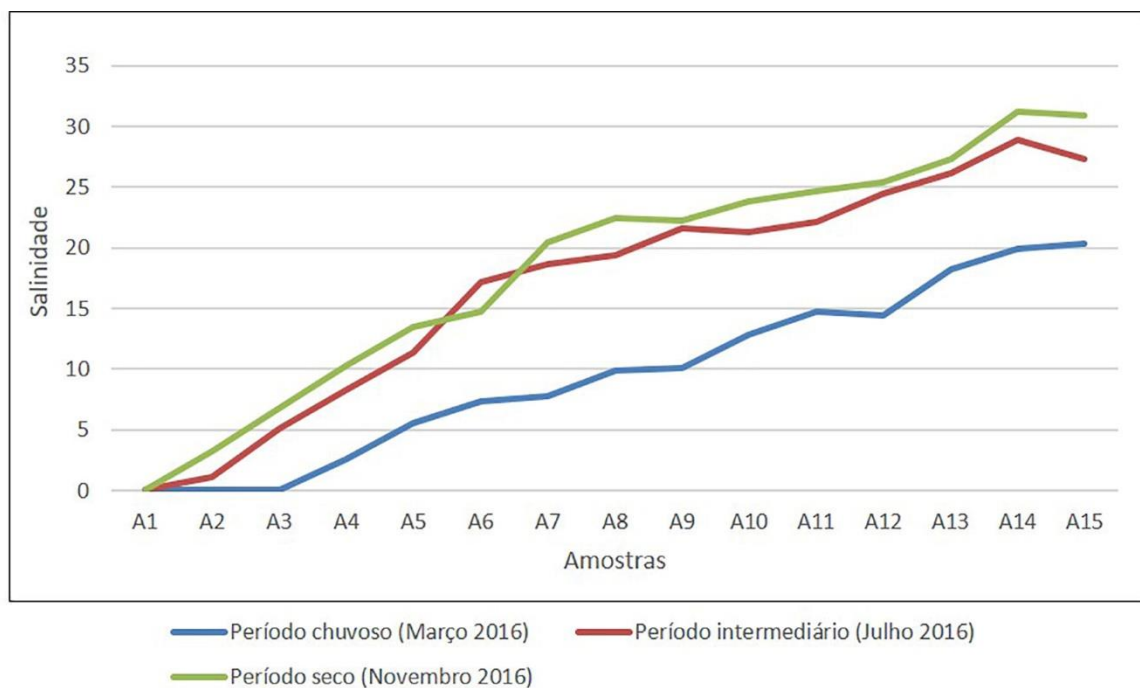
Figura 3. Principais pontos de levantamento do GPR e coleta de dados no rio Aturiaí, com suas características: A) A1: Ponte sobre o rio Aturiaí, situada na cabeceira do rio para uso da comunidade, B) A5: Trapiche de embarque/desembarque, C) A6: Terraço, com afloramentos de um pacote de sedimentos não consolidados, recoberto por vegetação rasteira, D) A8: Terraço, com afloramentos de um pacote de sedimentos não consolidados, recoberto por palmeiras e E) A10: Ponto mais largo, com terraço mais alto.



Fonte: Os autores.

A altura de maré máxima e mínima nos períodos chuvoso, intermediário e seco é respectivamente de 5,4/-0,2 m, 5,4/-0,1 m e 5,2/0,3 m (DHN, 2020). O rio Aturiaí deságua no trecho inferior do estuário do rio Caeté, sendo fortemente influenciado pela salinidade, onde os resultados indicam a tendência sazonal.

Figura 4. Registro da salinidade das águas no canal de maré de Aturiaí, da parte interna (A1) até a foz (A15), durante os períodos chuvoso (03/2016), intermediário (07/2016) e seco (11/2016).



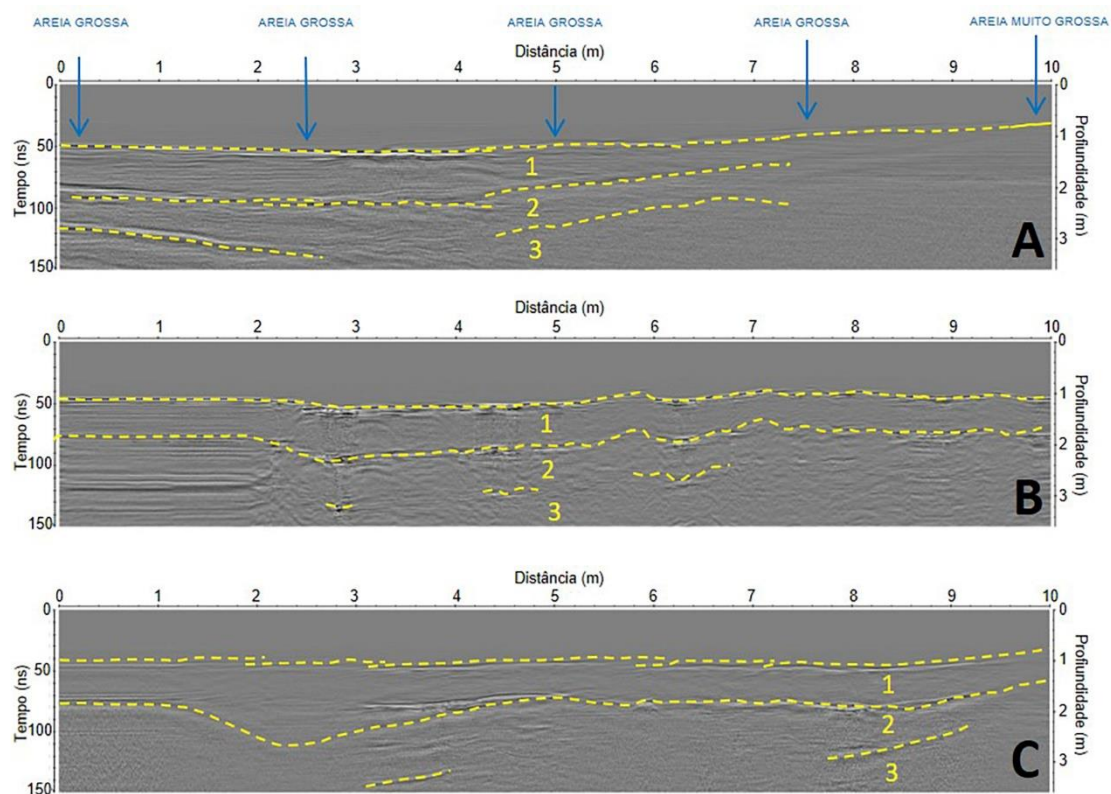
Fonte: Os autores.

