



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MAÍSA DE CALDA LOPES**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS AVANÇADOS NA MODELAGEM  
NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL NA ANÁLISE DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO EM  
BARRAGENS DE TERRA**

**FORTALEZA**

**2024**

MAÍSA DE CALDA LOPES

APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS AVANÇADOS NA MODELAGEM  
NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL NA ANÁLISE DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO EM  
BARRAGENS DE TERRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil Recursos Hídricos. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na  
Publicação Universidade  
Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L854a    Lopes, Máisa de Calda.  
Aplicação de métodos estatísticos avançados na modelagem numérica tridimensional na análise do fluxo de percolação em barragens de terra / Máisa de Calda Lopes. – 2025.  
146 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.  
Coorientação: Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça.

1. Estatística robusta. 2. Modelagem tridimensional. 3. Fluxo de percolação. 4. Barragem de terra.  
I. Título.

CDD 624.1

---

MAÍSA DE CALDA LOPES

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS AVANÇADOS NA MODELAGEM  
NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL NA ANÁLISE DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO EM  
BARRAGENS DE TERRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil Recursos Hídricos. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 03/02/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Professor Marco Aurelio Holanda de Castro, Ph.D. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça (Co-orientador)  
Universidade Federal do Cariri – UFCA

---

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Membro Interno)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Renata Shirley de Andrade Araújo (Membro Externo)  
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Ao meu pai, que andou no sol para  
que eu pudesse andar na sombra;

À minha mãe, que de joelhos me  
manteve em pé.

Dedicatória especial à família  
Kerntopf Mendonça.

## AGRADECIMENTOS

À Ele, pois é d'Ele toda honra e toda glória;

À minha família. Ao meu pai, cujo trabalho tornou-se a base sólida para a construção dos meus sonhos. À minha mãe, cuja presença constante tem sido meu maior apoio moral e espiritual. À minha irmã, pelo apoio e pela paciência;

Ao meu melhor amigo, e agora namorado Dayvison, que me ensinou que quando algo dá errado hoje, não é o fim do mundo e que amanhã dará certo (e sempre deu);

À família Kerntopf Mendonça, por sua amizade, estímulo e apoio incomparável na realização deste sonho. Minha gratidão a vocês será eterna;

Aos meus orientadores Marco Aurélio e Luiz Alberto, pela orientação desenvolvida com excelência. Primeiramente, agradeço ao professor Marco Aurélio pelo acolhimento na UFC e no Laboratório de Hidráulica Computacional, sua confiança e apoio foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e sucesso deste trabalho. Também gostaria de expressar minha gratidão ao professor Luiz Alberto, que acompanha meu desenvolvimento acadêmico desde a graduação. Sua orientação contínua, amizade e suporte ao longo deste processo foram de grande importância, proporcionando-me a segurança e motivação necessárias em cada etapa da minha jornada;

Ao professor Paulo Roberto, que primeiro me apresentou à área de recursos hídricos e sempre me ofereceu apoio e oportunidades para o meu crescimento acadêmico;

Aos professores Vicente Helano, Paulo Ulisses, Job Saraiva e Francisco Chagas. Excelentes profissionais e essenciais para minha vida profissional;

A todos os docentes e funcionários da POSDEHA, que contribuíram para minha formação e participaram de maneira direta e indireta na realização deste trabalho;

Ao Laboratório de Recursos Hídricos e ao professor coordenador Iran Neto. Grata pelo acolhimento e pelas oportunidades ofertadas. Também estendo meus agradecimentos a Karla Monique, que conheci nos momentos de estudo no laboratório e que se tornou amiga e um apoio tanto na vida profissional, quanto na vida pessoal.

Aos meus colegas da Pós-Graduação, especialmente àqueles que se tornaram amigos. Agradeço em particular ao Luis Felipe e à Thayná. Luis Felipe, desde o processo seletivo, foi a voz calma que sempre me dizia que tudo daria certo (*Spoiler*: deu tudo certo!).

Thayná, que muitas vezes foi como uma irmã, ora mãe, ora filha, sempre esteve ao meu lado, independentemente do horário, da distância ou da situação. Vocês tornaram essa jornada mais leve;

A minha amiga Vanessa Coelho, que, apesar da distância, sempre se faz presente compartilhando alegrias, tristezas e conquistas desde a graduação;

Aos meus amigos Gabriel Mendes, Séphora Fernandes, Tomaz Junior, Ana Lídia Alencar, Simon Sabino e Cícero Roberto, que apesar da distância sempre me apoiaram na realização dos meus objetivos profissional e pessoal;

Ao meu amigo e companheiro de pesquisa Luiz Gustavo. Sou grata por sua amizade e por seu apoio não só na pesquisa, mas na adaptação à nova vida em Fortaleza;

À COGERH, pelo fornecimento dos dados e das informações. Expresso minha gratidão a Otacílio Neto, pela paciência e pelo apoio;

À todas as pessoas que, de alguma forma, tenham contribuído direta ou indiretamente na minha formação acadêmica;

À Funcap pelo apoio financeiro;

À ciência.

## RESUMO

Os elementos do sistema de drenagem interno de uma barragem são, comumente, dimensionados com base na análise bidimensional (2D) com fluxo em regime estacionário. Porém, por se tratar de uma estrutura tridimensional (3D) com fluxo em regime transiente, essa simplificação pode levar ao subdimensionamento dos elementos de drenagem. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia utilizando a análise numérica do fluxo de percolação de uma barragem de terra, a partir de uma modelagem 3D transiente. Para validação da metodologia desenvolvida utilizou-se informações da barragem Olho D'Água, localizada no município de Várzea Alegre - CE, obtidas do projeto executivo, de relatórios de gestão da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e de trabalhos acadêmicos realizados na área. Inicialmente foram selecionados períodos de monitoramento para análise de cargas hidráulicas observadas em instrumentos instalados no maciço e na fundação, a partir da decomposição da série histórica, da verificação de dados perdidos e da detecção de *outlier*. Com base em informações topográficas e sondagens, utilizando o programa *Surfer*, construiu-se o domínio do modelo conceitual tridimensional no programa *MODFLOW*. A decomposição das séries referente a carga hidráulica medida a partir dos instrumentos, identificou resíduos atípicos que não seguiam a tendência ou padrões sazonais e, posteriormente foram classificados como *outliers*. Na análise de calibração do modelo, realizada a partir da análise de sensibilidade do modelo, foi dividida em cinco etapas nas quais foram avaliados os parâmetros hidrogeológicos e a anisotropia do meio em regime transiente. Na última etapa foram obtidos valores mínimos, entre a carga calculada e a observada de Erro Médio (EM) de 0,587m, Erro Médio Quadrático (EMQ) de 0,123, coeficiente de correlação (r) de 0,892, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,796, Eficiência de *Nash-Sutcliffe* (ENS) de 0,645, e Erro Médio Absoluto (EAM) de 2,67m, sendo possível observar, com o avanço de cada etapa uma melhora na precisão do modelo. Na validação do modelo, foram obtidos  $R^2$  de 0,786 e ENS de 0,645, indicando uma calibração aceitável. A partir da simulação de cenário foi possível identificar problemas que não foram observados na modelagem 2D. Ademais, o *MODFLOW*, mostrou-se uma ferramenta eficaz não só para análise do fluxo de percolação em barragens de terra. O programa fornece informações rápidas para uma tomada de decisão, além de prever possíveis situações críticas por meio de simulações de cenários, permitindo a antecipação de medidas de ação antes de sua ocorrência, auxiliando no monitoramento e gestão de barragem de terra.

**Palavras-chaves:** estatística robusta; modelagem tridimensional; fluxo de percolação; barragem de terra.

## ABSTRACT

The elements of an embankment dam's internal drainage system are commonly dimensioned based on two-dimensional (2D) analyses under steady-state flow conditions. However, since the dam is a complex three-dimensional (3D) structure with transient flow conditions, this simplification may lead to the underestimation of drainage components. In this context, this study aims to develop a methodology based on the numerical analysis of seepage flow through the dam body and foundation, using three-dimensional transient modeling. For the validation of the proposed methodology, data from the Olho D'Água Dam, located in Várzea Alegre - CE, were used, obtained from the executive project, management reports from the Water Resources Management Company (COGERH), and academic studies conducted by Araújo (2013) and Vidal (2022). Monitoring periods were selected to analyze hydraulic heads observed in piezometers and water level recorders installed in the dam body and foundation, based on the decomposition of historical data series, verification of missing data, and outlier detection using the Minimum Volume Ellipsoid (MVE) method. Based on topographic data and borehole investigations, the conceptual 3D model domain was developed using MODFLOW, with data processed in Surfer software. The correlation analysis showed a direct relationship between water accumulation in the reservoir and the increase in hydraulic heads within the dam. The decomposition of the time series related to the hydraulic head measurements identified atypical residuals that did not follow seasonal trends or patterns, which were subsequently classified as outliers. The model calibration, performed through sensitivity analysis, was divided into five stages in which hydrogeological parameters and medium anisotropy under transient flow conditions were evaluated. The statistical parameters used in the analyses included Mean Error (ME), Root Mean Square Error (RMSE), correlation coefficient ( $r$ ), coefficient of determination ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and Mean Absolute Error (MAE), comparing observed and simulated hydraulic heads. At the end of each stage, the evaluated hydrogeological parameters were fixed based on the most favorable statistical conditions. In the final stage, the results showed ME of 0.587 m, RMSE of 0.123,  $r$  of 0.892,  $R^2$  of 0.796, NSE of 0.645, and MAE of 2.67 m, demonstrating progressive improvements in model accuracy. For model validation,  $R^2$  of 0.786 and NSE of 0.645 were obtained, indicating satisfactory calibration. Scenario simulations allowed for assessing the efficiency of the internal drainage system, identifying issues not observed in the 2D modeling, such as seepage emergence on the downstream slope near the abutments. In steady-state 3D modeling, seepage flow through the dam body was 3.7 times greater than that obtained in the 2D modeling. Furthermore,

MODFLOW, commonly used for groundwater flow modeling in large areas, proved to be an effective tool not only for analyzing seepage flow in embankment dams but also for supporting the monitoring of these structures. The application provides quick and accurate information for decision-making and allows for anticipating preventive measures through scenario simulations of potential critical conditions.

**Keywords:** robust statistics; three-dimensional modeling; seepage flow; earth dam.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem de terra do tipo homogênea (a) e zonada (b).....	22
Figura 2 - Elementos de drenagem interno e externo.....	23
Figura 3 - Esboço esquemático do dispositivo utilizado por Darcy.....	25
Figura 4 - Valores de condutividade hidráulica, em m/s, para diferentes classificações de solo .....	27
Figura 5 - Quatro possibilidades de combinações de heterogeneidade e anisotropia.....	28
Figura 6 - Representação de aquífero poroso livre e confinado.....	30
Figura 7 - Volume de controle de um aquífero confinado.....	36
Figura 8 - Volume de controle de um aquífero livre.....	38
Figura 9 - Malha tridimensional de diferenças finitas composta por 5 linhas, 9 colunas e 5 camadas, incluindo a representação de seus elementos.....	40
Figura 10 - Célula $i,j,k$ e as seis células adjacentes.....	41
Figura 11 - Fluxo do nó central da célula $i,j,k$ para o da célula vizinha $i,j+1,k$ .....	41
Figura 12 - Variação da carga com o tempo na célula $i,j,k$ em uma dada célula.....	43
Figura 13 - Esboço esquemático da condição de contorno dreno com a função condicional utilizada no <i>MODFLOW</i> e o gráfico representando do fluxo em função da carga hidráulica numa dada célula $i,j,k$ . .....	44
Figura 14 - Seção transversal máxima (a) e o perfil longitudinal (b) da barragem Gouhou....	46
Figura 15 - Procedimento para identificar dados perdidos e aplicar ações corretivas.....	49
Figura 16 - Mapa de localização da barragem Olho D'Água.....	56
Figura 17 - Localização das sondagens.....	57
Figura 18 - Perfil estratificado da fundação obtido com base nos resultados das sondagens..	58
Figura 19 - Seção-tipo da barragem Olho D'Água, conforme o projeto executivo.....	59
Figura 20 - Seção-tipo modificada da barragem Olho d'Água.....	60
Figura 21 - Seção 01: seção transversal ombreira esquerda.....	61
Figura 22 - Seção 02: seção transversal máxima.....	61
Figura 23 - Seção 03: seção transversal ombreira direita.....	61
Figura 24 - Fluxograma da metodologia aplicada.....	63
Figura 25 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA111.....	74
Figura 26 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA231.....	75
Figura 27 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA131.....	75
Figura 28 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA331.....	76

Figura 29 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ111 .....	77
Figura 30 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ131 .....	78
Figura 31 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ351 .....	78
Figura 32 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ211 .....	79
Figura 33 - <i>Outliers</i> identificados do instrumento PZ221 .....	80
Figura 34 - Decomposição da série temporal das cargas hidráulicas do instrumento NA131 antes (a) e depois (b) da exclusão dos <i>outliers</i> .....	81
Figura 35 - Ajustes da seção 02: seção 02 conforme o projeto executivo (a) e seção amostrada (b).....	82
Figura 36 - Sobreposição da seção 02 ajustada e da seção tipo .....	83
Figura 37 - Superfície de topo da Barragem Olho D'Água obtida por <i>krigagem</i> e seções longitudinal e transversal com apresentação do maciço e da fundação.....	83
Figura 38 - Células e camadas do domínio do modelo constituídas de diferentes tipos de materiais.....	85
Figura 39 - Seções instrumentadas .....	86
Figura 40 - Condição de contorno dreno, carga constante e células inativas utilizadas no modelo .....	87
Figura 41 - Erros Absolutos Médios (EAM) das cargas hidráulicas associados à variação da condutividade hidráulica de cada camada obtidos durante a Etapa 01 .....	89
Figura 42 - Avaliação estatística da Etapa 01 .....	91
Figura 43 - Erros Absolutos Médios (EAM) das cargas hidráulicas calculadas associados à variação da anisotropia durante a Etapa 02 .....	93
Figura 44 - Avaliação estatística da Etapa 02 .....	95
Figura 45 - Erros Absolutos Médios (EAM) das cargas piezométricas calculadas associados à variação do $S_s$ obtidos durante a Etapa 04 .....	97
Figura 46 - Avaliação estatística da Etapa 04 .....	98
Figura 47 - Avaliação estatística da validação do modelo .....	100
Figura 48 - Linha freática referente ao dia 31 de dezembro na seção correspondente a linha 102 da malha de diferenças finitas.....	101
Figura 49 - Fluxo no maciço e surgência no talude de jusante referente ao dia 31 de dezembro na seção correspondente a linha 102 da malha de diferenças finitas.....	102
Figura 50 - Perfil estratificado discretizado e surgências na seção localizada na linha 28 (seção AA) da malha de diferenças finitas .....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios das vazões específicas para diferentes tipos de materiais .....	35
Tabela 2 - Comparação entre técnicas de atribuição para dados perdidos .....	50
Tabela 3 - Sondagens mista, rotativa, percussiva e a pá e picareta, realizadas ao logo dos eixos do barramento e do rio realizadas na barragem Olho D'Água com base no projeto executivo.....	57
Tabela 4 – Propriedades hidrogeológicas $k$ , $S_s$ e $S_y$ utilizadas como condição inicial.....	66
Tabela 5 - Sequência das camadas analisadas e dos instrumentos utilizados nas leituras das cargas hidráulicas.....	68
Tabela 6 - Resultado da análise de correlação de Pearson.....	70
Tabela 7 - Parâmetros da estatística descritiva .....	72
Tabela 8 - Verificação interferência do preenchimento dos dados faltantes.....	79
Tabela 9 - Condutividades hidráulicas ajustadas para cada camada de materiais distintos durante a análise de sensibilidade do modelo da Etapa 01 .....	91
Tabela 10 - Anisotropia vertical $k_x/k_z$ ajustada para cada camada de materiais distintos durante a análise de sensibilidade do modelo na Etapa 02 .....	94
Tabela 11 – Situação da validação do modelo .....	99

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Hipótese.....	20
1.3	Objetivos.....	20
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
2.1	Introdução a barragens de terra .....	22
2.2	Percolação de água no solo.....	24
2.2.1	<i>Lei de Darcy</i> .....	25
2.2.2	<i>Equações fundamentais em aquíferos porosos</i> .....	30
2.3	Programa MODFLOW .....	39
2.4	Análises do fluxo de percolação em barragens de terra realizadas com a modelagem tridimensional.....	45
2.5	Análise estatística na modelagem computacional.....	47
2.5.1	<i>Análise de dados perdidos</i> .....	48
2.5.2	<i>Detecção e tratamento de outliers</i> .....	51
2.5.3	<i>Análise de sensibilidade e calibração na modelagem computacional</i> .....	53
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>56</b>
3.1	Perfil estratificado da fundação.....	56
3.2	Projeto executivo e execução.....	59
3.3	Histórico dos problemas e medidas corretivas .....	62
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>63</b>
4.1	Modelagem de fluxo no maciço e na fundação da barragem de terra .....	63
4.1.1	<i>Análise estatísticas das séries históricas</i> .....	64
4.1.2	<i>Construção do modelo tridimensional</i> .....	65
4.1.3	<i>Construção do modelo conceitual, discretização, condições de contorno e propriedades hidrogeológicas iniciais</i> .....	66
4.1.4	<i>Calibração do modelo</i> .....	67
4.1.5	<i>Validação do modelo</i> .....	68
4.1.6	<i>Simulações de cenários</i> .....	69
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>70</b>
5.1	Análise estatística das séries históricas de altura de acumulação e cargas hidráulicas dos instrumentos .....	70

5.1.1	<i>Correlação</i> .....	70
5.1.2	<i>Análise do comportamento dos dados brutos</i> .....	72
5.1.3	<i>Análise dos dados perdidos</i> .....	79
5.1.4	<i>Deteção de outliers</i> .....	80
5.2	<b>Construção geométrica espacial do domínio do modelo de fluxo</b> .....	82
5.3	<b>Construção do modelo conceitual, discretização da malha de diferenças finitas, inclusão de condições de contorno e das propriedades hidrogeológicas iniciais</b> .....	84
5.4	<b>Calibração do modelo de fluxo</b> .....	88
5.4.1	<i>Etapa 01</i> .....	88
5.4.2	<i>Etapa 02</i> .....	92
5.4.3	<i>Etapa 03</i> .....	95
5.4.4	<i>Etapa 04</i> .....	96
5.4.5	<i>Etapa 05</i> .....	99
5.5	<b>Validação do modelo</b> .....	99
5.6	<b>Simulação de cenários</b> .....	101
5.6.1	<i>Simulação do primeiro cenário</i> .....	101
5.6.2	<i>Simulação do segundo cenário</i> .....	103
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	105
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	108
	<b>APÊNDICE A – Decomposição das séries temporal</b> .....	113
	<b>APÊNDICE B – <i>Outliers</i> identificados</b> .....	121
	<b>APÊNDICE C - AJUSTE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS</b> .....	133
	<b>ANEXO A - leituras nos piezômetros e nos medidores de nível de água</b> .....	135

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (Brasil, 2016) as barragens são definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de reter água, ou qualquer outro líquido, rejeito, e detrito, para fins de armazenamento ou controle. As primeiras barragens brasileiras foram construídas com o objetivo de amenizar os problemas relacionados aos períodos de estiagem (Alves, Lima; 2022).

Com o armazenamento de água, por exemplo, as barragens fornecerem alguns benéficos, como a produção de energia elétrica, abastecimento de água para uso cotidiano doméstico e/ou industrial, irrigação, navegação, lazer e turismo, dentre outros (Campos, Poznyakov; 2020) e, conseqüentemente, contribuem substancialmente para o desenvolvimento socioeconômico da região (Dantas, 2017).

Apesar de seus benefícios, é necessário assegurar o bom funcionamento dessas estruturas, pois sua falha pode provocar impactos devastadores, tanto para o meio ambiente, quanto para a vida humana (Rodrigues Junior, *et al.*, 2023). Para isso, segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, a segurança de uma barragem deva ser considerada em todas as suas fases de existência (Brasil, 2020).

Segundo Foster *et al.* (2000), falhas apresentadas em uma barragem podem resultar no rompimento, tendo como principais mecanismos: a instabilidade dos taludes e da fundação, o galgamento e a erosão regressiva precedida por *piping*. Esses mecanismos têm como causa primária o fluxo de percolação da água através do meio. Neste contexto, simplificações adotadas na fase de elaboração do projeto, podem resultar no subdimensionamento das estruturas de drenagem internas. Já na fase construtiva, a escolha inadequada dos materiais filtrantes também pode contribuir com o problema.

Apesar de ser questionado (Bayat *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2023), no dimensionamento do sistema de drenagem interna de uma barragem utiliza-se a modelagem computacional do fluxo de percolação com domínio bidimensional (2D) e regime estacionário. Nessa metodologia considera-se a seção transversal máxima, geralmente constituída de material homogêneo e isotrópico, selecionada dentro do domínio

tridimensional (3D). Porém, segundo Nazari *et al.*, (2018), as simplificações utilizadas nesse tipo de modelagem podem gerar resultados inadequados.

Diante disso, a preocupação com problemas relacionados à estabilidade hidráulica em maciços e fundações de barragens de terra, tem levado muitos pesquisadores a aplicarem ou formularem modelos de fluxos de percolação em meios porosos, utilizando métodos numéricos que solucionam equações diferenciais. Vale salientar que a obtenção de bons resultados a partir da modelagem computacional está relacionada não só a construção do modelo conceitual adequado, mas também à qualidade dos dados de entrada.

Para garantir resultados mais precisos, a estatística desempenha um papel importante em diversas fases da modelagem computacional, como na identificação de irregularidades nas séries temporais dos dados de entrada, na compreensão das tendências e comportamentos destas séries, na análise de sensibilidade, na calibração e, conseqüentemente, na validação do modelo.

## **1.1 Justificativa**

O estudo baseia-se em dois principais focos de investigação: o primeiro refere-se à análise do fluxo de percolação através de modelagem tridimensional em regime transiente; e o segundo, a aplicação de métodos estatísticos avançados na análise dos dados de entrada e de saída, bem como na verificação da precisão do modelo.

Com relação a análise do fluxo de percolação, alguns autores como Chen e Zhang (2006) e Pimenta *et al.*, (2020) indicam que os primeiros sinais de erosão, com aparecimento de surgência no talude de jusante, ocorrem geralmente em decorrência de falhas no sistema de drenagem interno, iniciando frequentemente em áreas próximas as ombreias.

Devido às limitações do método convencional de análise do fluxo de percolação, que utiliza modelagem bidimensional em regime estacionário, algumas anomalias não são identificadas. No entanto, na modelagem tridimensional transiente estas anomalias podem ser previstas, já que o domínio do modelo inclui toda a geometria da estrutura da barragem

e da fundação, incluindo o contato com as ombreiras, resultando em uma representação mais realista (Bayat *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o programa *MODFLOW* é uma importante ferramenta, pois permite analisar a dinâmica de sistemas hidrogeológicos complexos, a partir de um modelo conceitual de domínio tridimensional, podendo ser utilizada como base para um programa de gerenciamento do fluxo de percolação a longo prazo.

Já em relação à estatística robusta, há estudo em diversas áreas de pesquisas que utilizam os benefícios desta técnica para análise de dados de entrada e de saída, além da análise de precisão de produtos/modelos desenvolvidos. Alzabeebee e Keawsawasvong (2024), desenvolveram um modelo utilizado na determinação do índice de compressibilidade dos solos aluviais, focando na melhoria da precisão dessas estimativas em contextos geotécnicos. Na hidrologia, Faouzi *et al.* (2022) utilizaram esta ferramenta estatística para obtenção de melhores resultados durante a análise de sensibilidade e calibração de um modelo conceitual aplicado na determinação da precipitação média em uma bacia hidrográfica. Ainda na área de hidrologia, Paul e Negahban-Azar (2018) utilizaram a estatística robusta para calibrar um modelo hidrológico, através da análise de sensibilidade dos parâmetros e das incertezas na previsão de vazão de um riacho usando múltiplos algoritmos de otimização e funções objetivas.

## **1.2 Hipótese**

A modelagem tridimensional transiente do fluxo de percolação no maciço e na fundação de barragens de terra, combinada com o uso de estatística multivariada robusta, pode fornecer resultados mais precisos e consistentes sobre a dinâmica hídrica no meio poroso, em comparação com a metodologia convencional (bidimensional).

## **1.3 Objetivos**

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para modelagem numérica tridimensional transiente do fluxo de percolação no maciço e na fundação de uma

barragem de terra, utilizando o programa *MODFLOW* associado a análise estatística multivariada robusta.

Com essa finalidade, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a análise das séries históricas das cargas hídricas observadas no reservatório, nos piezômetros e nos medidores de nível d'água, a partir da aplicação de técnicas estatísticas robustas;
- Construir o modelo geométrico tridimensional, a partir do ajuste das seções transversais do maciço e da fundação, associado a informações topográficas e sondagens;
- Construir o modelo hidrogeológico conceitual tridimensional discretizado, definindo as condições de contorno e as propriedades hidrogeológicas iniciais;
- Calibrar o modelo numérico, a partir da análise de sensibilidade, avaliando as variações das propriedades hidrogeológicas em simulações com fluxo em regime estacionário e transiente, utilizando técnicas estatísticas robustas;
- Validar o modelo numérico;
- Realizar simulações de cenários com fluxo em regime transiente para avaliar a eficiência do sistema de drenagem interno, comparando os resultados com os obtidos a partir de uma simulação convencional, considerando o domínio bidimensional com fluxo em regime estacionário.

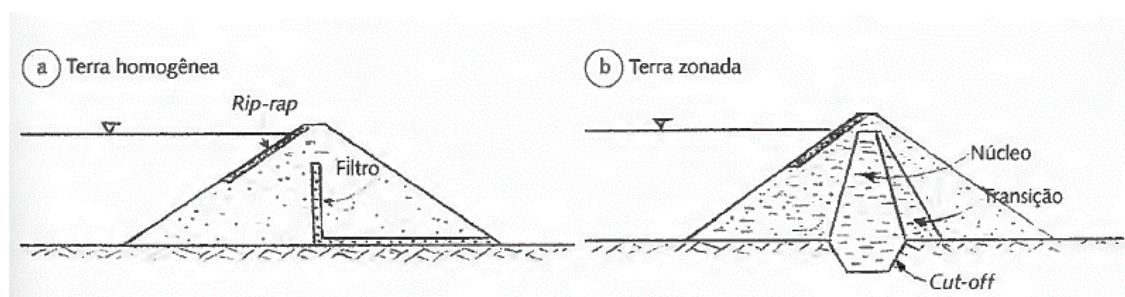
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Introdução a barragens de terra

As barragens devem ser classificadas em dois grupos: convencionais, que são as mais utilizadas e cujos mecanismos de construção são amplamente conhecidos na literatura especializada; e não convencionais, que englobam aquelas menos utilizadas, nas quais são empregadas novas técnicas construtivas (Costa, 2012). Devido à disponibilidade de materiais para sua construção, além do custo e das técnicas de execução, as barragens convencionais, especialmente as barragens de terra, são mais utilizadas (Costa, 2012; Moreira *et al.*, 2019).

As barragens de terra podem ser divididas em homogêneas e zonadas. Na barragem de terra homogênea (Figura 1a), predomina um único tipo de material, embora possa ser constituída por elementos diversificados (Figura 2). Já na barragem de terra do tipo zonada (Figura 1b), existe um zoneamento de materiais terrosos em função de suas características e/ou permeabilidade.

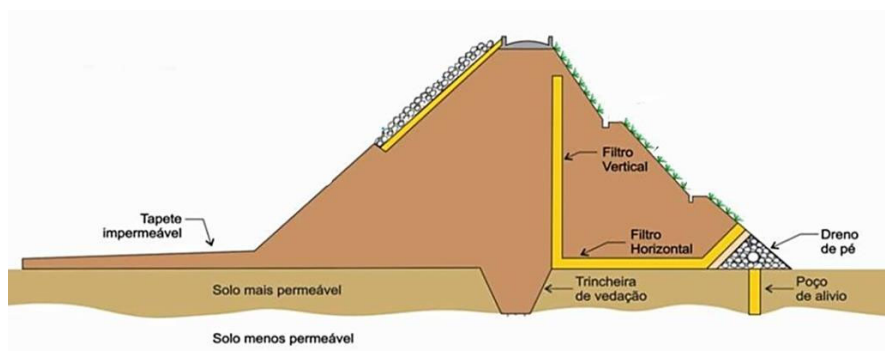
Figura 1 - Barragem de terra do tipo homogênea (a) e zonada (b)



Fonte: Costa (2012)

Inicialmente, conforme descreve Gaioto (2003), a ideia ao construir barragens era maximizar a impermeabilização, visando o bloqueio completo da percolação de água para a região de jusante. Contudo, com o passar do tempo, observou-se a impossibilidade da impermeabilização total das barragens. Nesse contexto, Terzaghi e Peck (1962) destacaram a relevância de sistemas de drenagem, internos e/ou externos, como meios de reduzir a percolação de água através do corpo e da base da barragem. Entre as principais soluções implementadas para esse propósito estão os filtros verticais e horizontais, drenos de pé, trincheiras de vedação, tapetes impermeáveis à montante e poços de alívio, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Elementos de drenagem interno e externo



Fonte: Modificada de Carvalho (2011)

Os filtros horizontais e verticais redirecionam o fluxo de percolação interno, conduzindo-o para a região a jusante. Segundo Perini (2009), essa alteração das linhas de fluxo, associada ao atendimento dos critérios de Terzaghi para filtros, diminui o risco de ocorrência de *piper*.

Tanto a trincheira de vedação parcial, também conhecida como *cut-off* parcial, quanto o tapete impermeável à montante, aumentam o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico e, conseqüentemente, a subpressão na fundação (Oliveira, 2008; Costa, 2012). Porém, um *cut-off* totalmente penetrante (construído até o estrato menos permeável) é mais eficiente. Neste contexto, o tapete impermeável é indicado quando o estrato permeável da fundação possui grande profundidade e sua permeabilidade é relativamente baixa; enquanto o *cut-off* é mais eficiente quando a condutividade hidráulica diminui com a profundidade.

Quanto aos poços de alívio, Oliveira (2008) descreve que estes instrumentos drenam a água que flui através da fundação e aliviam as subpressões impostas pela carga hidráulica do reservatório, sendo mais eficientes quando a condutividade hidráulica do material preenchido seja dez vezes maior do que a condutividade hidráulica do material da fundação, além de atender os critérios de Terzaghi.

Já o dreno de pé, devido sua localização, é um elemento necessário para que a água oriunda da percolação interna seja encaminhada para fora da barragem sem provocar possíveis arrastamentos de partículas de solo ao longo do tempo (Moreira *et al.*, 2020).

Quando estes dispositivos não são dimensionados adequadamente e/ou sofrem alterações durante a execução da obra, sem a devida concordância com a equipe técnica

responsável pela elaboração do projeto executivo, a segurança da barragem pode ficar comprometida, aumentando o risco da ocorrência de erosão regressiva e outros problemas relacionados.

Como dito, segundo a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (BRASIL, 2020) a segurança de uma barragem deve ser garantida em todas as fases de sua existência, que são elas: projeto, construção e operação. Os riscos da fase de projeto surgem a partir dos parâmetros e simplificações adotados para a realização do dimensionamento do maciço e do sistema de drenagem interno. Já na fase de construção, decorrem do descumprimento das especificações ou de alterações não estabelecidas no projeto executivo. Por fim, durante a fase de operação, principalmente em períodos de cheias, os riscos estão associados a problemas que interferem na estabilidade da estrutura, sendo comumente relacionados ao galgamento, à erosão regressiva e aos deslizamentos de taludes. Para garantir a segurança, além do cumprimento dos parâmetros adotados no projeto executivo, é essencial o monitoramento da barragem.

O monitoramento de uma obra representa um conjunto de atividades que permitem o controle da segurança e da eficácia de sua construção (Costa, 2012). Especificamente para obras de barramento, o autor destaca que o monitoramento se dá através da inspeção visual, da topografia e da instrumentação. Com a instrumentação, por exemplo, pode ser realizada a medição do nível de água, da pressão neutra e da vazão de percolação, grandezas que Costa (2012) destaca como sendo indispensáveis, pois são diretamente associadas à percolação da água no maciço e na fundação de uma barragem de terra.

## **2.2 Percolação de água no solo**

Segundo Cruz (1996), o fluxo de percolação pelo maciço e pela fundação de uma barragem provoca problemas de instabilidade, uma vez que ocorre uma queda nas tensões efetivas na região do talude de jusante. Uma forma de controle da percolação pelo maciço e pela fundação é a drenagem interna (Cruz, 1996).

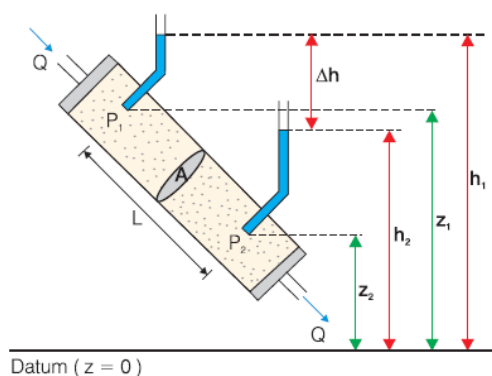
Para isso, é necessária a análise do fluxo de percolação, conhecendo sua magnitude e direção. Essa análise é realizada a partir das equações que governam o fluxo em

meios porosos. A solução dessas equações é obtida considerando-se os domínios unidimensional, bidimensional e tridimensional, fundamentando-se nos princípios determinados pela Lei de Darcy e pela Equação da Continuidade, aplicando métodos analíticos ou numéricos.

### 2.2.1 Lei de Darcy

Em 1856, ao analisar o movimento da água em uma única direção através de filtros preenchidos com areia saturada (Figura 3), Darcy descobriu que o volume de água que flui ( $Q$ ) mantém uma relação de proporcionalidade com a área transversal do filtro ( $A$ ) e com a diferença de carga hidráulica entre os pontos de entrada ( $h_1$ ) e saída ( $h_2$ ) do filtro, na direção do fluxo ( $\Delta h = h_1 - h_2$ ), e que esta relação é inversamente proporcional ao comprimento do filtro na mesma direção ( $L$ ) (Equação 2.1). O coeficiente de proporcionalidade ( $k$ ), conhecido como condutividade hidráulica, é definido como velocidade de percolação da água quando o gradiente hidráulico for -1 m/m.

Figura 3 - Esboço esquemático do dispositivo utilizado por Darcy



Fonte: Cabral (2008)

$$Q = -k \frac{\Delta h}{L} A \quad (2.1)$$

Em que:

$h_1$  é a carga hidráulica no piezômetro 1 [L];

$h_2$  é a carga hidráulica no piezômetro 2 [L];

$z_1$  é a cota no ponto  $P_1$  [L];

$z_2$  é a cota no ponto  $P_2$  [L];

$Q$  é a vazão de percolação [ $L^3T^{-1}$ ];

$A$  é a área transversal do cilindro [ $L^2$ ];

$\Delta h$  é a variação hidráulica entre os piezômetros [L];

$L$  é a distância entre os piezômetros [L].

O sinal negativo da Equação 1.1 indica que o fluxo da água ocorre no sentido dos potenciais decrescentes, ou seja, no sentido contrário ao gradiente da carga hidráulica (CABRAL, 2008).

Considerando que o gradiente hidráulico ( $i$ ) é dado pela razão entre a variação da carga hidráulica e a distância percorrida pelo fluxo, a Equação 2.2 expressa a razão entre o fluxo de percolação ( $Q$ ) e a área da seção transversal ( $A$ ), denominado como velocidade de percolação de Darcy.

$$q = -k \frac{\Delta h}{l} = -ki \quad (2.2)$$

Em que:

$q$  é a velocidade de percolação de Darcy [ $LT^{-1}$ ];

$i$  é o gradiente hidráulico [-].

Em termos diferenciais, a Equação 2.2 pode ser reescrita conforme mostra a Equação 2.3

$$q = -k \frac{dh}{dl} \quad (2.3)$$

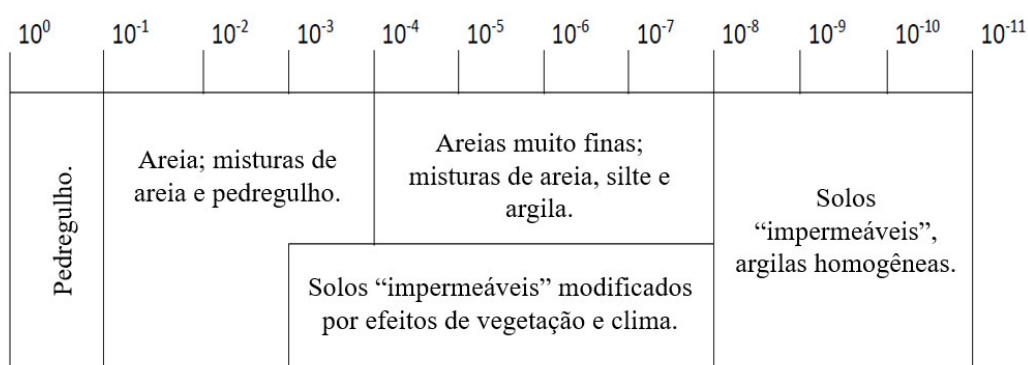
Em que:

$dh$  é a variação diferencial de carga hidráulica [L];

$dl$  é a variação diferencial da distância que a água percola [L].

A condutividade hidráulica é uma propriedade particular do solo, variando de acordo com o arranjo granulométrico das partículas, com a distribuição do índice de vazios e a temperatura da água. A Figura 4 mostra a faixa de valor para a condutividade hidráulica de cada tipo de solo.

Figura 4 - Valores de condutividade hidráulica, em m/s, para diferentes classificações de solo

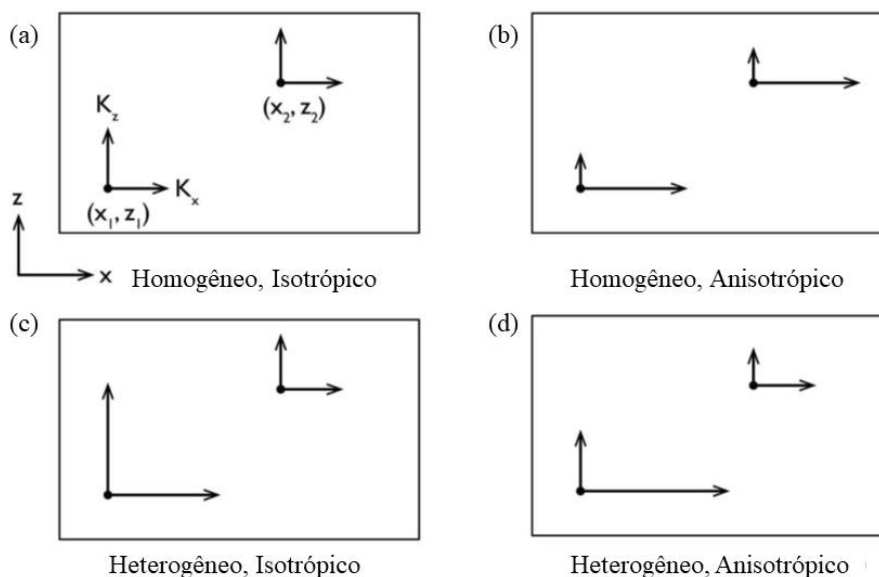


Fonte: Modificado de Knoedel *et al.* (1998)

Nos solos/ formações geológicas, a condutividade hidráulica geralmente apresenta variações no espaço (propriedade de heterogeneidade) e na direção em um dado ponto (propriedade de anisotropia) (Freeze, Cherry; 1979).

Nesse contexto, se a condutividade hidráulica for independentemente da posição, dentro de um mesmo solo/ formação geológica, o meio será considerado homogêneo ( $k(x, y, z) = Constante$ ), caso contrário, será heterogêneo ( $k(x, y, z) \neq Constante$ ). Já se a condutividade hidráulica for independente da direção de medição em um dado ponto, o meio será isotrópico ( $k_x = k_y = k_z$ ), caso contrário, será anisotrópico ( $k_x \neq k_y \neq k_z$ ). Diante disso, há quatro combinações possíveis para a caracterização de um meio quanto a heterogeneidade e a anisotropia: homogêneo e isotrópico (Figura 5a), homogêneo e anisotrópico (Figura 5b), heterogêneo e isotrópico (Figura 5c) e heterogêneo e anisotrópico (Figura 5d).

Figura 5 - Quatro possibilidades de combinações de heterogeneidade e anisotropia



Fonte: Modificada de Freeze e Cherry (1979)

Na natureza, a condutividade hidráulica dos materiais permeáveis na direção horizontal tende a ser maior do que na vertical, devido principalmente ao processo de deposição e consolidação em camadas (Pinto, 2006). Em casos de barragens de terra, devido o processo construtivo de compactação das camadas, a razão entre a condutividade hidráulica horizontal e vertical pode ser de 5 a 15.

### 2.2.1.1 Lei de Darcy generalizada para o domínio tridimensional

No experimento de Darcy o fluxo de percolação por unidade de área foi considerado permanente unidirecional em meio homogêneo e anisotrópico. Posteriormente, a equação modificada abrangendo a condição de fluxo tridimensional transiente em meio heterogêneo e anisotrópico (Equações 2.4, 2.5 e 2.6).

$$q_x = - \left[ k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (2.4)$$

$$q_y = - \left[ k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (2.5)$$

$$q_z = - \left[ k_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (2.6)$$

Que podem ser apresentadas na forma matricial (Equação 2.7) ou resumida (Equação 2.8).

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\{\vec{q}\} = -[k] \cdot \{\vec{\nabla}h\} \quad (2.8)$$

Em que:

$\{\vec{q}\}$  é o vetor da velocidade de Darcy [ $LT^{-1}$ ];

$[k]$  é o tensor da condutividade hidráulica [ $LT^{-1}$ ];

$\{\vec{\nabla}h\}$  é o vetor do gradiente hidráulico [-].

No caso de um meio anisotrópico, a inexistência de um gradiente hidráulico em uma dada direção não inviabiliza o fluxo (Bicalho, *et al.*, 2015), pois a anisotropia do meio possibilita que haja percolação para direções diferentes das dos gradientes hidráulicos especificados.

Com isso, em meios anisotrópicos, os gradientes hidráulicos por si só não determinam exclusivamente a direção do fluxo de percolação. Portanto, as linhas de fluxo, que representam a trajetória da água, não necessariamente serão perpendiculares às linhas equipotenciais, como seria esperado em meios isotrópicos. Esse cenário ressalta a complexidade da dinâmica da água em meios anisotrópicos e mostra a importância de considerar a anisotropia ao modelar o fluxo de água percolando no meio poroso.

Freeze e Cherry (1979) destaca que ao considerar as direções principais de anisotropia coincidirem com os eixos coordenados  $x, y$  e  $z$  (fazendo  $k_{xy} = k_{xz} = k_{yx} = k_{yz} = k_{zx} = k_{zy} = 0$ ) os problemas de fluxo em meio heterogêneo e anisotrópico podem ser solucionados aplicando as Equações 2.9, 2.10 e 2.10, uma vez que a solução da Equação 1.8, até então, é inviável.

$$q_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.9)$$

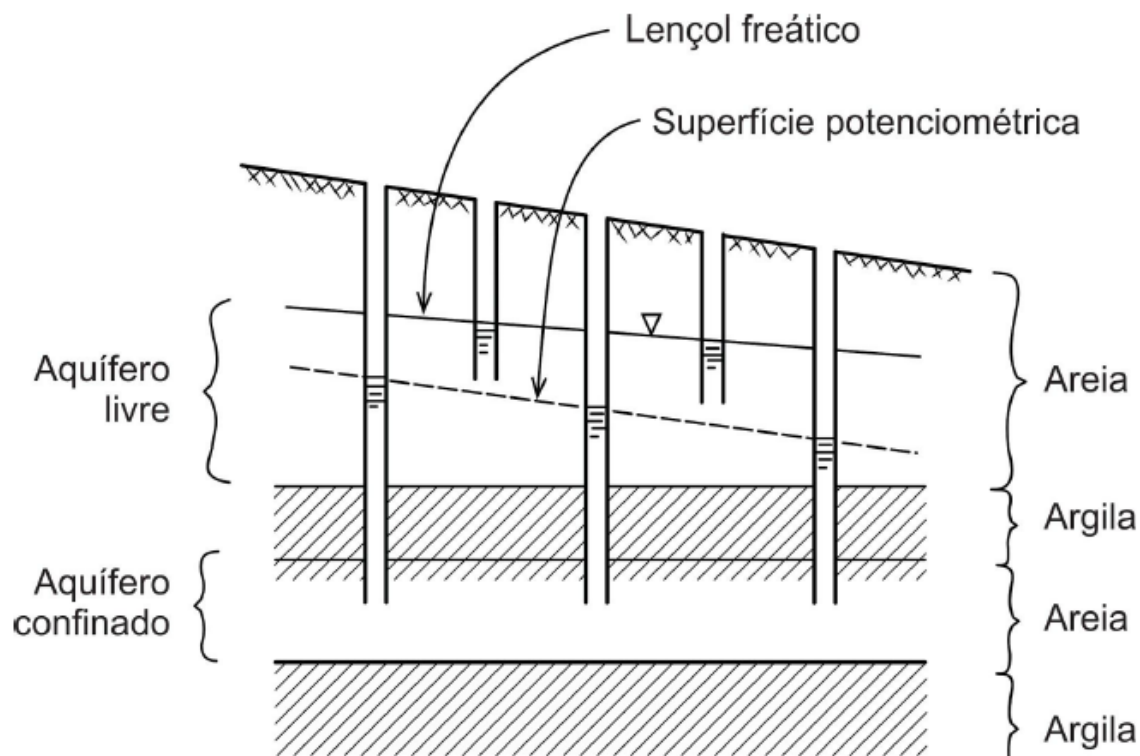
$$q_y = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$q_z = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 Equações fundamentais em aquíferos porosos

Ao percolar sob o efeito de um gradiente hidráulico natural, o fluxo de água através do maciço e da fundação de uma barragem de terra é governado pelas equações que descrevem o fluxo em aquíferos porosos livres e/ ou confinados (Figura 6).

Figura 6 - Representação de aquífero poroso livre e confinado



Fonte: Freeze e Cherry (1979)

Sobre a definição de aquífero livre e confinado, Cleary (1989), escreve:

Aquíferos confinados são formações geológicas permeáveis, confinadas no topo e na base por camadas de materiais relativamente impermeáveis, e submetidas a pressões hidrostáticas superiores à pressão atmosférica local. Em contraste, os aquíferos livres, ou não confinados, possuem uma superfície freática exposta à pressão atmosférica, e o fluxo de água neles ocorre sob a ação da gravidade. A variação do volume de água nesses aquíferos é especificada em termos da vazão específica.

Conforme descreve Das (2007), as equações fundamentais que descrevem os fluxos de percolação em aquíferos são obtidas através da aplicação dos princípios de conservação de massa, associados à Lei de Darcy. Porém, o mecanismo de liberação de água nos aquíferos confinados é diferente daquele que ocorre em aquíferos livres (Cabral, 2008).

Portanto, a equação fundamental que descreve o fluxo de água que percola aquíferos confinados difere daquela aplicada aos aquíferos livres, devido às diferenças nos mecanismos de extração/liberação e, conseqüentemente, na variação do volume de água.

#### 2.2.2.1 *Mecanismo de liberação de água em aquíferos confinados*

Em aquífero confinado, a água é liberada devido dois fatores: i) a expansão da água proporcionada pela redução da pressão hidrostática (devido a propriedade de compressibilidade da água); e ii) compressão dos vazios do meio com conseqüente aumento da pressão efetiva (devido a propriedade de compressibilidade do meio poroso) (Cabral, 2008).

Nesse contexto, o volume de água liberado durante a compactação do meio será igual à redução da unidade de volume de aquífero (Freeze, Cherry; 1979).

A variação do volume de água de um aquífero confinado, por liberação ou recarga,  $dV_w$ , é igual, em módulo, a variação volumétrica do aquífero,  $dV_T$  (no caso da liberação tem-se a Equação 2.12).

$$dV_w = -dV_T = \alpha V_T d\sigma_e \quad (2.12)$$

Em que:

$dV_w$  é a variação do volume de água no aquífero por liberação ou recarga [ $L^3$ ];

$dV_T$  é a variação volumétrica total do aquífero [ $L^3$ ];

$\alpha$  é a compressibilidade do meio poroso [ $M^{-1}LT^2$ ];

$V_T$  é o volume total do aquífero [ $L^3$ ];

$d\sigma_e$  é a variação da tensão efetiva [ $ML^{-1}T^{-2}$ ].

Considerando um volume unitário, um decréscimo unitário de carga hidráulica e que a variação da tensão efetiva é dada pela Equação 2.13, a Equação 2.12 pode ser reescrita na Equação 2.14, que quantifica a variação do volume causado pela compactação da camada de solo do aquífero.

$$d\sigma_e = -\rho g dh \quad (2.13)$$

$$dV_w = \alpha \rho g \quad (2.14)$$

Em que:

$\rho$  é a massa específica da água [ $ML^{-3}$ ];

$g$  é a aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ].

A partir das expressões que definem a compressibilidade da água,  $\beta$  (Equação 2.15) e o volume de água no volume total (Equação 2.16), obtêm-se a Equação 2.17 que expressa a variação do volume de água como função de sua compressibilidade e da porosidade do meio.

$$\beta = -\frac{dV_w}{V_w dp} \leftrightarrow dV_w = \beta V_w dp \quad (2.15)$$

$$V_w = nV_T \quad (2.16)$$

$$dV_w = -\beta n \rho g \quad (2.17)$$

Em que:

$\beta$  é a compressibilidade da água [ $M^{-1}LT^2$ ];

$V_w$  é o volume de água no aquífero por extração ou injeção [ $L^3$ ];

$dp$  é a variação da pressão [ $MLT^{-2}$ ];

$n$  é a porosidade [-].