No período chuvoso (03/2016), a salinidade do rio Aturiaí (Figura 4) variou entre 0,01 (A1) na parte interna e 20,3 (A15) na sua foz. No intermediário (07/2016), a salinidade apresentou um ligeiro aumento, 0,02 (A1) na parte interna e 27,3 (A15) na sua foz. Este período coincide com a diminuição do índice pluviométrico. Entretanto no período seco (11/2016), a salinidade tende a aumentar com valores entre 0,05 (A1) na parte interna e 30,9 (A13) na foz, sendo que este valor coincide com 86% da salinidade oceânica (36). Estudo realizado por Barletta *et al.* (2010) no estuário inferior do rio Caeté, apontam valores de salinidade altos (17-35), e corroboram relativamente com os valores obtidos neste trabalho. Este canal de maré é encaixado na planície de maré do macro estuário do rio Caeté.

4.2. Radargramas do rio Aturiaí

Para verificar a influência da salinidade sobre os radargramas, foram realizados levantamentos geofísicos (GPR) sazonais, considerando os períodos chuvoso (03/2016), intermediário (07/2016) e seco (11/2016).

Figura 5. Perfis GPR levantados no ponto A1. Períodos: A) chuvoso (março 2016), B) intermediário (julho 2016) e C) seco (novembro 2016).



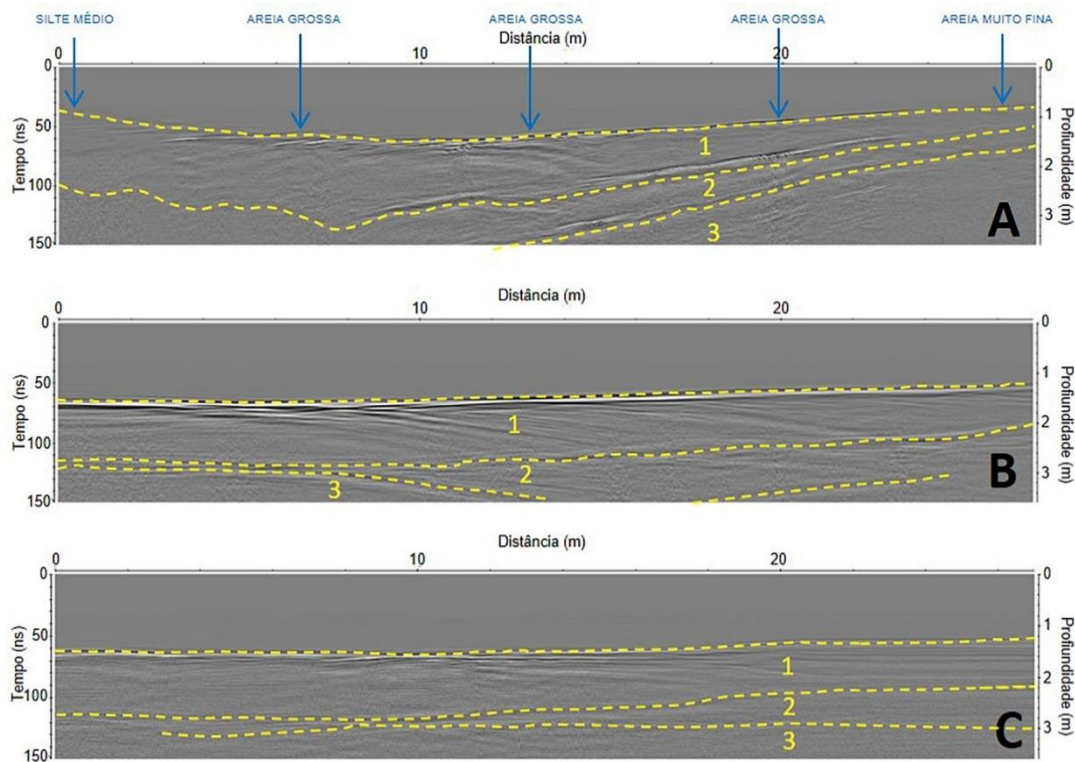
Fonte: Os autores.

No ponto A1, próximo à cabeceira do rio Aturiaí, o radargrama foi produzido em condições de salinidade quase nula, onde os valores de salinidade foram: 0,01 (período chuvoso), 0,02 (período intermediário) e 0,05 (período seco) (Figura 5).

A salinidade não interferiu na leitura dos radargramas e mostraram três refletores (linhas tracejadas de cor amarelo) bem definidos nos três períodos. Com base nos refletores identificados também foi possível definir 3 camadas, sendo que a camada acima da camada 1 é a coluna d'água do rio. As camadas 1 e 2 estão depositadas sobre o substrato rochoso identificado com o número 3. Todas estas camadas tiveram uma espessura variada

espacialmente e ao longo dos períodos estudados. A camada 1 teve uma espessura entre 0,6 e 1,6 m. Finalmente a camada 2 teve uma espessura compreendida entre 0,6 a 1,0 m. Neste perfil (Figura 5), os fundos são constituídos por areias grossas a muito grossas. O ponto A1 fica próximo da estrada PA-462, com uma grande influência antrópica, e a ponte da comunidade (Figura 2A).

Figura 6. Perfis GPR levantados no ponto A5. Períodos: A) chuvoso (março 2016), B) intermediário (julho 2016) e C) seco (novembro 2016).



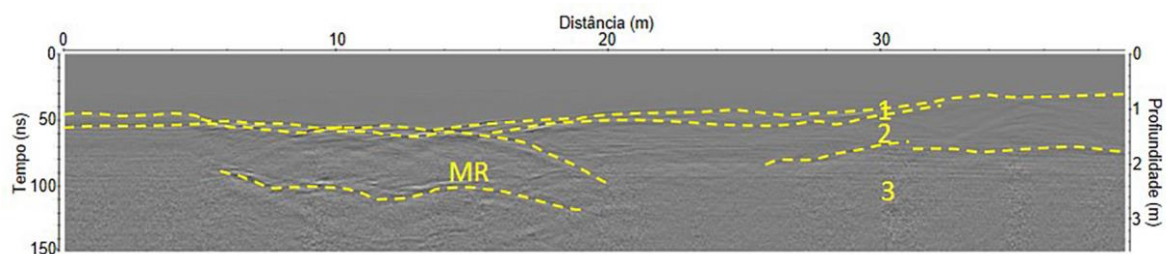
Fonte: Os autores.

No ponto A5 (Figura 6), localizado no curso médio do rio Aturiaí, próximo a um cais (Figura 2B), também foi possível a geração dos radargramas em todos os períodos, apesar do valor da salinidade atingindo 5,5 (período chuvoso), 11,4 (período intermediário) e 13,48 (período seco). As diferenças nos valores de salinidade têm a ver com a intensidade das chuvas no local de estudo. Este nível de salinidade apesar de ser maior em relação ao ponto A1 também não interferiu no desempenho da aquisição dos perfis GPR, com a mesma identificação dos 3 refletores anteriores. Entretanto, apenas o primeiro refletor tem uma boa definição nesse ponto, enquanto os outros não se apresentam com tanta clareza. Aqui também foi possível identificar 3 camadas. A camada acima da camada 1 corresponde à coluna d'água do rio. As camadas 1 e

2 estão assentadas sobre o substrato identificado com o número 3. As espessuras das camadas variaram ao longo da profundidade.

Na Figura 6A (margem lateral direita) as camadas 1 e 2 vão se acunhando e estão depositadas sobre o substrato rochoso. A camada 1 tem uma espessura entre 1 e 2 m sendo mais espessa próxima na direção da margem lateral esquerda e menos espessa na margem lateral direita (0,4 m). A camada 2 tem uma espessura menor (0,2 a 1 m) em relação as outras camadas. Os sedimentos depositados nos fundos são compostos por areias muito finas a grossas, entretanto, na margem esquerda, por se tratar de uma área relativamente calma, ocorre silte médio.

Figura 7. Perfil GPR levantado no ponto A6 durante o período chuvoso (março 2016). MR = reflexão múltipla.

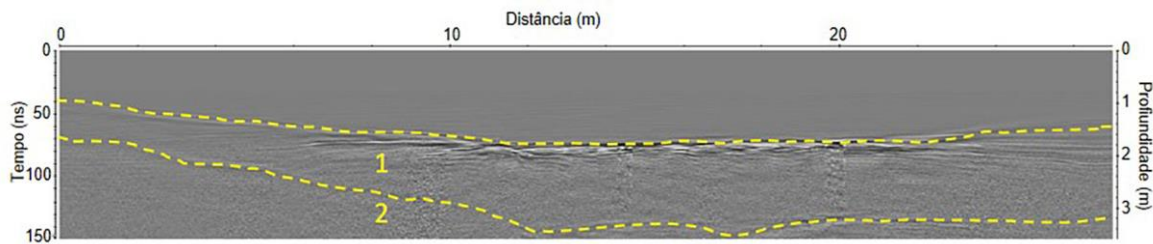


Fonte: Os autores.

No ponto A6 (Figura 7), localizado no curso médio do rio Aturiaí, foi possível a obtenção do radargrama somente no período chuvoso (março/2016), com uma salinidade de 7,3. Durante os períodos intermediário (salinidade = 17,2) e seco (salinidade = 14,7), não foi possível obter perfis de boa resolução e qualidade, devido aos altos valores de salinidade que limitam o desempenho do GPR, com a antena de frequência 200 MHz. Além da salinidade, o terreno é argiloso.