Somando as Equações 2.14 e 2.17, obtêm-se o volume total de água que uma unidade de volume do aquífero libera do armazenamento sob uma diminuição unitária na carga hidráulica, definida como coeficiente de armazenamento específico,  $S_s$  (Equação 2.18).

$$S_s = \frac{dV_w}{V_T \cdot dh} = \rho g(\alpha + n\beta) \quad (2.18)$$

Em que:

$S_s$  é o coeficiente de armazenamento específico [ $L^{-1}$ ].

O coeficiente de armazenamento específico de um aquífero confinado pode variar no intervalo de  $7 \times 10^{-5} m^{-1} < S_s < 5 \times 10^{-3} m^{-1}$  (Barbosa Junior, 2007; Germain *et al.*, 2020).

A partir da Equação 2.18, pode ser obtida a Equação 2.19, que expressa a variação do volume em um aquífero confinado considerando o armazenamento específico.

$$dV_w = S_s V_T dh \quad (2.19)$$

#### 2.2.2.2 Mecanismo de liberação de água em aquíferos livres

Em aquíferos livres a água flui sob efeito da gravidade, logo a variação do volume total do meio poroso saturado ( $dV_T$ ) por unidade de área superficial ( $A$ ) corresponde a variação da carga hidráulica limitada pela base litológica e a superfície freática ( $dh$ ) (Equação 2.20).

$$dV_T = Adh \quad (2.20)$$

Análogo a Equação 2.16, tem-se que a variação do volume de água em um aquífero livre ( $dV_w$ ) é dada pelo produto entre a variação do volume total do meio poroso saturado ( $dV_T$ ) e a porosidade efetiva ( $n_e$ ) (Equação 2.21).

$$dV_w = n_e dV_T \quad (2.21)$$

Considerando uma área superficial unitária ( $A = 1$ ), das Equações 2.20 e 2.21 obtém-se a Equação 2.22.

$$dV_w = n_e dh \quad (2.22)$$

Considerando a Equação 2.22 e a definição de vazão específica ( $S_y$ ), dada pelo volume de água que um aquífero livre libera do armazenamento por unidade de área de superficial por unidade de declínio no nível freático (Equação 2.23) (Freeze, Cherry; 1979), obtém-se a relação Equação 2.24.

$$S_y = \frac{dV_w}{Adh} \quad (2.23)$$

$$S_y = n_e \quad (2.24)$$

A partir da Equação 2.23 obtém-se a variação do volume de água em um aquífero livre como função da vazão específica (Equação 2.25).

$$dV_w = S_y Adh \quad (2.25)$$

Assim, diferentemente do coeficiente de armazenamento específico em aquíferos confinados, que depende das compressibilidades da água e do meio poroso, a vazão específica em aquíferos livres depende apenas da vazão específica (ou porosidade efetiva). A vazão específica depende das características do meio poroso, cujos valores médios para diferentes tipos de materiais estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios das vazões específicas para diferentes tipos de materiais

<b>Material</b>	<b>Vazão específica (%)</b>
Argila	3,0
Areia	25,0
Pedregulho	22,0
Pedregulho e areia	16,0
Arenito	8,0
Calcário denso	2,0
Quartzito, granito	0,5

Fonte: Modificada de Barbosa Junior (2007)

As vazões específicas dos aquíferos porosos livres (que estão na faixa de 0,01 a 0,30) são muito mais elevados do que os armazenamentos específicos dos aquíferos confinados (que estão na faixa de  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$ ).

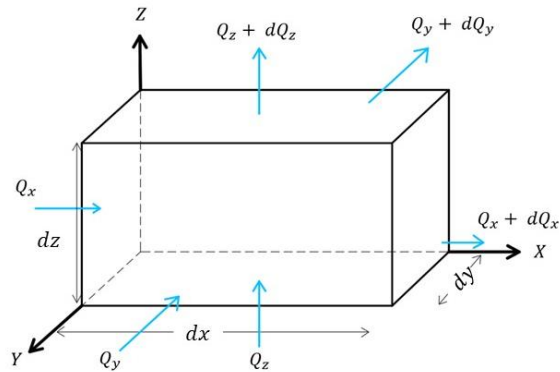
Conforme descreve Freeze e Cherry (1979):

Estes valores relativamente mais elevados refletem o fato de que liberações de água pelo armazenamento em aquíferos livres representam uma drenagem real dos poros do solo, enquanto liberações do armazenamento em aquíferos confinados representam apenas os efeitos secundários da expansão de água e compactação do aquífero causados por alterações na pressão do fluido.

### 2.2.2.3 *Equações fundamentais para aquíferos porosos confinados*

Considere um elemento infinitesimal em um aquífero poroso confinado, representado pelo volume de controle mostrado na Figura 7. Nesse caso, os fluxos de entrada são definidos pelas Equações 2.26, 2.27 e 2.28; e os fluxos de saída pelas Equações 2.29, 2.30 e 2.31.

Figura 7 - Volume de controle de um aquífero confinado



Fonte: Modificada de Lopes *et al.* (2024)

$$Q_x = q_x dydz \quad (2.26)$$

$$Q_y = q_y dx dz \quad (2.27)$$

$$Q_z = q_z dx dy \quad (2.28)$$

$$Q_x + dQ_x = \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy dz \quad (2.29)$$

$$Q_y + dQ_y = \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz \quad (2.30)$$

$$Q_z + dQ_z = \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (2.31)$$

A partir da equação da continuidade que expressa a variação do volume de água no volume de controle como a diferença entre os fluxos de entrada e os de saída, considerando a Lei de Darcy para o fluxo tridimensional transiente em meio heterogêneo e anisotrópico (Equações 2.9 a 2.11), obtém-se a Equação 2.32.

$$\left( k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz = \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (2.32)$$

Em que:

$t$  é o tempo [T].

Substituindo a Equação 2.19 na Equação 2.32, obtém-se a Equação 2.33.

$$\left( k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz = \frac{S_s V_T dh}{\partial t} \quad (2.33)$$

Considerando  $V_T = dx dy dz$  e adicionando possíveis fontes e sumidouros presentes no volume de controle ( $W$ ), obtém-se a Equação 2.34, que descreve o fluxo tridimensional transiente em aquíferos porosos confinados heterogêneos e anisotrópicos.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.34)$$

Em que:

$W$  é o fluxo volumétrico por unidade de volume [ $T^{-1}$ ].

Para o fluxo tridimensional permanente ( $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ ) a Equação 2.34 é simplificada para a Equação 2.35.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \pm W = 0 \quad (2.35)$$

Considerando o fluxo tridimensional transiente em aquíferos porosos confinados homogêneos e isotrópicos ( $k_x = k_y = k_z = k$ ), a Equação 2.34 é simplificada para a Equação 2.36.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \pm \frac{W}{k} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.36)$$

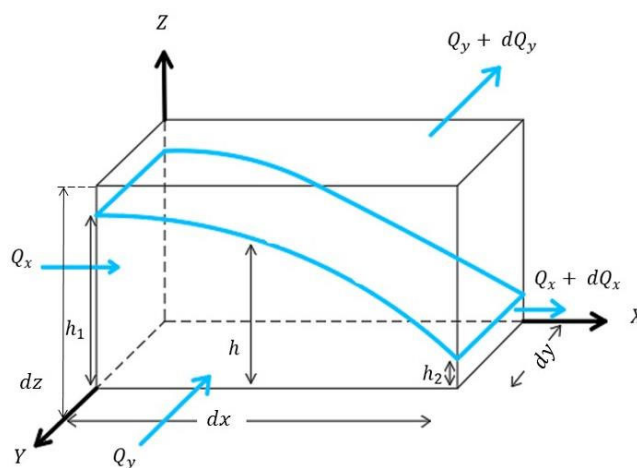
Para aquíferos porosos confinados homogêneos e isotrópicos ( $k_x = k_y = k_z = k$ ) de fluxo tridimensional permanente ( $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ ), a Equação 2.34 é simplificada para a Equação 2.37.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \pm \frac{W}{k} = 0 \quad (2.37)$$

### 2.2.2.4 Equações fundamentais para aquíferos porosos livres

Diferentemente dos aquíferos porosos confinados, utiliza-se aproximação de *Dupuit-Forchheimer*, para o qual os fluxos em aquíferos porosos livres é predominantemente horizontal, no qual as propriedades hidrogeológicas e o fluxo são estudados de forma bidimensional. Assim, considerando um elemento infinitesimal em um aquífero livre (Figura 8), o fluxo de entrada é caracterizado pelas Equações 2.38 e 2.39; e o de saída pelas Equações 2.40 e 2.41.

Figura 8 - Volume de controle de um aquífero livre



Fonte: Modificada de Lopes *et al.* (2024)

$$Q_x = q_x dy dz \quad (2.38)$$

$$Q_y = q_y dx dz \quad (2.39)$$

$$Q_x + dQ_x = \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy dz \quad (2.40)$$

$$Q_y + dQ_y = \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz \quad (2.41)$$

A partir da equação da continuidade, das equações do fluxo de entrada (Equação 2.38 e 2.39) e de saída (Equações 2.40 e 2.41) e da Lei de Darcy para o domínio bidimensional (Equações 2.9 a 2.10), obtém-se a Equação 2.42.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hk_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx dy + \frac{\partial}{\partial y} \left( hk_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) dx dy = \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (2.42)$$

Substituindo a Equação 2.25 na Equação 2.42, tem-se a Equação 2.43.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hk_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx dy + \frac{\partial}{\partial y} \left( hk_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) dx dy = \frac{S_y A dh}{\partial t} \quad (2.43)$$

Considerando  $A = dx dy$  e adicionando possíveis fontes e sumidouros presentes no volume de controle, obtém-se a Equação 2.44, que descreve o fluxo bidimensional transiente para aquíferos porosos livres heterogêneos e anisotrópicos.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hk_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hk_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.44)$$

Para o fluxo bidimensional permanente a Equação 2.44 é simplificada para a Equação 2.45.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hk_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hk_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm W = 0 \quad (2.45)$$

Considerando o fluxo bidimensional transiente em aquíferos porosos livres homogêneos e isotrópicos, a Equação 2.44 é simplificada para a Equação 2.46.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm \frac{W}{k} = \frac{S_y}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.46)$$

Para aquíferos porosos livres homogêneos e isotrópicos de fluxo bidimensional permanente, a Equação 2.44 é simplificada para a Equação 2.47.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm \frac{W}{k} = 0 \quad (2.47)$$

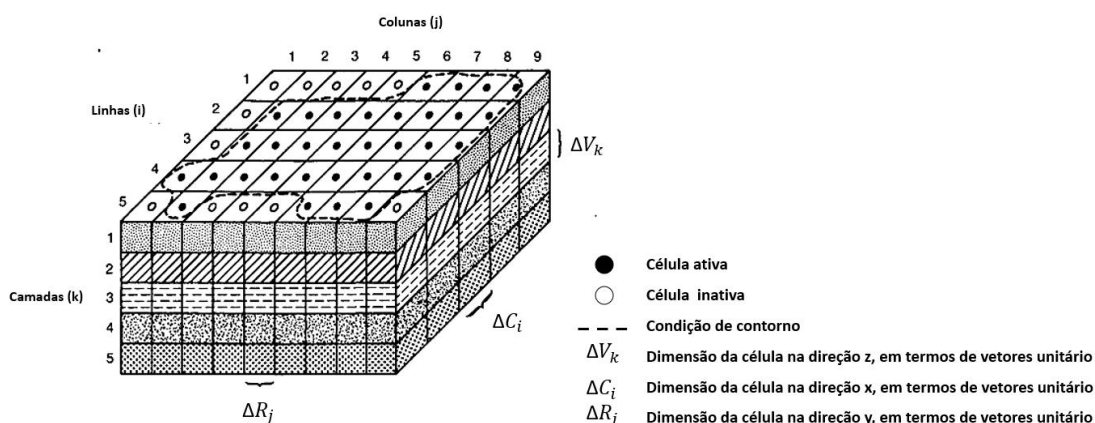
### 2.3 Programa MODFLOW

Um dos programas que é utilizado obtenção dos resultados das Equações 2.34 e 2.44, é o *MODFLOW (modular three dimensional finite difference groundwater flow model)*. A partir do MDF, o programa fornece não apenas a análise do fluxo subterrâneo, mas também simula o transporte de contaminante.

A fundamentação matemática do MODFLOW, sintetizada neste tópico, está descrita em McDonald e Harbaugh (1988).

A Figura 9 mostra a representação de um sistema de aquífero físico através de um domínio tridimensional definido por uma malha de Diferenças Finitas de  $i$  linhas,  $j$  colunas e  $k$  camadas. Os elementos que contém círculos brancos representam células inativas (ou de não fluxo) ou de carga constante, que indicam as fronteiras hidrogeológicas do sistema de aquífero. Já os que contém círculos hachurados de preto indicam as células ativas, cujas cargas são variáveis.

Figura 9 - Malha tridimensional de diferenças finitas composta por 5 linhas, 9 colunas e 5 camadas, incluindo a representação de seus elementos



Fonte: Modificado de McDonald e Harbaugh (1988)

Nas células ativas confinadas (sobrejacentes as que contém a superfície freática) o *MODFLOW* aplica a Equação 2.37 juntamente com a Equação da Continuidade (Equação 2.48).

$$\sum q_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta V_{i,j,k} \quad (2.48)$$

Em que:

$q_{i,j,k}$  é o fluxo na célula  $i,j,k$  [ $L^3 T^{-1}$ ];

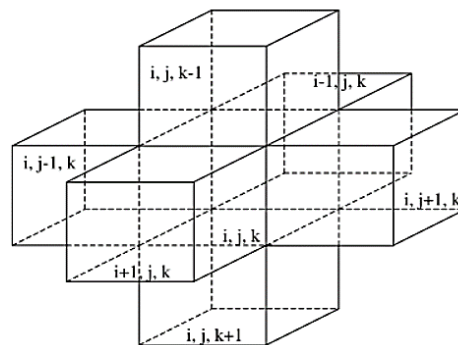
$S_{S_{i,j,k}}$  é o coeficiente de armazenamento específico [ $L^{-1}$ ];

$\Delta V_{i,j,k}$  é o volume da célula [ $L^3$ ];

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$  é a variação de carga hidráulica no intervalo de tempo  $\Delta t$  [ $LT^{-1}$ ].

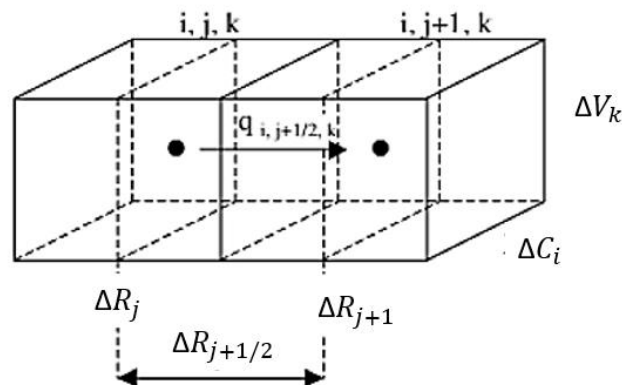
A análise do fluxo de percolação em uma dada célula de localização central  $i, j, k$  é feita considerando um volume de controle contendo as seis células adjacentes (Figura 10). A Figura 11 ilustra o fluxo do nó central da célula  $i, j, k$  para o da vizinha  $i, j + 1, k$ , representado por  $q_{i,j+1/2,k}$  (Figura 11). Nesta análise os fluxos de entrada em cada célula são positivos e os de saída, negativos.

Figura 10 - Célula  $i,j,k$  e as seis células adjacentes.



Fonte: McDonald e Harbaugh (1988)

Figura 11 - Fluxo do nó central da célula  $i, j, k$  para o da célula vizinha  $i, j + 1, k$



Fonte: McDonald e Harbaugh (1988)

Através da Lei de Darcy é possível obter a do fluxo de percolação entre as células  $i, j, k$  e  $i, j + 1, k$  (Equação 2.49).

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta R_{j+1/2}} \quad (2.49)$$

Em que:

$q_{i,j+1/2,k}$  é o fluxo entre os nós centrais das células  $i, j, k$  e  $i, j + 1, k$  [ $L^3 T^{-1}$ ];

$h_{i,j,k}$  e  $h_{i,j+1/2,k}$  são as cargas hidráulicas nos nós centrais das células  $i, j, k$  e  $i, j + 1, k$  [L];

$KR_{i,j+1/2,k}$  é a condutividade hidráulica ao longo da linha entre os nós centrais das células  $i, j, k$  e  $i, j + 1, k$  [ $LT^{-1}$ ];

$\Delta C_i \Delta V_k$  é a área das faces da célula normal à direção do fluxo [ $L^2$ ];

$\Delta R_{j+1/2}$  é a distância entre os nós centrais das células  $i, j, k$  e  $i, j + 1, k$  [L].

Considerando este raciocínio para as seis células vizinhas e substituindo na Equação 2.48, obtém-se a Equação 2.50.

$$\begin{aligned} q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i,j,k+1/2} + q_{i,j,k-1/2} + QS_{i,j,k} \\ = S_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta R_j \Delta C_i \Delta V_k \end{aligned} \quad (2.50)$$

Em que:

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$  é a aproximação em diferenças finitas para a derivada da carga com respeito ao tempo [ $LT^{-1}$ ];

$\Delta R_j \Delta C_i \Delta V_k$  é o volume da célula  $i, j, k$  [ $L^3$ ];

$QS_{i,j,k}$  são os fluxos de entrada e/ou saída na célula  $i, j, k$  [ $L^3 T^{-1}$ ].

Os fluxos de entrada e/ou saída são definidos por condições de contorno, que no geral são representadas pela Equação 2.51.

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (2.51)$$

Em que:

$P_{i,j,k}h_{i,j,k}$  são fluxos dependentes da carga [ $L^3 T^{-1}$ ];

$Q_{i,j,k}$  são fluxos independentes da carga [ $L^3 T^{-1}$ ].

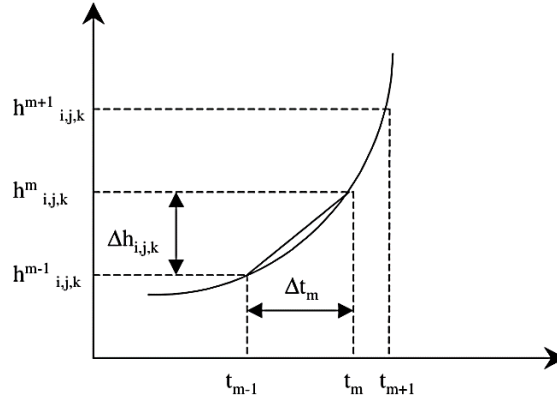
O termo  $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$  representado na Figura 12 é expresso pela Equação 2.52.

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (2.52)$$

Em que:

$m$  e  $m - 1$  correspondem aos passos do tempo (não são expoentes).

Figura 12 - Variação da carga com o tempo na célula  $i, j, k$  em uma dada célula



Fonte: McDonald e Harbaugh (1988)

Substituindo a Equação 2.52 na Equação 2.50 e fazendo as devidas simplificações, obtém-se a Equação 2.53.

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-1/2}h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k}h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k}h_{i,j-1,k}^m \\ & + \left( -CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CV_{i,j,k+1/2} - CC_{i+1/2,j,k} \right. \\ & \left. - CR_{i,j+1/2,k} + HCOF_{i,j,k} \right) h_{i,j,k}^m + CV_{i,j,k+1}h_{i,j,k+1}^m + CC_{i+1/2,j,k}h_{i+1,j,k}^m \\ & + CR_{i,j-1/2,k}h_{i,j-1,k}^m = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \quad (2.53)$$

Em que:

$$RHS_{i,j,k} = -QS_{i,j,k} - SC1_{i,j,k}h_{i,j,k}^{m-1}/(t_m - t_{m-1}) [L^2T^{-1}];$$

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k-} - SC1_{i,j,k}/(t_m - t_{m-1}) [L^3T^{-1}];$$

$$SC1_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} \Delta R_j \Delta C_i \Delta V_k [L^2].$$

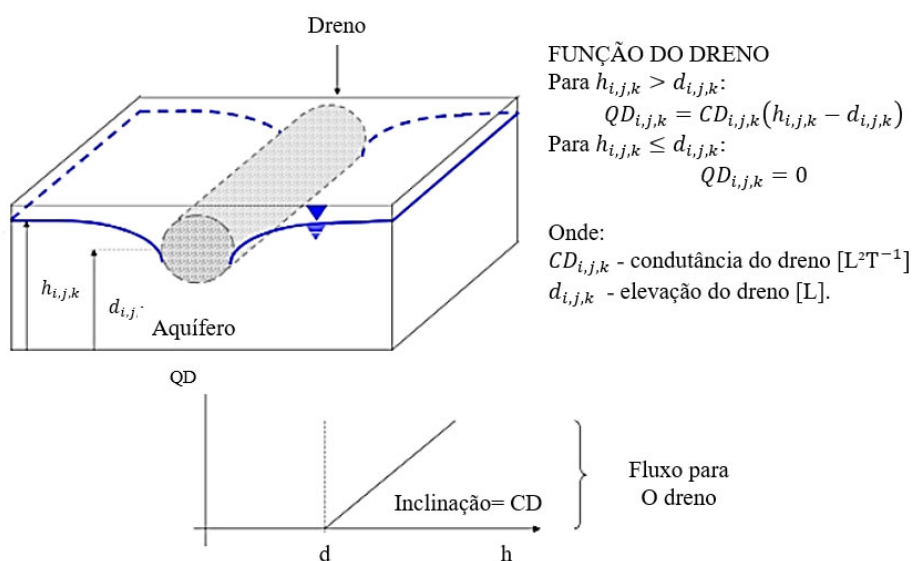
Esta metodologia é adotada para cada célula da malha de DF, gerando um sistema de equações que é resolvido simultâneas para cada passo do tempo de simulação, podendo ou não convergir para uma solução.

Nas células ativas livres (as que contém a superfície freática) o *MODFLOW* aplica a Equação 2.47 e utiliza a mesma metodologia adotada para as células ativas confinadas.

As funções utilizadas nas condições de contorno do *MODFLOW* são matematicamente similares (Equação 2.51). Elas são representadas por sub-rotinas independentes, conhecidas como “pacotes”. Cada “pacote” calcula fluxos de entrada e/ ou de saída em uma dada célula  $i, j, k$ , que são diretamente proporcionais à diferença entre a carga na célula ( $h_{i,j,k}$ ) e a carga de uma dada fonte ou sumidouro.

A Figura 13 mostra o esboço esquemático de um dreno, utilizado como condição de contorno no *MODFLOW*, juntamente com sua função condicional e um gráfico representando o fluxo em função da carga hidráulica numa dada célula  $i, j, k$ .

Figura 13 - Esboço esquemático da condição de contorno dreno com a função condicional utilizada no *MODFLOW* e o gráfico representando do fluxo em função da carga hidráulica numa dada célula  $i, j, k$ .



Fonte: McDonald e Harbaugh (1988)

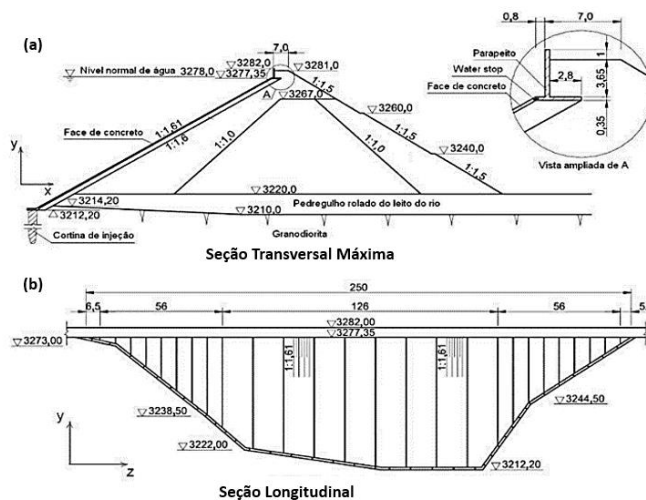
A condutância é um coeficiente que descreve a perda de carga entre o dreno e o aquífero. Na literatura não há formulação matemática ou experimental para obtenção da condutância, sendo necessária ser ajustada durante a calibração do modelo. O fluxo de saída do aquífero através de um dreno pode ser obtido a partir do módulo *ZoneBudget* do MODFLOW.

#### **2.4 Análises do fluxo de percolação em barragens de terra realizadas com a modelagem tridimensional**

A análise do fluxo de percolação em barragens já foi realizada por alguns pesquisadores, utilizando a modelagem computacional tridimensional, a partir da Equação 2.34 e/ou suas simplificações (Equações 2.35, 2.36 e 2.37) e da Equação 2.44 e/ou suas simplificações (Equações 2.45, 2.46 e 2.47).

Chen e Zhang (2006) realizaram não apenas a análise tridimensional transiente, mas também compararam os resultados com os obtidos em uma modelagem bidimensional transiente. Os autores estudaram a barragem de Gouhou, localizada no condado de Gonghe, província de Qinghai, China. A barragem é do tipo de enrocamento, situada em um desfiladeiro íngreme e construída sobre uma camada de 10 m de espessura de cascalho arenoso, assentada sobre base rochosa. O topo da barragem alcança uma altitude de 3281 m acima do nível do mar, estendendo-se por um comprimento de 265 m e com uma crista de 7 m de largura. O reservatório formado pelo barramento possui uma capacidade volumétrica de 3,1 milhões de metros cúbicos. Detalhes da seção transversal máxima e da perspectiva da face voltada para montante da barragem podem ser visualizados na Figura 14.

Figura 14 - Seção transversal máxima (a) e o perfil longitudinal (b) da barragem Gouhou



Fonte: Modificada de Chen e Zhang (2006)

A análise de fluxo obtida pelos autores indicou que a água de percolação flui mais rapidamente e os gradientes hidráulicos são mais elevados próximos ao limite da ombreira na barragem. Com isso, a evolução da ruptura por *piping* pode ser prevista na análise tridimensionais. Esta informação não foi obtida na análise bidimensional, uma vez que o perfil tipo utilizado na construção do modelo conceitual não abrangeu a região das ombreiras. Nesse caso observou-se que a análise bidimensional subestimou o fluxo de percolação e, conseqüentemente, o risco de ruptura por infiltração.

É importante ressaltar que, para a obtenção dos resultados mencionados, foi considerado o efeito da anisotropia dos materiais. No entanto, os autores também realizaram simulações considerando o meio isotrópico, nas quais observou-se que, no caso de barragens de enrocamento, o fluxo percorre um longo caminho com direção descendente, em direção ao leito do rio, não emergindo no talude de jusante.

Por fim, os autores destacam a importância da análise tridimensional em um meio anisotrópico.

Não raramente, as rupturas por *piping* em barragens iniciam-se nas ombreiras (Chen, Zhang; 2006), áreas que não são contempladas por análises bidimensionais. Isso ocorre porque, na abordagem da análise bidimensional, seleciona-se uma seção transversal dentro do domínio tridimensional (Freeze, Cherry; 1979). Esse fato ressalta que a análise

tridimensional é mais precisa, pois pode incluir todas as irregularidades do barramento, a topografia local e condições de contorno mais realistas (Lópes, Promotor; 2016).

Ademais, na análise bidimensional tradicional, frequentemente considera-se o meio como isotrópico, o que pode levar a uma subestimação do fluxo de percolação através do maciço da barragem, conforme evidenciado nos resultados obtidos pelos autores.

Outro trabalho utilizando modelos matemáticos para análise do fluxo de percolação bidimensional e tridimensional em barragens de terra ou de enrocamento, foi desenvolvido por Kacimov *et al.* (2019). Estes modelos foram aplicados a barragem Oroville, situada no Rio Feather, próximo à cidade de Oroville, na Califórnia, EUA. Essa barragem é de terra zoneada, com uma altura de 235 m e um comprimento de 2.109 m, com capacidade de acumulação de aproximadamente 4,36 bilhões de metros cúbicos.

Nas simulações tridimensionais, o fluxo de percolação através do maciço revelou zonas de alto risco de erosão interna, as quais não foram evidenciadas na análise bidimensional. Tal como observado na barragem de Gouhou, essa situação manifestou-se, principalmente, nas proximidades das ombreiras, nas quais os gradientes hidráulicos e as velocidades de fluxo são significativamente maiores. Os autores identificaram que, nessas regiões, o fluxo de percolação muda de predominantemente horizontal para vertical ou obliquamente ascendente, resultando em um aumento localizado na força de pressão da água e na velocidade. Essa alteração potencializa os processos de erosão interna, representando uma ameaça à integridade da barragem.

## **2.5 Análise estatística na modelagem computacional**

A análise estatística é fundamental na avaliação séries temporais e de resultados de modelagem computacional.

Em cenários nos quais a precisão do modelo é influenciada por diversas variáveis, as etapas tornam-se complexas, necessitando de ferramentas estatísticas robustas, como as associadas à análise multivariada. Tais ferramentas permitem o entendimento de relações entre variáveis, otimizando o processo decisório e, conseqüentemente, tornando o modelo mais preciso.

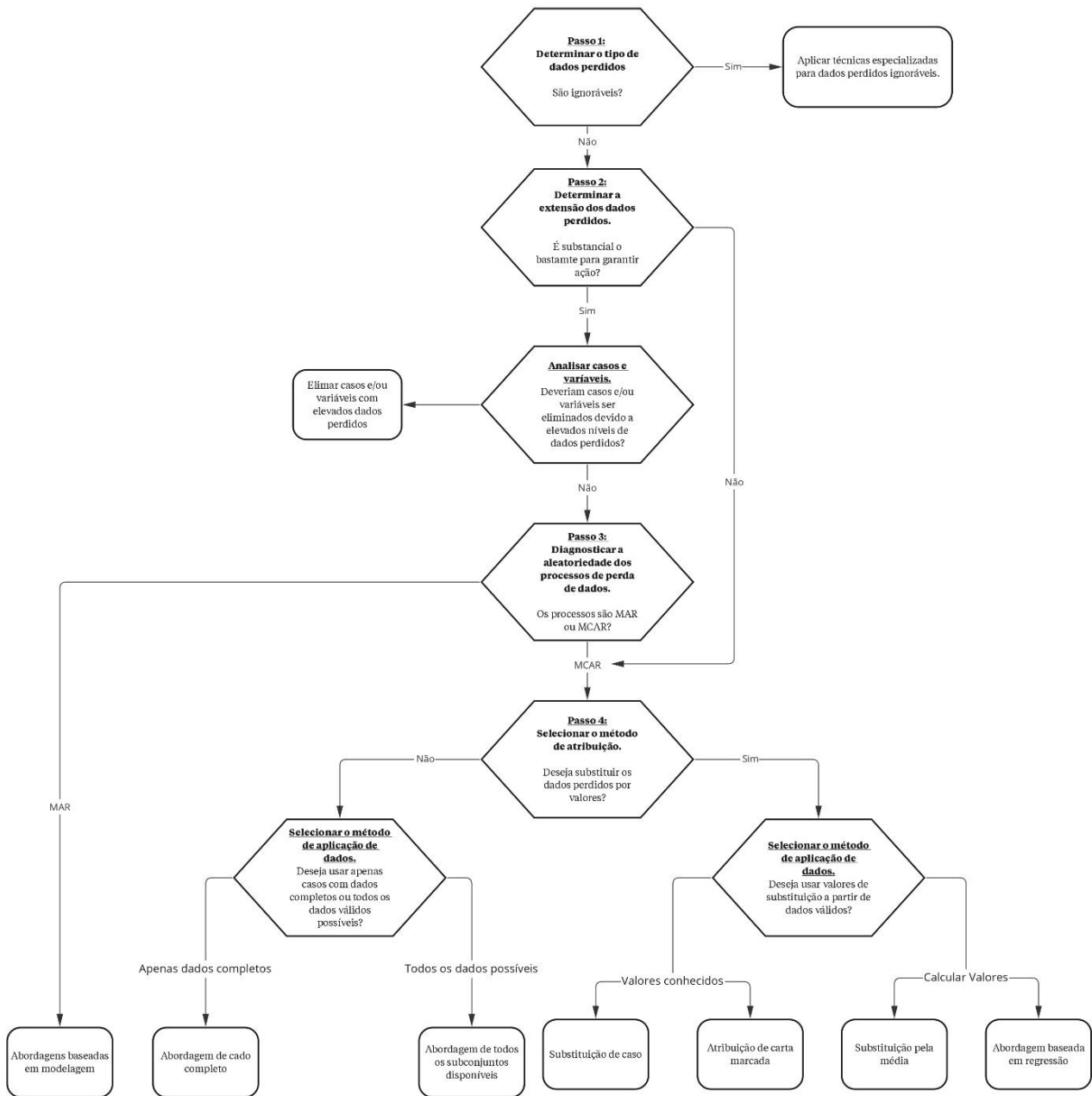
Neste contexto, os tópicos subsequentes objetivam explicar cada fase da modelagem computacional, bem como as ferramentas estatísticas vinculadas à análise multivariada aplicáveis em cada etapa.

### **2.5.1 *Análise de dados perdidos***

Dados perdidos são informações omitidas, perdidas, errôneas ou inconsistentes. Como descreve He e Deng (2020), existem diferentes padrões de falta, incluindo não resposta de variável única, não resposta multivariada, não resposta monótona e não resposta geral.

Segundo Hair *et al.* (2009), os resultados estatísticos baseados em dados com um processo não-aleatório de dados perdidos podem ser tendenciosos, levando assim a tomada de decisões errôneas. Os autores destacam dois níveis de aleatoriedade quando se avaliam dados perdidos: completamente perdida ao acaso (MCAR) e perdida ao acaso (MAR). Além disso, os autores estabelecem o procedimento para a análise dos dados perdidos, sintetizado na Figura 15. As técnicas de atribuição dos dados perdidos estão expostas na Tabela 2.

Figura 15 - Procedimento para identificar dados perdidos e aplicar ações corretivas



Fonte: Modificado de Hair *et al.* (2009)

Tabela 2 - Comparação entre técnicas de atribuição para dados perdidos

Método de atribuição	Vantagens	Desvantagens	Melhor a ser usado quando ocorrem:
<b>Atribuição usando apenas dados válidos</b>			
Dados completos	O mais simples para implementação; Padrão de muitos programas.	Mais afetados por processos não-aleatórios; Maior redução no tamanho da amostra; Menor poder estatístico.	Grandes amostras; Fortes relações entre variáveis; Baixos níveis de perda de dados.
Dados totalmente disponíveis	Maximiza o uso dos dados válidos; Resulta no maior tamanho possível de amostra sem substituir valores.	Variam os tamanhos de amostra para cada atribuição; Pode gerar valores para correlação e autovalores fora do escopo.	Níveis relativamente baixos de dados perdidos; Relações moderadas entre variáveis.
<b>Atribuição usando valores de substituição conhecidas</b>			
Substituição por um caso	Oferece valores realistas de substituição no lugar de valores calculados.	Deve ter casos adicionais fora da amostra original; Deve definir medida de similaridade para identificar o caso de substituição.	Casos adicionais disponíveis; Oportunidades para identificar casos de substituição.
Atribuição por carta marcada	Substitui dados perdidos por valores reais a partir do caso mais parecido ou do melhor valor conhecido.	Deve definir casos adequadamente semelhantes ou valores externos apropriados.	Valores de substituição conhecidos; Indicações de variáveis no processo de perda de dados sobre as quais se possa basear a similaridade.
<b>Atribuição por cálculo de valores de substituição</b>			
Substituição pela média	Facilmente implementado; Fornece todos os casos com informação completa.	Reduz variância da distribuição; Distorce distribuição dos dados; Comprime correlações observadas. Reforça relações existentes e reduz generalidade;	Níveis relativamente baixos de perda de dados; Relações relativamente fortes entre variáveis.
Atribuição por regressão	Emprega relações reais entre as variáveis; Valores de substituição calculados com base em valores de uma observação em outras variáveis; Conjunto único de preditores pode ser usados para cada variável com dados perdidos.	Deve ter suficientes relações entre as variáveis para gerar valores previstos válidos; Subestima variâncias a menos que erro seja adicionado ao valor de substituição; Valores de substituição podem estar “fora do escopo”.	Níveis moderados ou altos de dados perdidos; Relações suficientemente estabelecidas para não impactarem generalidade; Disponibilidade de software.
<b>Métodos baseados em modelos para processos de perda de dados MAR</b>			
Métodos baseados em modelos	Acomodam tanto processo de dados perdidos aleatórios, quanto não-aleatórios; Melhor representação da distribuição de valores com menor viés.	Complexa especificação de modelo pelo pesquisador; Requer programa especializado. Tipicamente indisponível de forma direta em programas (exceto o método EM em SPSS).	É o único que pode acomodar processos não-aleatórios de perda de dados; Elevados níveis de perda de dados que demandam métodos menos tendenciosos para garantir generalidade.

Fonte: Hair *et al.* (2009)

## 2.5.2 *Detecção e tratamento de outliers*

Segundo Afzal *et al.* (2021), nas séries históricas existem observações que não estão em conformidade com o comportamento dos dados, estas observações que são significativamente inconsistentes com a maioria das observações no conjunto de dados são conhecidas como *outliers*.

A principal razão para o surgimento de *outliers* são as contaminações juntamente com o erro humano e a ignorância, podendo afetar os resultados da análise de dados estatísticos, por isso devem ser detectados (Okhli, Nooghabi; 2023). A detecção de valores discrepantes é uma tarefa desafiadora, especialmente quando os valores discrepantes são definidos por combinações raras de múltiplas variáveis (Afzal *et al.*, 2021). Uma das técnicas mais conhecidas para a análise multivariada de *outliers* é a Distância de Mahalanobis.

### 2.5.2.1 *Distância de Mahalanobis*

Em 1930, o estatístico Prasanta Chandra Mahalanobis introduziu uma abordagem inovadora para a análise estatística, a qual ele denominou "Distância de Mahalanobis" (MD). Esta técnica não se limita a simplesmente medir a distância entre um ponto específico e uma distribuição; ela incorpora um elemento adicional ao considerar a correlação existente entre as variáveis em análise. A incorporação dessa correlação permite uma avaliação mais precisa e contextualizada dos dados.

O equacionamento do método pode ser observado a partir da simplificação de Hazewinkel (1990) (Equação 2.54).

$$MD_i = \sqrt{(V_i - T(V))C(V)^{-1}(V_i - T(V))^T} \quad (2.54)$$

Em que:

$V$  é o conjunto de dados em análise com  $p$  variáveis e  $n$  amostras;

$V_i$  é a  $i$ -ésima amostra do conjunto de dados;

$T(V)$  é um vetor de média aritmética simples;

$C(V)$  é a matriz de covariância  $p \times p$ .

Para uma distribuição Normal Multivariada, a Distância de Mahalanobis ao quadrado ( $MD_i^2$ ) tem aproximadamente uma distribuição qui-quadrado, com  $p$  graus de liberdade ( $X_p^2$ ), assim pode-se definir os *outliers* como aquelas medidas que ultrapassam um determinado quantil da distribuição qui-quadrado (Valadares, *et al.* 2012).

Porém, Valadares *et al.* (2012) descreve que a Distância de Mahalanobis, embora usada para identificar *outliers*, é sensivelmente afetada por eles devido à vulnerabilidade dos estimadores de localização e dispersão empregados, como a média aritmética simples e a matriz de covariância amostral. Alguns métodos alternativos empregam a Distância de Mahalanobis para detecção de *outliers*, mas substituem a média e a matriz de covariância por estimadores mais robustos, como *Minimum Volume Ellipsoid (MVE)*

#### 2.5.2.2 *Minimum Volume Ellipsoid (MVE)*

O estimador do MVE pode ser obtido com a utilização do elipsoide de menor volume capaz de cobrir pelo menos  $k$  pontos do conjunto amostral, em que  $n/2 < k < n$ .

Em seu estudo, Valadares *et al.* (2012) descreve detalhes sobre o *MVE*:

- Os estimadores iniciais são a média e a matriz de covariância. A partir destes dados será traçado um elipsoide de volume mínimo que definirá os “pontos bons”, ou seja, que pertencem a um intervalo de confiança definido. Esses “pontos bons” são utilizados para os cálculos das estimativas finais dos parâmetros de localização e dispersão;
- Os valores iniciais para os estimadores são a média e a matriz de covariância. Com base nessas informações, um elipsoide de volume mínimo é traçado para determinar os "pontos confiáveis", ou seja, aqueles que estão dentro de um intervalo de confiança estabelecido. Esses "pontos confiáveis" são empregados para determinar as estimativas finais dos parâmetros de posição e variação;
- O estimador *MVE* pode ser definido como um par  $(T, C)$ , que substituem a média e a matriz de covariância por um vetor  $T(V)$  de tamanho  $p$ ; e  $C(V)$ , por uma matriz positiva semi-definida de tamanho  $p \times p$ . O determinante da matriz é mínimo e deve satisfazer a Inequação 2.55.

$$\#\{i; (V_i - T(V))C(V)^{-1}(V_i - T(V))^T \leq a^2\} \geq g \quad (2.55)$$

Em que:

# é o número de elementos no conjunto;

$$g = \frac{(n+p+2)}{2};$$

$n$  é o tamanho da amostra;

$p$  é a qualidade de variáveis.

### 2.5.3 *Análise de sensibilidade e calibração na modelagem computacional*

Modelos computacionais são usados rotineiramente para planejamento e gestão de recursos hídricos. Como os modelos são simplificações do mundo real, a precisão das suas previsões não pode ser considerada garantida (Muleta, 2011). Diante disso, torna-se necessário análises de sensibilidade e calibração desses modelos, bem como avaliar seu desempenho por meio de métodos que mensurem sua acurácia.

A principal aplicação da análise de sensibilidade é indicar as incertezas nos parâmetros de entrada que afetam o desempenho do modelo (Paul, Negahban-azar; 2018). A análise de sensibilidade é uma técnica utilizada para determinar como diferentes variações nos parâmetros de entrada de um modelo influenciam os resultados, identificando e quantificando as incertezas associadas aos parâmetros de entrada.

Os indicadores estatísticos mais utilizados na avaliação do desempenho de modelos computacionais, são os coeficientes de determinação, de correlação e de eficiência de *Nash-Sutcliffe*, além do Erro Quadrático Médio.

#### 2.5.3.1 *Coefficiente de determinação*

O grau de colinearidade entre as variáveis simuladas e medidas pode ser obtido através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 2.56), com métrica que varia de 0 a 1, com valor máximo indicando que o modelo avaliado explica toda a variação dos dados (Kumar *et al.*, 2017).

$$R^2 = \frac{[\sum_i (X_{m,i} - \bar{X}_m)(X_{s,i} - \bar{X}_s)]^2}{\sum_i (X_{m,i} - \bar{X}_m)^2 \sum_i (X_{s,i} - \bar{X}_s)^2} \quad (2.56)$$

Em que:

$X_{m,i}$  corresponde ao valor do  $i$ -ésimo dado observado;

$X_{s,i}$  corresponde ao valor do  $i$ -ésimo dado calculado;

$\bar{X}_m$  corresponde à média dos dados observados;

$\bar{X}_s$  corresponde à média dos dados calculados.

### 2.5.3.2 Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação ( $r$ ) (Equação 2.57) mede o grau da correlação entre as variáveis calculadas e observadas, assumindo valores entre -1 e 1 (Schober *et al.*, 2018). Valores, em módulo, de 0,00 a 0,10 indicam correlação insignificante; de 0,11 a 0,36, fraca; de 0,40 a 0,69, moderada; de 0,70 a 0,89, forte; e de 0,90 e 1,00, muito forte.

$$r = \frac{\sum_i (X_{m,i} - \bar{X}_m)(X_{s,i} - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_i (X_{m,i} - \bar{X}_m)^2 \sum_i (X_{s,i} - \bar{X}_s)^2}} \quad (2.57)$$

### 2.5.3.3 Eficiência de Nash-Sutcliffe

O coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS) (Nash e Sutcliffe 1970) (Equação 2.58) é um índice adimensional que quantifica a proporção da variância residual em relação à variância dos dados observados.

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{m,i} - X_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{m,i} - \bar{X}_m)^2} \quad (2.58)$$

Para um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados o valor de *ENS* deve ser igual a 1. Na análise do desempenho de um modelo o *ENS* é dito como bom se estiver no intervalo de 0,6 a 0,8 e excelente se for maior que 0,8 (Masood *et al.*, 2023). Os autores ainda destacam que para a calibração de um modelo os critérios são menos restritos, pois valores de *ENS* maiores que 0,5 já são considerados validados. No entanto, quando  $ENS \leq 0$  indica que o uso da média dos dados observados é melhor do que a simulação feita.

#### 2.5.3.4 Erro Quadrático Médio

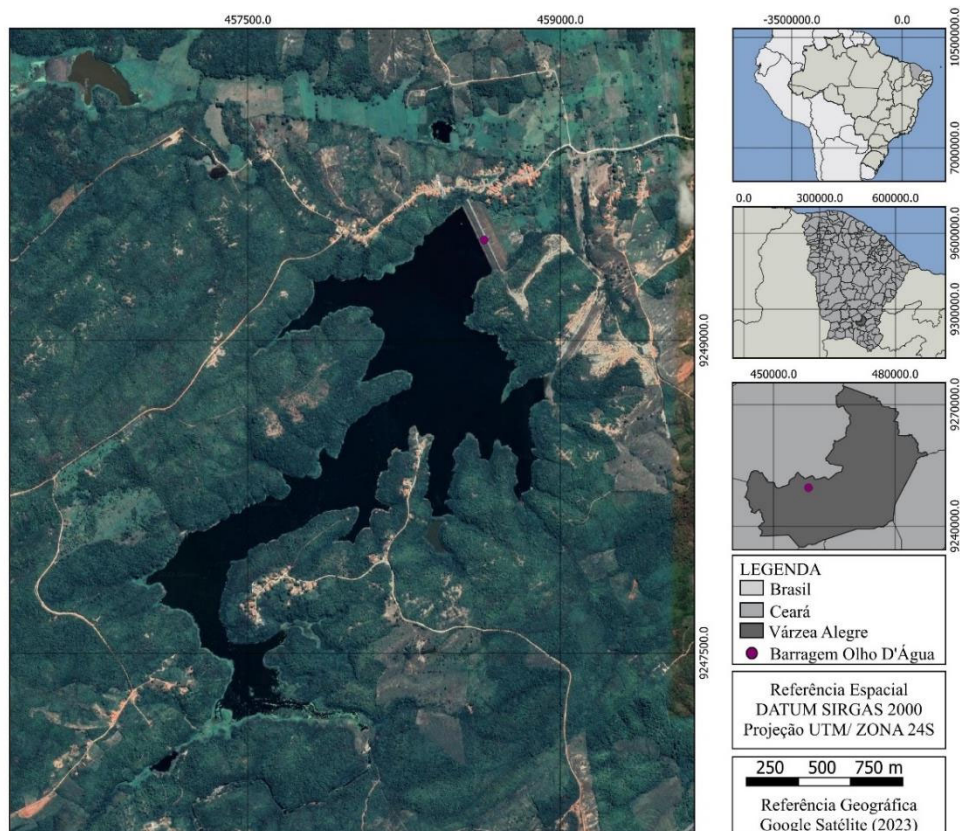
O *EMQ* (Erro Quadrático Médio) (Equação 2.59) é uma métrica amplamente empregada para avaliar o erro de modelos numéricos aplicados em hidrogeologia. Ele fornece uma quantificação do erro nas mesmas unidades da variável em estudo, facilitando a interpretação dos resultados, onde quanto menor for o *EMQ* maior aderência do modelo às observações reais.

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{m,i} - X_{s,i})^2}{n}} \quad (2.59)$$

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A barragem Olho d'Água, localizada no município de Várzea Alegre, CE, intercepta o riacho Machado e possui capacidade de armazenamento de 19 milhões de metros cúbicos de água. Suas coordenadas UTM são 458.750 E e 9.249.600 N, na zona 24S, datum WGS-84 (Figura 16). A bacia hidráulica da barragem cobre uma área de 456 hectares.

Figura 16 - Mapa de localização da barragem Olho D'Água



Fonte: Lopes *et al.*, (2024)

#### 3.1 Perfil estratificado da fundação

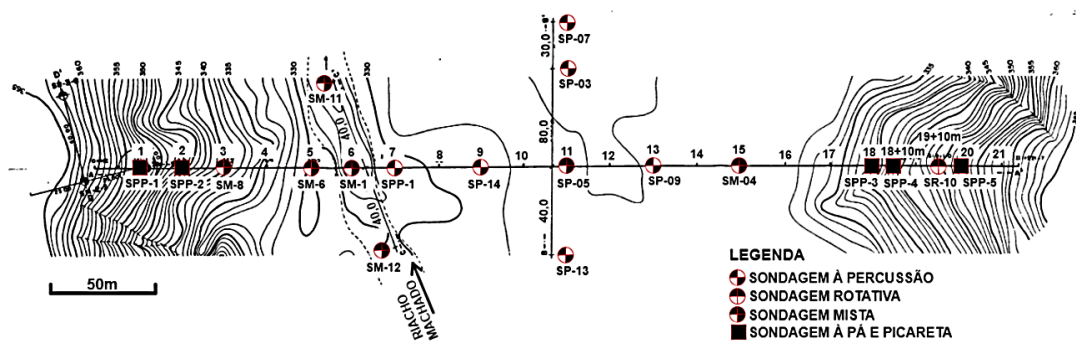
Os estudos geotécnicos foram realizados para caracterização da fundação (segundo a orientação dos eixos do barramento e do rio). A Tabela 3 e a Figura 17 apresentam as sondagens mista, rotativa, percussiva e a pá e picareta, realizadas ao longo dos eixos do barramento e do rio.