O radargrama obtido (Figura 7) mostra os três refletores identificados anteriormente e uma possível reflexão múltipla correspondente ao segundo refletor. Comparados com os perfis obtidos em pontos menos salinos, os refletores e camadas neste ponto não aparecem com tanta clareza. Foram identificadas as mesmas camadas dos pontos anteriores investigados. A camada 1 tem uma espessura de no máximo 0,2 m ao longo de todo o perfil. A camada 2 teve variações de espessura de até 1 m.

Figura 8. Perfil GPR levantado no ponto A8, quase na parte central do rio Aturiaí (período chuvoso, março 2016).

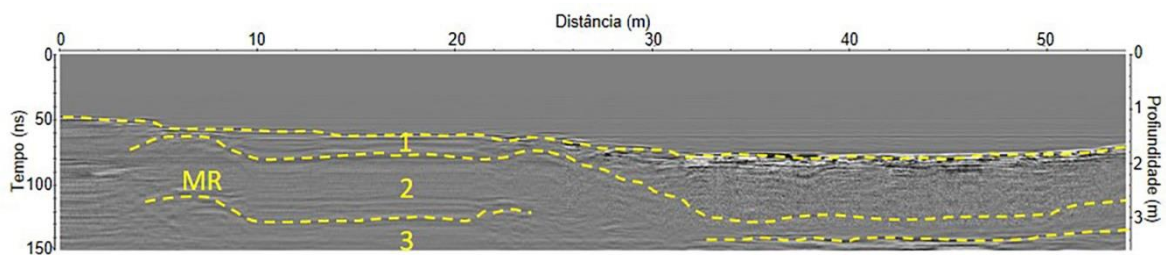


Fonte: Os autores.

No ponto A8 (Figura 8), localizado na parte central do rio Aturiaí, só foi possível a aquisição do radargrama no período chuvoso (março de 2016), com salinidade de 9,9. Nos outros períodos, a salinidade foi muito alta, chegando a valores de 19,4 (período intermediário) e 22,5 (período seco), a qual dificultou a penetração do sinal eletromagnético do GPR e comprometeu a resolução e qualidade do perfil. Neste ponto, aparece um terraço, formado por pacote sedimentar não consolidado (Figura 3D).

O radargrama mostra dois refletores, indicando dois estratos. A camada 1 tem uma espessura mínima de 0,8 m (margem lateral esquerda) e máxima de 1,8 m (margem lateral direita) a partir do centro do perfil (marcação de 12 m).

Figura 9 - Perfil GPR levantado no ponto A10, próximo à foz do rio Aturiaí (período chuvoso, março 2016). MR = reflexão múltipla.



Fonte: Os autores.

No ponto A10 (Figura 9), localizado próximo à foz do rio Aturiaí, também ocorreu o mesmo comportamento que nos perfis GPR dos pontos A6 (Figura 7) e A8 (Figura 8), onde somente foi possível a obtenção do radargrama no período chuvoso (março de 2016). Nos outros períodos, os valores da salinidade medidas foram altas: 21,3 (período intermediário) e 23,8 (período seco), o que dificultou a resolução e qualidade dos radargramas. O radargrama

obtido permitiu a identificação de três refletores. É importante ressaltar que também foi identificada uma possível reflexão múltipla correspondente ao segundo refletor. O mesmo número de camadas e substrato rochoso também são visualizados neste perfil.

No ponto A10 (Figura 9), a camada 1 tem uma espessura variando de 0,1 m (margem lateral esquerda) até 1,0 m na margem lateral direita. A camada 2 apresenta a menor espessura (0,4 a 0,6 m). Os dados GPR foram sensivelmente afetados pela mudança sazonal dos valores de salinidade. Uma vez que o GPR passa a sofrer limitações na penetração do sinal eletromagnético à medida que aumenta a condutividade elétrica de um ambiente, fica claro entender, porque os melhores dados foram obtidos no período chuvoso. Durante o período chuvoso (março de 2016), a média pluviométrica mensal foi de 340 mm (INMET, 2020), influenciando no volume de água do rio, que diluiu parte da água salgada proveniente do oceano Atlântico, diminuindo os níveis de salinidade e tornando o rio um ambiente com uma menor condutividade, causando menos interferência na penetração do sinal do GPR.

Nos pontos mais próximos da foz do rio: A11 (14,7 a 24,7), A12 (14,4 a 25,4), A13 (18,2 a 27,3), A14 (19,9 a 31,2) e A15 (20,3 a 30,9) os altos valores de salinidade influenciaram na aquisição de radargramas com boa resolução. O valor máximo de salinidade onde foi possível obter os radargramas foi de 13,48. Uma salinidade acima desse valor já se mostra suficiente para afetar a penetração do sinal eletromagnético do GPR e causar interferência nos resultados. Os valores altos de salinidade também influenciam na resolução dos detalhes nos perfis, onde os refletores não aparecem bem definidos. Já em pontos de menor salinidade, os refletores aparecem com maior destaque e diferenciação.