Tabela 3 - Sondagens mista, rotativa, percussiva e a pá e picareta, realizadas ao longo dos eixos do barramento e do rio realizadas na barragem Olho D'Água com base no projeto executivo

Sondagem	Localidade	Tipo
SPP-1	Eixo do barramento	Pá e picareta
SPP-2	Eixo do barramento	Pá e picareta
SM-08	Eixo do barramento	Mista
SM-06	Eixo do barramento	Mista
SM-01	Eixo do barramento	Mista
SM-12	Rio Machado	Mista
SM-11	Rio Machado	Mista
SP-14	Eixo do barramento	Percussão
SP-5	Eixo do barramento	Percussão
SM-01	Eixo do barramento	Mista
SP-3	Eixo do rio	Percussão
SP-7	Eixo do rio	Percussão
SP-13	Eixo do rio	Percussão
SP-9	Eixo do barramento	Percussão
SM-04	Eixo do barramento	Mista
SPP -3	Eixo do barramento	Pá e picareta
SPP-4	Eixo do barramento	Pá e picareta
SR-10	Eixo do barramento	Rotativa
SPP-5	Eixo do barramento	Pá e picareta

Fonte: Autora

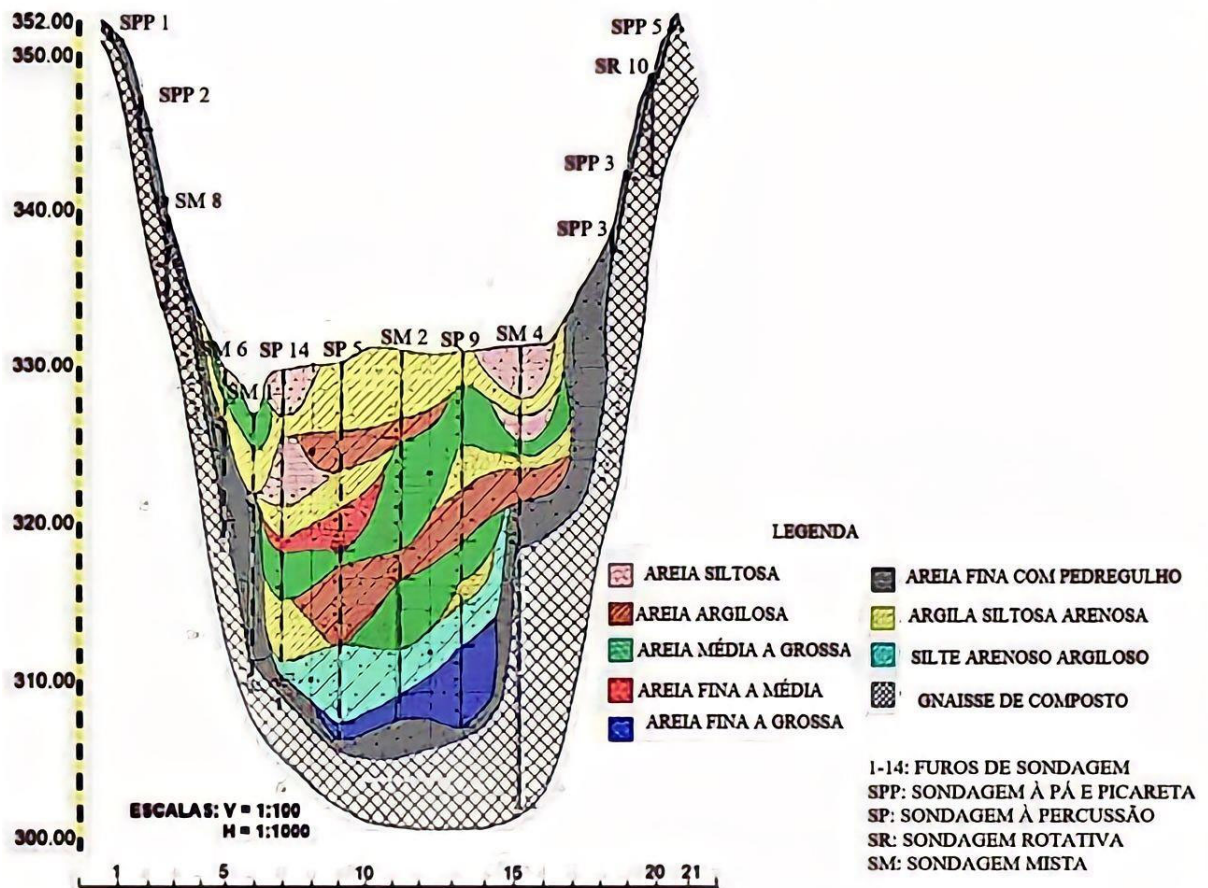
Figura 17 - Localização das sondagens



Fonte: Modificado de SHR (1988c)

Os resultados das sondagens estão resumidos no perfil estratigráfico da Figura 18. Este perfil mostra camadas de areia variando de fina a grossa (com ou sem pedregulho), além de camadas de areia siltosa a argilosa, às vezes intercaladas por camadas de argila siltosa arenosa e silte arenoso argiloso. Essas camadas formam uma espessa camada aluvial sobre gnaisse decomposto. Nas ombreiras do boqueirão, foram identificados solos residuais compostos por areia fina com pedregulho, também depositados sobre gnaisse decomposto, apresentando continuidade na área aluvial.

Figura 18 - Perfil estratificado da fundação obtido com base nos resultados das sondagens



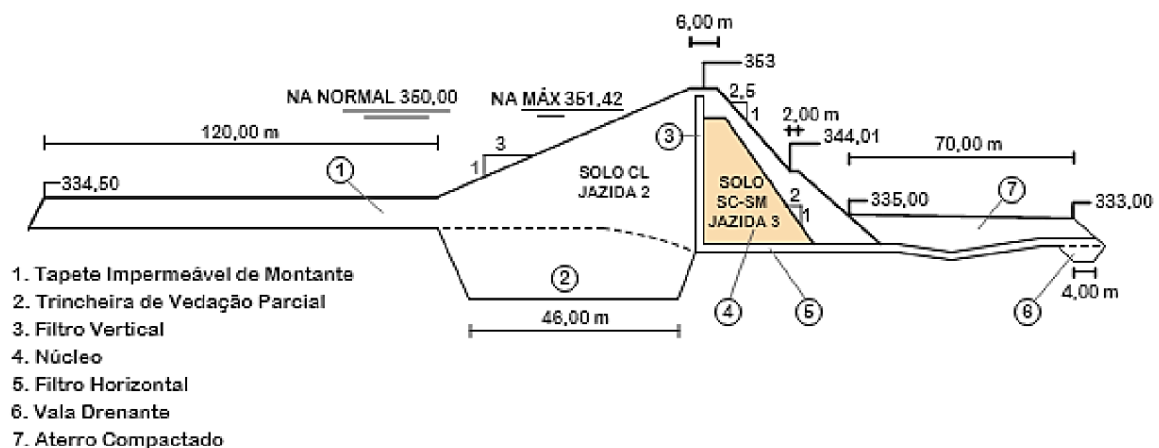
Fonte: Adaptado de SRH (1988b)

### 3.2 Projeto executivo e execução

O Projeto Executivo SRH (1988a) da barragem Olho d'Água foi desenvolvido pela empresa Aguasolos – Consultora de Engenharia Ltda, e finalizado em 1998. A obra foi executada pelo 3º Batalhão de Engenharia de Construção, iniciada em outubro de 1993 e inaugurada em 30 de julho de 1998.

A barragem, do tipo terra zonada (Figura 19), possui núcleo de solo SC-SM e abas de solo CL. O coroamento tem 6,00 m de largura na cota 353,00 m, com níveis de água normal e máximo nas cotas 350,00 m e 351,42 m, respectivamente. O talude de montante tem inclinação de 1:3,0 (V:H) e o de jusante, 1:2,5 (V:H), com uma berma de 2,00 m de largura na cota 344,00 m.

Figura 19 - Seção-tipo da barragem Olho D'Água, conforme o projeto executivo



Fonte: Modificado de Dantas Neto e Carneiro (2013, apud Araújo, 2013).

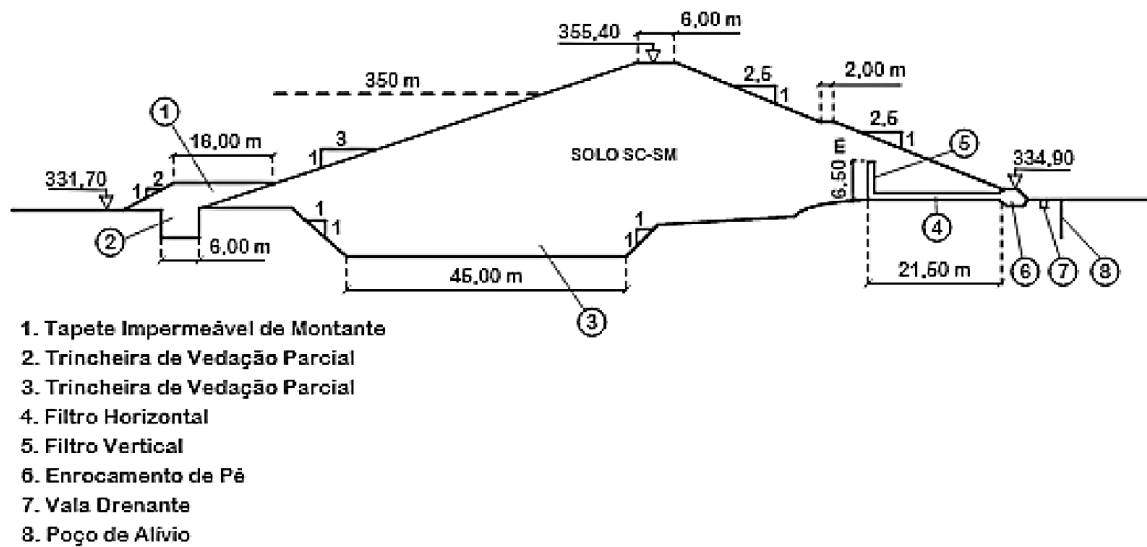
Foi projetado um sistema de drenagem interna com filtros vertical e horizontal, e uma vala drenante de 4,00 m de largura. No pé do talude de jusante, há uma banquetta de aterro compactado de 70,00 m de comprimento. A barragem possui altura máxima de 26,00 m, largura máxima da base de 310,00 m, extensão do coroamento de 381,00 m e volume de solo utilizado de 698,14 m<sup>3</sup>.

O sangradouro tipo "soleira espessa" foi dimensionado para uma vazão de 150,00 m<sup>3</sup>/s, com período de retorno de 1.000 anos. A soleira está na cota 350,00 m, com largura de 50,00 m e lâmina máxima de 1,42 m. A tomada d'água é do tipo galeria, com diâmetro de 600

mm, cotas de montante e jusante em 336,50 m e 336,16 m, respectivamente, com dois registros de gaveta a jusante e descarga regularizadora de  $1,26 \times 10^{-01} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Porém, durante a execução da barragem, houve alterações no projeto executivo que não foram registradas em um projeto *As Built*. Araújo (2013) descreveu essas alterações com base no relatório da COGERH sobre barragens instrumentadas do Ceará, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Seção-tipo modificada da barragem Olho d'Água

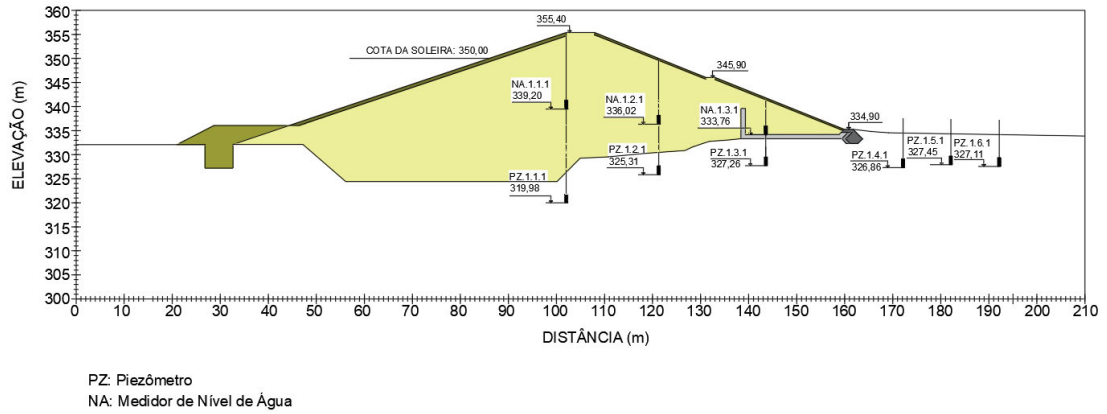


Fonte: Modificado de Dantas Neto e Carneiro (2013, apud Araújo, 2013).

A barragem foi modificada de terra zonada para homogênea, com maciço de solo SC-SM (areia-silto-argilosa). O comprimento do tapete impermeável de montante foi reduzido de 120 m para 16 m, e foi adicionada uma pequena trincheira de vedação parcial de 6 m de largura. Os filtros horizontal e vertical foram reduzidos para 21,50 m e 6,50 m, respectivamente. A vala drenante foi diminuída e a banquetta de aterro compactado à jusante foi substituída por enrocamento de pé. Após a construção, surgiram problemas de sobrepressão por artesianismo na fundação, o que levou à instalação de poços de alívio à jusante da barragem.

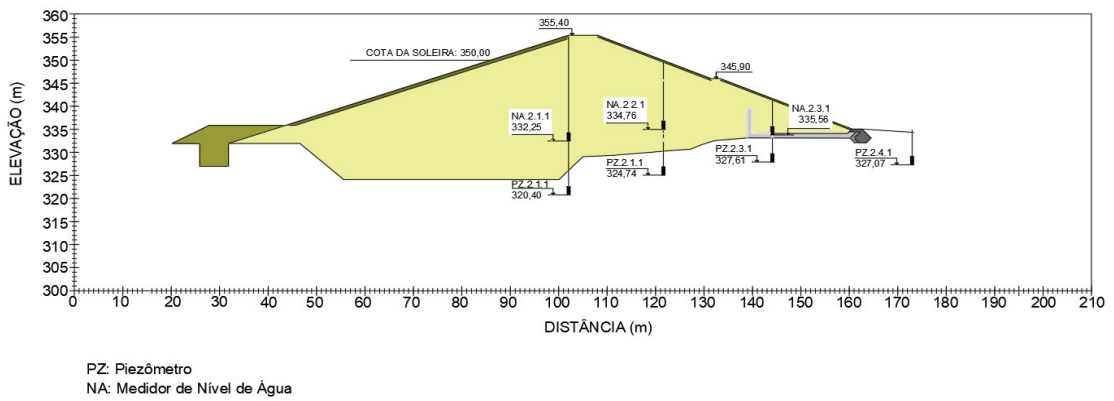
Devido às alterações realizadas, os instrumentos instalados no maciço e na fundação da barragem estão representados das Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Seção 01: seção transversal ombreira esquerda



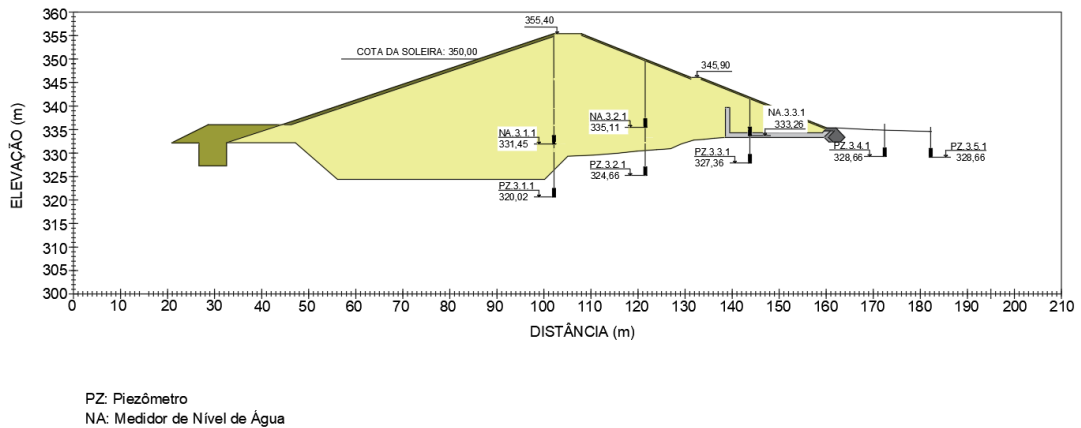
Fonte: Disponibilizada pela COGERH

Figura 22 - Seção 02: seção transversal máxima



Fonte: Disponibilizada pela COGERH

Figura 23 - Seção 03: seção transversal ombreira direita



Fonte: Disponibilizada pela COGERH

### 3.3 Histórico dos problemas e medidas corretivas

Após a inauguração em 1998, a barragem Olho d'Água apresentou problemas relacionados ao fluxo de percolação na fundação, falta de proteção no talude de jusante e falhas no sistema de drenagem. Em 2001, o Painel de Inspeção de Segurança de Barragens (PISB) da SRH detectou estruturas extrusivas de liquefação e recomendou cobrir a área com brita e areia grossa para evitar piping.

Em 2005, uma nova inspeção do PISB verificou que as medidas tomadas foram eficazes, embora tenha sido constatado um aumento na quantidade de água empoçada, recomendando-se a drenagem da área e a instalação de pesos para prevenir piping. Além disso, foi sugerida a instalação de um vertedouro triangular para monitorar o fluxo de surgência.

Em 2006, a COGERH instalou poços de alívio para mitigar a sobrepressão por artesianismo na fundação, trincheiras de drenagem, replantio da vegetação no talude de jusante, além de piezômetros e medidores de nível d'água no maciço da barragem para aumentar a segurança.

De acordo com a COGERH (2021), a barragem foi considerada uma prioridade de intervenção máxima devido a anomalias como erosão nos taludes, rip-rap destruído, fissuras no coroamento e instrumentação obstruída. Foram recomendadas várias ações corretivas, incluindo aterro e compactação dos trechos erodidos, desobstrução ou reposição da instrumentação, limpeza e recuperação do coroamento, e recobrimento do canal de restituição do vertedor com enrocamento adequado.

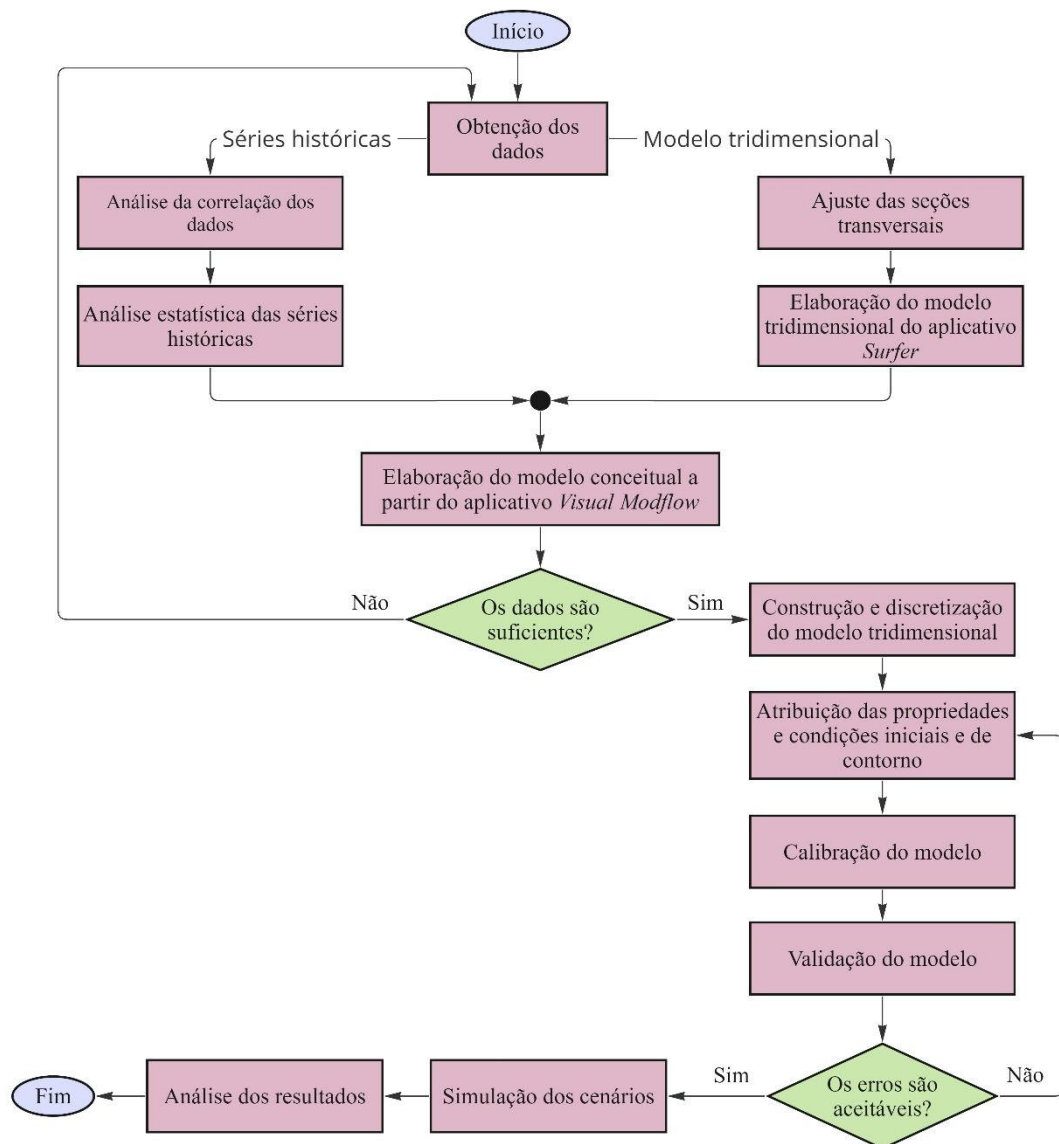
Em 2022, chuvas intensas levaram ao volume máximo do reservatório, resultando em surgência no talude de jusante. Para garantir a segurança da barragem, foi construído um dreno invertido em toda a extensão do talude.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Modelagem de fluxo no maciço e na fundação da barragem de terra

A metodologia aplicada está exposta, de maneira sucinta, na Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma da metodologia aplicada



Fonte: Autora

Inicialmente, foram coletadas informações nos projetos executivos e em estudos acadêmicos desenvolvidos por Araújo (202) e Vidal (2022), sobre as condições previstas para a execução da barragem e aquilo que de fato foi executado. Além disso, foram obtidos dados referentes às leituras das cargas hidráulicas, medidas a partir de instrumentos instalados no

maciço e na fundação da barragem, diretamente da COGERH e do Portal Hidrológico do Ceará. A escolha das séries históricas correspondentes às leituras dos instrumentos foi baseada em métodos estatísticos multivariados.

Para construção do modelo tridimensional, foram ajustadas as seções transversais do projeto executivo a partir da seção tipo fornecida pela COGERH. Com base nesse modelo, foi determinada a abordagem mais adequada para o desenvolvimento do modelo conceitual. Este foi discretizado seguindo as informações contidas nas seções tipo, nas especificações dos materiais utilizados na execução do maciço e no perfil estratificado da fundação. Ademais, foram atribuídas as condições iniciais e de contorno.

Posteriormente, foi analisada a sensibilidade do modelo a partir da variação dos parâmetros hidrogeológicos. Paralelamente, foi feita a calibração do modelo, considerando os valores que forneceram o menor erro médio absoluto entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas. Em seguida procedeu-se a validação do modelo a partir dos dados de um cenário escolhido. Após a validação, foram simulados vários cenários para verificação da eficiência dos sistemas de drenagem interno, dos poços de alívio e da eficácia do modelo em resposta às situações reais.

#### **4.1.1      *Análise estatísticas das séries históricas***

As alturas de acumulação no reservatório e as cargas hidráulicas dos medidores de nível de água e dos piezômetros, em diferentes períodos, obtidas na COGERH e no Portal Hidrológico do Ceará, foram tabuladas no *Excel* e analisadas estatisticamente com auxílio do *software RStudio*.

A priori, foram verificadas as correções entre as alturas de acumulação e as cargas hidráulicas, a partir da construção da matriz de correlação de *Pearson*, utilizando a função *cor()*.

Posteriormente, foi observado o comportamento das séries históricas correspondentes as leituras, tanto das alturas de acumulação, quanto das cargas hidráulicas, decompondo as séries históricas a partir do método de decomposição *STL* disponibilizado na função *stl()*. Neste procedimento, além de obter o gráfico da série original, são também obtidos os gráficos de tendência, de sazonalidade e de resíduos, facilitando a inferência dos padrões

subjacentes aos dados. Paralelamente, realizou-se a análise da estatística descritiva para uma melhor compreensão dos dados.

Em seguida, a partir do procedimento de análise de dados perdidos, apresentado no tópico 2.5.1, foram selecionados os dias com ausência de dados em cada instrumento e posteriormente realizado o método de preenchimento de falhas a partir do método de calcular valor por substituição da média. Consecutivamente, foram detectados os *outliers* com a aplicação do método MVE, a partir do uso da função *cov.mve()*, considerando a correlação entre as alturas de acumulação e as cargas hidráulicas.

As leituras dos dias correspondentes aos pontos identificados como *outliers* foram removidos, garantindo obter o mesmo número de dados para as leituras diárias para todos os instrumentos. Vale ressaltar que, após essa alteração nas séries históricas, foi realizada, novamente, a decomposição da série e a obtenção da estatística descritiva para comparar com a situação inicial e verificar se a exclusão dos outliers influencia significativamente o comportamento geral dos dados.

#### **4.1.2 Construção do modelo tridimensional**

O procedimento para a construção do modelo tridimensional, a partir das informações do projeto executivo, foi realizado em duas etapas distintas, utilizando *softwares* específicos.

Na primeira etapa utilizou-se o *AutoCAD* 2022, no qual as seções transversais do projeto foram referenciadas. Posteriormente, fez-se a sobreposição dessas seções com a seção tipo fornecida pela COGERH, realizando os ajustes necessários para garantir a conformidade com a barragem executada.

A segunda etapa envolveu a coleta de pontos georreferenciados considerando coordenadas tridimensionais que descreviam as seções para tomar como base para a construção do modelo tridimensional. Esses pontos foram então importados para o *software Surfer* versão 23, no qual foi elaborada a superfície de topo do modelo tridimensional, a partir de georreferenciamento e *krigagem*. Para construção da base, foram obtidas as cotas necessárias a partir do perfil estratificado da fundação, considerando o limite rochoso. Por fim, foi analisada

as seções transversais, compreendendo geometria do maciço e a constituição da fundação, para a construção do modelo conceitual no *software Visual MODFLOW* versão 2011.1.

#### 4.1.3 *Construção do modelo conceitual, discretização, condições de contorno e propriedades hidrogeológicas iniciais*

No *Visual MODFLOW*, a malha do domínio do modelo conceitual foi discretizado e refinada com base nas informações da seção tipo do maciço e do perfil estratificado da fundação. A partir desse refinamento obteve-se uma representação mais precisa de certos elementos do domínio, como o sistema de drenagem interno, os poços de alívio, o enrocamento de pé e o *rip-rap*. Além disso, foi feito o refinamento detalhado do perfil estratificado para que fossem representados cada camada de solo que compõe a fundação.

Foram atribuídas condições de contorno ao modelo: a jusante, adotou-se carga constante com cota no leito do rio, representando as surgências; a montante, atribuiu-se carga constante com cota equivalente ao nível da água acumulada no reservatório; no interior do maciço e na fundação à jusante, adotou-se a condição dreno, para representar, respectivamente, o sistema de drenagem interno e os poços de alívio.

Com base na literatura foram atribuídos valores iniciais das propriedades hidrogeológicas  $k$  (Knoedel *et al.* (1998)),  $S_s$  (Barbosa Junior (2007) e Germain *et al.* (2020)) e  $S_y$  (Barbosa Junior (2007)). Inicialmente, as camadas foram consideradas isotrópicas ( $k_x = k_y = k_z = k$ ). Os valores estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades hidrogeológicas  $k$ ,  $S_s$  e  $S_y$  utilizadas como condição inicial

Local	$k$ [m/s]	$S_s$ [m/s]	$S_y$ [-]
Maciço/areia-silto-argilosa	$10^{-04}$	0.0025	0.03
Areia siltosa	$10^{-03}$	0.0025	0.25
Areia argilosa	$10^{-04}$	0.0025	0.25
Areia média a grossa	$10^{-05}$	0.0025	0.25
Areia fina a média	$10^{-04}$	0.0025	0.25
Areia de fina a grossa	$10^{-03}$	0.0025	0.25
Areia fina com pedregulho	$10^{-07}$	0.0025	0.16
Argila silto arenosa	$10^{-06}$	0.0025	0.25
Silte arenosa argiloso	$10^{-07}$	0.0025	0.03
Areia	$10^{-02}$	0.0025	0.25
Brita/ rip-rap	$10^{-03}$	0.0025	0.22

Brita/enrocamento de pé	$10^{-02}$	0.0025	0.22
-------------------------	------------	--------	------

Fonte: Autora

#### 4.1.4 *Calibração do modelo*

A calibração do modelo foi realizada concomitantemente à análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade foi feita variando as propriedades hidrogeológicas de cada camada que compõe o modelo conceitual, avaliando estatisticamente as cargas hidráulicas calculadas e observadas, a partir de sucessivas simulações. Esse procedimento teve início nas camadas da fundação. As propriedades que apresentavam melhores valores na avaliação estatística eram fixadas e a análise passava para outras camadas, com isso procedeu-se também a calibração do modelo.

A análise de sensibilidade seguiu as seguintes etapas:

- Etapa 01: variação de  $k$ , considerando o meio isotrópico e o regime estacionário;
- Etapa 02: variação de  $k$ , considerando o meio anisotrópico e o regime estacionário;
- Etapa 03: variação da condutância do sistema de drenagem interna e dos poços de alívio, considerando o regime estacionário;
- Etapa 04: variação de  $S_s$ , considerando o regime transiente;
- Etapa 05: variação de  $S_y$ , considerando o regime transiente.

A avaliação estatística das cargas hidráulicas calculadas e observadas, realizada em cada etapa da análise de sensibilidade foi feita a partir dos seguintes parâmetros: Erro Médio (EM), Erro Médio Quadrático (EMQ), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Eficiência de *Nash-Sutcliffe* (ENS), Erro Absoluto Médio (MAE), Porcentagem de Viés (PBIAS) e Coeficiente de Inclinação da Reta de Correlação (Coef. RC).

A sequência das camadas utilizadas na análise de sensibilidade, juntamente com os instrumentos utilizados nas leituras das cargas hidráulicas, está exposta na Tabela 5. Inicialmente apenas os instrumentos que registravam as cargas hidráulicas da camada avaliada foram ativados. Ao passo que uma nova camada era avaliada seus instrumentos eram ativados e os das demais camadas, cujas propriedades foram fixadas, eram mantidos ativos.

Tabela 5 - Sequência das camadas analisadas e dos instrumentos utilizados nas leituras das cargas hidráulicas

Sequência	Camada	Material	Localização	Instrumentos
1	7	Areia fina com pedregulho	Fundação	PZ111
2	3	Areia argilosa	Fundação	PZ211
3	4	Areia média a grossa	Fundação	PZ311
				PZ321
				PZ231
				PZ241
4	8	Argila silto arenosa	Fundação	PZ151
				PZ161
				PZ221
				PZ331
				PZ341
5	2	Areia siltosa	Fundação	PZ351
				PZ121
				PZ131
6	5	Areia fina a média	Fundação	PZ141
7	6	Areia de fina a grossa	Fundação	-
8	12	Brita	Enrocamento de pé	-
9	9	Silte arenosa argiloso	Fundação	-
10	1	Areia-silto-argilosa	Maciço	NA111
				NA121
				NA131
				NA211
				NA221
				NA231
11	11	Brita	Rip-rap	NA311
				NA321
				NA331

Fonte: Autora

#### 4.1.5 Validação do modelo

A validação do modelo foi feita a partir de simulações considerando condições de carregamento do reservatório diferentes das adotadas na calibração. O modelo foi validado quando todos os parâmetros  $R^2$  e  $ENS$  estivessem na faixa de aceitação estabelecida por Masood *et al.* (2023).

#### **4.1.6      *Simulações de cenários***

Para obter os fluxos de percolação de água no maciço e na fundação da barragem em diferentes cenários, realizou-se simulações considerando o fluxo transiente. Essas simulações permitiram determinar a superfície freática, as velocidades de fluxo e as vazões de percolação no maciço e a fundação sob diferentes condições de carregamento do reservatório. Com esses dados, foram avaliados o sistema de drenagem interno e os poços de alívio, onde realizou-se o comparativo com os resultados da simulação estacionária bidimensional realizada por Araújo (2013) e Vidal (2022).

Também foram realizadas simulações considerando o mês de junho de 2022, considerando a situação mais crítica da barragem Olho D'Água, devido a surgências no talude de jusante, que levou na necessidade da construção de um dreno invertido como obra corretiva.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análise estatística das séries históricas de altura de acumulação e cargas hidráulicas dos instrumentos

#### 5.1.1 Correlação

Considerando a correlação de Pearson entre a altura de acumulação e as cargas hidráulicas mensuradas nos instrumentos, têm-se os coeficientes de correlação expostos na Tabela 6, referentes aos dados exposto no anexo A.

Tabela 6 - Resultado da análise de correlação de Pearson

<b>Instrumento</b>	<b><i>r</i></b>
NA111	0,98
PZ111	0,95
NA121	0,69
PZ121	0,69
NA131	-0,61
PZ131	0,35
PZ141	0,88
PZ151	0,73
PZ161	0,63
NA211	0,99
PZ211	0,84
NA221	0,76
PZ221	0,88
NA231	0,56
PZ231	0,65
PZ241	0,62
NA311	0,95
PZ311	0,97
NA321	0,89
PZ321	0,80
NA331	0,04
PZ331	0,89
PZ341	0,84
PZ351	0,38

Fonte: Fonte: Autora

Conforme mostra a Tabela 6 e segundo Schober *et al* (2018), há 5 instrumentos (NA111, PZ111, NA211, NA311, PZ311) que possuem correlação positiva muito forte com a altura de acumulação, 9 instrumentos (PZ141, PZ151, PZ211, NA221, PZ221, NA321, PZ321, PZ331, PZ341) apresentam correlação positiva forte, 6 instrumentos (NA121, PZ121, PZ161, NA231, PZ231, PZ241) possuem correlação positiva moderada, 2 instrumentos (PZ131 e PZ351) possuem correlação positiva fraca, 1 instrumento (NA331) possui correlação positiva muito fraca e 1 instrumento (NA131) possui correlação negativa moderada.

Há diversos fatores que podem interferir na precisão das leituras dos piezômetros e dos medidores de nível de água, como as ações humanas (erros humanos durante a coleta dos dados e negligência da manutenção) e as condições internas da barragem (estado de compactação do maciço, condições de saturação e eficiência/não eficiência do sistema de drenagem interno). De maneira geral, essas situações podem causar *outliers* nos dados que infere diretamente na correlação das cargas hidráulicas mensuradas com a altura de acumulação.

Além disso, diferentes localizações podem responder de maneira diferente à variação da altura de acumulação. Por exemplo, instrumentos localizados ou mais próximos do espaldar de montante (NA111, PZ111, NA211, PZ211, NA311, PZ311), conforme exposto nas figuras 21, 22 e 23; apresentaram correlação mais forte com relação aos mais distantes, como o PZ351.

Outro fator que também interfere nesta correlação é a proximidade entre os instrumentos e o sistema de drenagem interna, como é o caso dos medidores NA131 e NA331, instalados nas proximidades do filtro horizontal (Figuras 21 e 23). O sistema de drenagem interna reduz o nível de água medido no instrumento, interferindo na correlação com a altura de acumulação, como o instrumento NA131, que apresentou correlação negativa, e o NA331, correlação muito fraca. Estes instrumentos também apresentaram resposta tardia às variações da altura de acumulação, neste caso, este comportamento também pode estar associado a maior distância dos mesmos em relação ao espaldar de montante e a proximidade das ombreiras. Porém, esse comportamento também pode sinalizar falha no equipamento necessitando de monitoramento e/ou substituição.

## 5.1.2 Análise do comportamento dos dados brutos

### 5.1.2.1 Estatística descritiva

Em geral, as cargas hidráulicas possuem variabilidade baixa (Tabela 7), pois segundo Gomes (1985) e Al-Marshadi *et al.* (2021) apresentaram  $CV < 10\%$ . Além disso, ao ser analisado o desvio padrão conforme Witte e Witte (2020), as leituras possuem desvio relativamente baixo da média. Contudo, os instrumentos NA111 e NA131 exibem valores relativamente altos. Considerando que estes instrumentos estão instalados diretamente no maciço, caso não haja falha durante a leitura (o que poderia indicar a presença de *outliers*), os dados podem sugerir instabilidade na estrutura e/ou problemas no instrumento.

Tabela 7 - Parâmetros da estatística descritiva

<b>Instrumentos</b>	<b>Média (m)</b>	<b>Mínimo (m)</b>	<b>Máximo (m)</b>	<b>Desvio Padrão (m)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Mediana (m)</b>
NA111	10,05	9,09	11,10	0,72	7,19	10,01
PZ111	29,04	28,10	30,16	0,68	2,34	28,96
NA121	5,73	5,17	6,07	0,24	4,19	5,79
PZ121	15,49	14,96	15,85	0,23	1,51	15,50
NA131	2,71	2,41	3,05	0,17	6,14	2,66
PZ131	8,49	8,31	9,08	0,13	1,57	8,50
PZ141	7,71	7,54	7,93	0,12	1,54	7,67
PZ151	7,21	7,10	7,32	0,06	0,87	7,22
PZ161	7,41	7,32	7,54	0,05	0,64	7,42
NA211	17,15	16,05	18,36	0,81	4,70	17,08
PZ211	21,57	20,50	22,39	0,54	2,52	21,67
NA221	11,10	10,59	11,67	0,37	3,36	11,03
PZ221	15,24	14,76	15,79	0,33	2,13	15,27
NA231	1,75	1,60	1,97	0,09	5,36	1,76
PZ231	8,17	7,99	8,27	0,07	0,81	8,16
PZ241	7,66	7,54	7,77	0,05	0,71	7,67
NA311	18,96	17,92	20,41	0,85	4,47	18,76
PZ311	21,54	21,13	22,09	0,32	1,48	21,48
NA321	11,08	10,40	11,82	0,50	4,53	11,01
PZ321	11,34	11,07	11,93	0,20	1,79	11,27
NA331	4,46	4,08	4,84	0,22	4,86	4,46
PZ331	8,00	7,88	8,15	0,08	0,99	8,00
PZ341	5,16	5,07	5,31	0,06	1,12	5,15
PZ351	5,56	5,41	5,94	0,10	1,74	5,55

Fonte: Autora

Por outro lado, os instrumentos PZ151, PZ161, PZ231 e PZ331 demonstram um coeficiente de variação inferior a 1% que, segundo Ortiz-Cañavate (2003), indica distribuição simétrica dos dados e variabilidade muito baixa. Essa situação pode estar relacionada à sua localização, pois são piezômetros com tomadas de pressão situadas na fundação, abaixo do espaldar de jusante, conforme as Figuras 21, 22 e 23. Nesta área, as cargas hidráulicas tendem a ser mais estáveis, sem variações significativas, resultando em medições consistentes ao longo do tempo.

Ademais, os valores da média e mediana são próximos não há distorção entre os dados como indica Witte e Witte (2020), resultando em uma distribuição simétrica dos dados, o que pode contribuir para poucos pontos classificados como *outliers*.

#### 5.1.2.2 *Decomposição das séries históricas de cargas hidráulicas*

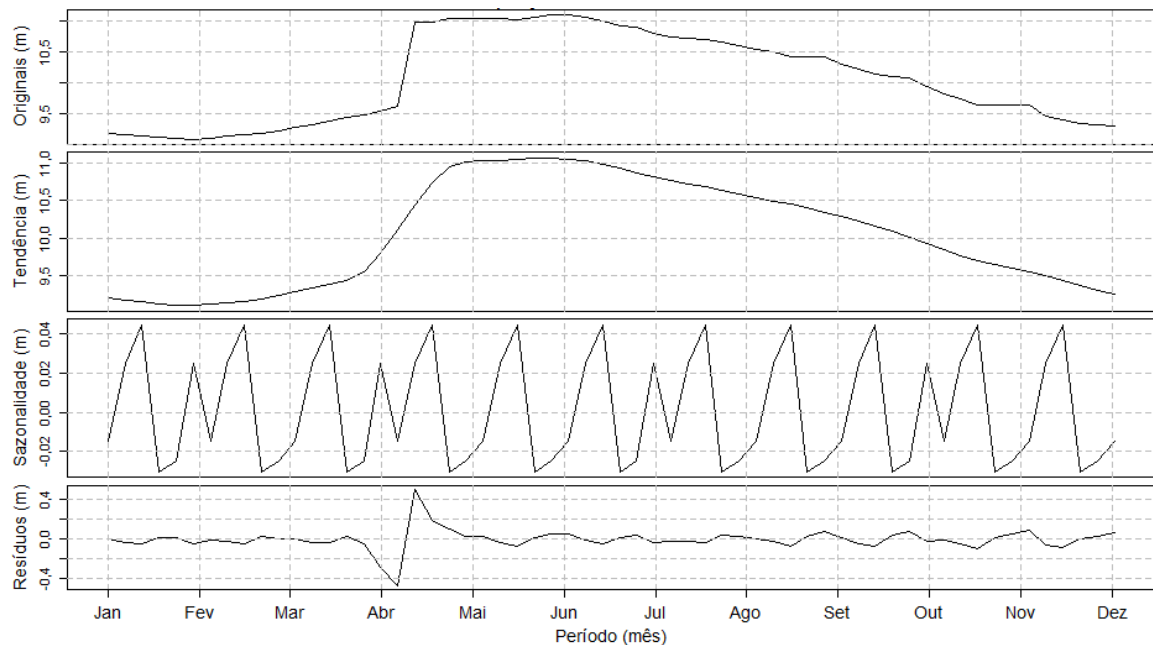
No município de Várzea Alegre, o período mais chuvoso corresponde aos meses de janeiro a abril, época em que o acúmulo de água em reservatórios é mais significativo. Devido à natureza parcialmente permeável das barragens de terra, a água acumulada percola gradualmente através dos poros do material do maciço. Este processo transiente leva a saturação parcial do maciço, resultando no aumento da carga hidráulica. Conforme a estação chuvosa passa, espera-se uma diminuição na carga hidráulica, assumindo que o sistema de drenagem da barragem esteja funcionando corretamente e direcionando o fluxo interno de forma eficaz. Contudo, se o sistema de drenagem não estiver operando adequadamente, pode-se enfrentar problemas de surgências no talude de jusante, podendo indicar um risco potencial à integridade da barragem. Essa situação pode ser observada nos gráficos de tendência, de sazonalidade e de resíduos, componentes fundamentais que ajudam a entender o comportamento dos dados ao longo do tempo.

Para as leituras dos níveis de água na barragem, o gráfico de tendência mostrará um aumento gradual, tendo seu pico entre os meses de abril e junho, quando a água terá percolado no maciço depois de apresentar o período com maior acúmulo de água no reservatório. No gráfico da sazonalidade, onde podem ser observados os padrões e/ou ciclos, mostra picos durante os meses chuvosos (janeiro a abril) todos os anos. Isso demonstra o período em que a barragem experimenta maior acúmulo de água e, conseqüentemente, maior carga hidráulica devido à percolação através do maciço. Por fim, com o gráfico de resíduos, é possível observar

variações dos dados não previstos pela tendência e pela sazonalidade. No caso específico dos medidores de nível de água, os resíduos podem mostrar flutuações inesperadas na carga hidráulica ou no nível da água que não se alinham com a tendência geral ou padrões sazonais. Essa situação pode ser decorrente de eventos extremos, como chuvas torrenciais não típicas da estação, ou problemas no sistema de drenagem, como obstruções ou falhas que impedem a drenagem adequada da água, levando a surgências no talude de jusante.

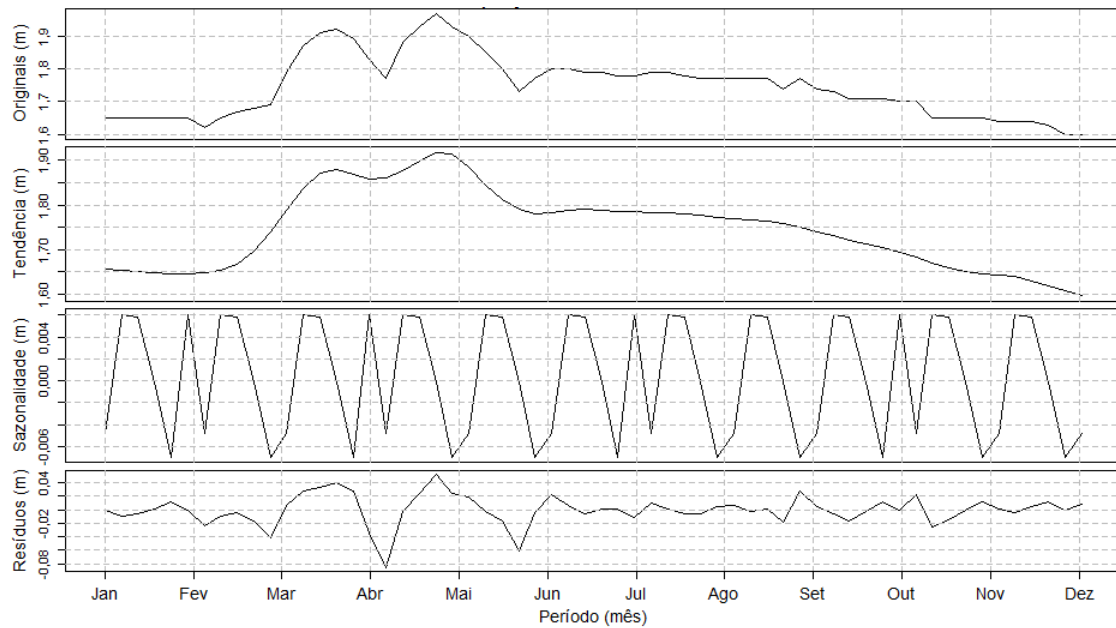
O comportamento descrito anteriormente, pode ser observado na decomposição da série temporal das cargas hidráulica dos medidores de nível de água NA111 (Figura 25), NA121, NA211, NA221, NA311 e NA321 (Apêndice A). Embora com pequenas oscilações entre os meses de março e junho, também é possível observar as variações sazonais na decomposição da série temporal das leituras do NA231 (Figura 26). No gráfico de sazonalidade pode ser observado que o NA111 possui variação de -0,02 a 0,04 m e o NA231 varia entre -0,006 e 0,004 m. Já em relação aos resíduos há variação de -0,4 a 0,4m e -0,40 a 0,40m para NA111 e -0,08 a 0,04 m NA231, respectivamente. Essa situação reflete a regularidade dos dados ao longo do tempo.

Figura 25 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA111



Fonte: Autora

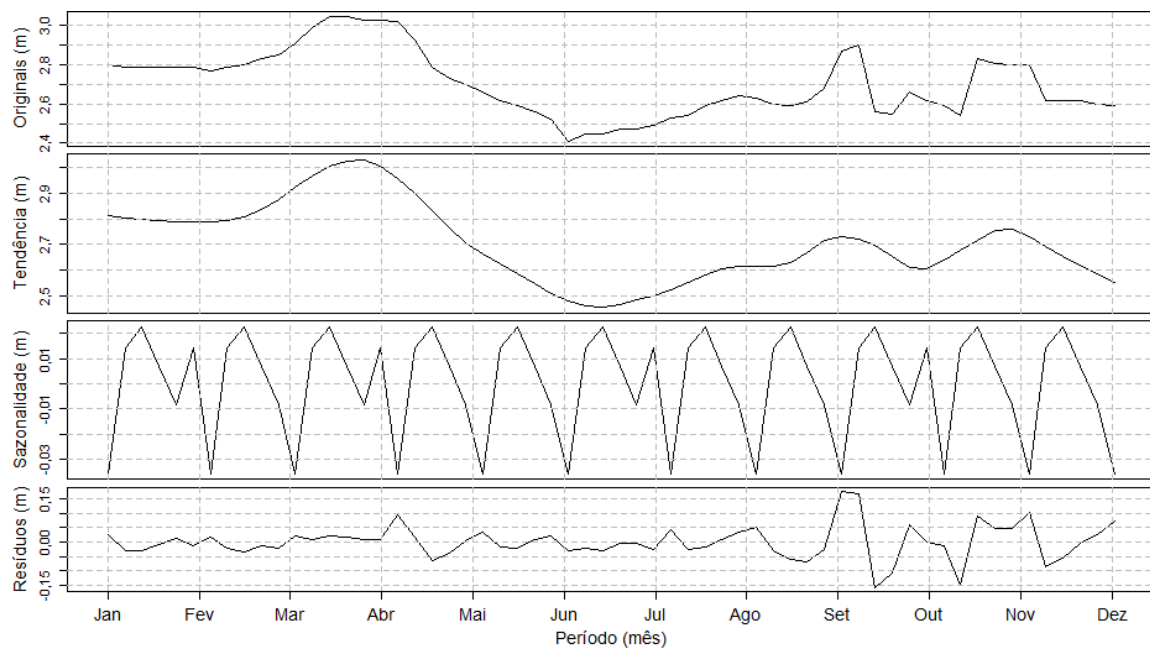
Figura 26 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA231



Fonte: Autora

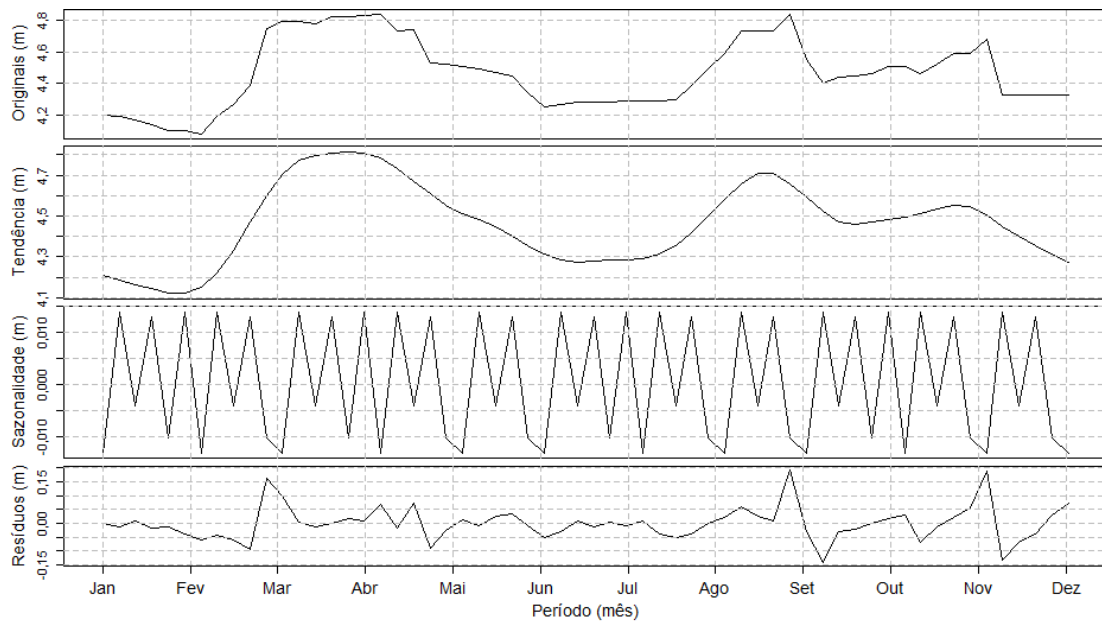
Já as decomposições das séries referentes às leituras dos instrumentos NA131 (Figura 27) e NA331 (Figura 28) mostram comportamento divergente daquele esperado (Crescimento gradual, com pico entre os meses de abril e junho), onde apresentaram pico entre os meses de fevereiro e junho e oscilações entre junho e dezembro.