4.3. Sedimentos no fundo do rio Aturiaí

No fundo do rio Aturiaí, foram identificados alguns tipos de sedimentos. A classificação granulométrica segue o mesmo padrão nos diferentes períodos sazonais: maior quantidade de areia (58%), seguida de cascalho (24%), silte (8%), argila (8%) e matéria orgânica (2%).

Brito, Asp, Beasley e Santos (2009) realizaram um estudo na bacia do rio Urumajó (Pará) e apresentaram o mesmo resultado, concluindo que as demais classes são contribuições atípicas, adicionadas ao leito do rio por falta da vegetação ripária, por enxurradas, ou até mesmo por influência marinha. O tamanho das partículas de sedimento das amostras diminui em direção a desembocadura do rio. Em geral, há uma tendência natural de que a granulometria dos sedimentos tende a diminuir em direção à jusante.

Nos pontos A1, A5, A11 e A14 (Figura 1) predominam respectivamente areia grossa, areia média e silte. Quanto mais preservada for a mata ciliar no local de amostragem, mais fina será sua granulometria predominante, pois serve como barreira física, impedindo que os sedimentos grosseiros venham a ser depositados no rio. Portanto, nos pontos A1 e A5 (Figura 1B) a granulometria é mais grosseira, pois estão em áreas onde a vegetação ripária é degradada (próximos à Vila de Aturiaí). Já os pontos A11 e A14 (Figura 1A) encontram-se mais afastados da Vila, e em locais com mata ciliar mais preservada em comparação aos pontos A1 e A5, e a granulometria é mais fina.

Segundo Christofolletti (1976) as partículas de tamanho menores (silte e argila) se conservam em suspensão no fluxo turbulento e são carregados na mesma velocidade da água, tendendo a decantar em trechos de águas mais calmas. Essa característica pode corroborar com o maior teor de silte no ponto A14 (Figura 1), onde o fluxo do rio é freado pela maré, provocando a diminuição na velocidade de corrente do rio Aturiaí. O tamanho médio do sedimento indica o grau de preservação da vegetação e, também a tendência natural de diminuição de tamanho à jusante, conforme constatado na bacia do rio Urumajó (Brito *et al.*, 2009).

5. Discussão

5.1. Influência da salinidade

Em geral, a umidade nos sedimentos marinhos pode aumentar a constante dielétrica relativa e diminuir a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas. Diante disso, a profundidade do sinal eletromagnético diminui significativamente (Alsharahi, Driouach, & Faize, 2016). Entretanto, o contrário permite uma melhor penetração do sinal GPR. De acordo com Pipan, Baradello e Forte (2000), a melhor eficiência dos levantamentos GPR ocorre em lâminas d'água de 0 a 7 m. Resultados satisfatórios são obtidos com antenas de 80 e 100 MHz, em profundidades de até 11 m (Placzek & Haeni, 1994), ou 50 MHz e 100 MHz (Pipan *et al.*, 2000). Entretanto, no rio Aturiaí, com a antena de frequência de 200 MHz, o sinal conseguiu atingir mais de 3 m de profundidade, levando em consideração que esta área se encontra numa planície costeira, fortemente influenciada pelo estuário do rio Caeté, onde as concentrações de material em suspensão são altas. Estas condições podem interferir parcialmente na resposta do sinal.

De acordo com Frazão (2006), a penetração da onda eletromagnética na coluna d'água e no subfundo depende da condutividade da água, condutividade elétrica do sedimento e frequência das antenas. Entretanto, em áreas com condutividade de 7 mS/m e 20 m de profundidade, ocorre uma boa penetração da onda na coluna sedimentar (Powers, Haeni, & Smith, 1999). De acordo com vários autores, fica evidente a baixa condutividade da água para atingir o subfundo, que varia de 3,2 mS/m até 26,2 mS/m.

Cheng *et al.* (2004), em estudos no rio São Joaquim (Califórnia), mostram que a condutividade entre 26 a 85 mS/m, prejudicou os resultados. Entretanto, de acordo com Frazão (2006), uma condutividade acima de 100 mS/m é suficiente para produzir reverberações do sinal eletromagnético.

5.2. Correlação das camadas com o perfil estratigráfico

De acordo com Souza Filho e El Robrini (1996), a estratigrafia recente da planície costeira mostra uma sequência transgressiva basal (S1), constituída por areias e lamas de origem marinha/estuarina na base (3-6 m), seguida por uma sequência regressiva de lamas orgânicas de planícies de maré (manguezal) (S2), situados atrás de um cordão arenoso transgressivo atual (S3). Esta sequência sedimentar vertical geral da planície de maré é caracterizada por uma granodecrescência ascendente, composta por areias da planície arenosa na base, sobreposta por lamas da planície lamosa (manguezal) de intermaré e supramaré. A espessura total dessa sequência varia de 3 m a mais de 6 m e está depositada sobre a sequência fluvial e areias marinhas da sequência transgressiva inferior (S1). Tendo em vista que o rio Aturiaí recorta o manguezal na Planície costeira de Bragança, identificou-se que na profundidade de 4 m, a camada disponível representa uma sequência transgressiva basal (S1), constituída por areias e lamas de origem marinha/estuarina na base (3-6 m) (Souza Filho & El Robrini, 2000).