Figura 27 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA131



Fonte: Autora

Figura 28 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA331

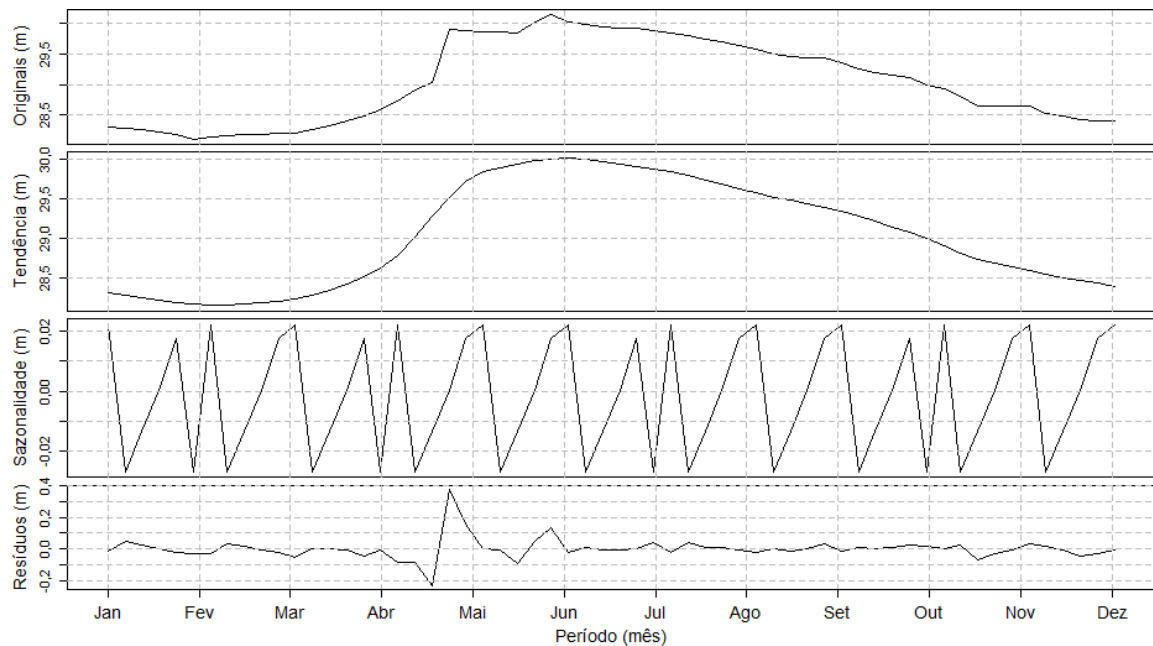


Fonte: Autora

Ainda nas Figuras 27 e 28, pode ser observado que a sazonalidade tem intervalo de variação menor (-0,03 a 0,01m para o NA131 e -0,010 a 0,01m para o NA331) os resíduos de ambos os gráficos variam com maior amplitude (-0,15 a 0,15 m). Essa situação, que há amplitude maior nos resíduos sugere que, embora possa ser previsto os padrões sazonais, há incertezas significativas associadas às leituras da carga hidráulica, que pode ou não ser identificadas como *outliers*.

Nas decomposições das séries temporais referentes às leituras dos piezômetros instalados na fundação, embora tenha o comportamento esperado (Crescimento gradual, com pico entre os meses de abril e junho), é possível observar pequenas oscilações, como em PZ111 (Figura 29), PZ121, PZ141, PZ151, PZ161, PZ221, PZ231, PZ241, PZ311, PZ321, PZ331 e PZ341 (Apêndice A). Apesar disso, nota-se que tanto a sazonalidade, quanto os resíduos apresentam intervalos de variação relativamente pequenos, sendo de -0,02 a 0,02m para a sazonalidade e de -0,2 a 0,04m para os resíduos.

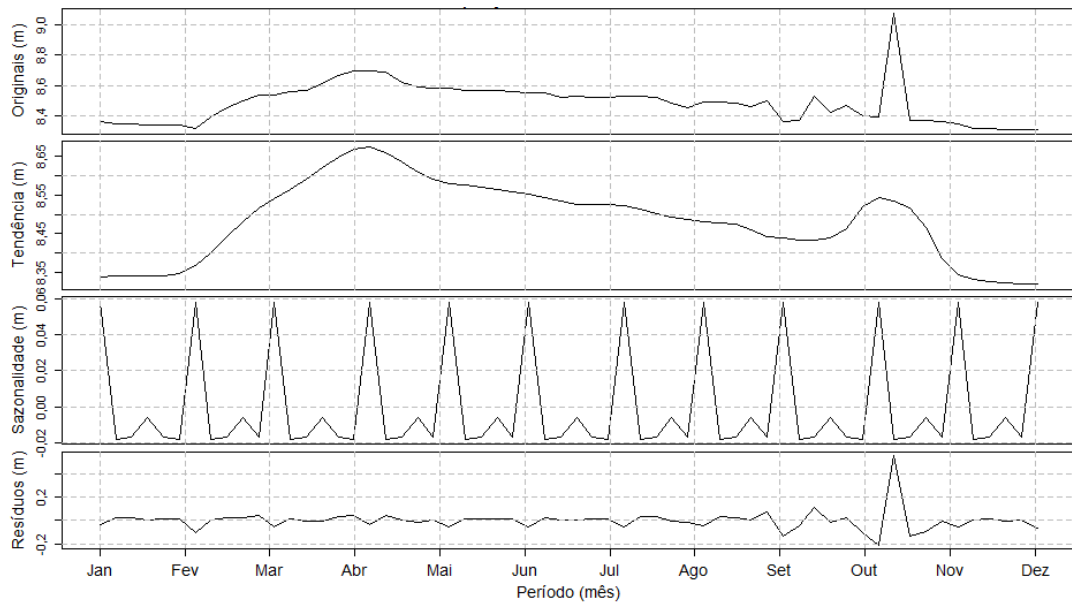
Figura 29 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ111



Fonte: Autora

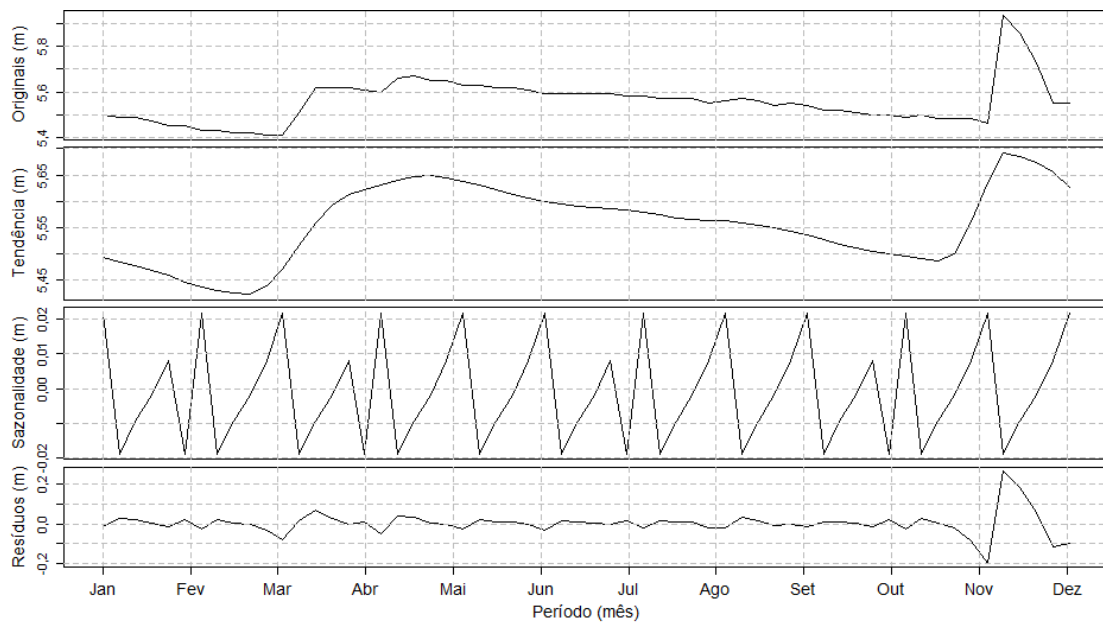
Porém, há instrumentos como o PZ131 (Figura 30) e o PZ351 (Figura 31) que embora a tendência tivesse o comportamento esperado (Crescimento gradual, com pico entre os meses de abril e junho) há um pico entre os meses de outubro e novembro para o PZ131 e entre novembro e dezembro para o PZ351. Ao analisar a série histórica, percebe-se que os picos observados podem ser resultado de medições isoladas. Essa conclusão é reforçada pelo fato de que tanto a sazonalidade, quanto os resíduos mostraram variações relativamente pequenas, especialmente quando comparados com os dados de outros instrumentos. Para o PZ131, a variação foi de -0,02 a 0,04 metros para a sazonalidade e de -0,2 a 0,2 metros para os resíduos. Já para o PZ351, as variações foram de -0,02 a 0,02 metros para a sazonalidade e de -0,2 a 0,2 metros para os resíduos

Figura 30 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ131



Fonte: Autora

Figura 31 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ351

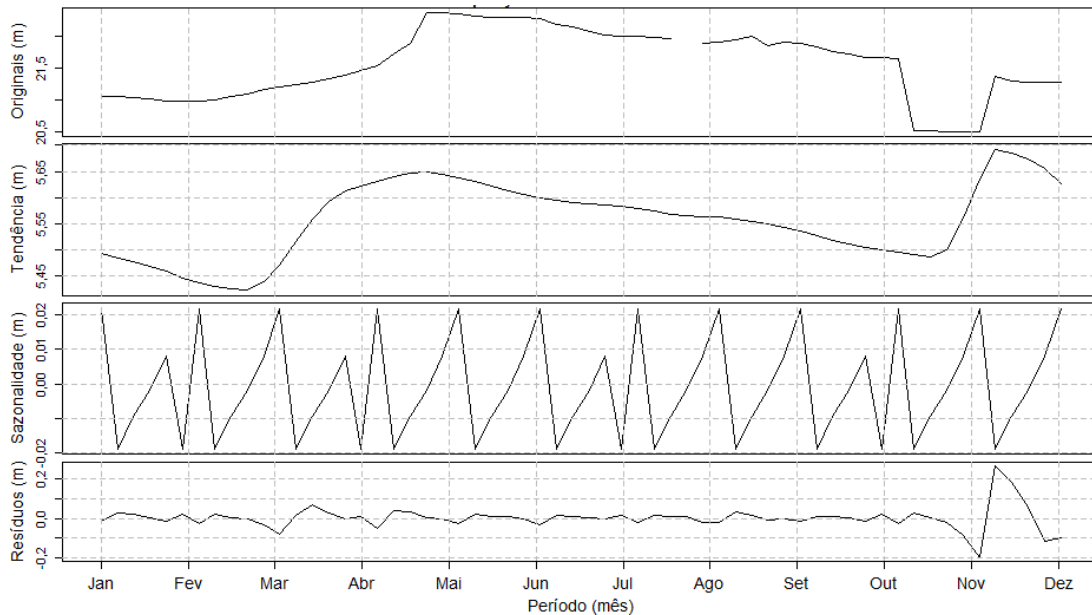


Fonte: Autora

Na análise da série temporal do instrumento PZ211, é possível observar a ausência de um dado no final de julho, além de uma diminuição nas cargas hidráulicas em outubro e no início de dezembro. Contudo, esses eventos não alteraram a tendência geral dos dados nem afetaram o padrão esperado tanto para a sazonalidade quanto para os resíduos (Figura 32), onde

os intervalos de variação foi de -0,03 a 0,03m e -0,6 a 0,3m para a sazonalidade e os resíduos, respectivamente.

Figura 32 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ211



Fonte: Autora

### 5.1.3 Análise dos dados perdidos

Na série temporal correspondente as leituras do instrumento PZ211 possui um dado faltante referente a coleta de dados realizadas no dia 13/08/2009. Essa situação caracteriza-se como um MCAR (*Missing Completely at Random*), pois dado faltante corresponder a um único dado pontual devido, possivelmente, a falha/erro no registro da medição; o que torna viável a substituição pela média.

Diante disso, foi realizada a substituição a partir da média das leituras adjacentes ao dado faltante. Após, foi verificado se a substituição alterou significativamente a estrutura da série histórica e, conforme mostra a Tabela 8 os parâmetros analisados (média, desvio padrão e CV) apresentaram valores próximo aos da série histórica original.

Tabela 8 - Verificação interferência do preenchimento dos dados faltantes

Série	Média (m)	Desvio Padrão (m)	CV (%)
Original	21.567	0.543	2.517
Após a substituição	21.574	0.540	2.505

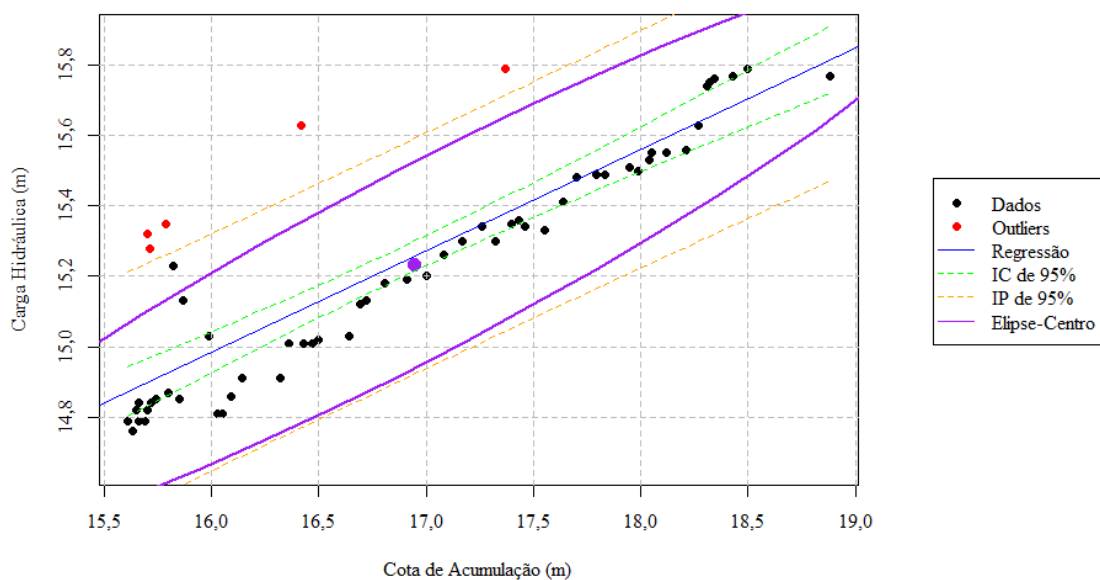
Fonte: Autora

### 5.1.4 Detecção de outliers

O MVE busca a menor elipse que englobe 95% dos dados, considerando o espaço multidimensional formado pela altura de acumulação e as cargas hidráulicas de cada instrumento. Os pontos que fora da elipse são considerados *outliers*. Porém, em séries históricas é comum que haja as discrepâncias significativas e a variabilidade natural dos dados. Essa variabilidade reflete mudanças no comportamento ao longo do tempo, que podem ser desencadeadas por eventos específicos (Hamilton, 1994). Por exemplo, uma chuva de grande intensidade pode aumentar o fluxo de percolação, resultando em leituras mais elevadas. Para Hamilton (1994) essa situação deve ser devendo ser considerada na hora da modelagem com dados de séries históricas.

Com isso, os intervalos de confiança e de predição, ajustados em 95%, ajudam a verificar o que é considerado "normal" para os dados analisados, permitindo uma detecção mais precisa de pontos que verdadeiramente se desviam do padrão. Assim, alguns pontos que estão fora da elipse MVE, mas ainda dentro do intervalo de predição de 95%, não são classificados como *outliers* (Figura 33). As demais figuras que mostram a identificação dos *outliers* de cada instrumento estão no Apêndice B.

Figura 33 - *Outliers* identificados do instrumento PZ221

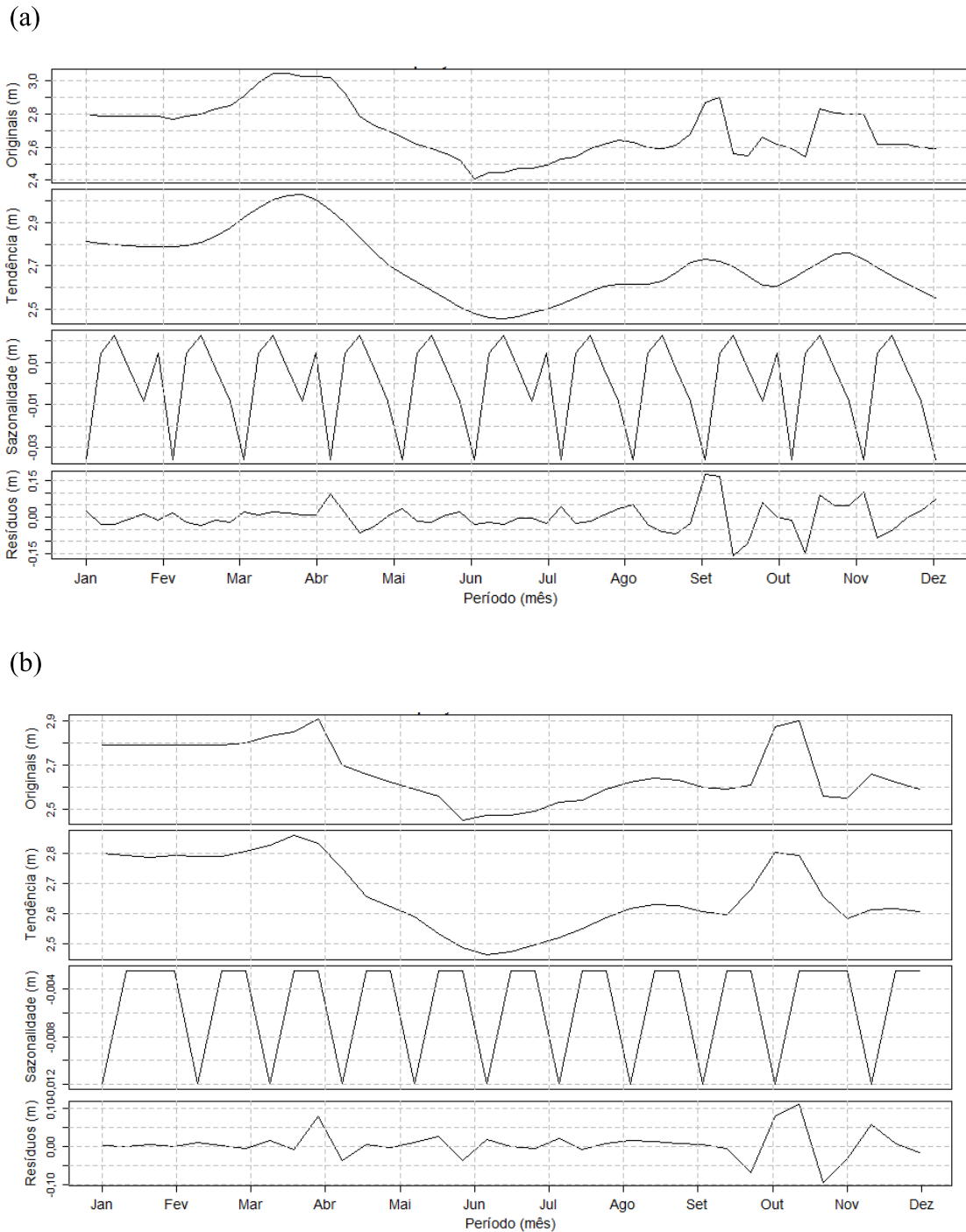


Fonte: Autora

Após a detecção e exclusão dos pontos considerados como *outliers*, foi realizada novamente a decomposição das séries para análise do comportamento das variações sazonais,

principalmente dos instrumentos que apresentaram comportamentos diferentes daqueles esperados, com tendência suavizada, como no NA131 (Figura 34).

Figura 34 - Decomposição da série temporal das cargas hidráulicas do instrumento NA131 antes (a) e depois (b) da exclusão dos *outliers*



Fonte: Autora

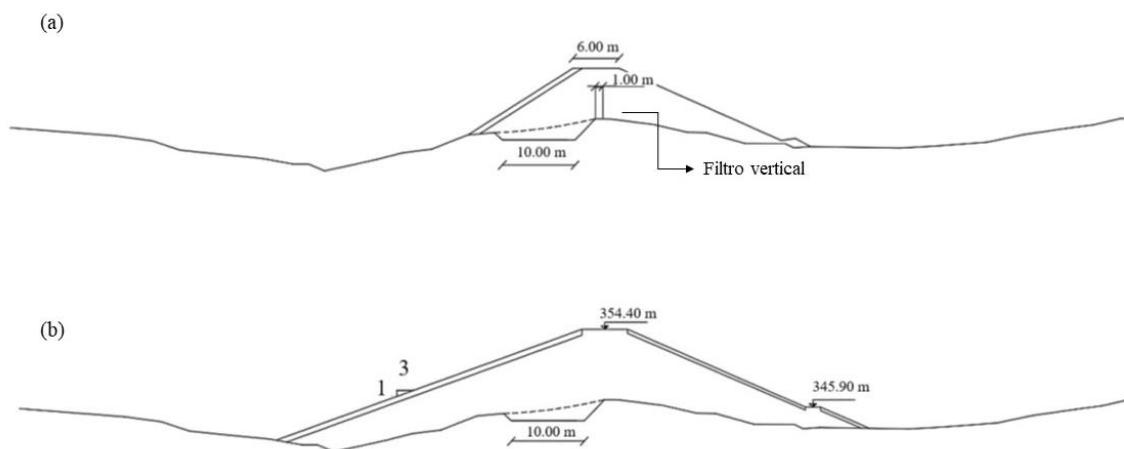
Na Figura 34, é notório que a exclusão dos *outliers* resultou a uma redução na variação dos dados. Especificamente, a amplitude da sazonalidade foi ajustada de  $-0,03$  a  $0,02$

metros para -0,012 a -0,04 metros, e a variação dos resíduos diminuiu de -0,15 a 0,051 metros para -0,10 a 0,01 metros. Além disso, observa-se que, após essa exclusão, o gráfico representando os dados originais passou a alinhar-se mais estreitamente com o gráfico da tendência.

## 5.2 Construção geométrica espacial do domínio do modelo de fluxo

As seções transversais do projeto executivo foram ajustadas com base nas seções transversais instrumentadas fornecidas pela COGERH (Figuras 21, 2 e 23). A Figura 35a mostra a seção 02 conforme consta no projeto executivo e a Figura 35b mostra a seção após os ajustes. Os ajustes realizados nas demais seções estão expostos no Apêndice C.

Figura 35 - Ajustes da seção 02: seção 02 conforme o projeto executivo (a) e seção amostrada (b)

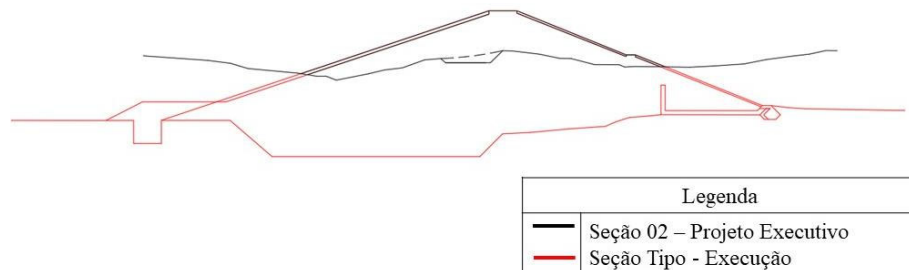


Fonte: Autora

A redução das medidas dos filtros na construção da barragem (filtro vertical de 29,0 m para 6,50 m e o filtro horizontal de 120,0 m para 21,50 m) teve um impacto significativo na viabilidade de implementar o sistema de drenagem interna. Por exemplo, na Seção 02 (Figura 35), observa-se a ausência do filtro vertical. Essa ausência decorre do fato de que, com as dimensões reduzidas, a cota do topo do filtro fica abaixo da cota da camada rochosa (gnaisse decompostos). Essa situação é melhor visualizada na Figura 36, onde mostra a sobreposição da seção 02 com a seção tipo (na qual é possível ver a nova localização do sistema de drenagem

interno). Nesse caso a cota do topo do filtro horizontal encontra-se em 339,32 m, enquanto a cota da camada rochosa encontra-se em 343,36 m.

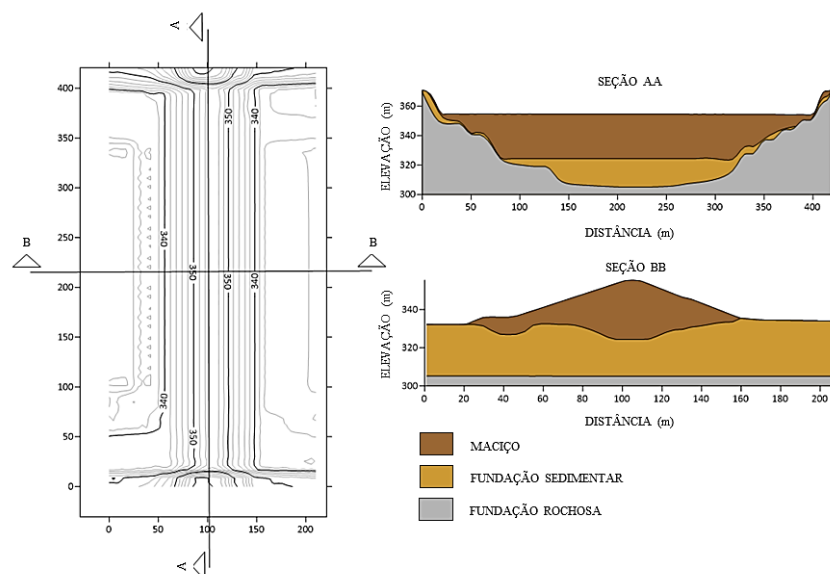
Figura 36 - Sobreposição da seção 02 ajustada e da seção tipo



Fonte: Autora

No software *Surfer*, foram importados 1.724 pontos que representam as seções no domínio tridimensional. A partir desses pontos, criou-se as superfícies de topo (que representa a parte superior do maciço), da fundação (localizada abaixo do maciço) e da base (que define a parte inferior do modelo), considerando as cotas em relação ao nível do mar. Através do método de interpolação padrão (*krigagem*), no *Surfer*, foram gerados 5.100 pontos adicionais para definir cada uma das superfícies. Sobrepondo estas superfícies, é possível visualizar a estrutura do maciço e da fundação, que são compostos por materiais sedimentares e rochosos, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Superfície de topo da Barragem Olho D'Água obtida por *krigagem* e seções longitudinal e transversal com apresentação do maciço e da fundação



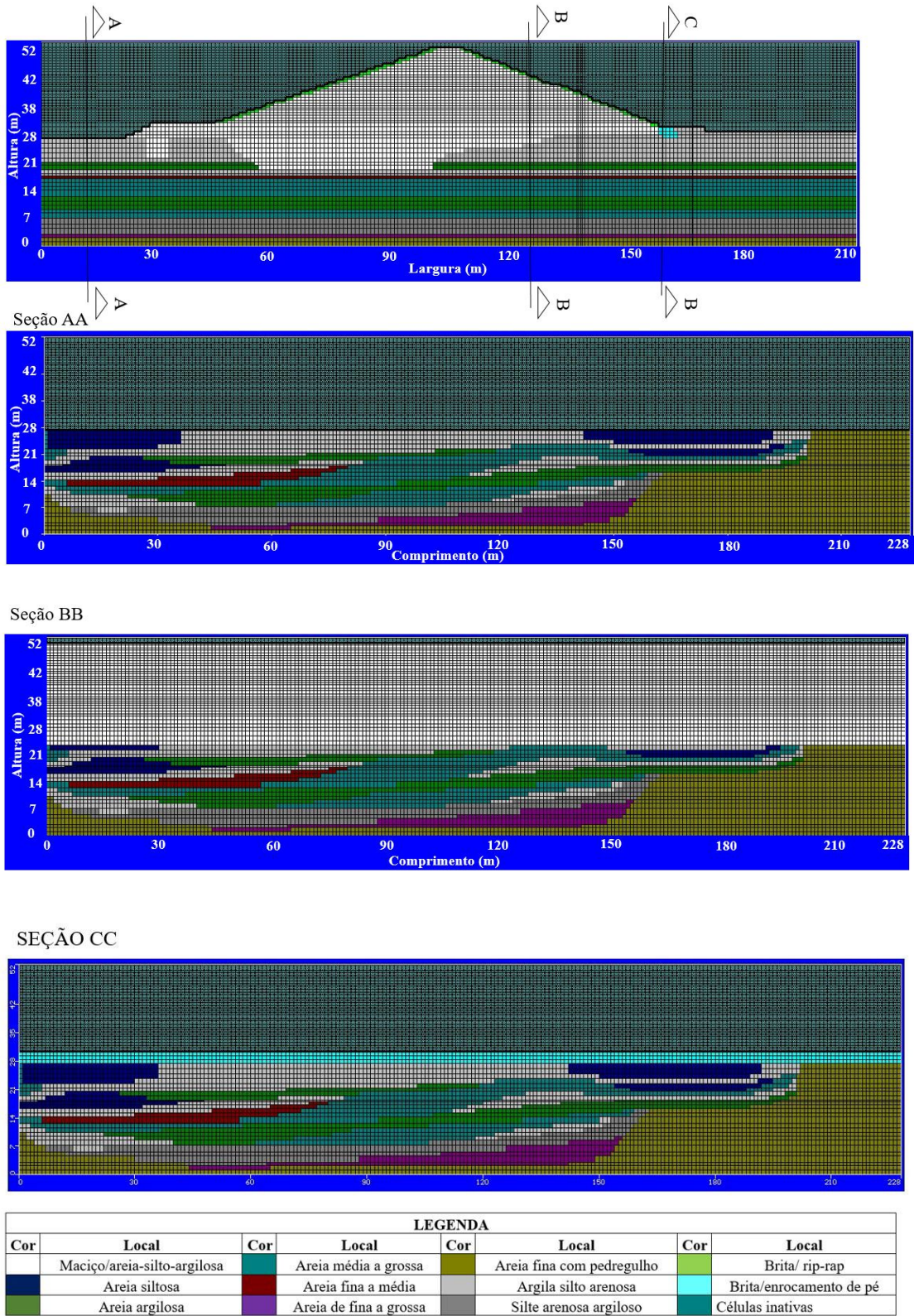
Fonte: Autora

### **5.3 Construção do modelo conceitual, discretização da malha de diferenças finitas, inclusão de condições de contorno e das propriedades hidrogeológicas iniciais**

O modelo conceitual foi definido a partir de um prisma quadrangular de 210 m x 228 m x 52 m, remodelado com base no modelo geométrico tridimensional, discretizado em 228 linhas, 214 colunas e 59 camadas, representando a estratificação das camadas do maciço e da fundação. Em cada camada estratificada foram inseridas as características hidrogeológicas do meio poroso, como a condutividade hidráulica ( $k$ ), o coeficiente de armazenamento específico ( $S_s$ ) e a vazão específica ( $S_y$ ).

A Figura 38 mostra a discretização da seção transversal máxima (correspondente ao furo de sondagem SP-9 da Figura 18), além de três seções longitudinais, uma à montante (seção AA), outra no eixo do maciço (seção BB) e outra à jusante (seção CC).

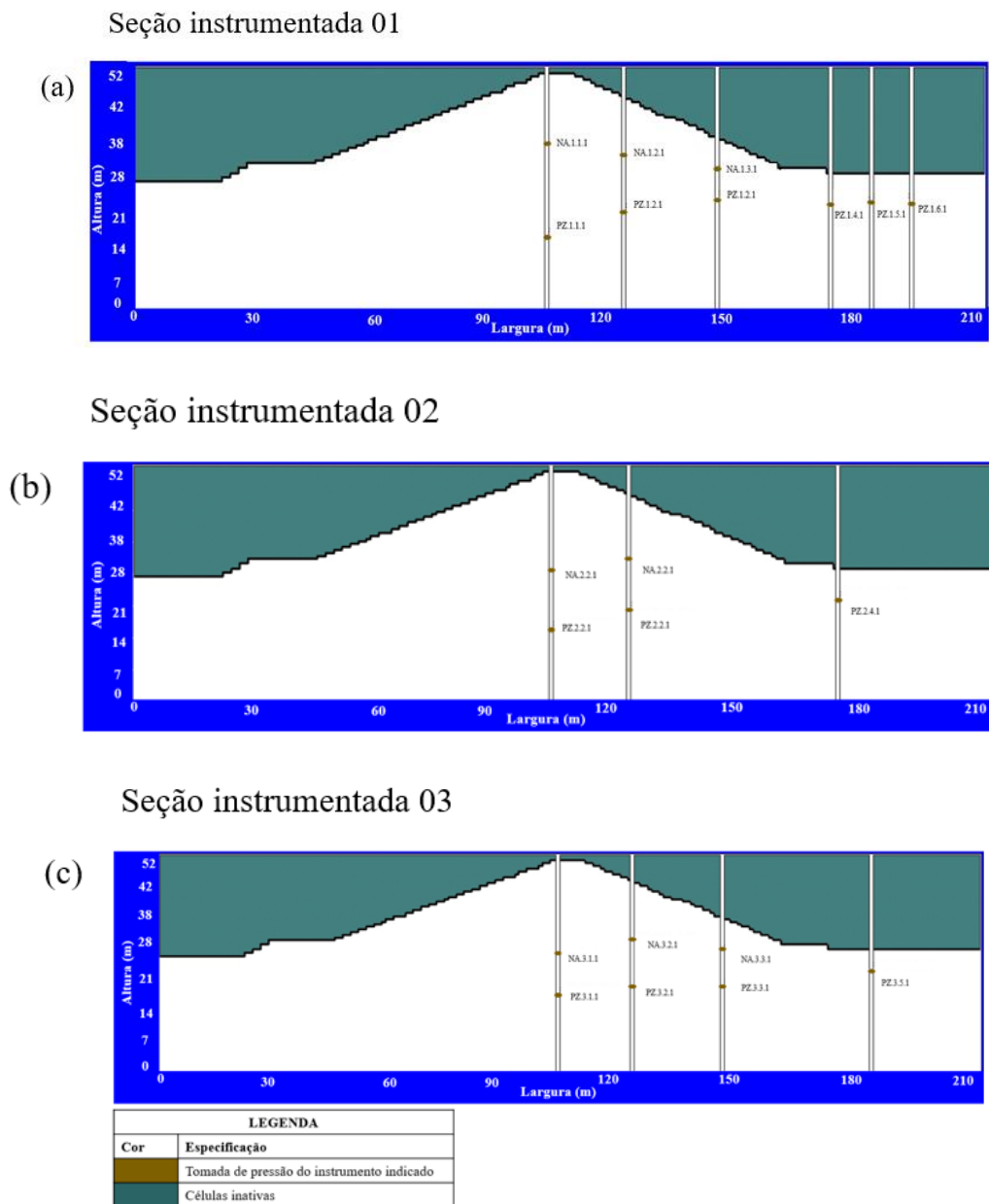
Figura 38 - Células e camadas do domínio do modelo constituídas de diferentes tipos de materiais



Fonte: Autora

Os valores das cargas hidráulicas utilizadas na calibração do modelo de fluxo, obtidas no ano de 2013 por meio de 13 piezômetros e 8 medidores de nível de água, foram introduzidas de acordo com a localização das seções instrumentadas disponibilizadas pela COGERH. Assim, três seções instrumentadas foram inseridas: a seção 01 (Figura 39a), correspondente ao furo de sondagem 09; a seção 02 (Figura 39b), associada ao furo de sondagem 02; e a seção 03 (Figura 39c), relacionada ao furo de sondagem 05.

Figura 39 - Seções instrumentadas

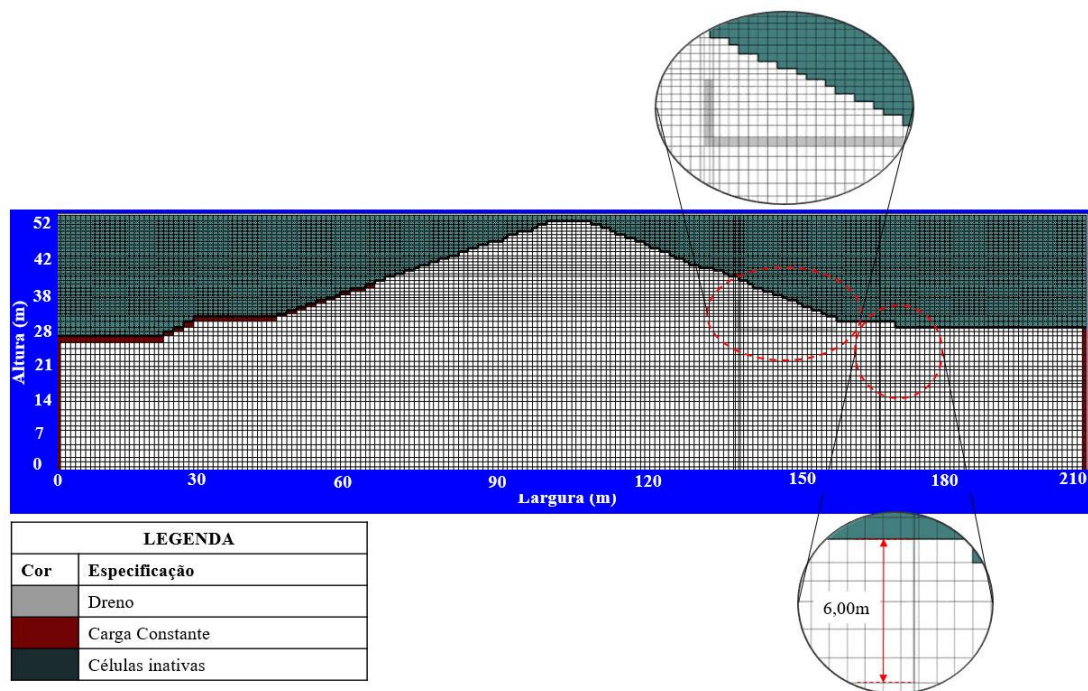


Fonte: Autora

As condições de contorno atribuídas ao modelo hidrogeológico conceitual foram definidas por cargas hidráulicas constantes (tipo *Dirichlet*), à montante e a jusante do maciço, representando, respectivamente, as águas armazenadas no reservatório em diferentes níveis e as surgências de pé; por regiões de não-fluxo (tipo *Neumann*), representada pelas células inativas, definindo os contornos impermeáveis que delimitam o domínio do modelo; e por drenos (tipo *Cauchy*), representando o sistema de drenagem interno e os poços de alívio instalados à jusante do maciço.

A Figura 40, mostra a aplicação das condições de contorno, destacando os drenos (caracterizando os poços de alívio e os filtros vertical e horizontal) e carga constante (representando às cargas hidráulicas à montante da barragem, de 37,75 m, referente ao nível mínimo para o ano de 2013, e à jusante, de 29,95 m), bem como as células inativas.

Figura 40 - Condição de contorno dreno, carga constante e células inativas utilizadas no modelo



Fonte: Autora

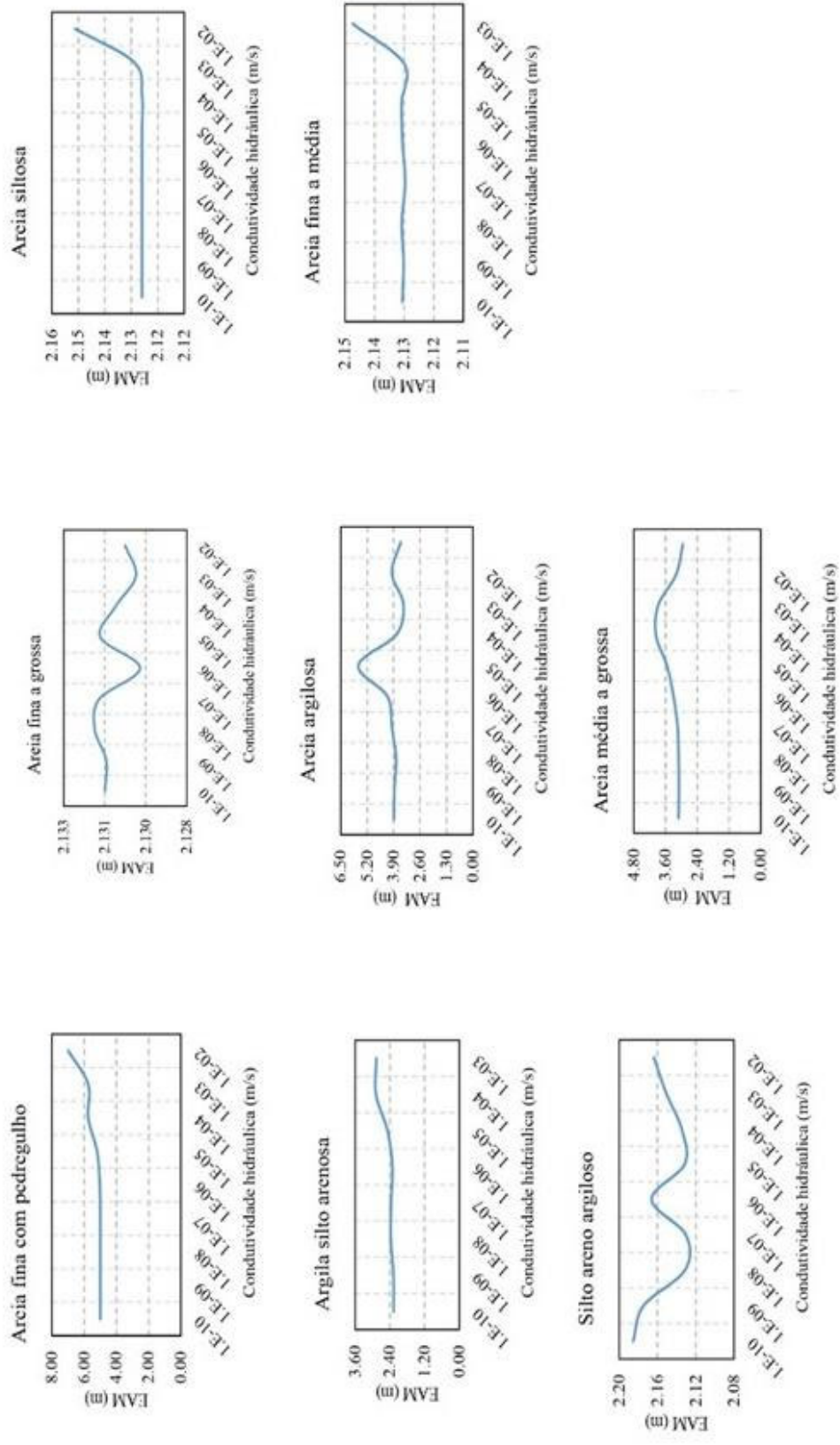
As propriedades do dreno foram inseridas conforme explicado no item 2.3, com condutância especificada a partir da análise de sensibilidade no regime estacionário.

## 5.4 Calibração do modelo de fluxo

### 5.4.1 *Etapa 01*

Na Etapa 01 foi realizada a variação da condutividade hidráulica  $k$  considerando o meio isotrópico ( $k_x = k_y = k_z = k$ ) e o regime estacionário ( $\partial h / \partial t = 0$ ). A Figura 41 mostra os Erros Absolutos Médios das cargas hidráulicas associados a variação de  $k$  de cada camada do domínio.

Figura 41 - Erros Absolutos Médios (EAM) das cargas hidráulicas associados à variação da condutividade hidráulica de cada camada obtidos durante a Etapa 01



Fonte: Autora

Na Figura 41 é possível observar que para a camada de areia fina com pedregulho o modelo apresentou um contínuo aumento do EAM com o aumento da condutividade hidráulica, indicando sensibilidade, uma vez que o erro passou de 5,0 m com  $k = 10^{-10}m/s$  para 7,0 m com  $k = 10^{-2}m/s$ .

Já para a areia siltosa o modelo apresentou pouca sensibilidade, pois o EAM aumentou suavemente com o aumento da condutividade hidráulica, sendo mais perceptível para  $k = 5,50 \times 10^{-10}m/s$ . Esse comportamento também pode ser observado no gráfico referente a camada de areia fina a grossa. Os gráficos referentes as camadas de areia argilosa, areia fina a grossa e silte areno argiloso (correspondentes às estratificações localizadas na fundação), além do enrocamento de pé, apresentaram oscilações, porém com baixa amplitude.

Para as camadas de areia média a grossa e de argila silto arenosa, observa-se uma pequena flutuação, indicado que existe um ponto específico (aproximadamente  $k = 10^{-7}m/s$  para a areia média a grossa e  $k = 10^{-6}m/s$  para a argila arenosa) em que o modelo mostra sensibilidade às mudanças na condutividade hidráulica. Vale ressaltar que, para as camadas de areia silto argilosa (maciço) e de brita (*rip-rap*) o método iterativo convergiu apenas para um único valor de  $k$ , sendo  $k = 10^{-3}m/s$  para ambas as camadas .

Concomitantemente à análise de sensibilidade, foi realizada a calibração do modelo, onde foi selecionado os valores de condutividade hidráulica (dentro da faixa estabelecida por Knoel *et al.* (1998), para cada tipo de material) que resultaram no menor EAM para cada camada. Estes valores foram determinados como representativos da condutividade hidráulica de cada camada, assumindo o meio isotrópico e o fluxo estacionário. Os valores ajustados estão expostos na Tabela 9.

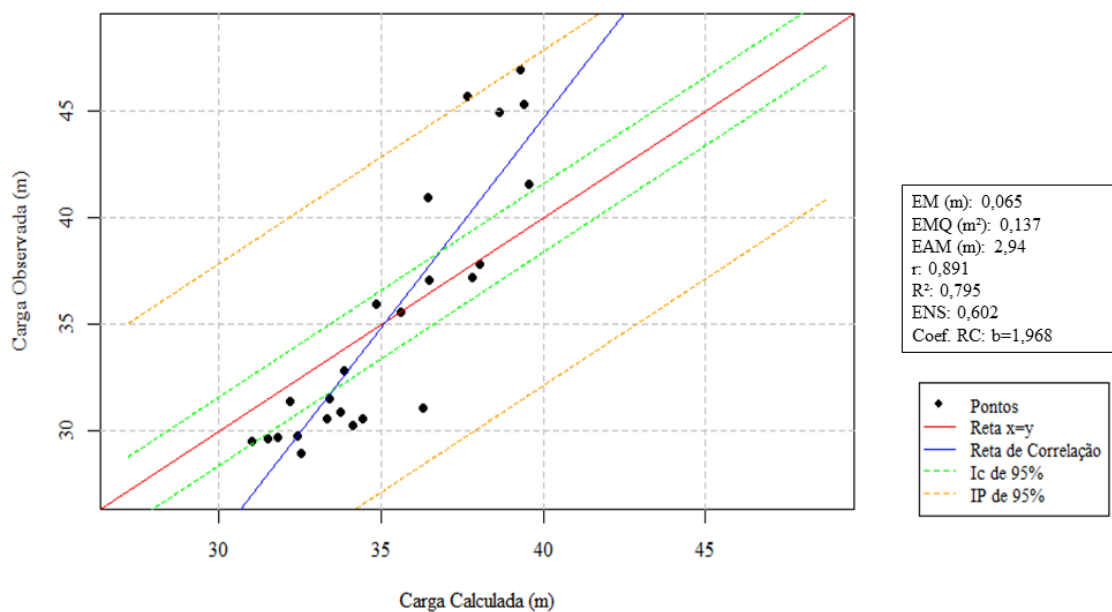
Tabela 9 - Condutividades hidráulicas ajustadas para cada camada de materiais distintos durante a análise de sensibilidade do modelo da Etapa 01

Sequência	Camada	Material	$k_{ajust}$ (m/s)
1	7	Areia fina com pedregulho	$10^{-03}$
2	3	Areia argilosa	$10^{-03}$
3	4	Areia média a grossa	$10^{-01}$
4	8	Argila silto arenosa	$10^{-10}$
5	2	Areia siltosa	$10^{-03}$
6	5	Areia fina a média	$10^{-04}$
7	6	Areia de fina a grossa	$10^{-01}$
8	12	Brita/enrocamento de pé	$10^{-12}$
9	9	Silte arenosa argiloso	$10^{-07}$
10	1	Maciço/areia-silto-argilosa	$10^{-03}$
11	11	Brita/ <i>rip-rap</i>	$10^{-03}$

Fonte: Autora

Para a Etapa 01, tem-se a avaliação estatística mostrada na Figura 18.

Figura 42 - Avaliação estatística da Etapa 01



Fonte: Autora

O EM apresentou um valor próximo de zero (0,065 m), indicando que em média, as cargas hidráulicas não estão nem subestimadas, nem superestimadas; e o EMQ de 0,137 m² sugere que o modelo calcula as cargas hidráulicas razoavelmente próximas às cargas observadas. No entanto, o EAM apresentou um valor 2,94 m, indicando que os desvios individuais entre as cargas observadas e calculadas são significativos. Apenar disso, o r e o R²

mostraram que há correlação positiva forte entre as cargas, segundo a classificação de Schober *et al.* (2018).

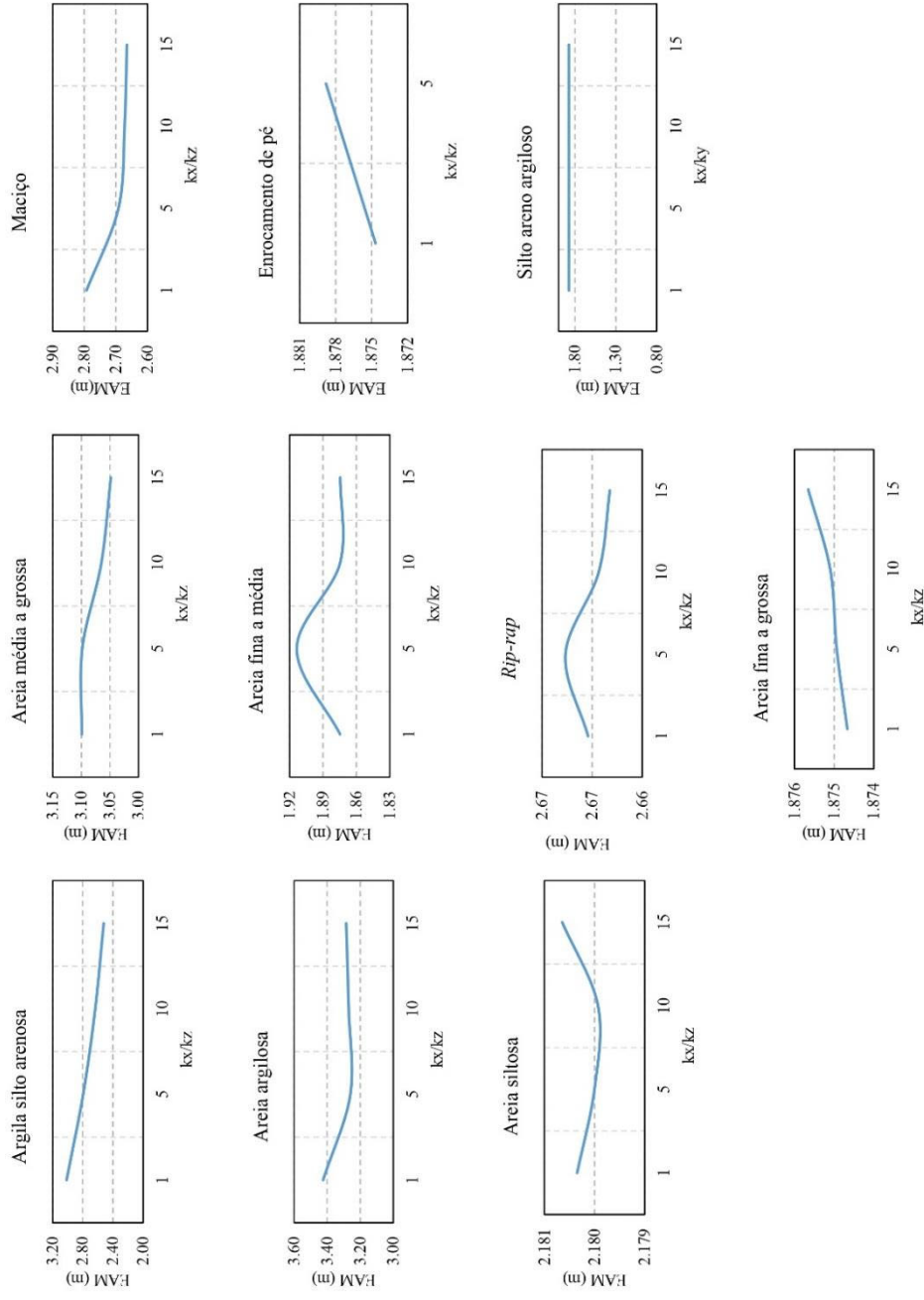
Ainda na Figura 18, pode ser observado que muitos pontos ficaram fora do intervalo de confiança (IC 95%) e tendo um único ponto em que a carga calculada foi igual a observada (situação verificada com a reta  $x = y$ ). Contudo, com exceção de um único ponto, as cargas calculadas estão dentro do intervalo de predição (IP 95%). O ponto fora do IP 95% corresponde ao instrumento NA311, que apresentou carga hidráulica subestimada.

Essa subestimação pode ser verificada com o coeficiente da reta de correlação (coef. RC)  $b = 1,968$ . Essa situação mostra que quando a carga calculada for 0m, a carga observada seria 1,968m, inferindo que o modelo está subestimando as cargas hidráulicas. Contudo, o modelo mostrou um bom desempenho, conforme Masood *et al.* (2023), pois o ENS de 0,602 mostra que o modelo explica 60,2% da variação dos dados.

#### **5.4.2 Etapa 02**

Na Etapa 02 o regime de fluxo também foi estacionário, porém o meio foi considerado anisotrópico com  $k_x = k_y$  e a sensibilidade do modelo foi avaliada variando a anisotropia para as condições  $k_x/k_z = 5$ ,  $k_x/k_z = 10$  e  $k_x/k_z = 15$ . A Figura 43 apresenta os Erros Absolutos Médios das cargas hidráulicas calculadas associados à variação da anisotropia.

Figura 43 - Erros Absolutos Médios (EAM) das cargas hidráulicas calculadas associados à variação da anisotropia durante a Etapa 02



Fonte: Autora

Na Figura 43 é possível observar que para as camadas de areia argilosa, areia média a grossa, argila silto arenosa, maciço, o EAM diminui quando aumenta a razão  $k_x/k_z$ , ou seja, quando diminui o valor de  $k_z$ . O inverso é observado na camada de areia fina a grossa, em que o aumento da razão  $k_x/k_z$  causa o aumento do EAM.

Para a camada de enrocamento de pé só foram obtidos resultados para as condições  $k_x/k_z = 1$  (meio isotrópico) e  $k_x/k_z = 5$ , para os demais valores de anisotropia vertical o método de iteração numérica não convergiu. Além disso, para a camada de areia fina com pedregulho não foi possível obter resultados durante a Etapa 02, uma vez que o método iterativo não convergiu para nenhum valor de  $k_x/k_z$ , sugerindo que esta camada é melhor representada pela condição isotrópica.

Para as camadas da areia fina a média e do *rip-rap*, o EAM tende a diminuir para valores  $k_x/k_z < 5$  e  $k_x/k_z > 10$ . Para a camada de areia siltosa a curva possui concavidade para cima com valor mínimo relativo do EAM também próximo da anisotropia  $k_x/k_z = 10$ . Por fim, a camada de silto areno argiloso não mostrou sensibilidade para a variação da anisotropia vertical.

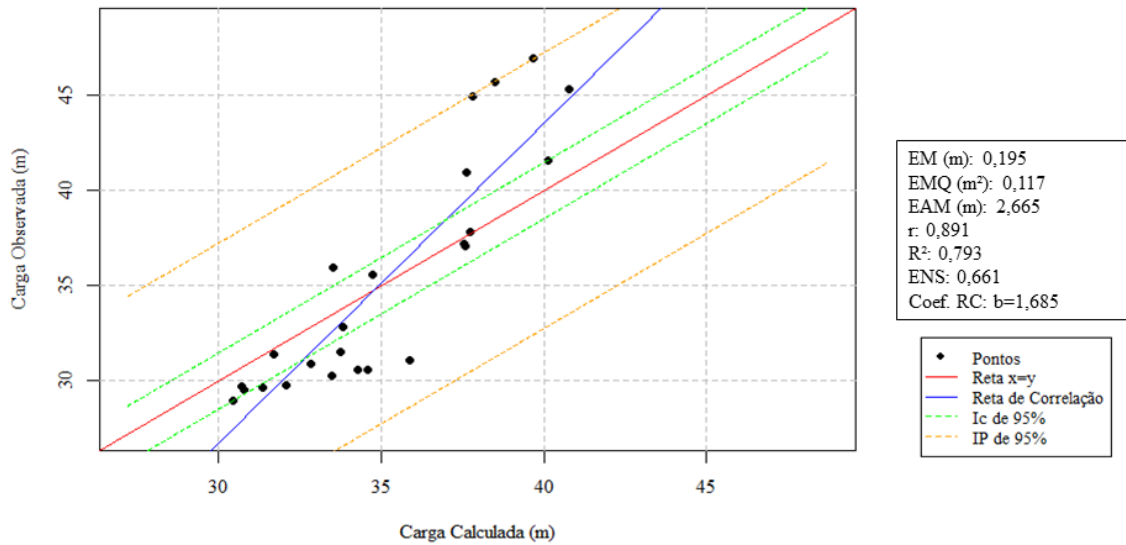
A calibração durante esta etapa está exposta na Tabela 10, onde foi selecionada a razão  $k_x/k_z$  dentro dos limites estabelecidos por Pinto (2006). Já a avaliação estatística para a Etapa 02 está exposta na Figura 44.

Tabela 10 - Anisotropia vertical  $k_x/k_z$  ajustada para cada camada de materiais distintos durante a análise de sensibilidade do modelo na Etapa 02

Sequência	Camada	Material	$k_x/k_z$	Condição do meio
1	7	Areia fina com pedregulho	1	Isotrópico
2	3	Areia argilosa	15	Anisotrópico
3	4	Areia média a grossa	15	Anisotrópico
4	8	Argila silto arenosa	15	Anisotrópico
5	2	Areia siltosa	10	Anisotrópico
6	5	Areia fina a média	1	Isotrópico
7	6	Areia de fina a grossa	1	Isotrópico
8	12	Brita/enrocamento de pé	1	Isotrópico
9	9	Silte arenosa argiloso	1	Isotrópico
10	1	Maciço/areia-silto-argilosa	15	Anisotrópico
11	11	Brita/ <i>rip-rap</i>	15	Anisotrópico

Fonte: Autora

Figura 44 - Avaliação estatística da Etapa 02



Fonte: Autora

Na Figura 44 pode ser observado que resultados dos parâmetros calculados com na análise estatística nesta etapa são próximos dos valores obtidos na etapa anterior, porém com pequeno aumento no EM (de 0,065 para 0,195m), redução no EMQ (0,137 para 0,117m<sup>2</sup>) e no coeficiente de correção da reta (1,968 para 1,685). Os valores de  $r$  e  $R^2$  não alteraram.

Nessa etapa houve melhor desempenho, quando comparado com a etapa anterior, pois houve diminuição do EAM (2,940 para 2,665m), indicando que houve diminuição nos desvios individuais entre as cargas observadas e calcula. Além disso, a capacidade de o modelo explicar a variação dos dados aumentou de 60,20% para 66,10%. Ainda é observado que, diferente da etapa anterior, todos os pontos ficaram dentro do limite determinado pelo IP (95%), apesar de três pontos se encontrarem sobre o extremo superior. Essa situação mostra que verificar a sensibilidade e calibrar o modelo através da análise da anisotropia contribui para minimizar os desvios individuais entre as cargas observadas e as cargas calculadas, melhorando o desempenho do modelo.

#### 5.4.3 Etapa 03

A Etapa 03 foi dividida em dois procedimentos: a variação da condutância dos poços de alívio e do sistema de drenagem interno. Como dito no item 2.3, não há formulação matemática para calcular a condutância, sendo determinada a partir da análise de sensibilidade

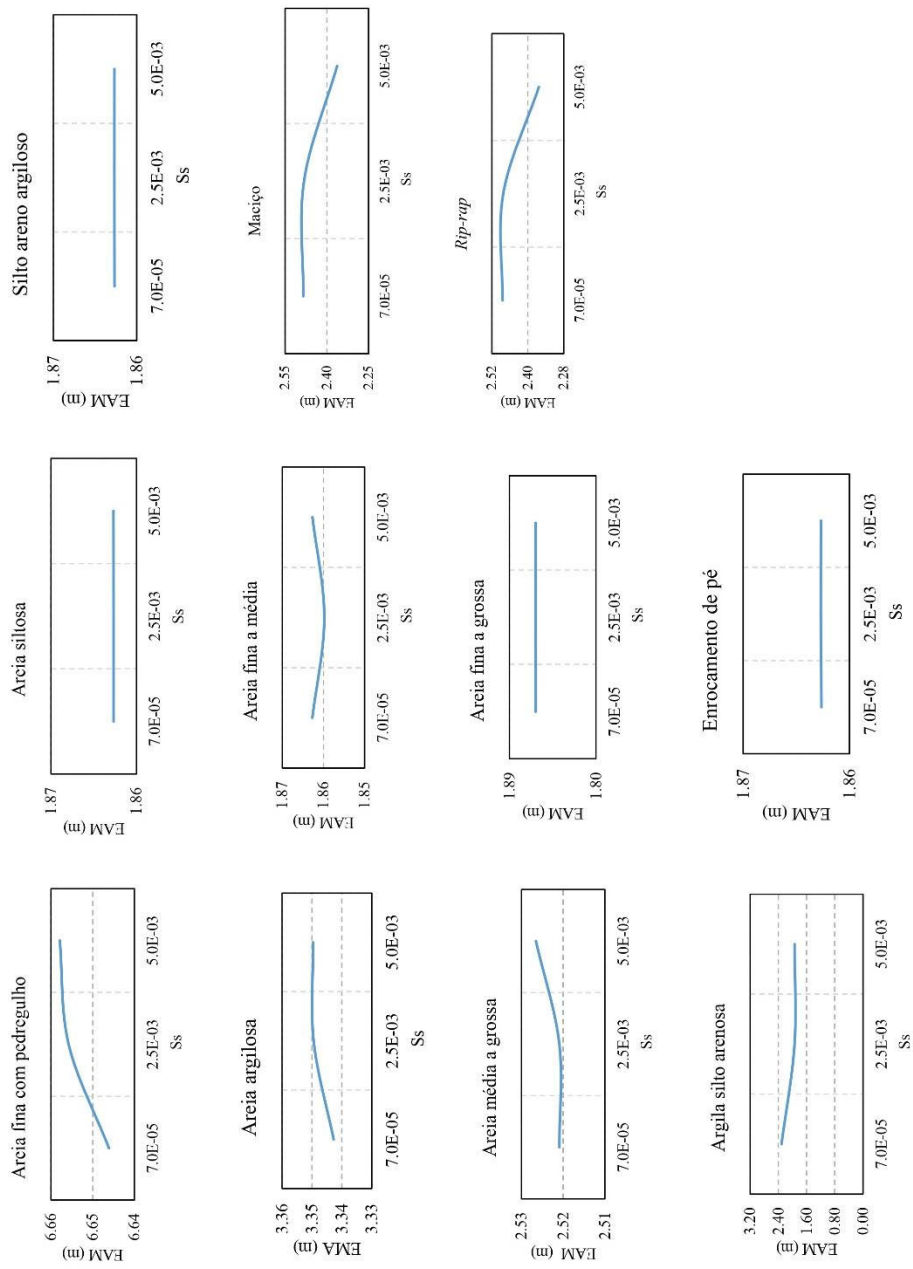
do modelo. Diante disso, variou-se a condutância no intervalo de  $10^{10}$  a  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/ dia, mas o modelo não se mostrou sensível.

#### **5.4.4 Etapa 04**

Na Etapa 04 foi verificada a sensibilidade do modelo em relação ao parâmetro  $S_s$  da Equação 2.34, considerando o regime transiente ( $\partial h/\partial t \neq 0$ ). Para isso, utilizou-se as medições das cargas hidráulicas realizadas no período de janeiro a março de 2009.

As variações foram realizadas dentro do intervalo de  $7 \times 10^{-6}$  a  $5 \times 10^{-3}$  m<sup>-1</sup>. A Figura 45 apresenta os Erros Absolutos Médios das cargas piezométricas calculadas associados a cada valor de  $S_s$ .

Figura 45 - Erros Absolutos Médios (EAM) das cargas piezométricas calculadas associados à variação do  $S_s$  obtidos durante a Etapa 04



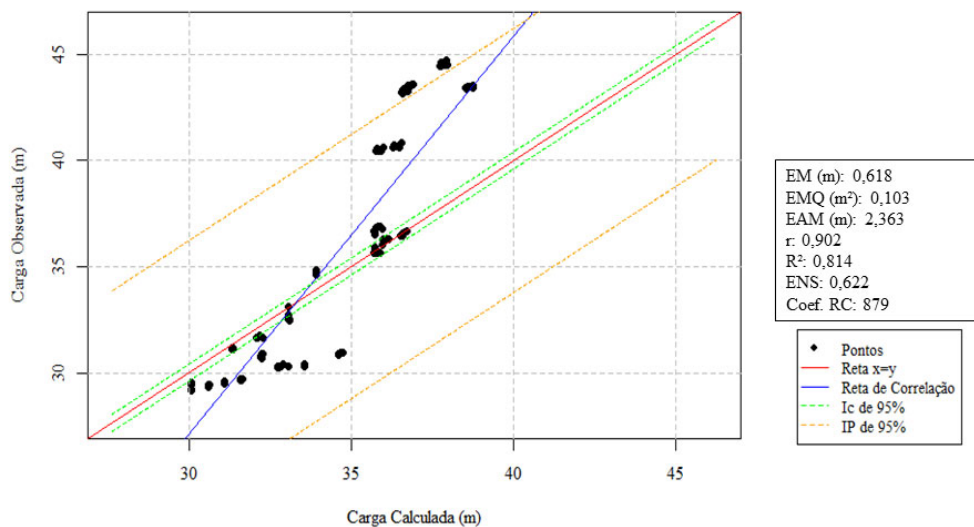
Fonte: Autora

Observa-se na Figura 45 que as camadas de areia fina com pedregulho, areia argilosa e areia média a grossa o EAM aumenta com o aumento do  $S_s$ . Já nas camadas de argila silto arenosa e no maciço o EAM diminui com o aumento do  $S_s$ . Além disso, pode ser observado que a argila silto arenosa apresentou mais sensibilidade, pois a amplitude da variação do erro foi de, aproximadamente, 1 m.

A camada de areia fina a média apresentou um ponto de mínimo local para  $S_s = 2,5 \times 10^{-3} m^{-1}$ . Para as demais camadas (silte areno argiloso, areia siltosa, areia fina a grossa, enrocamento de pé e *rip-rap*) o modelo não foi sensível às variações de  $S_s$ .

A avaliação estatística do modelo referente à Etapa 04, está na Figura 46.

Figura 46 - Avaliação estatística da Etapa 04



Fonte: Autora

Observa-se na Figura 46 que alguns pontos estão fora do intervalo IP (95%). No entanto, registrou-se uma diminuição no EAM, passando de 2.665 metros para 2.363 metros, indicando uma redução dos desvios individuais. Além disso, houve um aumento na correlação entre as cargas calculadas e observadas, evidenciado pelo crescimento  $r$  e do  $R^2$ , mantendo-se ainda dentro da classificação de correlação positiva forte, descrita por Schober *et al.* (2018). Para os parâmetros de EMQ e ENS houve redução. Já para o coeficiente de correlação da reta e o EM houve aumento.

### 5.4.5 Etapa 05

Na Etapa 05 foi feita análise de sensibilidade do modelo quanto a variação do parâmetro  $S_y$  da Equação 2.44, considerando o regime transiente ( $\partial h/\partial t \neq 0$ ). No modelo, esta equação só é aplicada às células que contém a superfície freática.

As variações de  $S_y$  foram realizadas no intervalo de 3 a 30%, porém os resultados não apresentaram sensibilidade a esse parâmetro, indicando que o modelo é composto predominantemente por células em condição de confinamento.

## 5.5 Validação do modelo

Após a obtenção dos parâmetros ajustados na fase de calibração do modelo, procedeu-se com a etapa de validação, considerando o período de abril a dezembro de 2009. A superfície freática inicial no maciço utilizada nessa modelagem foi definida a partir de uma simulação estacionária prévia, tomando como referência as cargas hidráulicas medidas pelos instrumentos no dia 8 de janeiro de 2013.

O período modelado foi dividido em sete simulações transientes sequenciais com intervalos. Neste caso os resultados das cargas calculadas ao final de cada simulação transiente serviram de condição inicial para a simulação subsequente. Esse processo foi repetido até obtenção da última simulação correspondente a dezembro de 2009.

Conforme discutido por Masood *et al.* (2023), os parâmetros estatísticos  $R^2$  e  $ENS$  podem ser utilizados para verificação da calibração de um modelo, em que é aceitável quando  $R^2$  e  $ENS$  forem maiores que 0,5. Com isso, a Tabela 11 mostra a situação de validação para cada período.

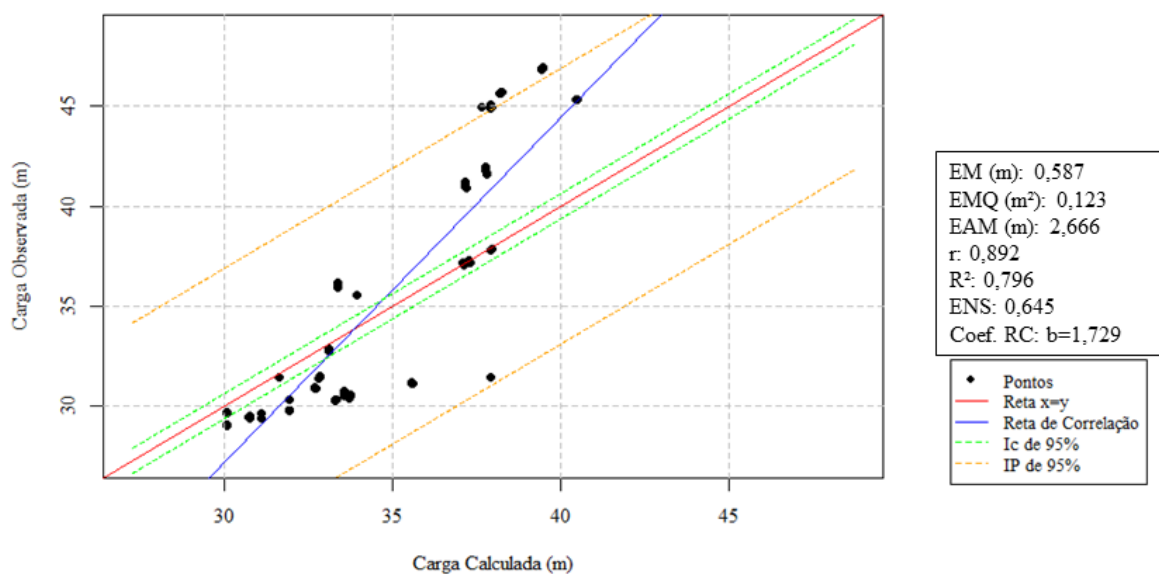
Tabela 11 – Situação da validação do modelo

Simulação	Intervalo de tempo (dias)	$R^2$	$ENS$	Situação
1	35	0,790	0,622	Calibração validada
2	64	0,810	0,623	Calibração validada
3	69	0,786	0,624	Calibração validada
4	48	0,809	0,635	Calibração validada
5	56	0,765	0,640	Calibração validada
6	49	0,788	0,640	Calibração validada
7	23	0,796	0,645	Calibração validada

Fonte: Autora

Além de todas as simulações mostrarem que o modelo pode ser considerado validado, para cada um dos sete intervalos de tempo, ao final da simulação, resultados obtidos na validação do modelo mostraram-se consistentes com relação aos obtidos na Etapa 04 (Figura 46), como mostra a Figura 47.

Figura 47 - Avaliação estatística da validação do modelo



Fonte: Autora

Apesar de ter ocorrido a diminuição nos valores de  $r$  e  $R^2$ , a correlação entre as cargas calculadas e observadas permaneceu classificada como positiva forte. Em média, durante a validação o modelo apresentou maior precisão, pois houve diminuição do EM (de 0.618m para 0.587m). Pode ser observado, ainda que alguns pontos ficaram fora do intervalo de precisão, apesar de muito próximos ao seu limite. Contudo, ao passo do tempo houve aumento do ENS, como observado na Tabela 11. Essa situação sugere que as simulações transientes se tornam progressivamente mais precisas à medida que avançam nos intervalos de tempo, como pode ser observado ainda na Tabela 11.

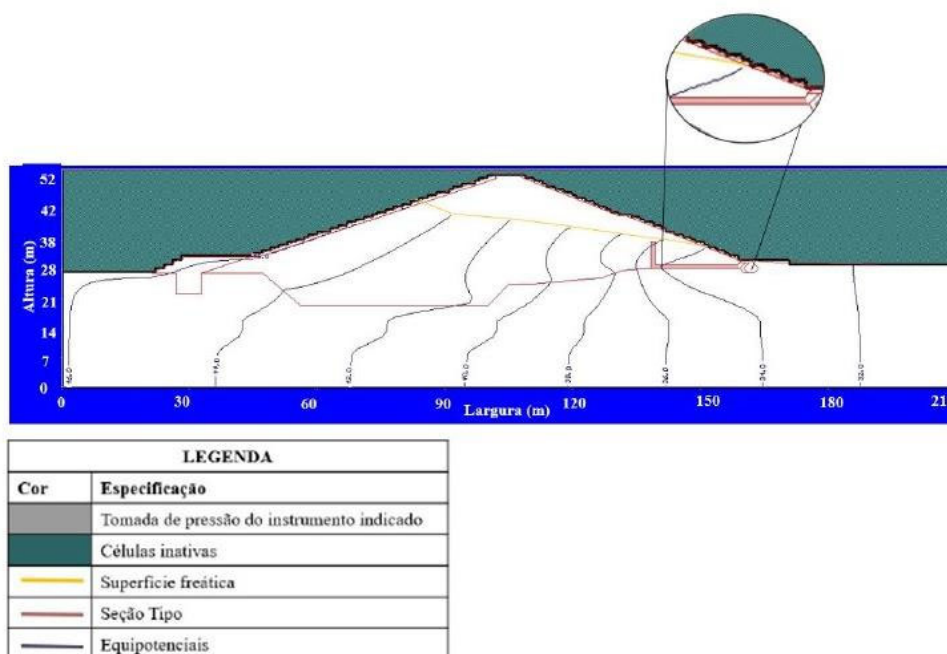
## 5.6 Simulação de cenários

### 5.6.1 Simulação do primeiro cenário

O primeiro cenário corresponde ao período de janeiro a dezembro de 2009, com a variação nas alturas de acumulação de respectivamente 15,61 m a 18,88 m. Os resultados desta simulação foram comparados com os de Araújo (2013) e Vidal (2022).

A Figura 48, apresenta o resultado da simulação referente ao dia 31 de dezembro. Nela é possível observar surgências no talude de montante na seção instrumentada 01, situada próximo a ombreira direita. Situação como essa foi observada por Chen e Zhand (2006) ao realizar a modelagem tridimensional realizada na barragem de Gouhou, na China e na barragem Macusani, no Peru. Neste contexto os autores defenderam a importância da modelagem tridimensional, pois os limites do maciço próximos às ombreiras correm maior risco de ruptura por erosão regressiva e não pode ser prevista em uma modelagem bidimensional.

Figura 48 - Linha freática referente ao dia 31 de dezembro na seção correspondente a linha 102 da malha de diferenças finitas

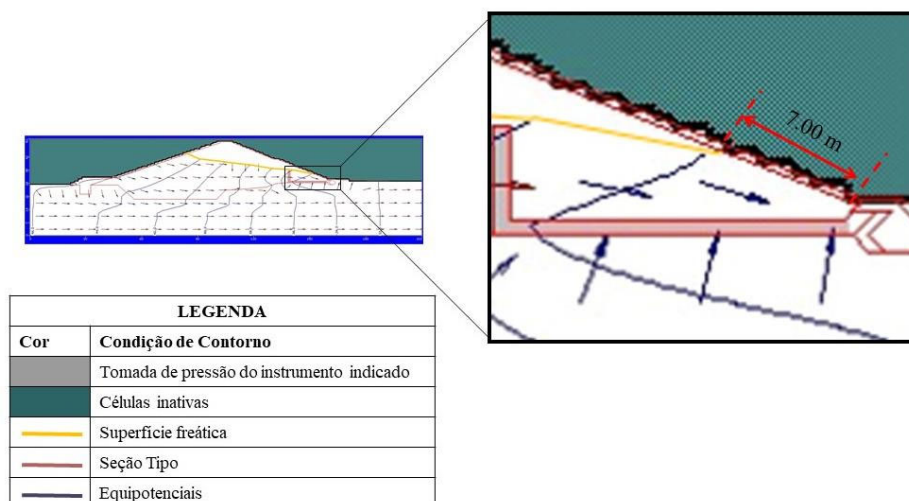


Fonte: Autora

Para o caso da barragem Olho D'Água, a surgência no talude de jusante, de aproximadamente 7 m, representa falha no sistema de drenagem. Possivelmente, esta situação deve-se ao fato da execução da obra não ter seguido as especificações do projeto executivo,

resultando em filtros verticais e horizontais subdimensionados, reduzindo a eficiência do direcionamento correto do fluxo (Figura 49).

Figura 49 - Fluxo no maciço e surgência no talude de jusante referente ao dia 31 de dezembro na seção correspondente a linha 102 da malha de diferenças finitas



Fonte: Autora

Essa surgência no talude de jusante não foi prevista por Araújo (2013) e Vidal (2022), que realizaram simulações bidimensionais em regime transiente e estacionário, respectivamente. Este cenário foi similar ao observado por Quispe e Romanel (2008) quando concluíram que os sistemas de drenagem interna das barragens Gouhau, na China e Macusani, no Peru funcionaram corretamente na simulação bidimensional e falharam na tridimensional.

Nesta simulação tridimensional o fluxo que percola o maciço foi da ordem de  $1,51 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , correspondendo a aproximadamente 3,65 vezes maior do que o obtido por Vidal (2022) em simulação bidimensional, que foi de  $4,13 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

Já o fluxo que percola a fundação foi da ordem de  $1,60 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , aproximadamente 12,5 vezes maior do que o valor obtido por Vidal (2022), que foi de  $1,28 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

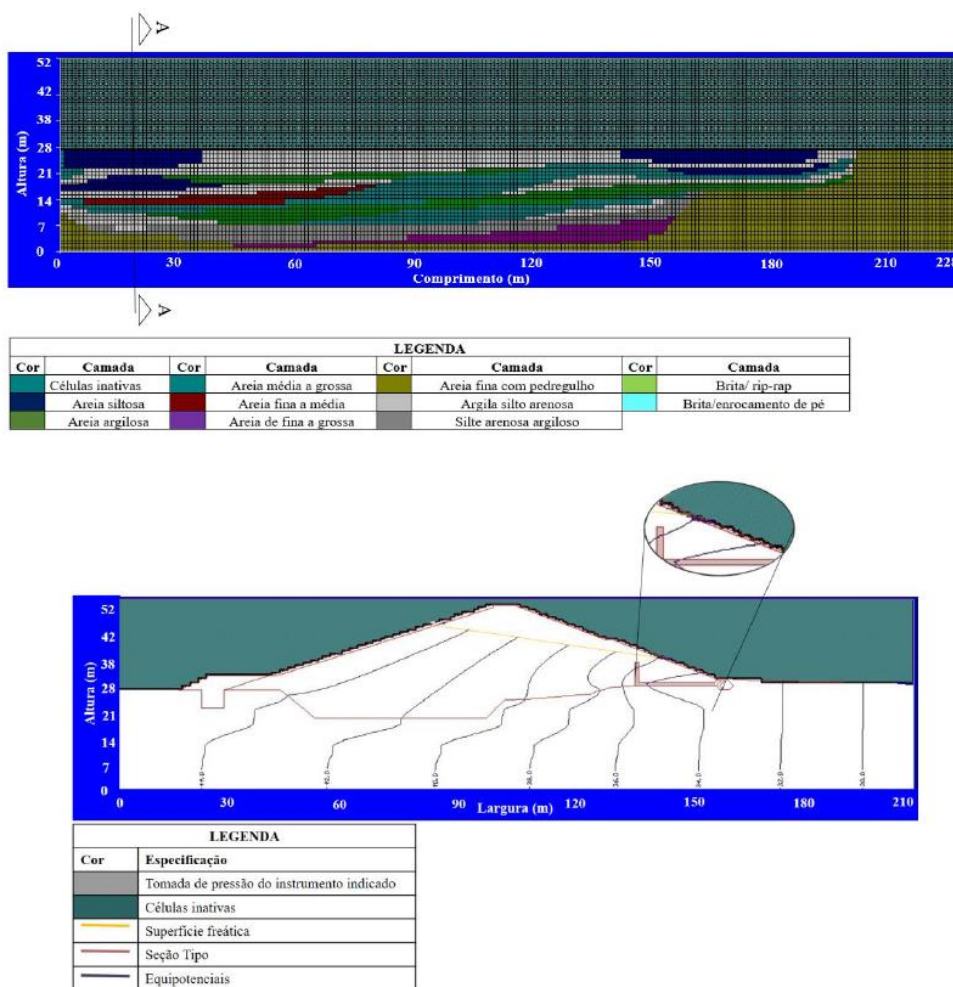
### 5.6.2 Simulação do segundo cenário

A simulação do segundo cenário foi realizada para analisar a barragem em situação de altura de acumulação máxima. Além disso, foram realizadas simulações considerando a ativação e a desativação dos poços de alívio (representando uma colmatação teórica).

Este cenário também apresentou surgências no talude de jusante, podendo ser observadas em todas as seções.

Similar ao primeiro cenário, este fenômeno é mais notável perto das ombreiras, onde a fundação é formada por camadas de areia siltosa, argila silto-arenosa, areia de granulação fina a média, areia de granulação média a grossa e areia fina misturada com pedregulhos (Figura 50).

Figura 50 - Perfil estratificado discretizado e surgências na seção localizada na linha 28 (seção AA) da malha de diferenças finitas



Fonte: Autora

Nas simulações de obstrução dos poços de alívio, os resultados permaneceram inalterados, sugerindo que a surgência no talude de jusante é consequência das modificações implementadas durante a construção do sistema de drenagem interno.

Vale ressaltar ainda, que essas surgências ocorreram, de fato, em campo e para impedir o carreamento dos finos do maciço e comprometimento na estabilidade da estrutura, foi sugerida a execução de um filtro invertido à jusante.

## 6 CONCLUSÃO

A modelagem tridimensional transiente para análise do fluxo de percolação no maciço e na fundação de barragens de terra utilizando o programa *MODFLOW*, integrada com técnicas estatísticas robustas, demonstrou superação em relação às limitações da metodologia convencional. Esta abordagem não apenas elevou a precisão dos resultados, mas também garantiu maior consistência e confiabilidade nos estudos, promovendo uma compreensão mais detalhada dos comportamentos hidráulicos complexos associados a estas estruturas. As técnicas estatísticas robustas também foram importantes na análise das cargas hidráulicas observadas avaliando a presença de *outliers*.

A análise da série temporal das cargas hidráulica mostrou-se uma etapa essencial para a melhor seleção dos dados de entrada, uma vez que contribuiu significativamente para o entendimento dos instrumentos de medida do comportamento das cargas hidráulicas.

A construção do modelo geométrico tridimensional foi importante para identificação das regiões mais sensíveis para a análise do fluxo de percolação. Contudo, para a barragem utilizada no estudo de caso deste trabalho, as alterações realizadas durante sua construção, sem o devido projeto *As Built*, dificultou a elaboração do modelo geométrico tridimensional e, posteriormente, o conceitual. No entanto, os resultados obtidos nas etapas das simulações foram compatíveis com os observados.

A partir da análise de sensibilidade foi possível inferir quais parâmetros apresentaram maior influência na modelagem, com destaque para a condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento específico, sendo mais sensível para o primeiro. O modelo não foi sensível para a condutância do sistema de drenagem, isso pode estar associado ao subdimensionamento da estrutura, pois ela foi significativamente reduzida na fase construtiva da barragem. O modelo também não apresentou sensibilidade à vazão específica, pois as células saturadas do domínio são predominantemente confinadas, nas quais o fluxo de percolação transiente é influenciado principalmente pelo coeficiente de armazenamento específico.

Na calibração, o modelo foi ajustado para valores diferentes dos fornecidos pelo projeto executivo e dos obtidos na modelagem 2D prévia, utilizando o método convencional. Com relação ao projeto executivo, as diferenças ocorreram, provavelmente, devido modificações dos materiais utilizados na construção do maciço. Já para a modelagem 2D as diferenças ocorreram devido as restrições geométricas no domínio do modelo hidrogeológico conceitual,

apresentando limitações no que se refere à representação da estratificação dos materiais constituintes da fundação e das condições de contorno.

A estatística robusta foi uma importante ferramenta utilizada na análise da acurácia do modelo numérico em cada etapa da simulação. Essa abordagem incluiu a análise dos parâmetros estatísticos coeficientes de correlação e de determinação, a avaliação do desvio individual por meio do erro absoluto médio, a investigação da capacidade do modelo de explicar as variações dos dados por meio da eficiência de Nash-Sutcliffe, e a análise da tendência por meio da Porcentagem de Viés, comparando as cargas hidráulicas observadas com as calculadas.

A metodologia desenvolvida mostrou-se uma ferramenta eficaz não só para a análise e monitoramento da dinâmica de fluxo de percolação no maciço e na fundação de barragens de terra. Por meio da análise das séries históricas das cargas hidráulica observadas foi possível observar discrepâncias entre os valores medidos e os esperados, possibilitando discussão sobre a necessidade de manutenção dos instrumentos de monitoramento. Além disso, a simulação de diferentes cenários permitiu avaliar o sistema de drenagem interno, oferecendo informações para a tomada de decisões estratégicas relacionadas à gestão e segurança da barragem.

A metodologia desenvolvida possibilita a construção de um modelo preditivo para barragens de terra, permitindo a análise de seu comportamento antes da construção. Ao considerar diferentes cenários, esse modelo se torna uma ferramenta útil para o planejamento, gestão, monitoramento e tomada de decisões, contribuindo para a segurança e eficiência dessas estruturas.

É importante destacar alguns aspectos da barragem Olho D'Água, utilizada no estudo de caso deste trabalho, que podem interferir na precisão do modelo numérico, como a escassez de dados e as incertezas relacionadas às informações sobre sua construção.

Considerando que cada barragem tem suas particularidades quanto as características geológicas, geotécnicas e hidrológicas, sugere-se que esta metodologia seja aplicada no estudo da dinâmica do fluxo de percolação de diferentes tipos de barragens. Por exemplo, barragens zonadas com diferentes sistemas de drenagem internos, como filtro horizontal, sanduíche e inclinado/vertical, considerando ou não o esvaziamento rápido. Também é importante considerar a permeabilidade da fundação, avaliando o fluxo de percolação com e sem *cut-off*. Além disso, levando em conta que a barragem Olho D'Água está localizada em uma região semiárida do Nordeste, pode ser realizada simulações em barragens

de terra situadas em regiões com diferentes condições climáticas, analisando como a metodologia proposta pode ser adaptada para lidar com diversas condições de carregamento.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Marina Calisto; LIMA, Filipe Augusto Xavier. A construção de barragens e seus efeitos sobre comunidades rurais: uma análise a partir do Reassentamento Novo Alagamar. *InterAções*, Campo Grande, MS, v. 23, n. 2, p. 457-471, abr./jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v23i2.2824>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/kdCkyZkGNLpbXZKQZbnL3XF/#>. Acesso em 21 maio 2024.
- AFZAL, Saima et al. A novel approach for outlier detection in multivariate data. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2021, Article ID 1899225, 2021. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/1899225/>. Acesso em 18 jun. 2024.
- AL-MARSHADI, Ali Hussein; ASLAM, Muhammad; ABDULLAH, Alharbey. Uncertainty-Based Trimmed Coefficient of Variation with Application. *Journal of Mathematics*, v. 2021, Article ID 5511904, 2021. DOI: 10.1155/2021/5511904. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/5511904>. Acesso em 19 jul. 2024.
- ALZABEEBEE, Saif; KEAWSAWASVONG, Suraparb. Robust models to predict the secondary compression index of fine-grained soils using multi-objective evolutionary polynomial regression analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 10, p. 157–165, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-023-01778-3>. Acesso em 13 jun. 2024.
- ARAÚJO, F. R. *Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de Taludes da Barragem Olho D'água no Estado do Ceará*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- BARBOSA JÚNIOR, Antenor Rodrigues. *Elementos de Hidrologia Aplicada*. São Paulo: Blucher, 2022.
- BICALHO, Kátia Vanessa; MACHADO, Sandro Lemos; GERSCOVICH, Denise M. S. Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In: SOLAN, M. H.; ROCHA, P. L. B. (Org.). *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. cap. 13, p. 404-421. DOI: 10.4322/978-65-992098-3-3.cap13. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/286448059>. Acesso em 17 jun. 2024.
- BRASIL. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Dispõe sobre a segurança de barragens; altera as Leis nºs 12.334, de 20 de setembro de 2010, 9.433, de 8 de janeiro de 1997, 9.984, de 17 de julho de 2000, 8.001, de 13 de março de 1990, 8.029, de 12 de abril de 1990, 10.233, de 5 de junho de 2001; e revoga dispositivos da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, e da Lei nº 8.029, de 12 de abril de 1990. Disponível em: <http://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-279026356>. Acesso em 21 maio 2024.
- BRASIL. Senado Federal. *Comissão Temporária da Política Nacional de Segurança de Barragens*. Relatório final nº 9, de 2016. Destinada a avaliar toda a PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens, criada pela Lei 12.334/2010, bem como o SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Brasília, DF, 25 maio 2016. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=4105073&disposition=inline>. Acesso em 05 de mar. de 2025.

- BAYAT, Mandana et al. The 3D analysis and estimation of transient seepage in earth dams through PLAXIS 3D software: neural network. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 571, 2019. DOI: 10.1007/s12665-019-8405-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8405-y>. Acesso em 21 maio 2024.
- CABRAL, Jaime J. da Silva Pereira. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, Fernando A. C.; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilton Carneiro; DEMETRIO, J. Geilson A. (Orgs.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. cap. 2.2, p. 77-91.
- CAMPOS, Nathalia Neves; POZNYAKOV, Karolina. A Gestão de riscos em barragens de rejeitos no Brasil. *Revista Boletim do Gerenciamento*, Rio de Janeiro: NPPG, Escola Politécnica, UFRJ, n. 22, 2021. Disponível em: [www.nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento](http://www.nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento). Acesso em 21 maio 2024.
- CARVALHO, David de. Barragens: uma introdução para graduandos. 2011. Disponível em: [https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem\\_terra\\_1.pdf](https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_1.pdf). Acesso em 13 de jun. 2024
- CLEARY, R. 1989. *Águas subterrâneas*. In Ramos, F. et al. 1989. Engenharia hidrológica. ABRH e Editora UFRJ. Cap. 5. Rio de Jan. 291-404 pp.
- CHEN, Qun; ZHANG, L. M. Three-dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated–unsaturated seepage theory. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 43, p. 449–461, 2006. DOI: 10.1139/T06-011.
- COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Ceará). *Relatório anual de segurança de barragens 2020*. Ceará, 2021. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/>. Acesso em: 15 maio de 2022.
- COSTA, W. D. *Geologia de Barragens*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto*. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 647p.
- DANTAS, Sulivan Pereira. *Acudagem no Nordeste brasileiro e no Ceará: estimativa de evaporação do Açude Castanhão em um ano seco*. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geografia, Fortaleza, 2017.
- DAS, B. M.. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson, 2007.
- FACCHINETTI, R. *Riscos associados ao projeto e a construção de barragens*. Salvador: Comitê Brasileiro de Barragens, 2010.
- FAOUZI, Elhousna et al. *Sensitivity analysis of CN using SCS-CN approach, rain gauges and TRMM satellite data assessment into HEC-HMS hydrological model in the upper basin of Oum Er Rbia, Morocco*. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 8, p. 4707–4729, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01404-8>. Acesso em: 12 fev. 2025.

FOSTER, M. et al. *The statistics of embankment dam failures and accidents*. NRC, Canadá, 2000.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.

GAIOTO, Nélio. *Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento*. São Paulo: EESC-USP, 2003.

GERMAIN, Alexandra et al. Hydrogeology of a complex Champlain Sea deposit (Quebec, Canada): implications for slope stability. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 58, p. 1611-1626, 2021. DOI: 10.1139/cgj-2020-0500. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2020-0500>. Acesso em 18 jun. 2024.

GOMES, F P.. *Curso de estatística experimental*. Piracicaba: Nobel, 1985 Disponível: <https://pt.scribd.com/document/385254016/Curso-De-Estatistica-Experimental-PIMENTEL-GOMES-pdf.1> Acesso em 4 fev. 2024.

HAIR, Joseph F. et al. *Análise multivariada de dados*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAZEWINKEL, Michiel. *Encyclopaedia of mathematics*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1990.

HE, Hanji; DENG, Guangming. Mean empirical likelihood inference for response mean with data missing at random. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2020, Article ID 8893594, 2020. DOI: 10.1155/2020/8893594. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ddns/2020/8893594/>. Acesso em 18 jun. 2024.

KACIMOV, A. R.; YAKIMOV, N. D.; ŠIMŮNEK, J. Phreatic seepage flow through an earth dam with an impeding strip. *Computational Geosciences*, v. 24, p. 17-35, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10596-019-09879-8>. Acesso em 18 jun. 2024.

KNOEDEL, P. et al. *Earth Manual Part 1. US Department of the Interior-Bureau of Reclamation*, Denver, 1998.

KUMAR, Nirmal; SINGH, Sudhir Kumar; SRIVASTAVA, Prashant K.; NARSIMLU, Boini. SWAT Model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction of the Tons River Basin, India, using Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) algorithm. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 3, p. 1-13, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-018-0474-5>. Acesso em 18 de jun. 2024.

LOPES, Maísa de Calda et al. Modelagem computacional do fluxo de percolação em barragem de terra: um comparativo entre modelo 2D e 3D. *Revista de Geociências do Nordeste*, Caicó,

v. 10, n. 1, p. 72-92, jan.-jun. 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/34833/18372>. Acesso em 13 de jun. 2024.

LÓPES, Norma Patricia; PROMOTOR, José Alfredo Mendoza. Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow-Slope Stability. *In*: [Nome dos editores do livro ou organizadores]. [Título do livro], [edição]. [Local de publicação]: [Editora], 2016. cap. 8. DOI: 10.5772/63903. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/63903>. Acesso em 13 de jun. 2024.

MASOOD, Muhammad et al. Evaluation of Satellite Precipitation Products for Estimation of Floods in Data-Scarce Environment. *Advances in Meteorology*, v. 2023, Article ID 1685720, 2023. DOI: 10.1155/2023/1685720. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2023/1685720>. Acesso em 18 de jun. 2024.

MCDONALD, M.G. E.; HARBAUGH, A.W.. A Modular three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model. *In*: *USGS Techniques of Water Resources Investigations*. Washington - Estados Unidos: USGS, 1988, v.6. cap.4.

MOREIRA, Aniele Lacerda; SANTOS, Isabella Christine de Paula; AZEVEDO, Ilana Borges de. Análises de Estabilidade de Taludes e de Percolação em Uma Barragem de Terra Homogênea Sob a Perspectiva de Segurança de Barragens. *In*: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 20., 2020, Campinas. Anais... Campinas: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://proceedings.science/p/149907?lang=pt-br>. Acesso em 13 de jun. 2024.

MULETA, Misgana K. Model Performance Sensitivity to Objective Function during Automated Calibrations. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 6, p. 756-767, jun. 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.000047](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000047). Acesso em: 18 jun. 2024.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282-290, 1970. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NAZARI, Saeed; ZAMANI, Mahdi; MOSHIZI, Sajad A. Comparison between two-dimensional and three-dimensional computational fluid dynamics techniques for two straight-bladed vertical-axis wind turbines in inline arrangement. *Wind Engineering*, v. 1, n. 18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309524X18780384>.

OKHLI, Kheirolah; NOOGHABI, Mehdi Jabbari. *On the three-component mixture of exponential distributions: A Bayesian framework to model data with multiple lower and upper outliers*. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 208, p. 480-500, 2023. ISSN 0378-4754. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.01.037>. Acesso em 18 de jun. 2024.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. *Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra*. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2008.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. *Las Máquinas Agrícolas y su Aplicación*. 6.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2003, 528p.

PAUL, Manashi; NEGAHBAN-AZAR, Masoud. Sensitivity and uncertainty analysis for streamflow prediction using multiple optimization algorithms and objective functions: San

Joaquin Watershed, California. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 4, p. 1509-1525, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0483-4>. Acesso em 13 de jun. 2024.

PERINI, Daniel Sosti. *Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2009.

PIMENTA, Rafael Colombo et al. Estado da arte sobre traçadores aplicados na avaliação de fugas de água em barragens. *Periódico Tchê Química*, v. 16, n. 31, p. 571-579, 2019.