5.3. Comparação com outros levantamentos com GPR

Frazão (2006) também conseguiu identificar o fundo da represa de Guarapiranga (São Paulo), mesmo usando o GPR em águas com condutividade alta. Entretanto, o mesmo autor concluiu que as camadas superficiais de argila atuam como uma blindagem para a penetração do sinal. Segundo Topp, Davis e Annan (1980), a propagação do sinal depende da frequência utilizada e das propriedades elétricas dos materiais do meio. A presença de argila é um dos fatores que afetam a condutividade elétrica de um ambiente. Dessa forma, tanto a presença de

argila quanto a alta salinidade da água explicam a baixa qualidade da resolução dos radargramas. Nos períodos secos, devido a um menor regime de chuvas, alguns pontos (A6 em diante, Figura 1) já apresentam valores de salinidade suficientes para interferir na qualidade dos radargramas, mesmo que não possuam um teor de argila tão elevado.

Faria (2016) também não conseguiu realizar a identificação da espessura da camada de sedimentos na Estação de Tratamento de Água (ETA), da Universidade Federal de Viçosa (Minas Gerais), em função da atenuação sofrida pelo sinal do GPR.

Aquino e Lopez (2000), além de obter a profundidade do fundo do rio Ribeirão Pires (São Paulo), tiveram êxito na identificação da espessura do pacote sedimentar no rio. Nos radargramas foi possível fazer a diferença entre o material mais fino (sedimento) e grosso (leito do rio). Os radargramas foram levantados com uma antena de 100 MHz.

Neste estudo, foi observada a ocorrência de reflexões múltiplas (Figuras 7 e 8), que segundo Moutinho, Porsani e Porsani (2005), são sinais comuns nos registros de GPR em ambiente aquático. Este tipo de reflexão funciona como um guia de ondas, aprisionando a energia eletromagnética entre interfaces com grandes contrastes de condutividade elétrica e de permissividade dielétrica (ar-água, água-sedimentos). Banks e Johnson (2011) também constataram reflexões múltiplas em radargramas em um lago de Maryland (USA).

6. Conclusão

A ferramenta geofísica GPR mostrou-se eficaz para emprego nas condições dos ensaios realizados. Permitiu a identificação do fundo e dos estratos no subfundo de até 3,6 m de profundidade no rio Aturiaí, mediante o uso da antena de 200 MHz de frequência, mesmo com uma condutividade da água de 136 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os sedimentos que recobrem os fundos são constituídos principalmente por areia grossa.

A amostragem espacial é um parâmetro importante na qualidade do registro, sendo útil tanto nos ensaios quanto na interpretação dos resultados. O GPR permite o mapeamento de camadas sedimentares argilosas com espessura de até 3,6 m e aparentemente identificou o contato entre os sedimentos aluvionares e o solo de alteração de rocha.

O GPR apresentou melhoria nos pontos do rio onde a salinidade da água foi ≤ 13 , tendo sua leitura reduzida em pontos onde a salinidade foi acima deste valor, passando a gerar radargramas nada visíveis para sua interpretação.

Os sedimentos identificados nos fundos do rio Aturiaí são constituídos por areia (58%), cascalho (24%), argila (8%), silte (8%) e matéria orgânica (2%). O tamanho das partículas de

sedimento diminui em direção a desembocadura do rio Aturiaí, onde ocorrem bancos de areia. Nos pontos A1 e A5 (Figura 1) a areia grossa predomina; já no ponto A11 a classe predominante foi areia média; entretanto, no ponto A14 (Figura 1), o silte foi predominante, devido à maior preservação da mata ciliar, aliado à tendência natural de diminuição do tamanho dos sedimentos em direção à desembocadura. Próximo à Vila, a granulometria é mais grosseira devido ao desmatamento da mata ciliar. Fora da Vila a mata ciliar é preservada e os sedimentos apresentam granulometria mais fina.

Como perspectivas futuras, pretende-se utilizar métodos adicionais como a batimetria, a sondagem de sedimentos e amostragem dos materiais em suspensão na coluna d'água, para agregar novos dados e corroborar os estudos de GPR realizados no rio Aturiaí.

Agradecimentos

Esta pesquisa teve o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio da bolsa de mestrado do primeiro autor. Os autores agradecem ao professor Dr. Nils Asp, por disponibilizar o Laboratório de Geologia Costeira (LAGECO)/IECOS/UFPA para as análises de sedimentologia com o apoio dos ex-alunos Dr. Vando Gomes e Amanda Oliveira e ao professor Dr. Colin Beasley do Laboratório de Conservação da Biodiversidade e das Águas (LCBA)/IECOS/UFPA pelo empréstimo da sonda multiparamétrica HANNA HI 9828.

Referências

Abdon, M. M. (2004). *Os impactos ambientais no meio físico erosão e assoreamento na bacia hidrográfica do rio Taquari - MS, em decorrência da Pecuária*. (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, Brasil.

Aquino, W. & Lopez, A. (2000). Estudo do assoreamento de corpos d'água pelo método geofísico de geo-radar. *27th Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Porto Alegre.

Aquino, W. F., Lopez, A. G., Souza, L. A. P., Gandolfo, O. C. B. & Botelho, M. A. B. (1998). Aplicação do geo-radar em estudos de assoreamentos. *Encontro Regional de Geotecnia e Meio*

Ambiente, 2 / Workshop de Geofísica Aplicada, 2. Rio Claro, SP, 19 a 20 de novembro de 1998.
Resumos expandidos. CD ROM.