PINTO, Carlos de Sousa. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROCHA, Othon José et al. Modelagem CFD-3D aplicada ao setor de mineração. In: XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2023, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2023. Disponível em: <http://cbdb.org.br/evento/dams-week-2023?lang=pt-BR>. Acesso em 21 maio 2024.

RODRIGUES JUNIOR, Aduari Silveira et al. Uma análise da história das barragens de rejeitos e das catástrofes de Brumadinho e Mariana. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação - REASE*, São Paulo, v. 9, n. 11, nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i11.12311>.

SCHOBER, Patrick; BOER, Christa; SCHWARTE, Lothar A. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, v. 126, n. 5, p. 1763-1768, maio 2018. DOI: 10.1213/ANE.0000000000002864.

CEARÁ, Secretaria de Recursos Hídricos: *Açude Olho D'água Várzea-Alegre-Ce: projeto executivo – relatório geral*. Tomo I, 1988a.

CEARÁ, Secretaria de Recursos Hídricos: *Açude Olho D'água Várzea-Alegre-Ce: projeto executivo – relatório geológico e geotécnico*. Tomo II, 1988b.

CEARÁ, Secretaria de Recursos Hídricos: *Açude Olho D'água Várzea-Alegre-Ce: projeto executivo - plantas*. Tomo V, 1988c.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph Brazelton; DE COSTA NUNES, Antonio Jose; DE LOURDES CAMPOS CAMPELLO, Maria. *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. São Paulo: Ao Livro Técnico, 1962.

VALADARES, Fabrício Geraldo; AQUINO, André Luiz Lins de; PEREIRA JUNIOR, Álvaro Rodrigues. Detecção de outliers multivariados em redes de sensores. In: Congresso Latino-Americano de Investigación Operativa, 2012, Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro: Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. p. 1350-1361.

VIDAL, G. H. P. *Análise do fluxo de água no maciço e na fundação da barragem olho d'água, Várzea Alegre-CE*. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, 2022.

WITTE, Robert S.; WITTE, John S. *Statistics*. 11ª ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

**APÊNDICE A – Decomposição das séries temporal**

Figura A1 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA121

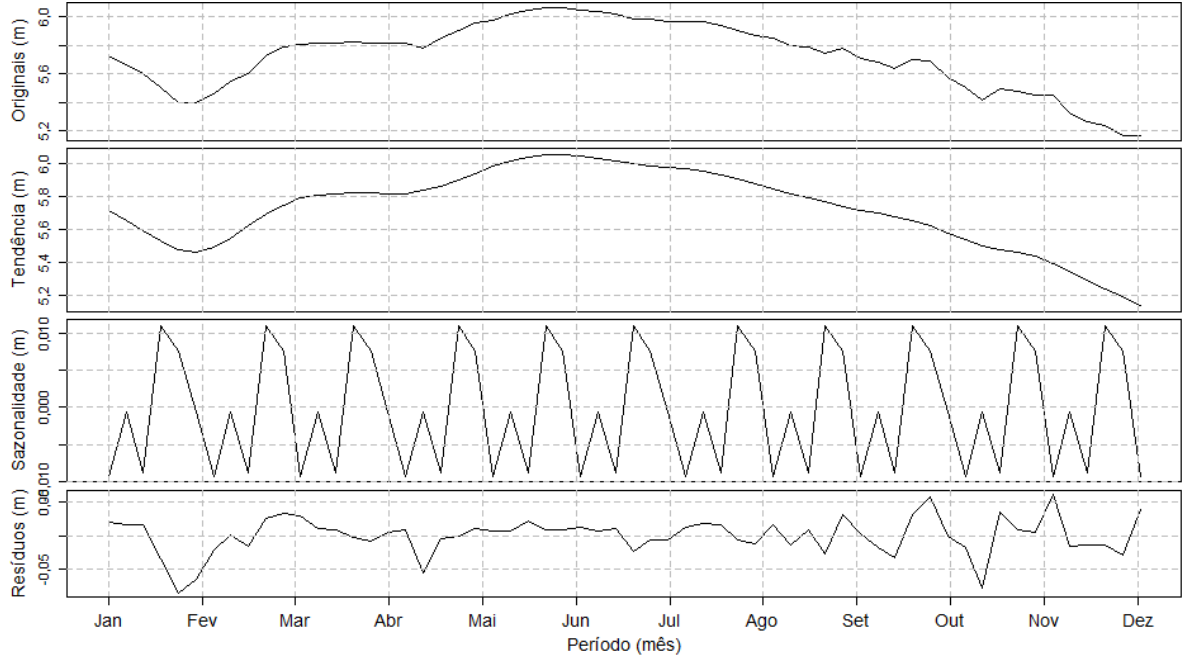


Figura A2 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA211

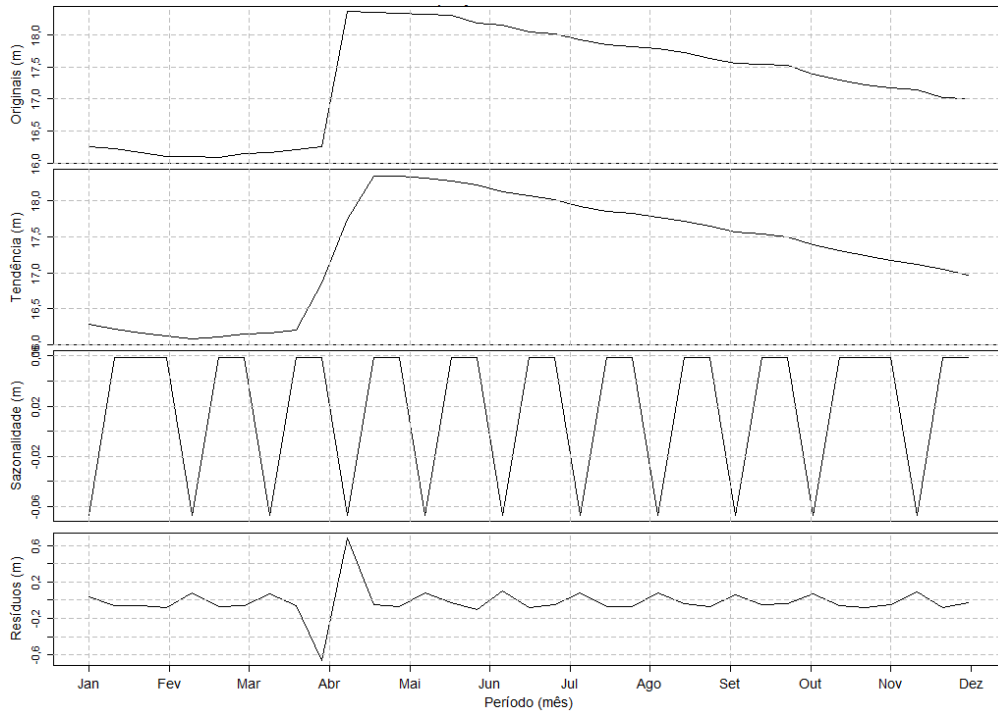


Figura A3 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA221

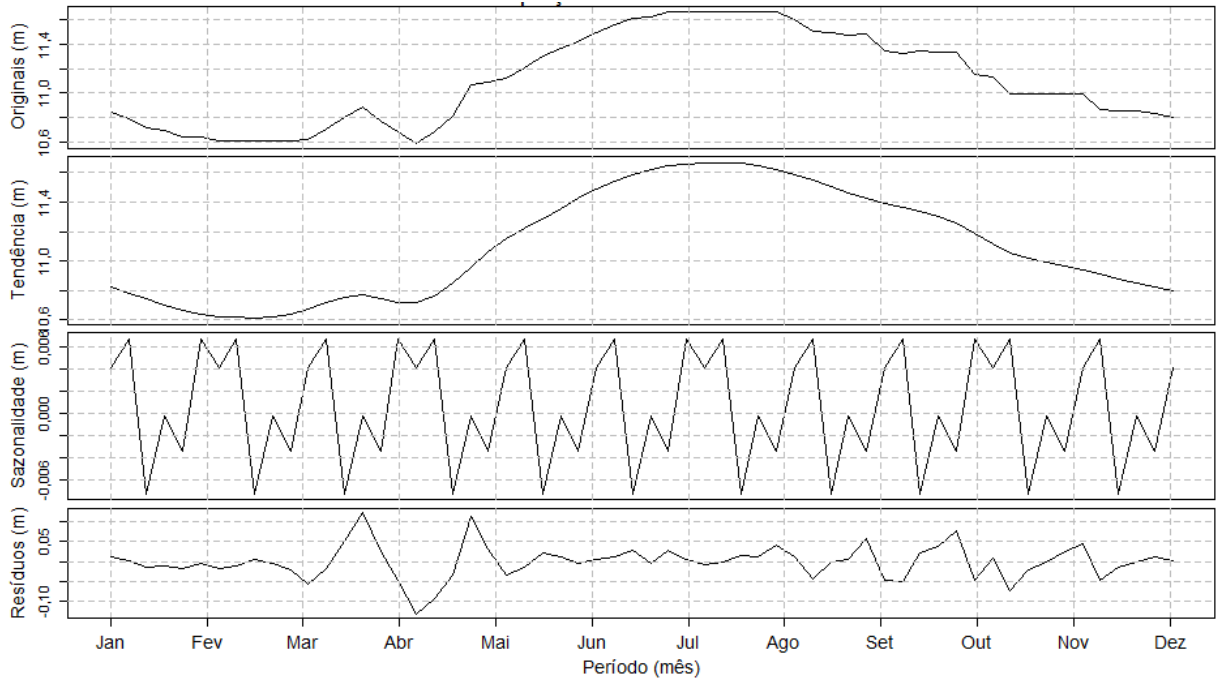


Figura A4 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA311

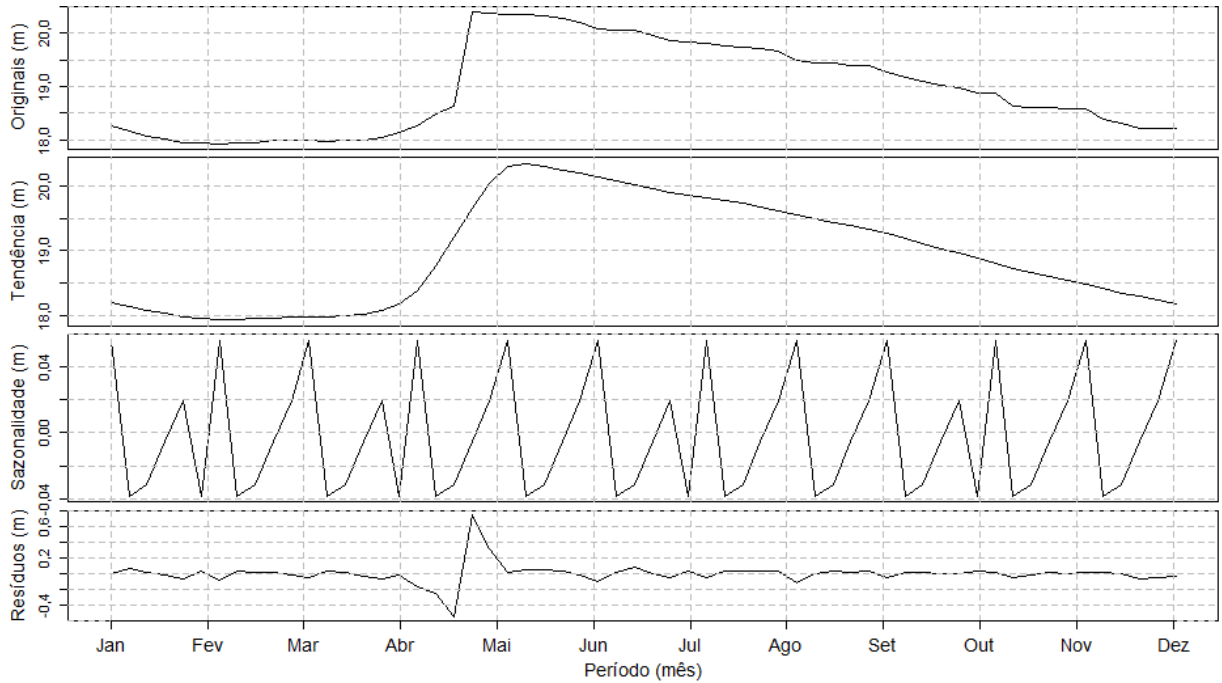


Figura A5 - Decomposição da série temporal referente às leituras do NA321

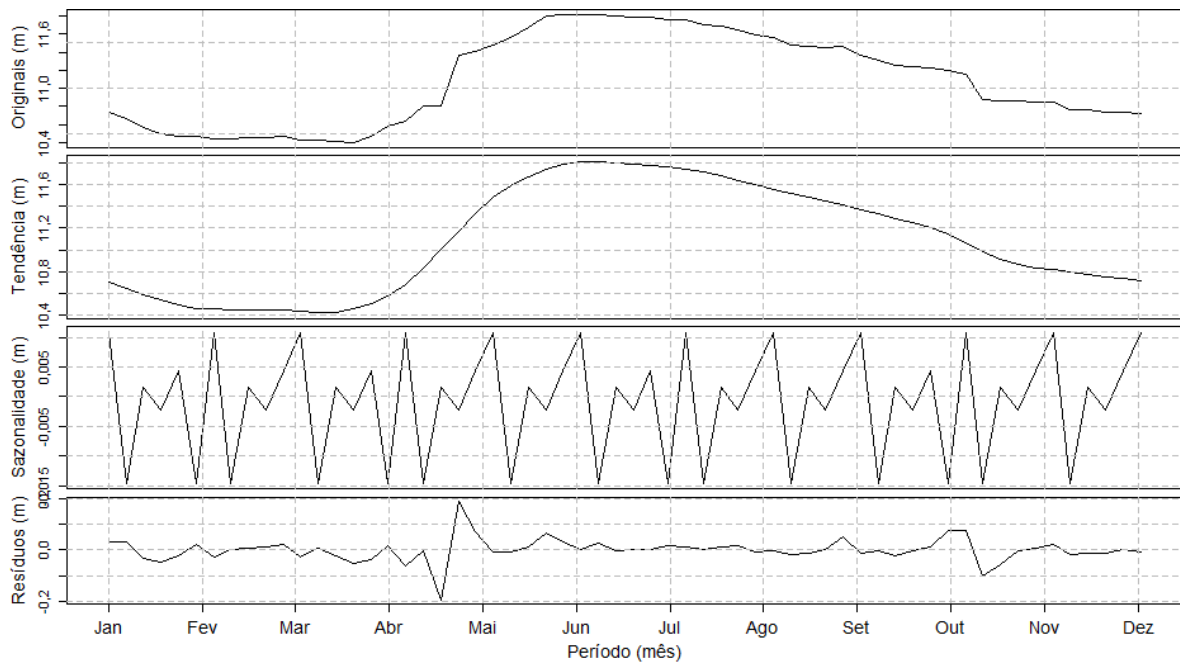


Figura A6 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ121

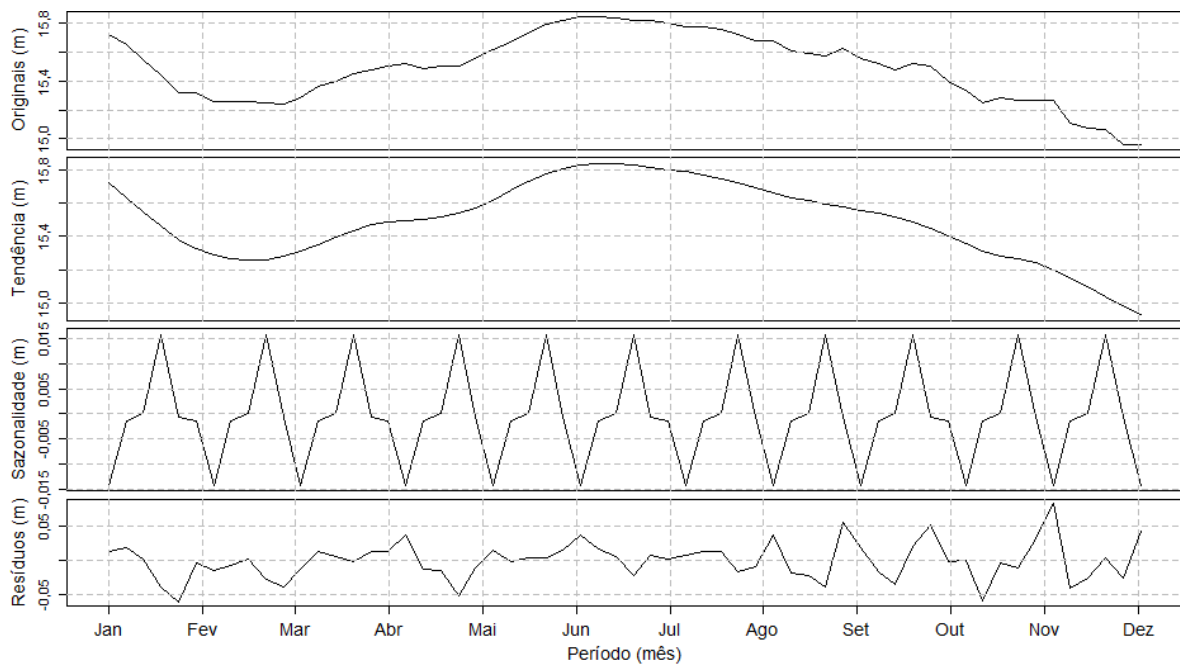


Figura A7 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ141

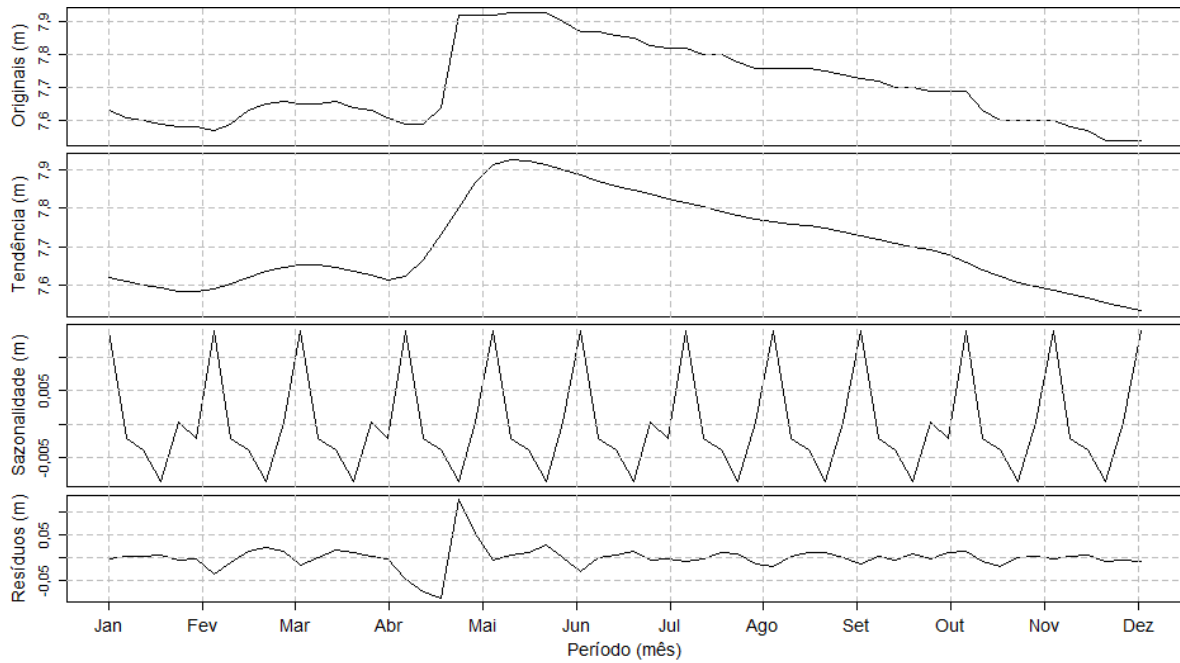


Figura A8 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ151

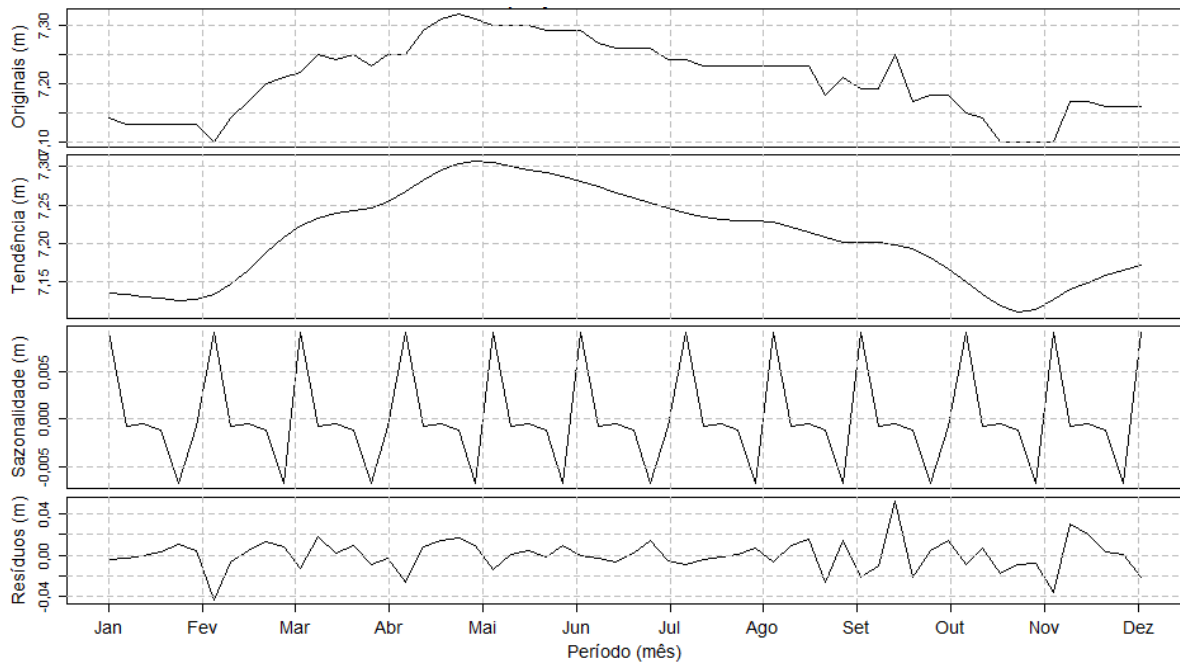


Figura A9 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ161

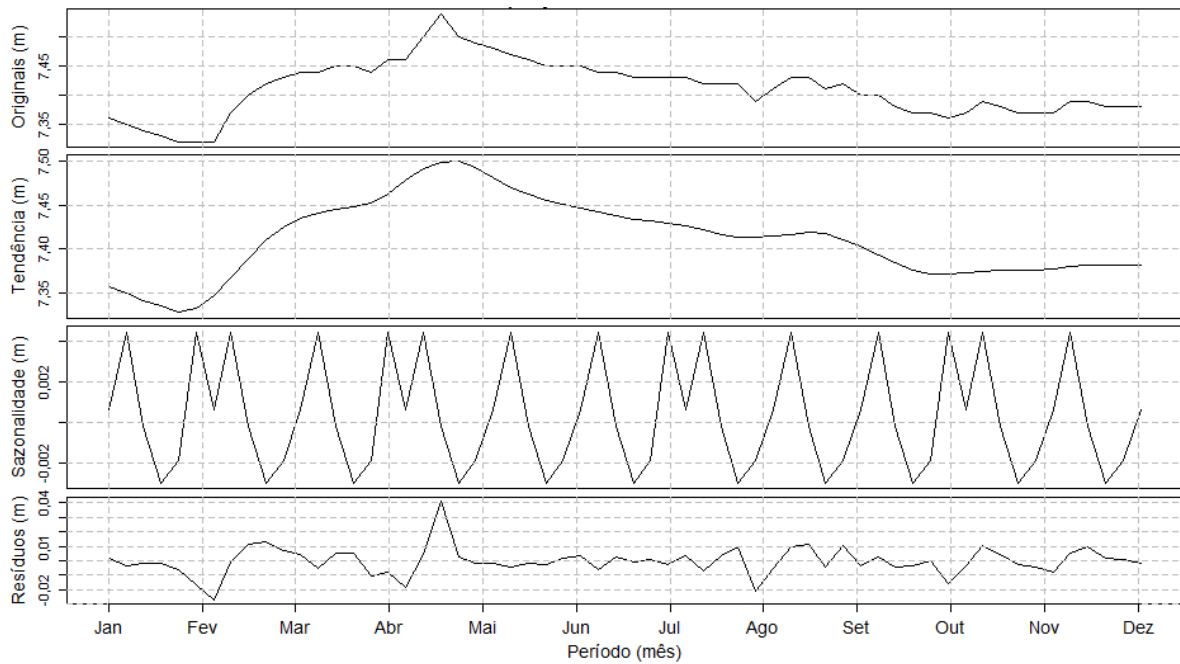


Figura A10 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ221

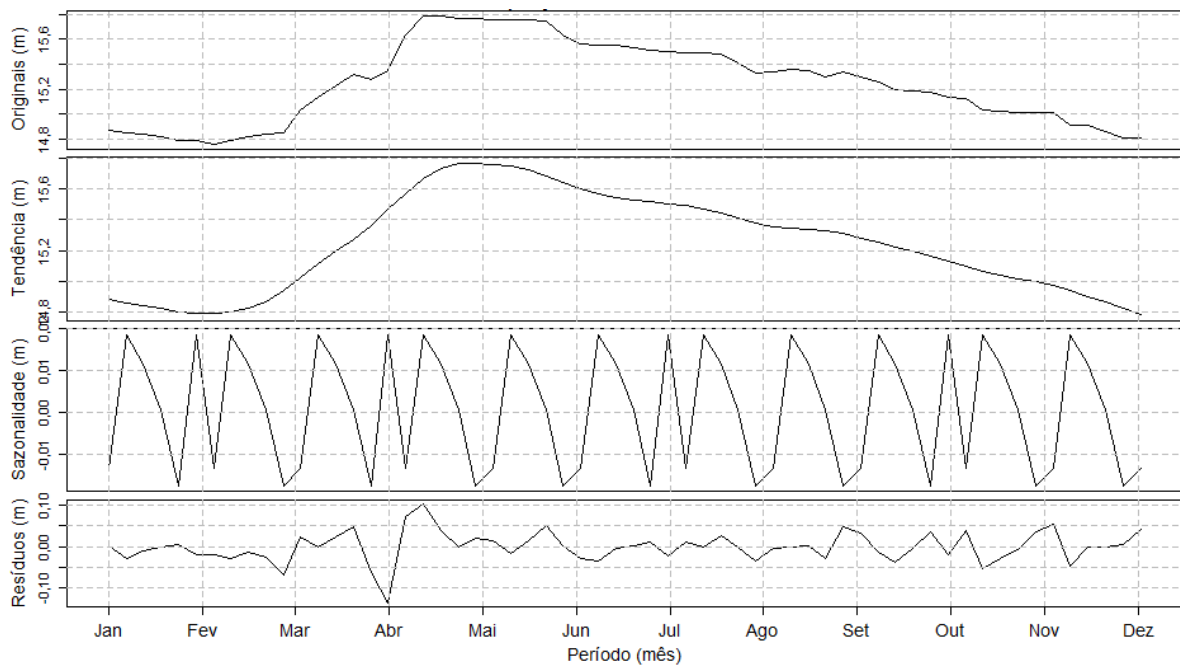


Figura A11 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ231

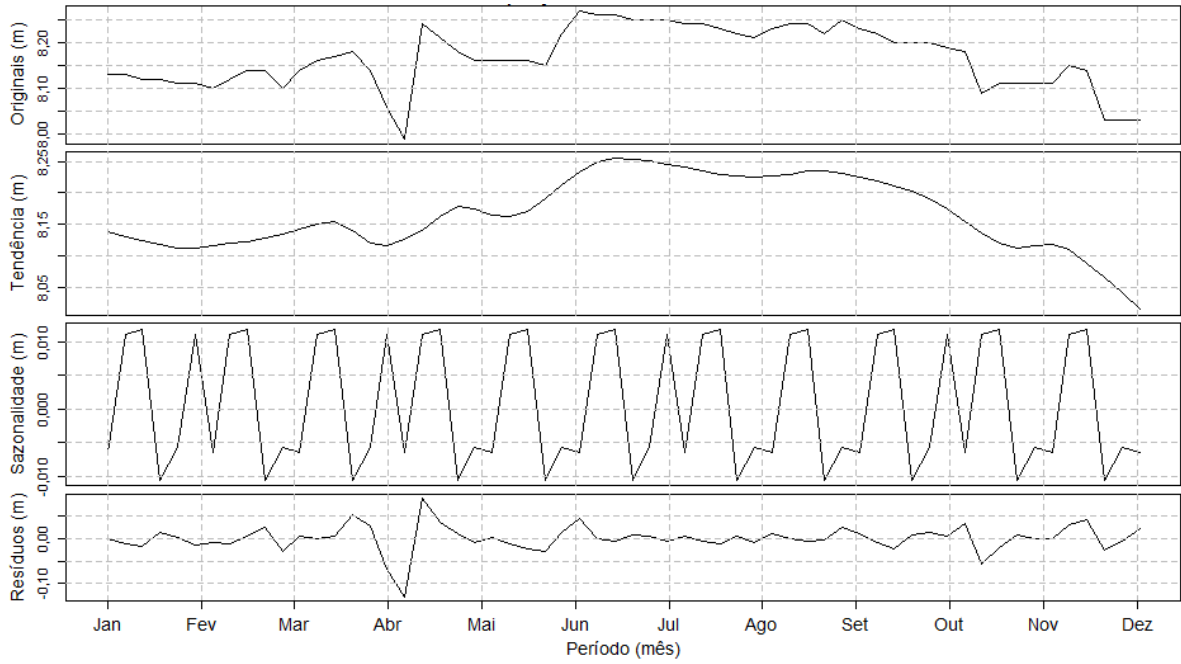


Figura A12 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ241

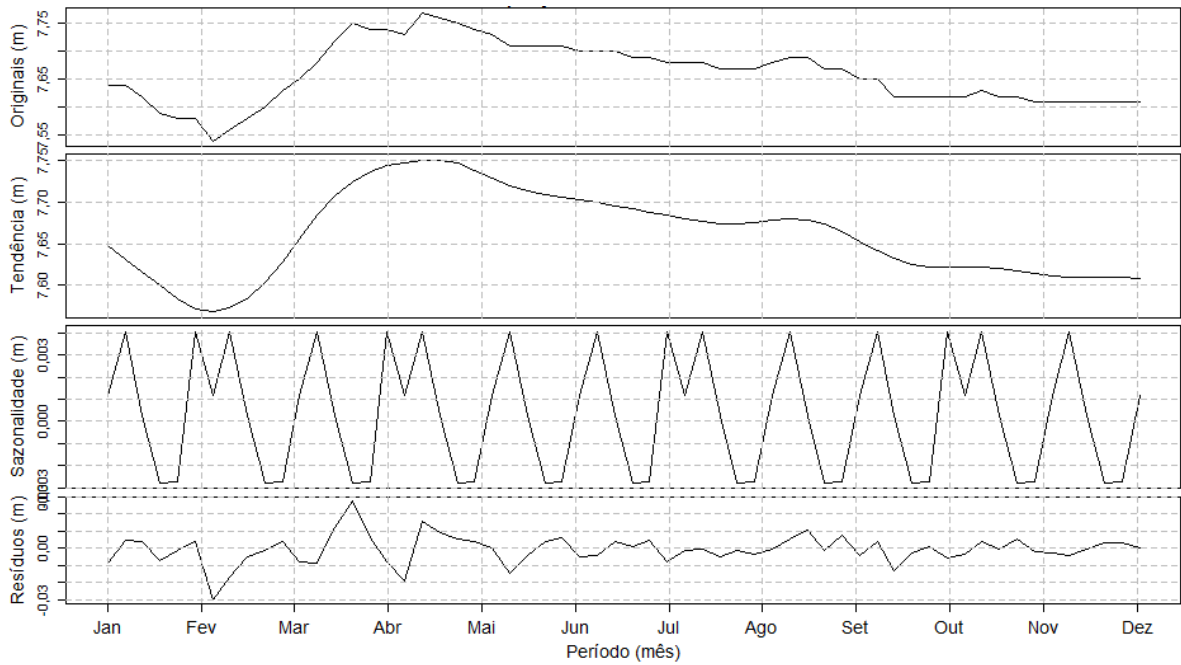


Figura A13 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ311

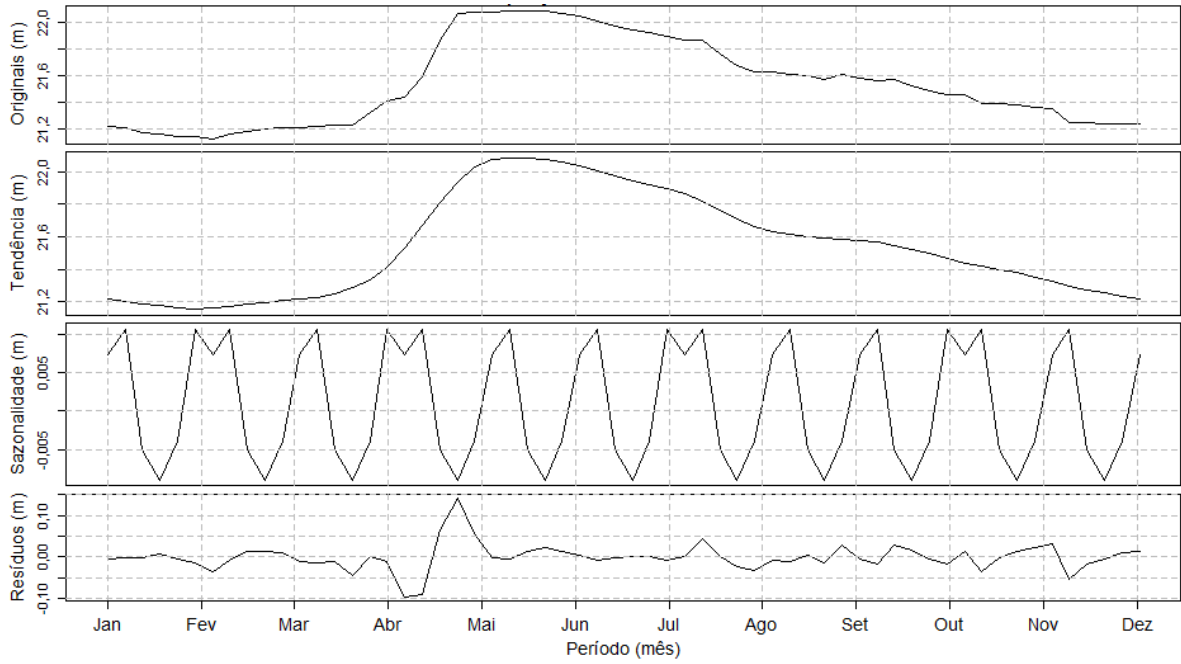


Figura A14 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ321

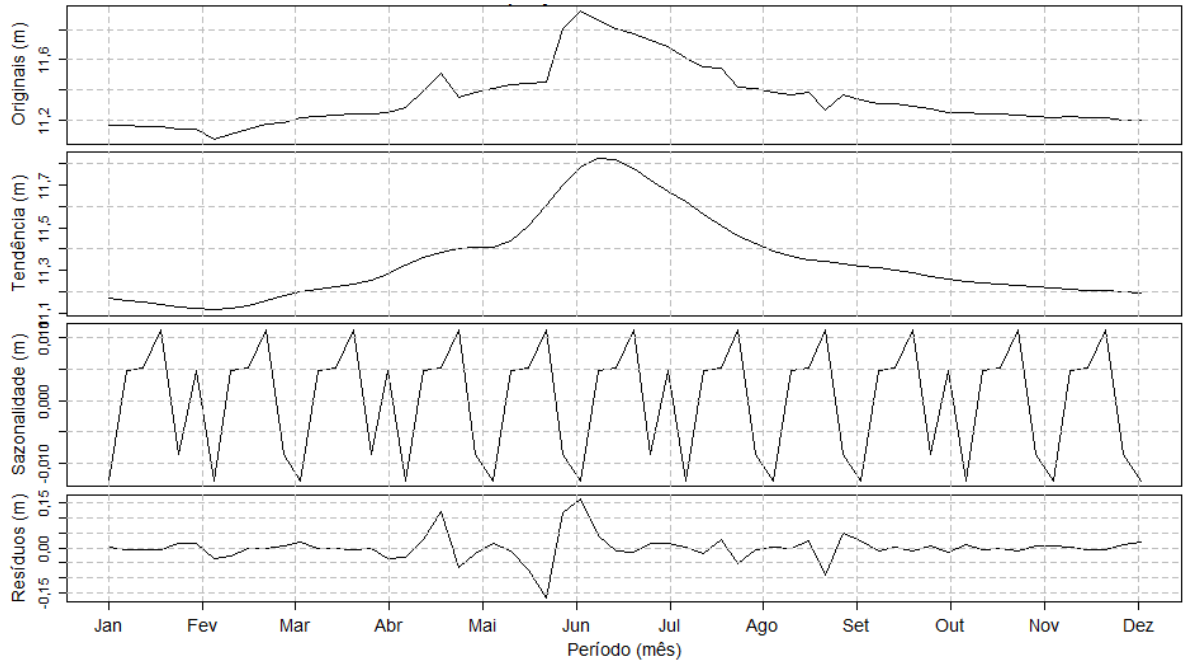
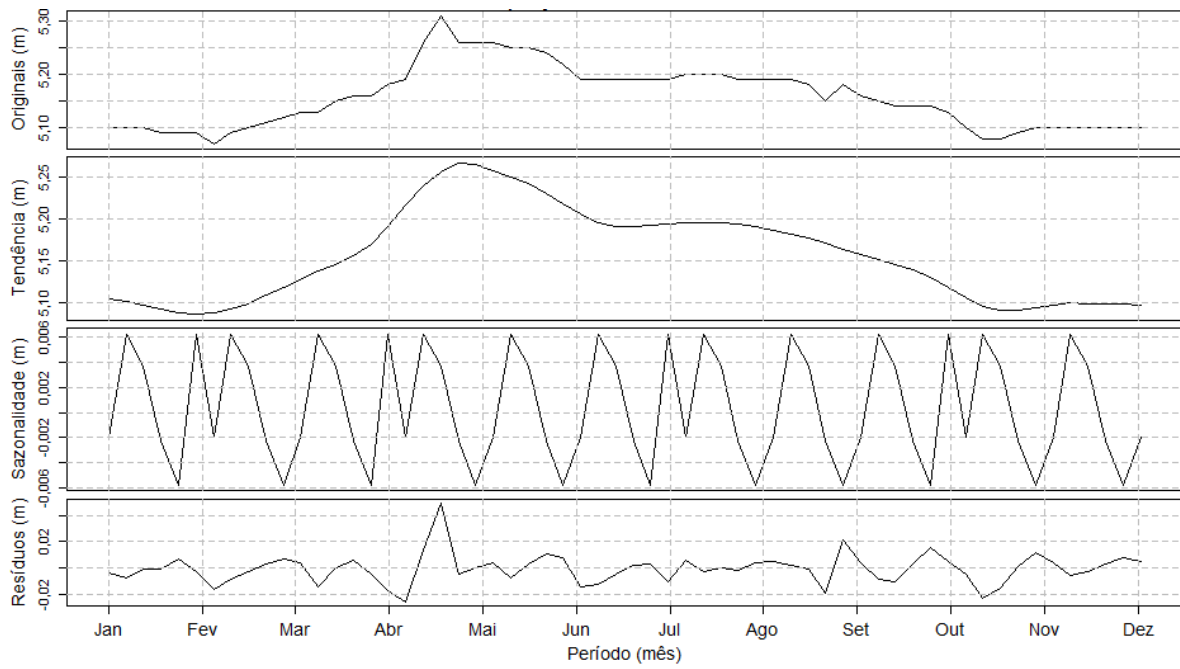


Figura A15 - Decomposição da série temporal referente às leituras do PZ341



## APÊNDICE B – *Outliers* identificados

Figura B1 - *Outliers* identificados do instrumento NA111

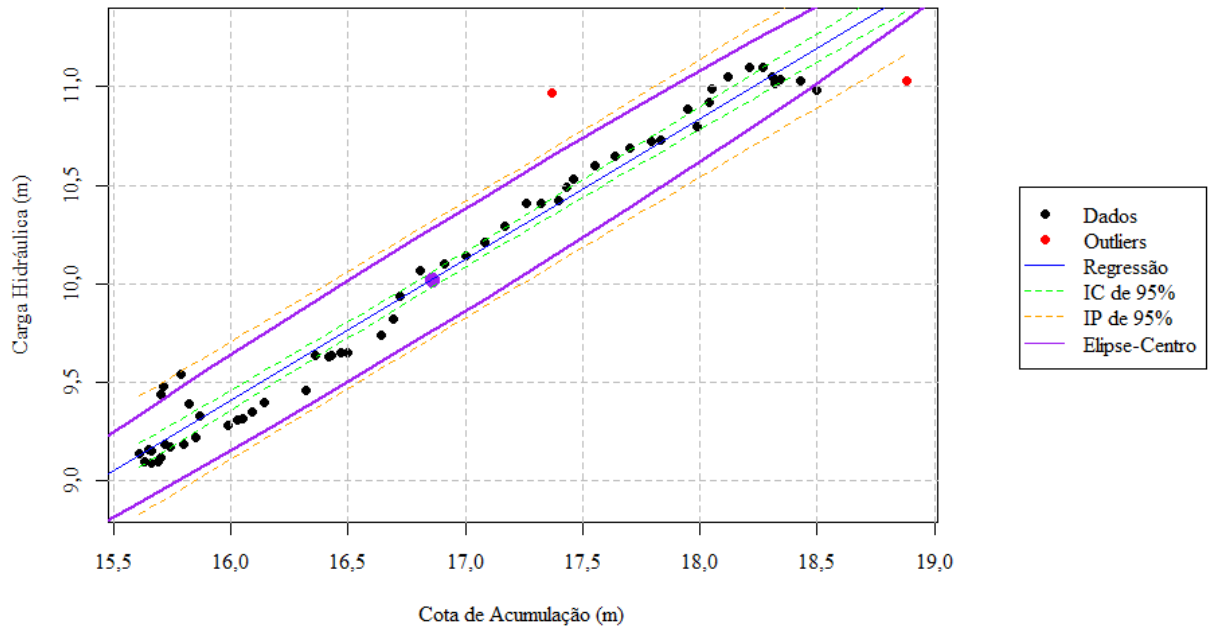


Figura B2 - *Outliers* identificados do instrumento NA121

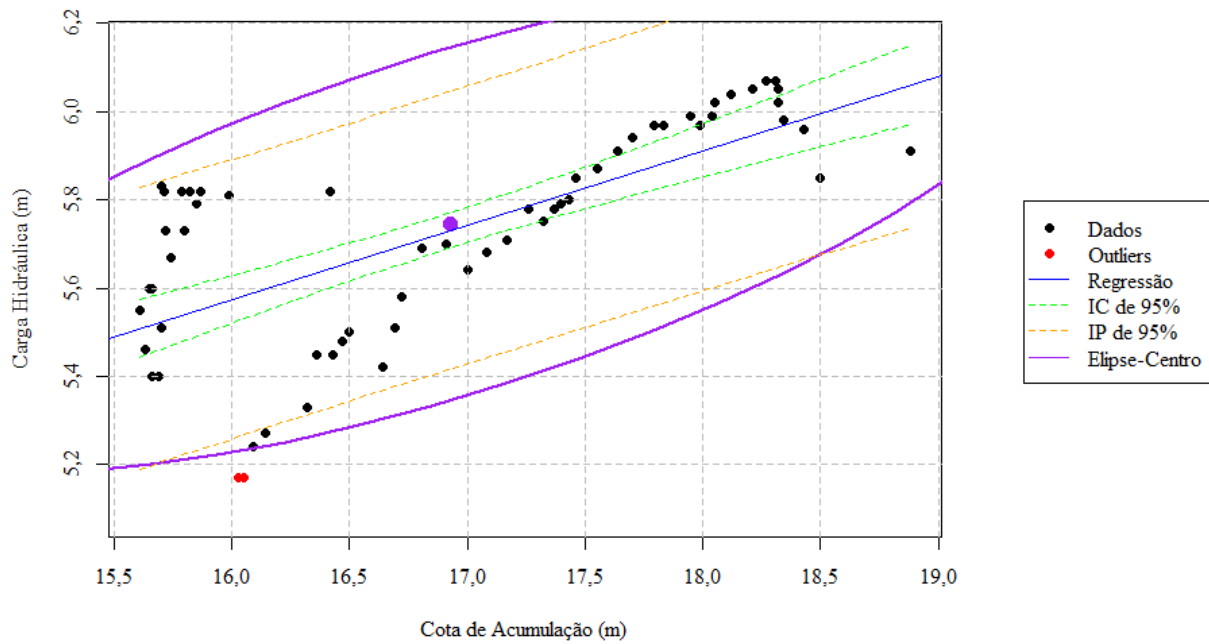


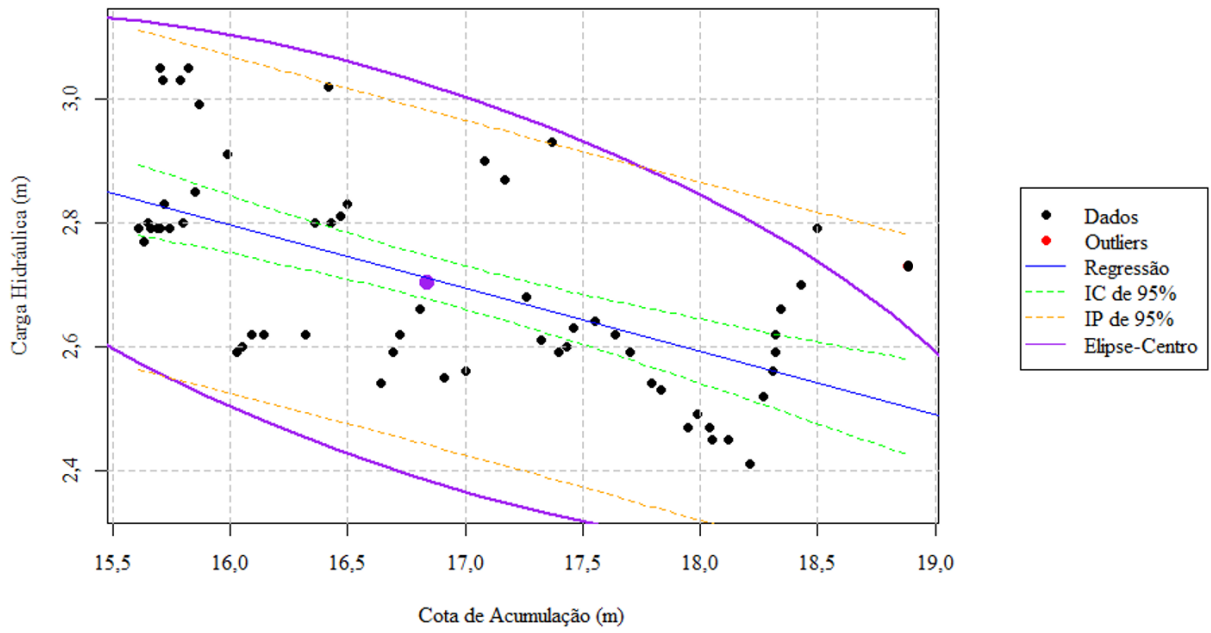
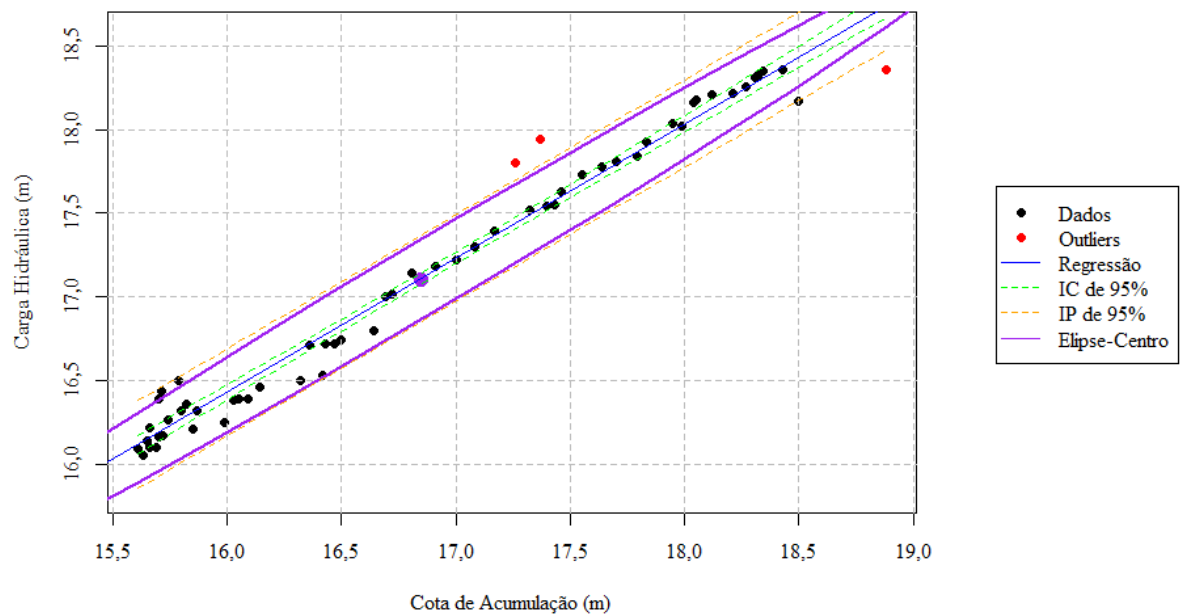
Figura B3 - *Outliers* identificados do instrumento NA131Figura B4 - *Outliers* identificados do instrumento NA211

Figura B5 - *Outliers* identificados do instrumento NA221

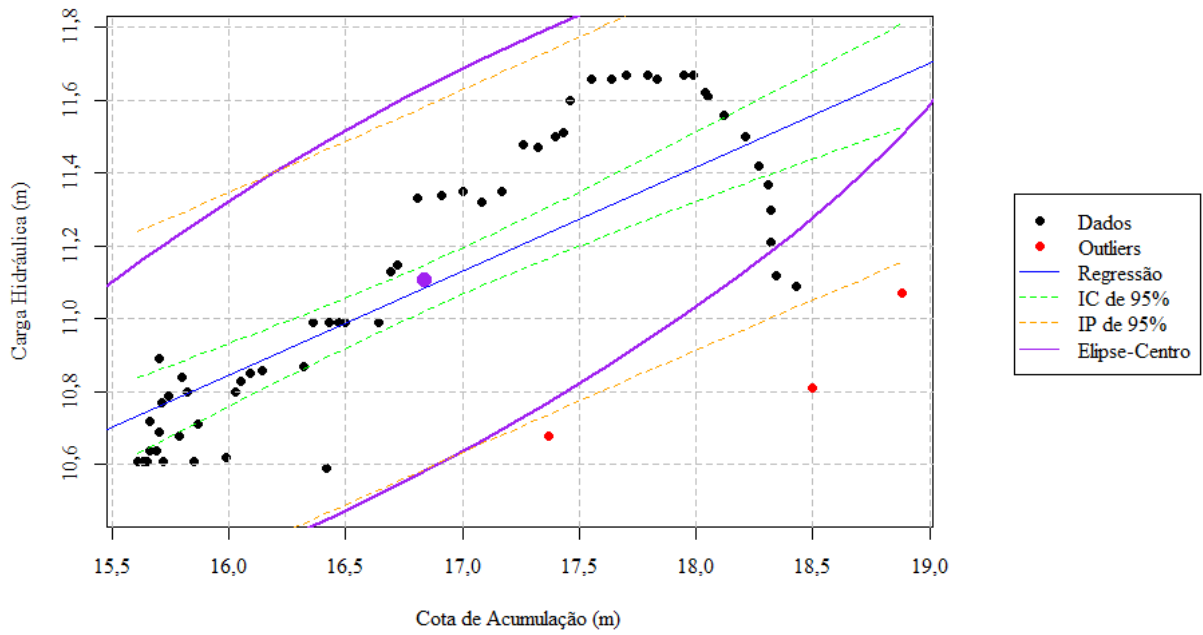


Figura B6 - *Outliers* identificados do instrumento NA231

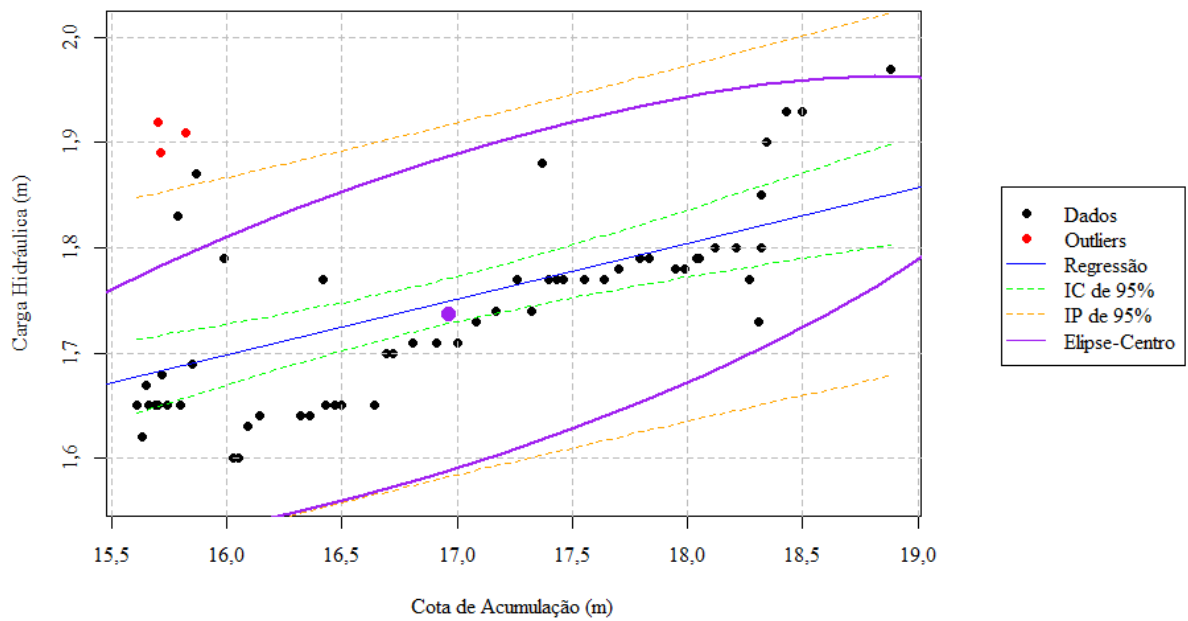


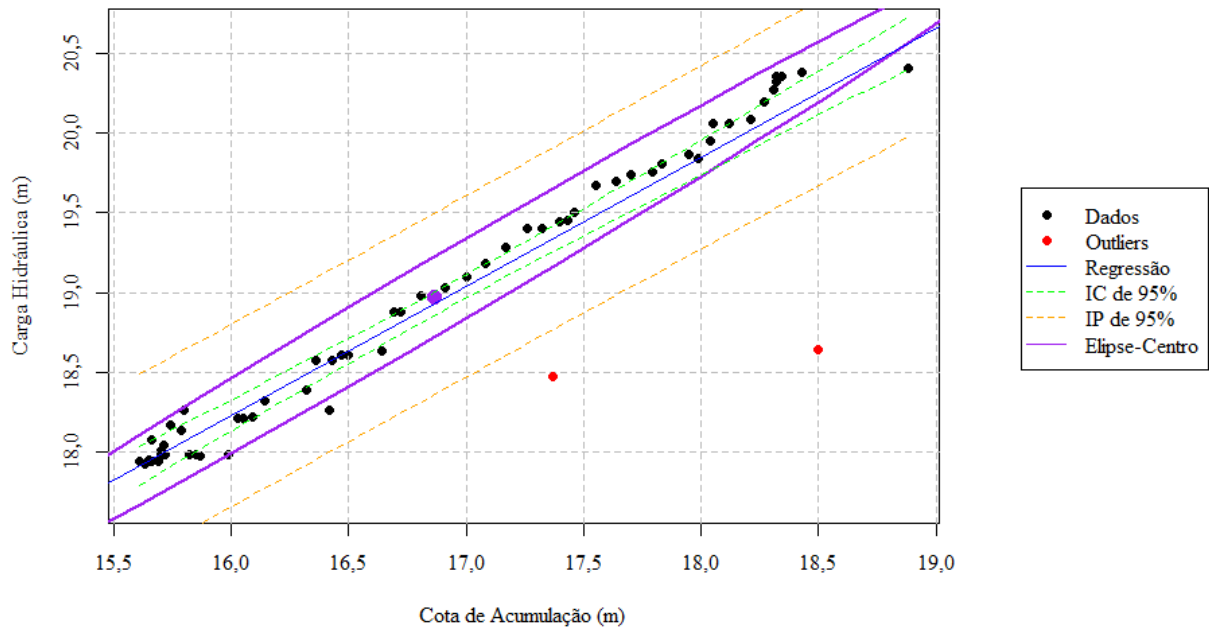
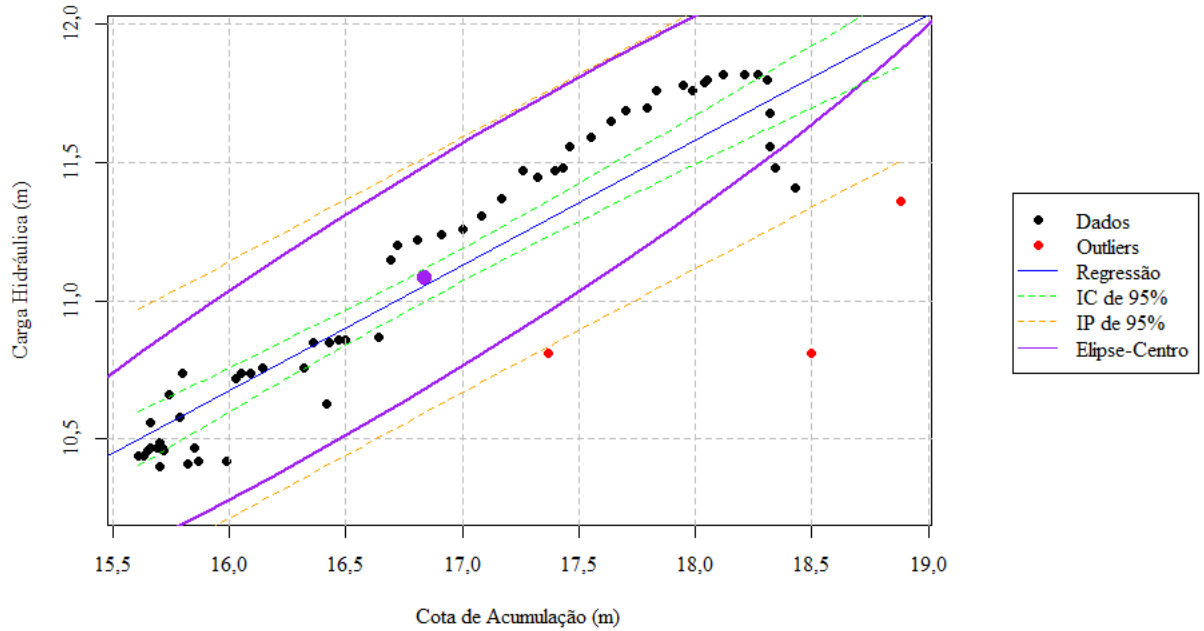
Figura B7 - *Outliers* identificados do instrumento NA311Figura B8 - *Outliers* identificados do instrumento NA321

Figura B9 - *Outliers* identificados do instrumento NA331

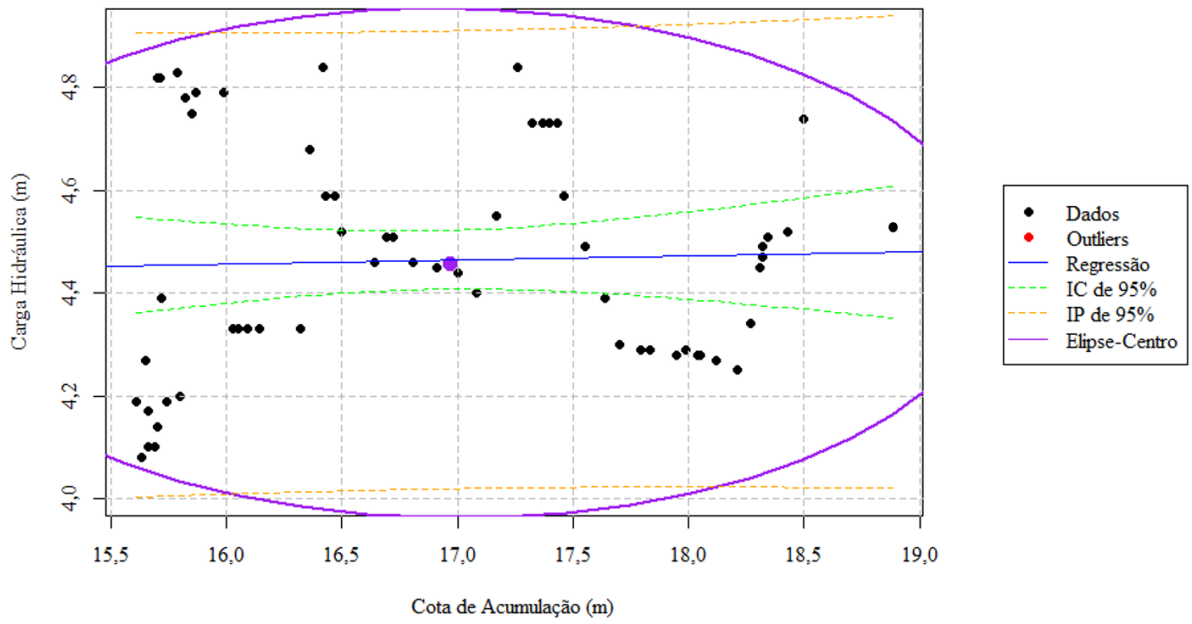


Figura B10 - *Outliers* identificados do instrumento PZ111

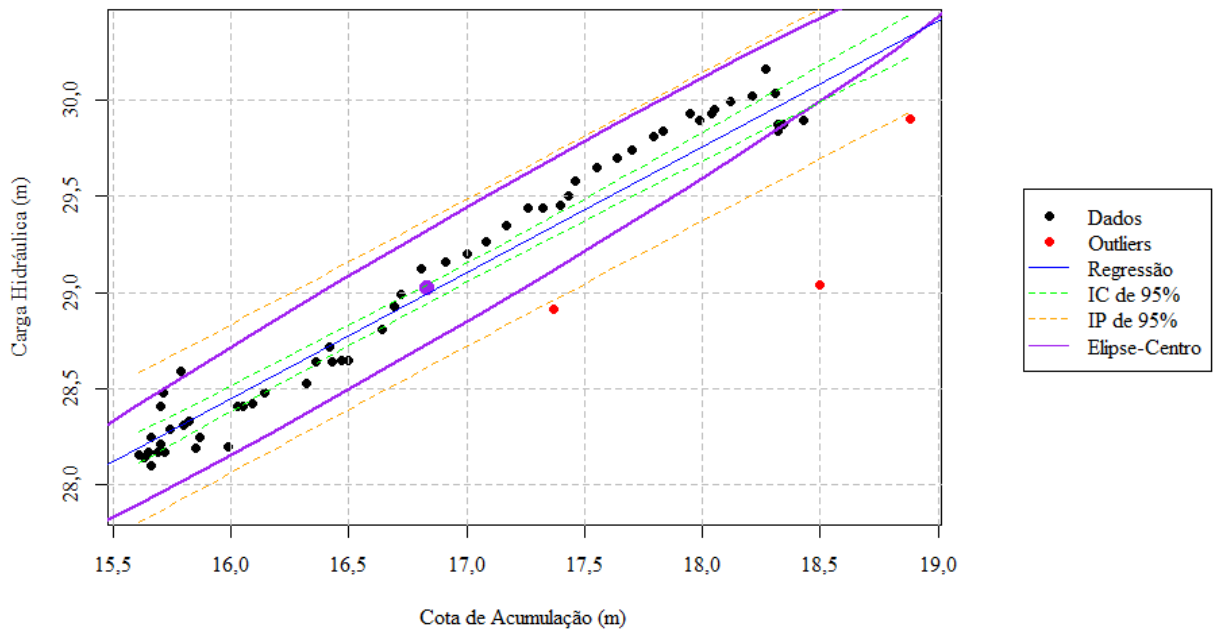


Figura B11 - *Outliers* identificados do instrumento PZ121

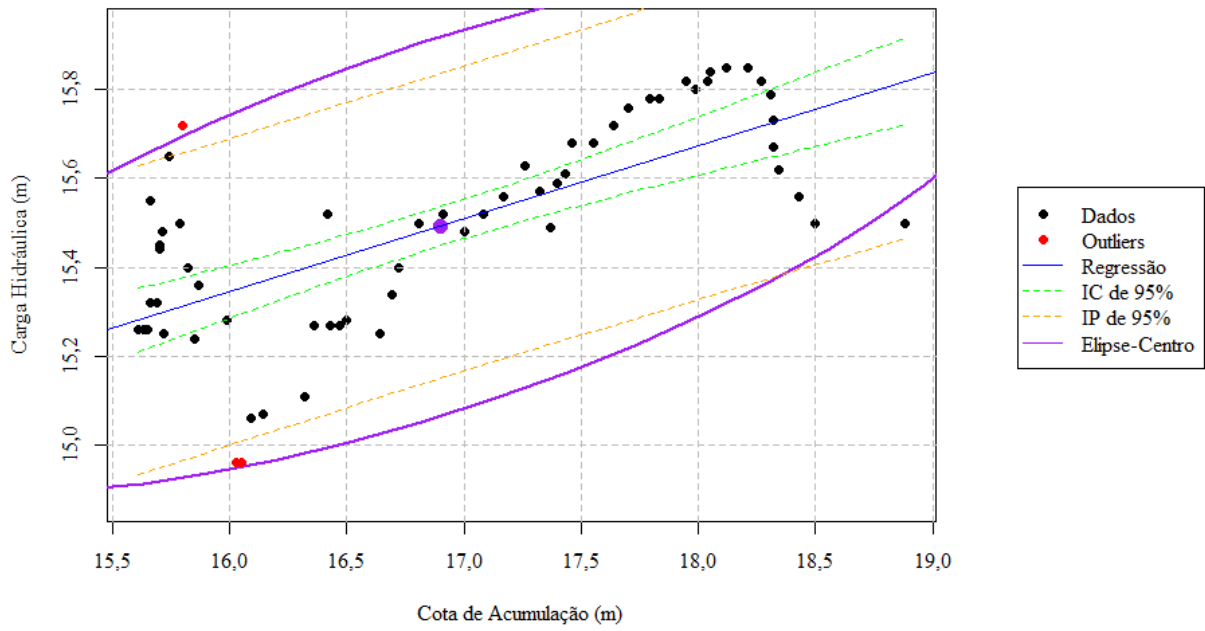


Figura B12 - *Outliers* identificados do instrumento PZ131

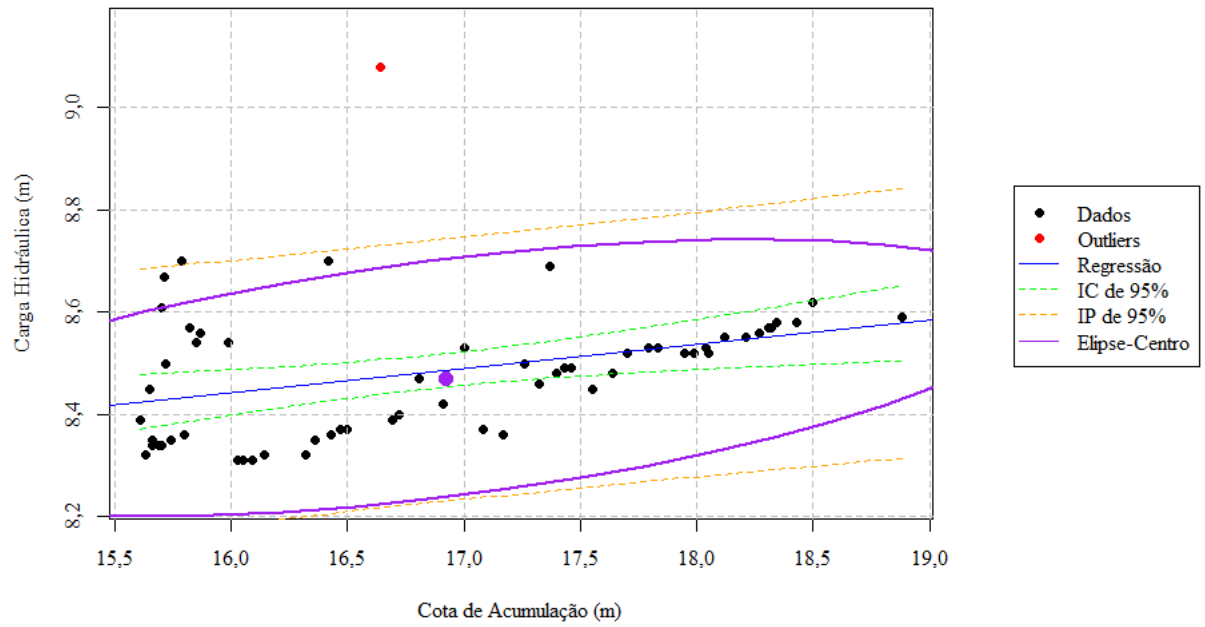


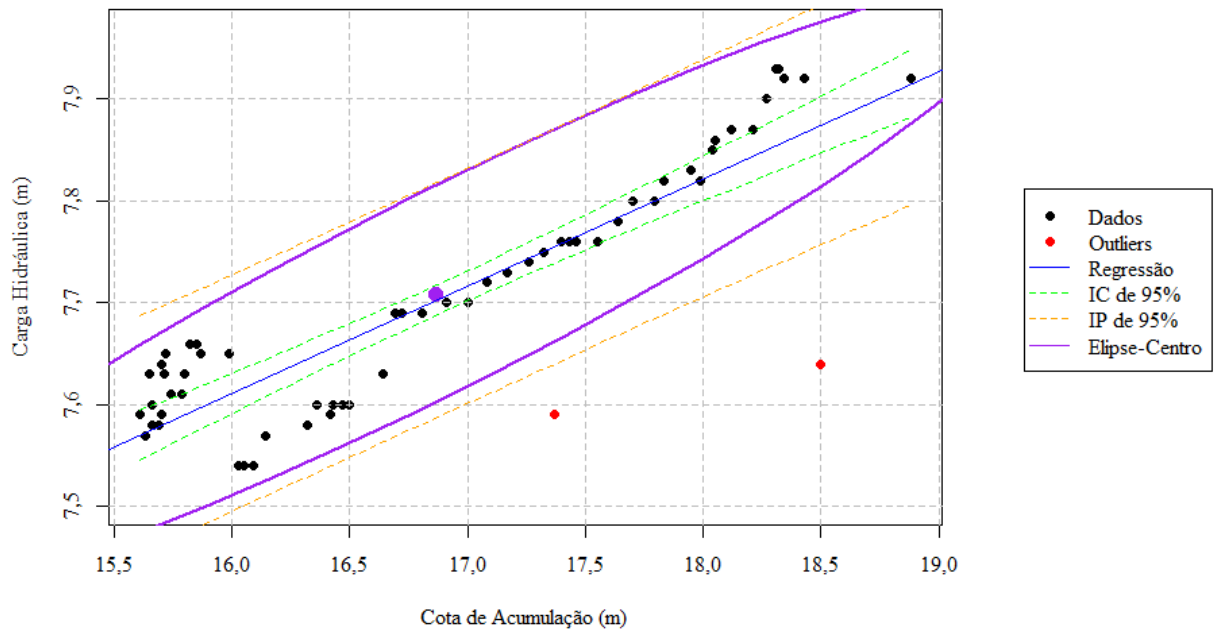
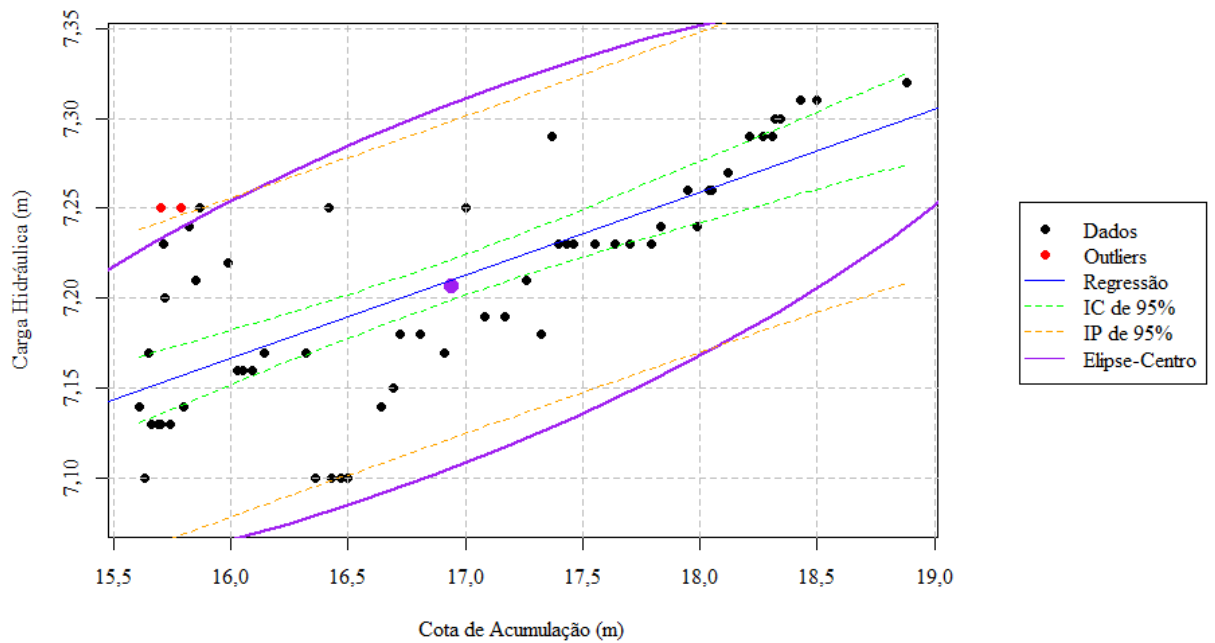
Figura B13 - *Outliers* identificados do instrumento PZ141Figura B14 - *Outliers* identificados do instrumento PZ151

Figura B15 - *Outliers* identificados do instrumento PZ161

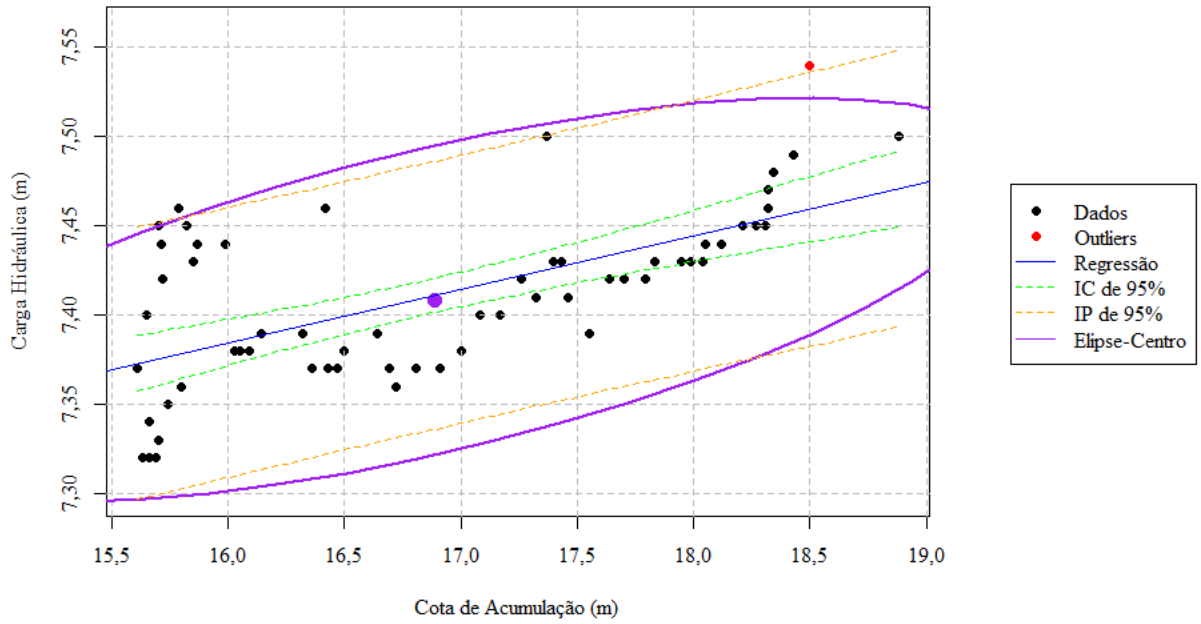


Figura B16 - *Outliers* identificados do instrumento PZ211

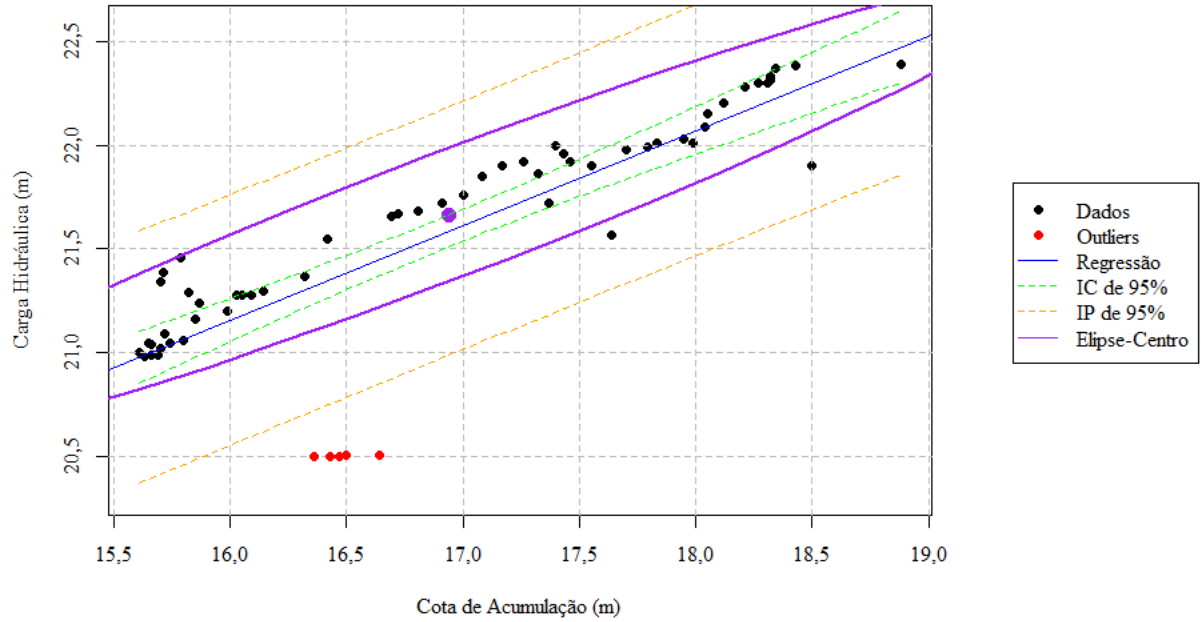


Figura B17 - *Outliers* identificados do instrumento PZ231

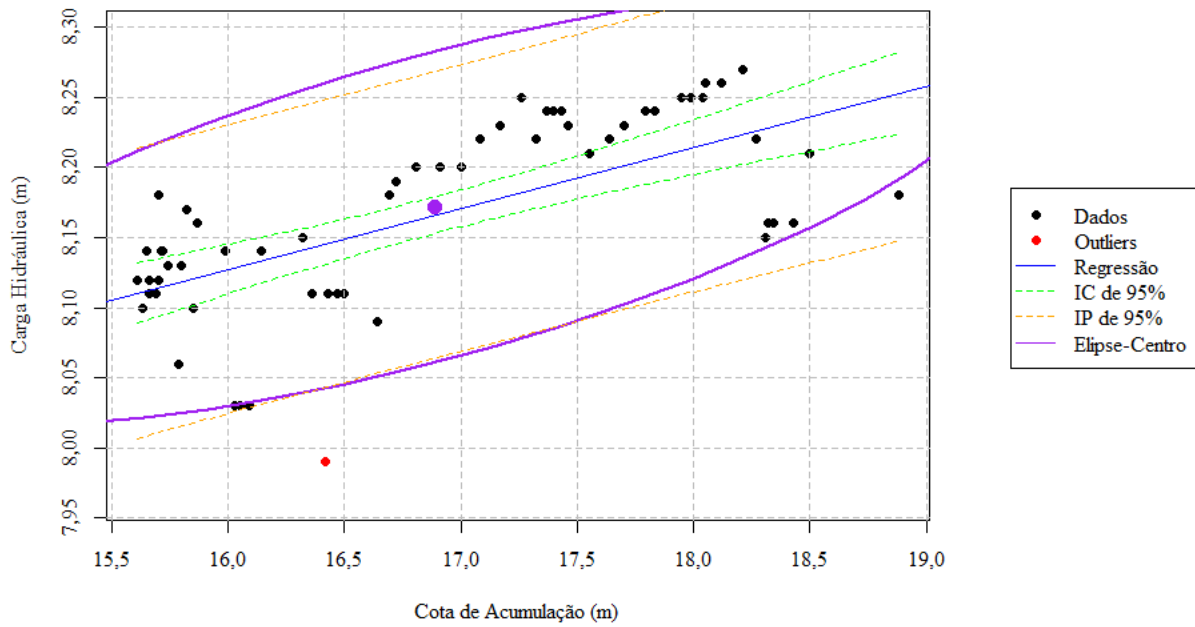


Figura B18 - *Outliers* identificados do instrumento PZ241

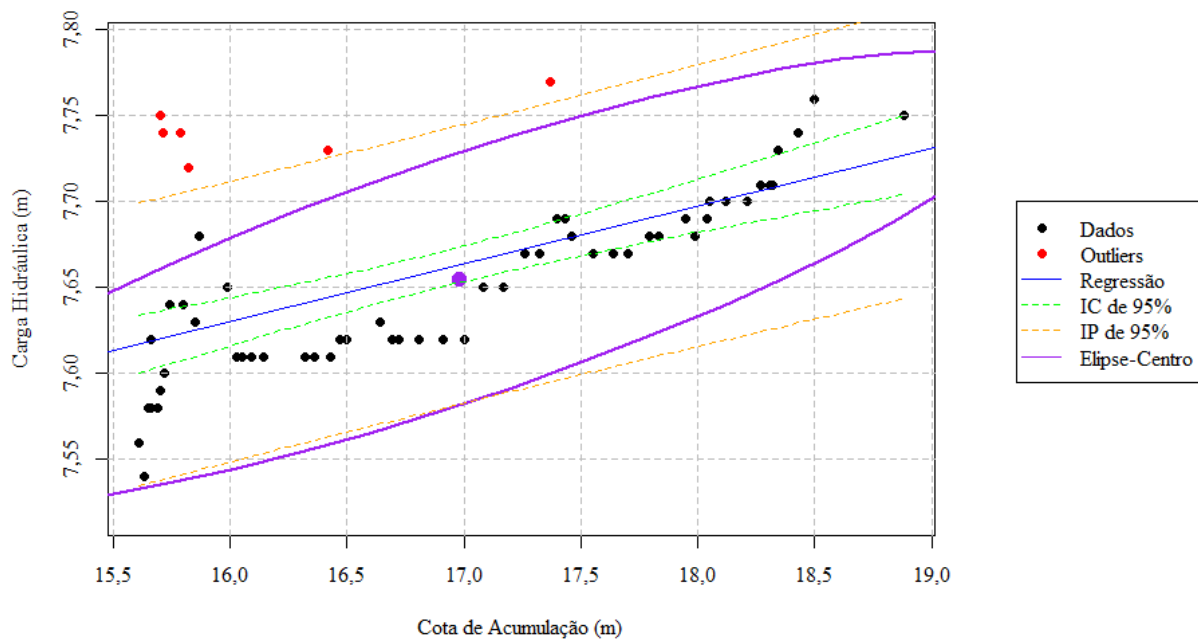


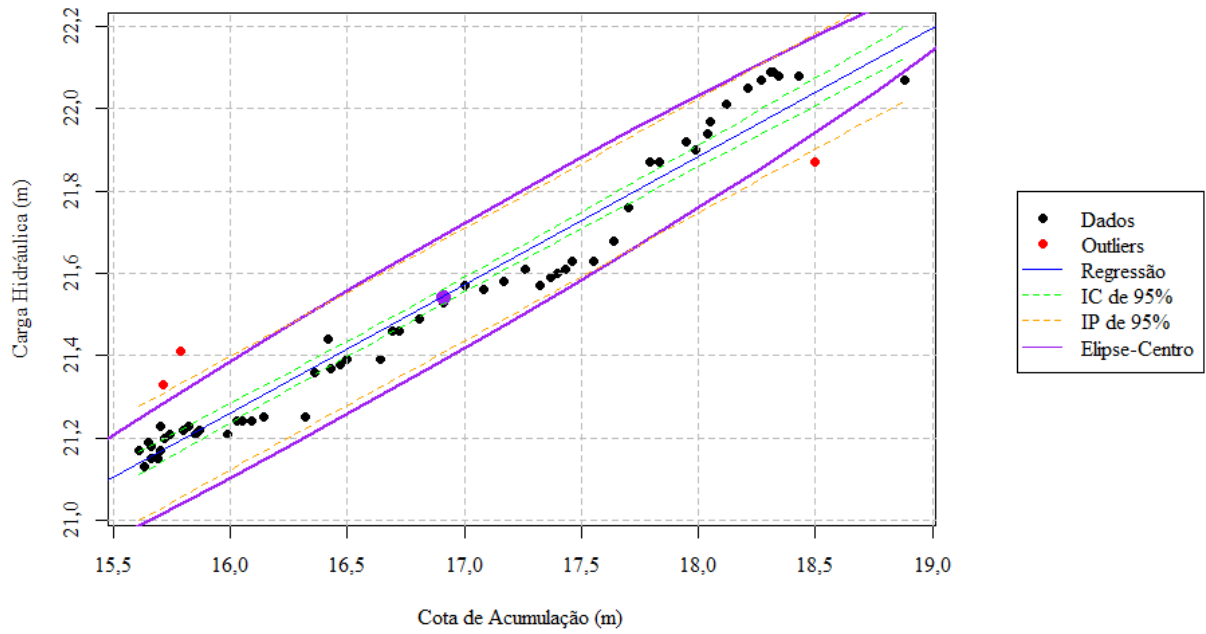
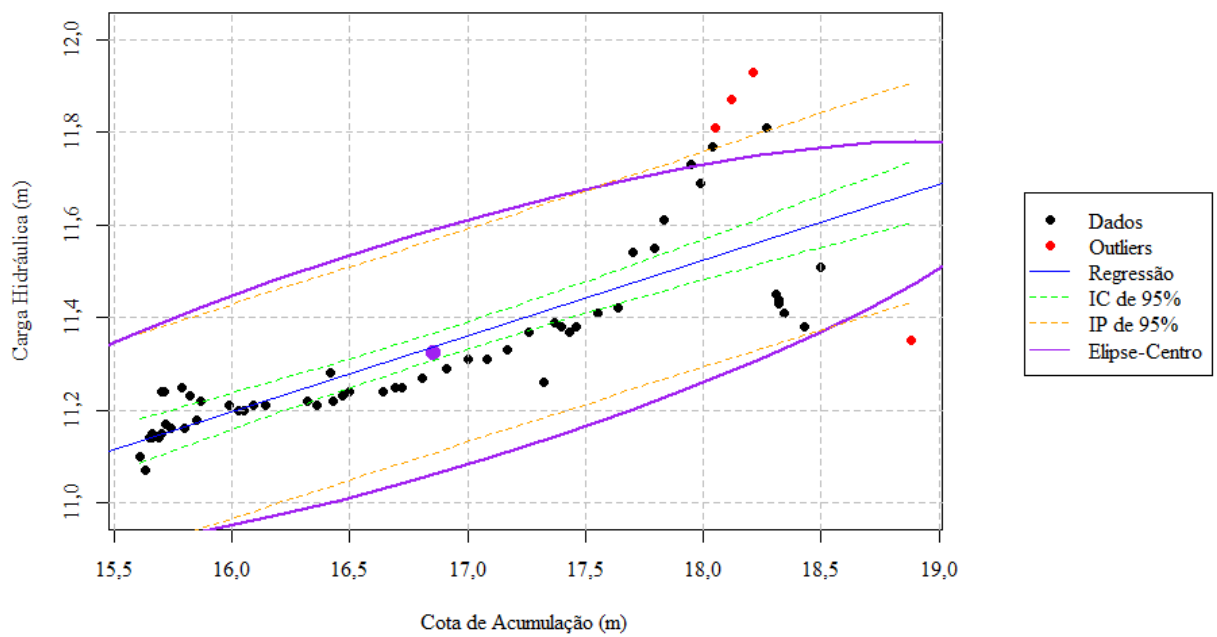
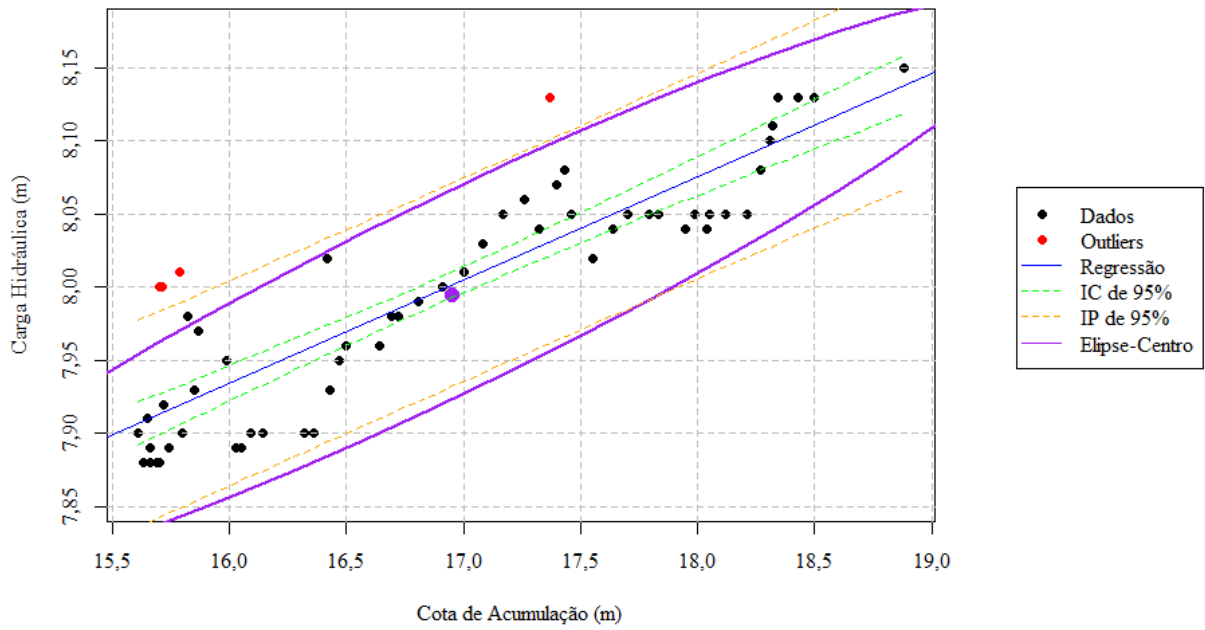
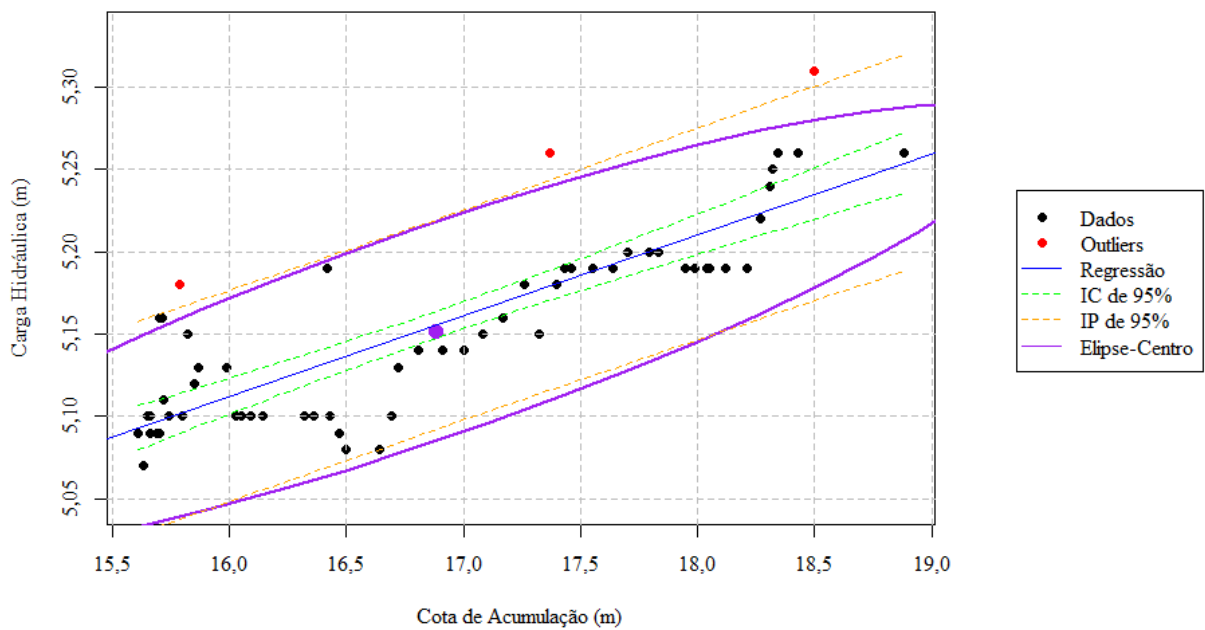
Figura B19 - *Outliers* identificados do instrumento PZ311Figura B20 - *Outliers* identificados do instrumento PZ321

Figura B21 - *Outliers* identificados do instrumento PZ331Figura B22 - *Outliers* identificados do instrumento PZ341



## APÊNDICE C - AJUSTE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

Quadro B1 – Releituras das seções transversais do projeto executivo

SEÇÃO	PROJETO EXECUTIVO	SEÇÃO EXECUTADA
SEÇÃO 02		
SEÇÃO 03		
SEÇÃO 04		



**ANEXO A - leituras nos piezômetros e nos medidores de nível de água**

**Tabela A1 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 01, obtidos jan a dez 2013**

DATA	NAA		NA.1.1.1		PZ.1.1.1		NA.1.2.1		PZ.1.2.1		NA.1.3.1		PZ.1.3.1		PZ.1.4.1		PZ.1.5.1		PZ.1.6.1											
	Cota leit (m)	Altura NA (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Altura NA (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Altura NA (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)								
																							LEITURA	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	LEITURA	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	LEITURA	Cota NA (m)
1/9/2013	346.01	14.31	8.26	347.46	7.99	27.43	347.41	8.85	5.01	341.03	10.16	14.41	339.72	5.99	8.31	335.57	0.47	7.57	336.03	5.99	8.31	335.57	0.48	7.57	334.46	0.38	7.41	334.35		
1/16/2013	345.92	14.22	7.99	347.41	8.09	27.33	347.31	8.89	4.97	340.99	10.21	14.36	339.67	5.99	8.31	335.57	0.48	7.56	335.99	5.99	8.31	335.57	0.48	7.56	334.46	0.38	7.41	334.35		
1/23/2013	345.92	14.22	8.11	347.29	8.21	27.21	347.19	8.95	4.91	340.93	10.33	14.24	339.55	6	8.3	335.56	0.48	7.56	335.99	6	8.3	335.56	0.48	7.56	334.46	0.38	7.41	334.35		
1/30/2013	345.83	14.13	8.23	347.17	8.32	27.1	347.08	8.97	4.89	340.91	10.41	14.16	339.47	6.01	8.29	335.55	0.49	7.55	335.98	6.01	8.29	335.55	0.49	7.55	334.46	0.38	7.41	334.35		
2/6/2013	345.74	14.04	8.34	347.06	8.4	27.02	347	8.89	4.97	340.99	10.58	13.99	339.3	5.59	8.27	335.53	0.53	7.51	335.94	5.59	8.27	335.53	0.53	7.51	334.46	0.39	7.4	334.34		
2/13/2013	345.64	13.94	8.41	346.99	8.51	26.91	346.89	8.97	4.89	340.91	10.71	13.86	339.17	5.59	8.25	335.51	0.53	7.51	335.94	5.59	8.25	335.51	0.53	7.51	334.46	0.39	7.4	334.34		
2/20/2013	345.58	13.88	8.52	346.88	8.64	26.78	346.76	9.01	4.85	340.87	10.89	13.68	338.99	5.6	8.23	335.49	0.57	7.47	335.9	5.6	8.23	335.49	0.57	7.47	334.46	0.39	7.4	334.34		
2/27/2013	345.50	13.80	8.69	346.71	8.77	26.65	346.63	9.09	4.77	340.79	11.05	13.52	338.83	5.62	8.21	335.47	0.6	7.44	335.87	5.62	8.21	335.47	0.6	7.44	334.46	0.4	7.39	334.33		
3/6/2013	345.40	13.70	8.85	346.55	8.91	26.51	346.49	9.11	4.75	340.77	11.28	13.29	338.6	5.62	8.19	335.45	0.61	7.43	335.86	5.62	8.19	335.45	0.61	7.43	334.46	0.4	7.39	334.33		
3/13/2013	345.31	13.61	8.93	346.47	8.99	26.43	346.41	9.21	4.65	340.67	11.44	13.13	338.44	5.63	8.17	335.43	0.62	7.42	335.85	5.63	8.17	335.43	0.62	7.42	334.46	0.4	7.39	334.33		
3/20/2013	345.22	13.52	9.11	346.29	9.28	26.14	346.12	9.3	4.56	340.58	11.57	13	338.31	5.65	8.16	335.42	0.65	7.39	335.82	5.65	8.16	335.42	0.65	7.39	334.46	0.4	7.39	334.33		
3/27/2013	345.30	13.60	9.12	346.28	9.29	26.13	346.11	9.31	4.55	340.57	11.58	12.99	338.3	5.65	8.16	335.42	0.65	7.39	335.82	5.65	8.16	335.42	0.65	7.39	334.46	0.4	7.39	334.33		
4/4/2013	345.28	13.58	9.2	346.2	9.25	26.17	346.15	9.43	4.43	340.45	11.72	12.85	338.16	5.58	8.14	335.4	0.65	7.39	335.82	5.58	8.14	335.4	0.65	7.39	334.46	0.4	7.39	334.33		
4/11/2013	345.21	13.51	9.28	346.12	9.3	26.12	346.1	9.47	4.39	340.41	11.73	12.84	338.15	5.59	8.14	335.4	0.66	7.38	335.81	5.59	8.14	335.4	0.66	7.38	334.46	0.4	7.39	334.33		
4/18/2013	345.14	13.44	9.33	346.07	9.34	26.08	346.06	9.51	4.35	340.37	11.78	12.79	338.1	5.61	8.13	335.39	0.66	7.38	335.81	5.61	8.13	335.39	0.66	7.38	334.46	0.4	7.39	334.33		
4/25/2013	345.07	13.37	9.38	346.02	9.42	26	345.98	9.52	4.34	340.36	11.79	12.78	338.09	5.62	8.12	335.38	0.67	7.37	335.8	5.62	8.12	335.38	0.67	7.37	334.46	0.4	7.39	334.33		
5/7/2013	344.94	13.24	9.4	346	9.42	26	345.98	9.53	4.33	340.35	11.79	12.78	338.09	5.63	8.11	335.37	0.68	7.36	335.79	5.63	8.11	335.37	0.68	7.36	334.46	0.4	7.39	334.33		
5/14/2013	344.99	13.29	9.41	345.99	9.46	25.96	345.94	9.53	4.33	340.35	11.8	12.77	338.08	5.64	8.11	335.37	0.68	7.36	335.79	5.64	8.11	335.37	0.68	7.36	334.46	0.4	7.39	334.33		
5/21/2013	344.87	13.17	9.43	345.97	9.48	25.94	345.92	9.54	4.32	340.34	11.81	12.76	338.07	5.64	8.11	335.37	0.68	7.36	335.79	5.64	8.11	335.37	0.68	7.36	334.46	0.4	7.39	334.33		
5/28/2013	344.78	13.08	9.45	345.95	9.51	25.91	345.89	9.57	4.29	340.31	11.81	12.76	338.07	5.64	8.11	335.37	0.68	7.36	335.79	5.64	8.11	335.37	0.68	7.36	334.46	0.4	7.39	334.33		
6/6/2013	344.71	13.01	9.51	345.89	9.6	25.82	345.8	9.58	4.28	340.3	11.85	12.72	338.03	5.67	8.11	335.37	0.69	7.35	335.78	5.67	8.11	335.37	0.69	7.35	334.46	0.4	7.39	334.33		
6/13/2013	344.63	12.93	9.58	345.82	9.68	25.74	345.72	9.63	4.23	340.25	11.87	12.7	338.01	5.67	8.1	335.36	0.69	7.35	335.78	5.67	8.1	335.36	0.69	7.35	334.46	0.4	7.39	334.33		
6/20/2013	344.56	12.86	9.69	345.71	9.81	25.61	345.59	9.64	4.22	340.24	11.89	12.68	337.99	5.67	8.1	335.36	0.69	7.35	335.78	5.67	8.1	335.36	0.69	7.35	334.46	0.4	7.39	334.33		
6/27/2013	344.53	12.83	9.76	345.64	9.95	25.47	345.45	9.64	4.22	340.24	11.89	12.68	337.99	5.68	8.1	335.36	0.7	7.34	335.77	5.68	8.1	335.36	0.7	7.34	334.46	0.4	7.39	334.33		
7/12/2013	344.33	12.63	9.85	345.55	9.99	25.43	345.41	9.67	4.19	340.21	11.93	12.64	337.95	5.59	8.1	335.36	0.71	7.33	335.76	5.59	8.1	335.36	0.71	7.33	334.46	0.4	7.39	334.33		
7/19/2013	344.24	12.54	9.99	345.46	10	25.42	345.4	9.69	4.17	340.19	12.01	12.56	337.87	5.7	8.08	335.34	0.72	7.32	335.75	5.7	8.08	335.34	0.72	7.32	334.46	0.4	7.39	334.33		
7/29/2013	344.12	12.42	10.04	345.36	10.18	25.24	345.22	9.7	4.16	340.18	12.11	12.46	337.77	5.71	8.06	335.32	0.73	7.31	335.74	5.71	8.06	335.32	0.73	7.31	334.46	0.4	7.39	334.33		
8/7/2013	344.01	12.31	10.1	345.3	10.35	25.07	345.05	9.87	3.99	340.01	12.2	12.37	337.68	5.72	8.05	335.31	0.82	7.22	335.65	3.99	340.01	12.2	12.37	337.68	5.72	8.05	334.46	0.4	7.39	334.33
8/14/2013	343.98	12.28	10.12	345.28	10.42	25	344.98	9.96	3.9	339.92	12.26	12.31	337.62	5.72	8.05	335.31	0.84	7.2	335.63	3.9	339.92	12.26	12.31	337.62	5.72	8.05	334.46	0.4	7.39	334.33
8/28/2013	343.80	12.10	10.13	345.27	10.51	24.91	344.89	10.03	3.83	339.85	12.37	12.2	337.51	5.74	8.02	335.28	0.87	7.17	335.6	3.83	339.85	12.37	12.2	337.51	5.74	8.02	334.46	0.4	7.39	334.29