Alsharahi, G., Driouach A. & Faize, A. (2016). Performance of GPR influenced by electrical conductivity and dielectric constant. *Procedia Technology*, 22, 570-575.

Aranha, L., Lima, H., Souza, J., & Marinho, R. (1990). *Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova*. In: Raja Gabaglia, g. p. & Milani E. j. (Eds.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: Petrobrás, 221-233.

Barbosa, M. J. S. (2003). *Tucunduba: Urbanização do Igarapé Tucunduba, Gestão de Rios Urbanos*. Belém-Pará. UFPA.

Barletta, M., Jaureguizar, A. J., Baigun, C., Fontoura, N. F., Agostinho, A. A., Almeida-Val, V. M. F., Val, A. L., Torres, R. A., Jimenes-Segura, L. F., Giarrizzo, T., Fabr e, N. N., Batista, V. S., Lasso, C., Taphorn, D. C., Costa, M. F., Chaves, P. T., Vieira, J. P. & Corr ea, M. F. M. (2010). Fish and aquatic habitat conservation in South America: a continental overview with emphasis on neotropical systems. *Journal of Fish Biology*, 76, 2118-2176.

Bollmanh, H. A. & Marques, M. D. (2000). Bases para Estruturação de Indicadores de Qualidade de  guas. *Revista Brasileira de Recursos H dricos*, 5(1), 37-60.

Borella, J. E. (1986). *Efeito da irriga o com  gua salina e da lâmina de lixivia o na produ o de feij o (Phaseolus vulgaris L.) e na saliniza o do solo*. (Disserta o de Mestrado). Programa de P s-gradua o em Irriga o e Drenagem, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil.

Boudreault, J. -P., Dub e, J. -S., Chouteau, M., Winiarski, T., & Hardy, E. (2010). Geophysical characterization of contaminated urban fills. *Engineering Geology*, 116: 196-206. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.09.002.

Brito, R. N. R., Asp, N. E., Beasley, C. R. & Santos, H. S. S. (2009). Caracter sticas sedimentares fluviais associadas ao grau de preserva o da mata ciliar - Rio Urumaj , Nordeste Paraense. *Acta Amazonica*, 39(1), 173-180.

Campos, J. R. da R. (2019). Use of Ground Penetrating Radar to Study Spatial Variability and Soil Stratigraphy. *Eng. Agríc.*, 39(3), 358-364.

Cezar, E., Nanni, M. N., Chicati, M. L. & Oliveira, R. B. de (2012). Emprego de GPR no estudo de solos e sua correlação com métodos laboratoriais. *Ciências Agrárias*. Londrina, v. 33, n° 3: 979-988.

Cheng, R. T., Gartne, J. W., Mason Jr., R. R., Costa, J. E., Plant, W J., Spicer, K. R., Haeni, F. P., Melcher, N. B., Keller, W. C. & Hayes, K. (2004). Evaluating a RadarBased, Non-Contact Streamflow Measurement System in the San Joaquin River at Vernalis, California. *Open report 1015 of U. S. Geological Survey*.

Christofolletti, A. (1976). Geometria Hidráulica. *Notícia Geomorfológica*. São Paulo, 16(32), 3-37.

Ciampalini, A., André, F., Garfagnoli, F., Grandjean, G., Lambot, S., Chiarantini, L. & Moretti, S. (2015). Improved estimation of soil clay content by the fusion of remote hyperspectral and proximal geophysical sensing. *Journal of Applied Geophysics*. 116: 135-145.

Cohen, M. C. L., Lara, R. J., Ramos, J. F. F. & Dittmar, T. (1999). Factors influencing the variability of Mg, Ca and K in waters of a mangrove creek in Bragança, North Brazil. *Mangr. Salt Marsh*. 3, 9-15. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009923513091>

Cordeiro, J. S., Aranha, P. R. A., Costa, R. D. da, Knauer, L. G. & Magalhães, J. T. R. (2020). Aplicação de georadar (GPR) para a caracterização de frentes de cavalgamento na região da Serra da Matriculada, município de Datas (MG). *Research, Society and Development*, 9(3), 1-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2682>

Correia, L. A., Silva, M. W. C. da, Mendes, A. C., Miranda, A. G. O. de, Luczynsky, E. & Cunha, I. R. V. da. (2019). A utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) na definição de penetração de cunha salina e no monitoramento do nível freático em praia estuarina amazônica. *Águas Subterrâneas*. 33(1), 87-101.

Costa, J. B. S., Hasui, Y., Bermeguy, R. L., Borges, M. S., Soares Júnior, A.V. & Villegas, J. M. C., (2002). Tectonic and Paleogeography of the Marajó Basin, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 74(3), 1-13.

Dantas, T. B. (2020). *Correlação entre a Morfologia e a Geometria Interna de Dunas Eólicas Parabólicas, com auxílio de GPR*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

Davis, J. L. & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysicalprospecting*, 37(5), 531-551.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil. <https://www.marinha.mil.br/dhn/>. Acesso em 18/08/2020.

El-Robrini M., Ranieiri A. L., Silva P. V. M., Guerreiro J. S., Alves M. A. M. S. da, Oliveira de R. R. S., Silva M. do S. F. da, Amora P. B. C., El-Robrini M. H. S. & Fenzl, N. (2018). Erosão e Progradação da zona costeira e Estuarina do Pará In: Panorama da Erosão Costeira no Brasil, 60-161.

Faria, S. H. (2016). *Avaliação do uso do GPR em aplicações batimétricas e desenvolvimento de software livre de para interpretação de radargramas*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Frazão, R. H. (2006). *O emprego do GPR na caracterização da superfície e depósitos de fundo da represa Guarapiranga, São Paulo/SP*. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.

Google Earth Pro. <https://www.google.com/earth/versions/>, 2019.

GSSI. (2011). SIR 3000 Manual. *Geophysical Survey Systems, Inc.*

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015) Bases e Referências: bases cartográficas: malhas digitais. <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html> Acesso em 05/07/2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <https://portal.inmet.gov.br/> Acesso em 02/08/2020.

Leite, W. da S. (2010). *Estratigrafia das Dunas de Salinópolis, em associação com variações pluviométricas*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Biologia Marinha, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Moura, H. T. G. de S. & Nunes, Z. M. P. (2016). Caracterização Sazonal das Águas do Sistema Estuarino do Caeté (Bragança-PA). *Bol. Inst. Pesca*, São Paulo, 42(4), 844-854.

Moutinho, L., Porsani, J. L. & Porsani, M. J. (2005). Deconvolução preditiva de dados GPR adquiridos sobre lâmina d'água: exemplo do rio Taquari, Pantanal Matogrossense. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23, 61-74. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2005000100006>

Oliveira, M. A. T. de & Santos, J. C. (2019). Estratigrafia GPR e morfogênese Quaternária no Semiárido Brasileiro. *Mercator*. Fortaleza, 18, 1-22.

Peixoto, R. de A. O. (2019). *Estudo do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do rio Jordão*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica*. [Recurso eletrônico] – 1 Ed. Santa Maria, RS, Brasil: UFSM, NTE.

Pereira, A. J., Gambôa, L. A. P., Silva, M. A. M., Rodrigues, A. R. & Costa, A. (2003). A utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) em estudos de estratigrafia na praia de Iataipuaçu, Maricá (RJ). *Revista Brasileira de Geofísica*. 21(2),163-172.

Pipan, M., Baradello, L. & Forte, F. (2000). Ground Penetrating Radar study of the Cheko Lake area (Siberia), Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR'2000, Gold Coast, Australia, p.6

Placzek, G. & Haeni, F. P. (1994). Surface geophysical techniques used to detect existing and infilled scour holes near bridge piers. USGS Water-resources investigations. Report 95-4009. Disponível em <http://water.usgs.gov/ogw/bgas/scour/>. Acesso: 6 de outubro de 2020.

Powers, C. J.; Haeni, F. P. & Smith, S. (1999). Integrated use of continuous seismic-reflection profiling and ground-penetrating radar methods at John's Pond, Cape Cod, Massachusetts. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Oakland. Calif., 359-368.

Rocha, H. O., Silva, M. W. C., Marques, F. L. T. & Leite Filho, D. C. (2015). Gradiometria magnética e radar de penetração no solo aplicados em Estearias de Penalva (MA). *Geol. USP, Ser. cient.*, São Paulo, 15(1), 3-14.

Rossetti, D. F., Góes, A. M., Lena S. B. & Souza, L. S. B. (2001). Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. *Rev. Bras. Geof.*, 19(1), 113-130.

Rossetti, D. F. & Góes, A.M. (2001). Imaging Upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brazil applying ground penetrating radar. *Revista Brasileira de Geociências*, 31, 195-202.

Rossetti, D. F., Truckenbrodt, W. & Góes, A. M. (1989). Estudo paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra 1: 25-74. Radar and frequency domain reflectometry data. *Journal of Hydrology*. 523, 252-261.

Sandmeier, K. J. (2008). *ReflexW 5.0 Manual*. Sandmeier Software. Zipser Strabe 1, D-76227 Karlsruhe, Germany.

Soupios, P. & Ntarlagiannis, D. (2017). *Characterization and Monitoring of Solid Waste Disposal Sites Using Geophysical Methods: Current Applications and Novel Trends*. In: Sengupta, D.; Agrahari, S. (Eds.) *Modelling Trends in Solid and Hazardous. Waste Management*. Springer, Singapore, 75-103. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2410-8_5.

Souza, L. A. P. de, Porsani, J. L., Souza, O. C. de & Moutinho, L. (2002). Levantamento experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Mato-grossense. *Rev. Bras. Geof.*, 20 (1), 67-72.

Souza Filho, P. W. M. & El-Robrini, M. (2000). Geomorphology of the Bragança coastal zone, northeastern Pará State. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 522-526.

Souza Filho, P. W. M. & El-Robrini, M. (1996). Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfosedimentares da Planície Costeira Bragantina – Nordeste do Pará (Brasil). *Geonomos*, 4, 1–16.

Topp, G. C., Davis, J. L. & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16 (3), 574-582. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>

Tran, A. P., Bogaert, P., Wiaux, F., Vanclooster, M. & Lambot, S. (2015). High-resolution space–time quantification of soil moisture along a hillslope using joint analysis of ground penetrating radar and frequency domain reflectometry data. *Journal of Hydrology*, 523:252.

Yelf, R. (2004). “Where is true time zero?”. *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 1, 279-282.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Clóvis Nivaldo da Costa Sousa Júnior – 30%

Maamar El Robrini – 35%

Pedro Andrés Chira Oliva – 35%