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A1 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 01, obtidos jan a dez 2013 (continuação)

9/11/2013	343,58	11,88	10,18	6,02	345,22	10,68	24,74	344,72	10,07	3,79	339,81	12,41	12,16	337,47	5,75	2,05	335,81	6,3	8	335,26	0,89	7,15	335,58	0,35	7,1	334,39	0,44	7,35	334,29
9/18/2013	343,48	11,78	10,25	5,95	345,15	10,77	24,65	344,63	10,11	3,75	339,77	12,48	12,09	337,4	5,75	2,05	335,81	6,31	7,99	335,25	0,89	7,15	335,58	0,36	7,09	334,38	0,46	7,33	334,27
9/25/2013	343,38	11,68	10,31	5,89	345,09	10,93	24,49	344,47	10,17	3,69	339,71	12,59	11,98	337,29	5,78	2,02	335,78	6,37	7,93	335,19	0,91	7,13	335,56	0,36	7,09	334,38	0,46	7,33	334,27
10/9/2013	343,20	11,50	10,47	5,73	344,93	11,12	24,3	344,28	10,17	3,69	339,71	12,68	11,89	337,2	5,81	1,99	335,75	6,37	7,93	335,19	0,91	7,13	335,56	0,36	7,09	334,38	0,46	7,33	334,27
10/16/2013	343,09	11,39	10,61	5,59	344,79	11,31	24,11	344,09	10,18	3,68	339,7	12,73	11,84	337,15	5,83	1,97	335,73	6,39	7,91	335,17	0,92	7,12	335,55	0,37	7,08	334,37	0,46	7,33	334,27
10/30/2013	342,92	11,22	10,82	5,38	344,58	11,58	23,84	343,82	10,18	3,68	339,7	12,75	11,82	337,13	5,89	1,91	335,67	6,39	7,91	335,17	0,92	7,12	335,55	0,37	7,08	334,37	0,46	7,33	334,27
11/13/2013	342,77	11,07	10,95	5,25	344,45	11,67	23,75	343,73	10,19	3,67	339,69	12,81	11,76	337,07	5,91	1,89	335,65	6,4	7,9	335,16	0,92	7,12	335,55	0,38	7,07	334,36	0,46	7,33	334,27
11/20/2013	342,68	10,98	11,15	5,05	344,25	11,75	23,67	343,65	10,2	3,66	339,68	12,88	11,69	337	5,91	1,89	335,65	6,4	7,9	335,16	0,92	7,12	335,55	0,38	7,07	334,36	0,47	7,32	334,26
11/27/2013	342,57	10,87	11,33	4,87	344,07	11,83	23,59	343,57	10,21	3,65	339,67	12,96	11,61	336,92	5,93	1,87	335,63	6,41	7,89	335,15	0,92	7,12	335,55	0,39	7,06	334,35	0,47	7,32	334,26
12/4/2013	342,46	10,76	11,51	4,69	343,89	11,95	23,47	343,45	10,21	3,65	339,67	13,04	11,53	336,84	5,93	1,87	335,63	6,43	7,87	335,13	0,93	7,11	335,54	0,39	7,06	334,35	0,47	7,32	334,26
12/11/2013	342,37	10,67	11,73	4,47	343,67	12,01	23,41	343,39	10,25	3,61	339,63	13,11	11,46	336,77	5,93	1,87	335,63	6,43	7,87	335,13	0,93	7,11	335,54	0,39	7,06	334,35	0,48	7,31	334,25
12/20/2013	342,27	10,57	11,85	4,35	343,55	12,09	23,33	343,31	10,28	3,58	339,6	13,25	11,32	336,63	5,94	1,86	335,62	6,46	7,84	335,1	0,93	7,11	335,54	0,4	7,05	334,34	0,48	7,31	334,25

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A2 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 02, obtidos jan a dez 2013

DATA	NAA		NA.2.1.1		PZ.2.1.1		NA.2.2.1		PZ.2.2.1		NA.2.3.1		PZ.2.3.1		PZ.2.4.1								
	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Altura NA (m)							
1/9/2013	346,01	14,31	7,92	15,23	347,48	15,02	19,98	340,38	5,17	9,95	344,71	10,89	14,25	338,99	6,54	1,46	335,02	6,63	7,86	334,93	0,14	7,69	334,68
1/16/2013	345,92	14,22	7,95	15,2	347,45	15,11	19,89	340,29	5,21	9,91	344,67	10,91	14,23	338,97	6,78	1,22	334,78	6,81	7,68	334,75	0,15	7,68	334,67
1/23/2013	345,92	14,22	7,95	15,2	347,45	15,16	19,84	340,24	5,26	9,86	344,62	10,91	14,23	338,97	6,99	1,01	334,57	6,94	7,55	334,62	0,16	7,67	334,66
1/30/2013	345,83	14,13	7,98	15,17	347,42	15,23	19,77	340,17	5,31	9,81	344,57	10,93	14,21	338,95	7,11	0,89	334,45	7,19	7,3	334,37	0,18	7,65	334,64
2/6/2013	345,74	14,04	8,09	15,06	347,31	15,32	19,68	340,08	5,48	9,64	344,4	11,05	14,09	338,83	7,29	0,71	334,27	7,65	6,84	333,91	0,21	7,62	334,61
2/13/2013	345,64	13,94	8,25	14,9	347,15	15,36	19,64	340,04	5,61	9,51	344,27	11,13	14,01	338,75	7,46	0,54	334,1	7,88	6,61	333,68	0,22	7,61	334,6
2/20/2013	345,58	13,88	8,31	14,84	347,09	15,45	19,55	339,95	5,78	9,34	344,1	11,18	13,96	338,7	7,71	0,29	333,85	8,1	6,39	333,46	0,24	7,59	334,58
2/27/2013	345,50	13,80	8,43	14,72	346,97	15,51	19,49	339,89	5,92	9,2	343,96	11,27	13,87	338,61	7,9	0,1	333,66	8,26	6,23	333,3	0,24	7,59	334,58
3/6/2013	345,40	13,70	8,58	14,57	346,82	15,52	19,48	339,88	6,04	9,08	343,84	11,3	13,84	338,58	8,49	-0,49	333,07	8,69	5,8	332,87	0,26	7,57	334,56
3/13/2013	345,31	13,61	8,66	14,49	346,74	15,53	19,47	339,87	6,14	8,98	343,74	11,39	13,75	338,49	8,74	-0,74	332,82	8,93	5,56	332,63	0,28	7,55	334,54
3/20/2013	345,22	13,52	8,89	14,26	346,51	15,53	19,47	339,87	6,14	8,98	343,74	11,4	13,74	338,48	8,74	-0,74	332,82	8,99	5,5	332,57	0,28	7,55	334,54
3/27/2013	345,30	13,60	8,89	14,26	346,51	15,53	19,47	339,87	6,14	8,98	343,74	11,4	13,74	338,48	8,74	-0,74	332,82	8,99	5,5	332,57	0,28	7,55	334,54
4/4/2013	345,28	13,58	8,93	14,22	346,47	15,53	19,47	339,87	6,08	9,12	343,88	11,42	13,72	338,46	6,46	1,54	335,1	6,47	8,02	335,09	0,24	7,59	334,58
4/11/2013	345,21	13,51	8,97	14,18	346,43	15,53	19,47	339,87	6,08	9,04	343,8	11,43	13,71	338,45	6,46	1,54	335,1	6,48	8,01	335,08	0,24	7,59	334,58
4/18/2013	345,14	13,44	8,98	14,17	346,42	15,58	19,42	339,82	6,11	9,01	343,77	11,51	13,63	338,37	6,48	1,52	335,08	6,49	8	335,07	0,26	7,57	334,56
4/25/2013	345,07	13,37	8,99	14,16	346,41	15,61	19,39	339,79	6,15	8,97	343,73	11,52	13,62	338,36	6,49	1,51	335,07	6,53	7,96	335,03	0,27	7,56	334,55

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A2 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 02, obtidos jan a dez 2013 (continuação)

5/7/2013	344,94	13,24	9,01	14,14	346,39	15,61	19,39	339,79	6,21	8,91	343,67	11,53	13,61	338,35	6,49	1,51	335,07	6,53	7,96	335,03	0,27	7,56	334,55
5/14/2013	344,99	13,29	9,01	14,14	346,39	15,62	19,38	339,78	6,23	8,89	343,65	11,53	13,61	338,35	6,49	1,51	335,07	6,53	7,96	335,03	0,28	7,55	334,54
5/21/2013	344,87	13,17	9,17	13,98	346,23	15,63	19,37	339,77	6,29	8,83	343,59	11,55	13,59	338,33	6,5	1,5	335,06	6,53	7,96	335,03	0,28	7,55	334,54
5/28/2013	344,78	13,08	9,23	13,92	346,17	15,63	19,37	339,77	6,31	8,81	343,57	11,55	13,59	338,33	6,5	1,5	335,06	6,53	7,96	335,03	0,29	7,54	334,53
6/6/2013	344,71	13,01	9,3	13,85	346,1	15,63	19,37	339,77	6,34	8,78	343,54	11,58	13,56	338,3	6,51	1,49	335,05	6,54	7,95	335,02	0,3	7,53	334,52
6/13/2013	344,63	12,93	9,31	13,84	346,09	15,7	19,3	339,7	6,34	8,78	343,54	11,59	13,55	338,29	6,51	1,49	335,05	6,54	7,95	335,02	0,3	7,53	334,52
6/20/2013	344,56	12,86	9,31	13,84	346,09	15,72	19,28	339,68	6,35	8,77	343,53	11,61	13,53	338,27	6,51	1,49	335,05	6,57	7,92	334,99	0,3	7,53	334,52
6/27/2013	344,53	12,83	9,33	13,82	346,07	15,76	19,24	339,64	6,35	8,77	343,53	11,63	13,51	338,25	6,53	1,47	335,03	6,57	7,92	334,99	0,31	7,52	334,51
7/12/2013	344,33	12,63	9,43	13,72	345,97	15,78	19,22	339,62	6,37	8,75	343,51	11,7	13,44	338,18	6,54	1,46	335,02	6,58	7,91	334,98	0,31	7,52	334,51
7/19/2013	344,24	12,54	9,57	13,58	345,83	15,88	19,12	339,52	6,41	8,71	343,47	11,75	13,39	338,13	6,61	1,39	334,95	6,61	7,88	334,95	0,31	7,52	334,51
7/29/2013	344,12	12,42	9,73	13,42	345,67	15,96	19,04	339,44	6,57	8,55	343,31	11,79	13,35	338,09	6,61	1,39	334,95	6,62	7,87	334,94	0,31	7,52	334,51
8/7/2013	344,01	12,31	9,98	13,17	345,42	16,22	18,78	339,18	6,68	8,44	343,2	11,93	13,21	337,95	6,63	1,37	334,93	6,65	7,84	334,91	0,32	7,51	334,5
8/14/2013	343,98	12,28	10,21	12,94	345,19	16,41	18,59	338,99	6,9	8,22	342,98	12,01	13,13	337,87	6,67	1,33	334,89	6,65	7,84	334,91	0,33	7,5	334,49
8/28/2013	343,80	12,10	10,49	12,66	344,91	16,58	18,42	338,82	6,98	8,14	342,9	12,09	13,05	337,79	6,67	1,33	334,89	6,66	7,83	334,9	0,33	7,5	334,49
9/11/2013	343,58	11,88	10,68	12,47	344,72	16,75	18,25	338,65	7,15	7,97	342,73	12,16	12,98	337,72	6,68	1,32	334,88	6,66	7,83	334,9	0,34	7,49	334,48
9/18/2013	343,48	11,78	10,89	12,26	344,51	16,88	18,12	338,52	7,51	7,61	342,37	12,22	12,92	337,66	6,68	1,32	334,88	6,66	7,83	334,9	0,34	7,49	334,48
9/25/2013	343,38	11,68	11,01	12,14	344,39	16,97	18,03	338,43	7,8	7,32	342,08	12,23	12,91	337,65	6,68	1,32	334,88	6,66	7,83	334,9	0,35	7,48	334,47
10/9/2013	343,20	11,50	11,31	11,84	344,09	16,98	18,02	338,42	7,81	7,31	342,07	12,3	12,84	337,58	6,69	1,31	334,87	6,62	7,87	334,94	0,35	7,48	334,47
10/16/2013	343,09	11,39	11,52	11,63	343,88	17,04	17,96	338,36	7,86	7,26	342,02	12,36	12,78	337,52	6,71	1,29	334,85	6,63	7,86	334,93	0,36	7,47	334,46
10/30/2013	342,92	11,22	11,67	11,48	343,73	17,06	17,94	338,34	7,9	7,22	341,98	12,36	12,78	337,52	6,71	1,29	334,85	6,64	7,85	334,92	0,37	7,46	334,45
11/13/2013	342,77	11,07	11,94	11,21	343,46	17,11	17,89	338,29	7,92	7,2	341,96	12,37	12,77	337,51	6,68	1,32	334,88	6,63	7,86	334,93	0,37	7,46	334,45
11/20/2013	342,68	10,98	12,01	11,14	343,39	17,15	17,85	338,25	7,92	7,2	341,96	12,39	12,75	337,49	6,68	1,32	334,88	6,64	7,85	334,92	0,38	7,45	334,44
11/27/2013	342,57	10,87	12,01	11,14	343,39	17,15	17,85	338,25	7,97	7,15	341,91	12,43	12,71	337,45	6,67	1,33	334,89	6,64	7,85	334,92	0,38	7,45	334,44
12/4/2013	342,46	10,76	12,06	11,09	343,34	17,16	17,84	338,24	7,99	7,13	341,89	12,47	12,67	337,41	6,67	1,33	334,89	6,63	7,86	334,93	0,38	7,45	334,44
12/11/2013	342,37	10,67	12,06	11,09	343,34	17,16	17,84	338,24	8,01	7,11	341,87	12,51	12,63	337,37	6,69	1,31	334,87	6,63	7,86	334,93	0,39	7,44	334,43
12/20/2013	342,27	10,57	12,07	11,08	343,33	17,14	17,86	338,26	8,05	7,07	341,83	12,53	12,61	337,35	6,69	1,31	334,87	6,64	7,85	334,92	0,39	7,44	334,43

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A3 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 03, obtidos em 10 de dezembro de 2013

DATA	NAA		NA.3.1.1		PZ.3.1.1		NA.3.2.1		PZ.3.2.1		NA.3.3.1		PZ.3.3.1		PZ.3.4.1		PZ.3.5.1						
	Cota leito (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	Prof. (m)	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	Prof. (m)	Altura NA (m)	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	Prof. (m)	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	Prof. (m)	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)				
																				Altura NA (m)	Cota NA (m)	Carga Piez. (m)	Prof. (m)
1/9/2013	346.01	14.31	7.22	16.73	348.18	14.68	20.7	340.72	5.13	9.64	344.75	4.38	3.92	337.18	6.32	7.88	335.24	1.14	5.1	7/1.14	0.8	5.44	334.4
1/16/2013	345.92	14.22	7.31	16.64	348.09	14.75	20.63	340.65	5.21	9.56	344.67	4.28	3.91	337.17	6.33	7.87	335.23	1.14	5.1	7/1.14	0.8	5.44	334.4
1/23/2013	345.92	14.22	7.48	16.47	347.92	14.83	20.55	340.57	5.26	9.51	344.62	4.31	3.89	337.15	6.33	7.87	335.23	1.14	5.1	7/1.14	0.81	5.43	334.39
1/30/2013	345.83	14.13	7.56	16.39	347.84	14.89	20.49	340.51	5.34	9.43	344.54	4.41	3.89	337.15	6.35	7.85	335.21	1.14	5.1	7/1.14	0.81	5.43	334.39
2/6/2013	345.74	14.04	7.7	16.25	347.7	14.92	20.46	340.48	5.46	9.31	344.42	4.43	3.84	337.1	6.35	7.85	335.21	1.15	5.09	7/1.15	0.81	5.43	334.39
2/13/2013	345.64	13.94	7.82	16.13	347.58	14.99	20.39	340.41	5.54	9.23	344.34	4.47	3.83	337.09	6.38	7.82	335.18	1.15	5.09	7/1.15	0.81	5.43	334.39
2/20/2013	345.58	13.88	7.91	16.04	347.49	15.08	20.3	340.32	5.72	9.05	344.16	4.38	3.79	337.05	6.38	7.82	335.18	1.15	5.09	7/1.15	0.82	5.42	334.38
2/27/2013	345.50	13.80	8.01	15.94	347.39	15.22	20.16	340.18	5.81	8.96	344.07	4.39	3.76	337.02	6.4	7.8	335.16	1.15	5.09	7/1.15	0.82	5.42	334.38
3/6/2013	345.40	13.70	8.05	15.9	347.35	15.27	20.11	340.13	5.85	8.92	344.03	4.39	3.73	336.99	6.4	7.8	335.16	1.15	5.09	7/1.15	0.82	5.42	334.38
3/13/2013	345.31	13.61	8.09	15.86	347.31	15.3	20.08	340.1	5.89	8.88	343.99	4.44	3.7	336.96	6.41	7.79	335.15	1.15	5.09	7/1.15	0.83	5.41	334.37
3/20/2013	345.22	13.52	8.1	15.85	347.3	15.31	20.07	340.09	5.94	8.83	343.94	4.44	3.67	336.93	6.42	7.78	335.14	1.15	5.09	7/1.15	0.83	5.41	334.37
3/27/2013	345.30	13.60	8.1	15.85	347.3	15.31	20.07	340.09	5.95	8.82	343.93	4.49	3.67	336.93	6.42	7.78	335.14	1.14	5.1	7/1.14	0.83	5.41	334.37
4/4/2013	345.28	13.58	8.18	15.77	347.22	15.37	20.01	340.03	7.1	7.67	342.78	4.52	3.62	336.88	6.44	7.76	335.12	1.13	5.11	7/1.13	0.83	5.41	334.37
4/11/2013	345.21	13.51	8.21	15.74	347.19	15.39	19.99	340.01	7.1	7.67	342.78	4.54	3.61	336.87	6.44	7.76	335.12	1.15	5.09	7/1.15	0.83	5.41	334.37
4/18/2013	345.14	13.44	8.24	15.71	347.16	15.43	19.95	339.97	7.1	7.67	342.78	4.56	3.61	336.87	6.45	7.75	335.11	1.17	5.07	7/1.17	0.83	5.41	334.37
4/25/2013	345.07	13.37	8.31	15.64	347.09	15.46	19.92	339.94	7.13	7.64	342.75	4.56	3.61	336.87	6.45	7.75	335.11	1.17	5.07	7/1.17	0.83	5.41	334.37
5/7/2013	344.94	13.24	8.36	15.59	347.04	15.47	19.91	339.93	7.13	7.64	342.75	4.56	3.61	336.87	6.45	7.75	335.11	1.17	5.07	7/1.17	0.83	5.41	334.37
5/14/2013	344.99	13.29	8.43	15.52	346.97	15.47	19.91	339.93	7.15	7.62	342.73	4.56	3.59	336.85	6.45	7.75	335.11	1.17	5.07	7/1.17	0.83	5.41	334.37
5/21/2013	344.87	13.17	8.43	15.52	346.97	15.47	19.91	339.93	7.15	7.62	342.73	4.57	3.59	336.85	6.46	7.74	335.1	1.17	5.07	7/1.17	0.84	5.4	334.36
5/28/2013	344.78	13.08	8.48	15.47	346.92	15.48	19.9	339.92	7.17	7.6	342.71	4.58	3.57	336.83	6.46	7.74	335.1	1.18	5.06	7/1.18	0.84	5.4	334.36
6/6/2013	344.71	13.01	8.59	15.36	346.81	15.58	19.8	339.82	7.18	7.59	342.7	4.59	3.56	336.82	6.47	7.73	335.09	1.19	5.05	7/1.19	0.84	5.4	334.36
6/13/2013	344.63	12.93	8.65	15.3	346.75	15.65	19.73	339.75	7.25	7.52	342.63	4.61	3.55	336.81	6.47	7.73	335.09	1.2	5.04	7/1.2	0.84	5.4	334.36
6/20/2013	344.56	12.86	8.77	15.18	346.63	15.68	19.7	339.72	7.29	7.48	342.59	4.61	3.53	336.79	6.47	7.73	335.09	1.2	5.04	7/1.2	0.85	5.39	334.35
6/27/2013	344.53	12.83	8.88	15.07	346.52	15.71	19.67	339.69	7.36	7.41	342.52	4.61	3.53	336.79	6.47	7.73	335.09	1.21	5.03	7/1.21	0.85	5.39	334.35
7/1/2013	344.33	12.63	9.01	14.94	346.39	15.77	19.61	339.63	7.47	7.3	342.41	4.61	3.52	336.78	6.47	7.73	335.09	1.21	5.03	7/1.21	0.85	5.39	334.35
7/19/2013	344.24	12.54	9.08	14.87	346.32	15.79	19.59	339.61	7.51	7.26	342.37	4.61	3.49	336.75	6.48	7.72	335.08	1.22	5.02	7/1.22	0.85	5.39	334.35
7/29/2013	344.12	12.42	9.1	14.85	346.3	15.89	19.49	339.51	7.55	7.22	342.33	4.62	3.45	336.71	6.48	7.72	335.08	1.23	5.01	7/1.23	0.85	5.39	334.35
8/7/2013	344.01	12.31	10.18	13.77	345.22	16.06	19.32	339.34	7.83	6.94	342.05	4.68	3.27	336.53	6.5	7.7	335.06	1.25	4.99	7/1.25	0.87	5.37	334.33
8/14/2013	343.98	12.28	10.35	13.6	345.05	16.24	19.14	339.16	7.99	6.78	341.89	4.69	3.19	336.45	6.53	7.67	335.03	1.28	4.96	7/1.28	0.87	5.37	334.33
8/28/2013	343.80	12.10	10.48	13.47	344.92	16.35	19.03	339.05	8.26	6.51	341.62	4.69	3.19	336.45	6.56	7.64	335	1.29	4.95	7/1.29	0.89	5.35	334.31
9/11/2013	343.58	11.88	10.61	13.34	344.79	16.41	18.97	338.99	8.52	6.25	341.36	4.73	3.16	336.42	6.58	7.62	334.98	1.3	4.94	7/1.3	0.89	5.35	334.31
9/18/2013	343.48	11.78	10.68	13.27	344.72	16.53	18.85	338.87	8.79	5.98	341.09	4.77	3.13	336.39	6.59	7.61	334.97	1.32	4.92	7/1.32	0.89	5.35	334.31

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A3 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 03, obtidos jan a dez 2013 (continuação)

9/25/2013	343,38	11,68	10,85	13,1	344,55	16,64	18,74	338,76	8,94	5,83	340,94	14,8	10,42	335,08	5,18	3,12	336,38	6,61	7,59	334,95	1,32	4,92	/1,32	0,89	5,35	334,31
10/9/2013	343,20	11,50	10,87	13,08	344,53	16,71	18,67	338,69	9,1	5,67	340,78	14,81	10,41	335,07	5,18	3,12	336,38	6,61	7,59	334,95	1,33	4,91	/1,33	0,91	5,33	334,29
10/16/2013	343,09	11,39	10,94	13,01	344,46	16,81	18,57	338,59	9,15	5,62	340,73	14,82	10,4	335,06	5,19	3,11	336,37	6,63	7,57	334,93	1,34	4,9	/1,34	0,91	5,33	334,29
10/30/2013	342,92	11,22	10,99	12,96	344,41	16,85	18,53	338,55	9,21	5,56	340,67	14,87	10,35	335,01	5,2	3,1	336,36	6,64	7,56	334,92	1,35	4,89	/1,35	0,93	5,31	334,27
11/13/2013	342,77	11,07	11,05	12,9	344,35	16,88	18,5	338,52	9,34	5,43	340,54	14,89	10,33	334,99	5,21	3,09	336,35	6,64	7,56	334,92	1,35	4,89	/1,35	0,93	5,31	334,27
11/20/2013	342,68	10,98	11,21	12,74	344,19	16,9	18,48	338,5	9,42	5,35	340,46	14,9	10,32	334,98	5,24	3,06	336,32	6,65	7,55	334,91	1,35	4,89	/1,35	0,93	5,31	334,27
11/27/2013	342,57	10,87	11,27	12,68	344,13	16,96	18,42	338,44	9,48	5,29	340,4	14,9	10,32	334,98	5,27	3,03	336,29	6,65	7,55	334,91	1,37	4,87	/1,37	0,94	5,3	334,26
12/4/2013	342,46	10,76	11,33	12,62	344,07	17,01	18,37	338,39	9,57	5,2	340,31	14,9	10,32	334,98	5,27	3,03	336,29	6,65	7,55	334,91	1,37	4,87	/1,37	0,94	5,3	334,26
12/11/2013	342,37	10,67	11,38	12,57	344,02	17,08	18,3	338,32	9,61	5,16	340,27	14,9	10,32	334,98	5,31	2,99	336,25	6,66	7,54	334,9	1,38	4,86	/1,38	0,96	5,28	334,24
12/20/2013	342,27	10,57	11,41	12,54	343,99	17,11	18,27	338,29	9,66	5,11	340,22	14,9	10,32	334,98	5,33	2,97	336,23	6,66	7,54	334,9	1,38	4,86	/1,38	0,96	5,28	334,24

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A4 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 01, obtidos jan a dez 2009

DATA	NAA		NA.1.1.1		NA.1.2.1		NA.1.3.1		NA.1.4.1		NA.1.5.1		PZ.1.6.1													
	Cota leito (m)	Altura NA (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)												
02/01/2009	347,30	15,80	348,39	7,11	28,31	348,29	8,13	5,73	341,75	8,85	15,72	341,03	5	2,8	336,56	5,94	8,36	335,62	0,31	7,14	334,43	0,43	7,36	334,3		
08/01/2009	347,44	15,74	7,03	9,17	348,37	7,13	28,29	348,27	8,19	5,67	341,69	8,92	15,65	340,96	5,01	2,79	336,55	5,95	8,35	335,61	0,43	7,61	336,04	0,32	7,13	334,42
15/01/2009	347,36	15,66	7,05	9,15	348,35	7,17	28,25	348,23	8,26	5,6	341,62	9,02	15,55	340,86	5,01	2,79	336,55	5,95	8,35	335,61	0,44	7,6	336,03	0,32	7,13	334,42
22/01/2009	347,40	15,70	7,08	9,12	348,32	7,21	28,21	348,19	8,35	5,51	341,53	9,13	15,44	340,75	5,01	2,79	336,55	5,96	8,34	335,6	0,45	7,59	336,02	0,32	7,13	334,42
29/01/2009	347,39	15,69	7,1	9,1	348,3	7,25	28,17	348,15	8,46	5,4	341,42	9,25	15,32	340,63	5,01	2,79	336,55	5,96	8,34	335,6	0,46	7,58	336,01	0,32	7,13	334,42
04/02/2009	347,36	15,66	7,11	9,09	348,29	7,32	28,1	348,08	8,46	5,4	341,42	9,25	15,32	340,63	5,01	2,79	336,55	5,96	8,34	335,6	0,46	7,58	336,01	0,32	7,13	334,42
11/02/2009	347,33	15,63	7,1	9,1	348,3	7,28	28,14	348,12	8,4	5,46	341,48	9,31	15,26	340,57	5,03	2,77	336,53	5,98	8,32	335,58	0,47	7,57	336	0,35	7,1	334,39
18/02/2009	347,31	15,61	7,06	9,14	348,34	7,26	28,16	348,14	8,31	5,55	341,57	9,31	15,26	340,57	5,01	2,79	336,55	5,91	8,39	335,65	0,45	7,59	336,02	0,31	7,14	334,43
23/02/2009	347,35	15,65	7,04	9,16	348,36	7,25	28,17	348,15	8,26	5,6	341,62	9,31	15,26	340,57	5	2,8	336,56	5,85	8,45	335,71	0,41	7,63	336,06	0,28	7,17	334,46
27/02/2009	347,42	15,72	7,01	9,19	348,39	7,25	28,17	348,15	8,13	5,73	341,75	9,32	15,25	340,56	4,97	2,83	336,59	5,8	8,5	335,76	0,39	7,65	336,08	0,25	7,2	334,49
05/03/2009	347,55	15,85	6,98	9,22	348,42	7,23	28,19	348,17	8,07	5,79	341,81	9,33	15,24	340,55	4,95	2,85	336,61	5,76	8,54	335,8	0,38	7,66	336,09	0,24	7,21	334,5
12/03/2009	347,58	15,99	6,92	9,28	348,48	7,22	28,2	348,18	8,05	5,81	341,83	9,29	15,28	340,59	4,89	2,91	336,67	5,76	8,54	335,8	0,39	7,65	336,08	0,23	7,22	334,51
18/03/2009	347,57	15,87	6,87	9,33	348,53	7,17	28,25	348,23	8,04	5,82	341,84	9,21	15,36	340,67	4,81	2,99	336,75	5,74	8,56	335,82	0,39	7,65	336,08	0,2	7,25	334,54
25/03/2009	347,52	15,82	6,81	9,39	348,59	7,09	28,33	348,31	8,04	5,82	341,84	9,17	15,4	340,71	4,75	3,05	336,81	5,73	8,57	335,83	0,38	7,66	336,09	0,21	7,24	334,53
31/03/2009	347,40	15,70	6,76	9,44	348,64	7,01	28,41	348,39	8,03	5,83	341,85	9,12	15,45	340,76	4,75	3,05	336,81	5,69	8,61	335,87	0,4	7,64	336,07	0,2	7,25	334,54
02/04/2009	347,41	15,71	6,72	9,44	348,68	6,94	28,48	348,46	8,04	5,82	341,84	9,09	15,48	340,79	4,77	3,03	336,79	5,63	8,67	335,93	0,41	7,63	336,06	0,22	7,23	334,52
09/04/2009	347,49	15,79	6,66	9,54	348,74	6,83	28,59	348,57	8,04	5,82	341,84	9,07	15,5	340,81	4,77	3,03	336,79	5,6	8,7	335,96	0,43	7,61	336,04	0,2	7,25	334,54
16/04/2009	348,12	16,42	6,57	9,63	348,83	6,7	28,72	348,7	8,04	5,82	341,84	9,05	15,52	340,83	4,78	3,02	336,78	5,6	8,7	335,96	0,45	7,59	336,02	0,2	7,25	334,54
23/04/2009	349,07	17,37	5,23	10,97	350,17	6,51	28,91	348,89	8,08	5,78	341,8	9,08	15,49	340,8	4,87	2,93	336,69	5,61	8,69	335,95	0,45	7,59	336,02	0,16	7,29	334,58
30/04/2009	350,02	18,50	5,22	10,98	350,18	6,38	29,04	349,02	8,01	5,85	341,87	9,07	15,5	340,81	5,01	2,79	336,55	5,68	8,62	335,88	0,4	7,64	336,07	0,14	7,31	334,6

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A4 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 01, obtidos jan a dez 2009 (continuação)

05/05/2009	18,88	5,17	11,03	350,23	5,52	29,9	349,88	7,95	5,91	341,93	9,07	15,5	340,81	5,07	2,73	336,49	5,71	8,59	335,85	0,12	7,92	336,35	0,13	7,32	334,61	0,29	7,5	334,44
13/05/2009	18,43	5,17	11,03	350,23	5,53	29,89	349,87	7,9	5,96	341,98	9,01	15,56	340,87	5,1	2,7	336,46	5,72	8,58	335,84	0,12	7,92	336,35	0,14	7,31	334,6	0,3	7,49	334,43
20/05/2009	18,34	5,16	11,04	350,24	5,55	29,87	349,85	7,88	5,98	342	8,95	15,62	349,85	5,14	2,66	336,42	5,72	8,58	349,85	0,12	7,92	336,35	0,15	7,3	336,35	0,31	7,48	336,35
26/05/2009	18,32	5,17	11,03	350,23	5,55	29,87	349,85	7,84	6,02	342,04	8,9	15,67	340,98	5,18	2,62	336,38	5,73	8,57	335,83	0,11	7,93	336,36	0,15	7,3	334,59	0,32	7,47	334,41
29/05/2009	18,32	5,18	11,02	350,22	5,58	29,84	349,82	7,81	6,05	342,07	8,84	15,73	341,04	5,21	2,59	336,35	5,73	8,57	335,83	0,11	7,93	336,36	0,15	7,3	334,59	0,33	7,46	334,4
03/06/2009	18,31	5,15	11,1	350,25	5,39	30,03	350,01	7,79	6,07	342,09	8,78	15,79	341,1	5,24	2,56	336,32	5,74	8,57	335,83	0,11	7,93	336,36	0,16	7,29	334,58	0,34	7,45	334,39
10/06/2009	18,27	5,1	11,1	350,3	5,26	30,16	350,14	7,79	6,07	342,09	8,75	15,82	341,13	5,28	2,52	336,28	5,74	8,56	335,82	0,14	7,9	336,33	0,16	7,29	334,58	0,34	7,45	334,39
16/06/2009	18,21	5,1	11,1	350,3	5,4	30,02	350	7,81	6,05	342,07	8,72	15,85	341,16	5,39	2,41	336,17	5,75	8,55	335,81	0,17	7,87	336,3	0,16	7,29	334,58	0,34	7,45	334,39
24/06/2009	18,12	5,15	11,05	350,25	5,43	29,99	349,97	7,82	6,04	342,06	8,72	15,85	341,16	5,35	2,45	336,21	5,75	8,55	335,81	0,17	7,87	336,3	0,18	7,27	334,56	0,35	7,44	334,38
30/06/2009	18,05	5,21	10,99	350,19	5,47	29,95	349,93	7,84	6,02	342,04	8,73	15,84	341,15	5,35	2,45	336,21	5,78	8,52	335,78	0,18	7,86	336,29	0,19	7,26	334,55	0,35	7,44	334,38
01/07/2009	18,04	5,28	10,92	350,12	5,49	29,93	349,91	7,87	5,99	342,01	8,75	15,82	341,13	5,33	2,47	336,23	5,77	8,53	335,79	0,19	7,85	336,28	0,19	7,26	334,55	0,36	7,43	334,37
11/07/2009	17,95	5,31	10,89	350,09	5,49	29,93	349,91	7,87	5,99	342,01	8,75	15,82	341,13	5,33	2,47	336,23	5,78	8,52	335,78	0,21	7,83	336,26	0,19	7,26	334,55	0,36	7,43	334,37
18/07/2009	17,99	5,4	10,8	350	5,53	29,89	349,87	7,89	5,97	341,99	8,77	15,8	341,11	5,31	2,49	336,25	5,78	8,52	335,78	0,22	7,82	336,25	0,21	7,24	334,53	0,36	7,43	334,37
25/07/2009	17,83	5,47	10,73	349,93	5,58	29,84	349,82	7,89	5,97	341,99	8,79	15,78	341,09	5,27	2,53	336,29	5,77	8,53	335,79	0,22	7,82	336,25	0,21	7,24	334,53	0,36	7,43	334,37
29/07/2009	17,79	5,48	10,72	349,92	5,61	29,81	349,79	7,89	5,97	341,99	8,79	15,78	341,09	5,26	2,54	336,3	5,77	8,53	335,79	0,24	7,8	336,23	0,22	7,23	334,52	0,37	7,42	334,36
06/08/2009	17,70	5,51	10,69	349,89	5,68	29,74	349,72	7,92	5,94	341,96	8,81	15,76	341,07	5,21	2,59	336,35	5,78	8,52	335,78	0,24	7,8	336,23	0,22	7,23	334,52	0,37	7,42	334,36
13/08/2009	17,64	5,55	10,65	349,85	5,72	29,7	349,68	7,95	5,91	341,93	8,85	15,72	341,03	5,18	2,62	336,38	5,82	8,48	335,74	0,26	7,78	336,21	0,22	7,23	334,52	0,37	7,42	334,36
20/08/2009	17,55	5,6	10,6	349,8	5,77	29,65	349,63	7,99	5,87	341,89	8,89	15,68	340,99	5,16	2,64	336,4	5,85	8,45	335,71	0,28	7,76	336,19	0,22	7,23	334,52	0,4	7,39	334,33
27/08/2009	17,46	5,67	10,53	349,73	5,84	29,58	349,56	8,01	5,85	341,87	8,89	15,68	340,99	5,17	2,63	336,39	5,81	8,49	335,75	0,28	7,76	336,19	0,22	7,23	334,52	0,38	7,41	334,35
31/08/2009	17,43	5,71	10,49	349,69	5,92	29,5	349,48	8,06	5,8	341,82	8,96	15,61	340,92	5,2	2,6	336,36	5,81	8,49	335,75	0,28	7,76	336,19	0,22	7,23	334,52	0,36	7,43	334,37
03/09/2009	17,40	5,78	10,42	349,62	5,97	29,45	349,43	8,07	5,79	341,81	8,98	15,59	340,9	5,21	2,59	336,35	5,82	8,48	335,74	0,28	7,76	336,19	0,22	7,23	334,52	0,36	7,43	334,37
10/09/2009	17,32	5,79	10,41	349,61	5,98	29,44	349,42	8,11	5,75	341,77	9	15,57	340,88	5,19	2,61	336,37	5,84	8,46	335,72	0,29	7,75	336,18	0,27	7,18	334,47	0,38	7,41	334,35
16/09/2009	17,26	5,79	10,41	349,61	5,98	29,44	349,42	8,08	5,78	341,8	8,94	15,63	340,94	5,12	2,68	336,44	5,8	8,5	335,76	0,3	7,74	336,17	0,24	7,21	334,5	0,37	7,42	334,36
23/09/2009	17,17	5,91	10,29	349,49	6,07	29,35	349,33	8,15	5,71	341,73	9,01	15,56	340,87	4,93	2,87	336,63	5,94	8,36	335,62	0,31	7,73	336,16	0,26	7,19	334,48	0,39	7,4	334,34
30/09/2009	17,08	5,99	10,21	349,41	6,16	29,26	349,24	8,18	5,68	341,7	9,05	15,52	340,83	4,9	2,9	336,66	5,93	8,37	335,63	0,32	7,72	336,15	0,26	7,19	334,48	0,39	7,4	334,34
07/10/2009	17,00	6,06	10,14	349,34	6,22	29,2	349,18	8,22	5,64	341,66	9,09	15,48	340,79	5,24	2,56	336,32	5,77	8,53	335,79	0,34	7,7	336,13	0,2	7,25	334,54	0,41	7,38	334,32
14/10/2009	16,91	6,1	10,1	349,3	6,26	29,16	349,14	8,16	5,7	341,72	9,05	15,52	340,83	5,25	2,55	336,31	5,88	8,42	335,68	0,34	7,7	336,13	0,28	7,17	334,46	0,42	7,37	334,31
21/10/2009	16,81	6,13	10,07	349,27	6,3	29,12	349,1	8,17	5,69	341,71	9,07	15,5	340,81	5,14	2,66	336,42	5,83	8,47	335,73	0,35	7,69	336,12	0,27	7,18	334,47	0,42	7,37	334,31
28/10/2009	16,72	6,26	9,94	349,14	6,43	28,99	348,97	8,28	5,58	341,6	9,17	15,4	340,71	5,18	2,62	336,38	5,9	8,4	335,66	0,35	7,69	336,12	0,27	7,18	334,47	0,43	7,36	334,3
31/10/2009	16,69	6,38	9,82	349,02	6,49	28,93	348,91	8,35	5,51	341,53	9,23	15,34	340,65	5,21	2,59	336,35	5,91	8,39	335,65	0,35	7,69	336,12	0,3	7,15	334,44	0,42	7,37	334,31
04/11/2009	16,64	6,46	9,74	348,94	6,61	28,81	348,79	8,44	5,42	341,44	9,32	15,25	340,56	5,26	2,54	336,3	5,22	9,08	336,34	0,41	7,63	336,06	0,31	7,14	334,43	0,4	7,39	334,33
17/11/2009	16,50	6,55	9,65	348,85	6,77	28,65	348,63	8,36	5,5	341,52	9,29	15,28	340,59	4,97	2,83	336,59	5,93	8,37	335,63	0,44	7,6	336,03	0,35	7,1	334,39	0,41	7,38	334,32
20/11/2009	16,47	6,55	9,65	348,85	6,77	28,65	348,63	8,38	5,48	341,5	9,3	15,27	340,58	4,99	2,81	336,57	5,93	8,37	335,63	0,44	7,6	336,03	0,35	7,1	334,39	0,42	7,37	334,31
24/11/2009	16,43	6,56	9,64	348,84	6,78	28,64	348,62	8,41	5,45	341,47	9,3	15,27	340,58	5	2,8	336,56	5,94	8,36	335,62	0,44	7,6	336,03	0,35	7,1	334,39	0,42	7,37	334,31
30/11/2009	16,36	6,56	9,64	348,84	6,78	28,64	348,62	8,41	5,45	341,47	9,3	15,27	340,58	5	2,8	336,56	5,95	8,35	335,61	0,44	7,6	336,03	0,35	7,1	334,39	0,42	7,37	334,31
03/12/2009	16,32	6,74	9,46	348,66	6,89	28,53	348,51	8,53	5,33	341,35	9,46	15,11	340,42	5,18	2,62	336,38	5,98	8,32	335,58	0,46	7,58	336,01	0,28	7,17	334,46	0,4	7,39	334,33
16/12/2009	16,14	6,8	9,4	348,6	6,94	28,48	348,46	8,59	5,27	341,29	9,5	15,07	340,38	5,18	2,62	336,38	5,98	8,32	335,58	0,47	7,57	336	0,28	7,17	334,46	0,4	7,39	334,33
22/12/2009	16,09	6,85	9,35	348,55	7	28,42	348,4	8,62	5,24	341,26	9,51	15,06	340,37	5,18	2,62	336,38	5,99	8,31	335,57	0,5	7,54	335,97	0,29	7,16	334,45	0,41	7,38	334,32
27/12/2009	16,05	6,88	9,32	348,52	7,01	28,41	348,39	8,69	5,17	341,19	9,61	14,96	340,27	5,2	2,6	336,36	5,99	8,31	335,57	0,5	7,54	335,97	0,29	7,16	334,45	0,41	7,38	334,32
31/12/2009	16,03	6,89	9,31	348,51	7,01	28,41	348,39	8,69	5,17	341,19	9,61	14,96	340,27	5,21	2,59	336,35	5,99	8,31	335,57	0,5	7,54	335,97	0,29	7,16	334,45	0,41	7,38	334,32

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A5 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 02, obtidos jan a dez 2009

DATA	NAA		NA.2.1.1		NA.2.2.1		NA.2.3.1		PZ.2.1.1		PZ.2.2.1		PZ.2.3.1		PZ.2.4.1			
	Cota leito (m)	Altura NA (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)	Cota furo (m)	Prof. (m)
02/01/2009	347,50	15,80	355,40	35,00	349,88	15,12	349,88	341,56	8,00	341,56	14,49	341,56	341,56	14,49	341,56	14,49	341,56	7,83
08/01/2009	347,44	15,74	348,57	34,146	345,6	10,84	345,6	335,21	1,65	335,21	14,87	339,61	8,13	335,2	8,13	335,2	0,19	7,64
15/01/2009	347,36	15,66	348,51	34,145	345,55	10,79	345,55	335,21	1,65	335,21	14,85	339,59	8,13	335,2	8,13	335,2	0,19	7,64
22/01/2009	347,40	15,70	348,47	34,144	345,48	10,72	345,48	335,21	1,65	335,21	14,84	339,58	8,12	335,19	8,12	335,19	0,21	7,62
29/01/2009	347,39	15,69	348,41	34,142	345,45	10,69	345,45	335,21	1,65	335,21	14,82	339,56	8,12	335,19	8,12	335,19	0,24	7,59
04/02/2009	347,36	15,66	348,35	34,139	345,4	10,64	345,4	335,21	1,65	335,21	14,79	339,53	8,11	335,18	8,11	335,18	0,25	7,58
11/02/2009	347,33	15,63	348,33	34,139	345,4	10,64	345,4	335,21	1,65	335,21	14,79	339,53	8,11	335,18	8,11	335,18	0,25	7,58
18/02/2009	347,31	15,61	348,3	34,138	345,37	10,61	345,37	335,18	1,62	335,18	14,76	339,5	8,1	335,17	8,1	335,17	0,29	7,54
23/02/2009	347,35	15,65	348,3	34,138	345,37	10,61	345,37	335,21	1,65	335,21	14,79	339,53	8,12	335,19	8,12	335,19	0,27	7,56
27/02/2009	347,42	15,72	348,39	34,145	345,37	10,61	345,37	335,21	1,67	335,21	14,82	339,56	8,14	335,21	8,14	335,21	0,25	7,58
05/03/2009	347,55	15,85	348,42	34,149	345,37	10,61	345,37	335,21	1,68	335,21	14,84	339,58	8,14	335,21	8,14	335,21	0,23	7,6
12/03/2009	347,58	15,99	348,46	34,156	345,37	10,61	345,37	335,25	1,69	335,25	14,85	339,59	8,1	335,17	8,1	335,17	0,2	7,63
18/03/2009	347,57	15,87	348,5	34,16	345,38	10,62	345,38	335,35	1,79	335,35	15,03	339,77	8,14	335,21	8,14	335,21	0,18	7,65
25/03/2009	347,52	15,82	348,57	34,164	345,47	10,71	345,47	335,43	1,87	335,43	15,13	339,87	8,16	335,23	8,16	335,23	0,15	7,68
31/03/2009	347,40	15,70	348,61	34,169	345,56	10,8	345,56	335,47	1,91	335,47	15,23	339,97	8,17	335,24	8,17	335,24	0,11	7,72
02/04/2009	347,41	15,71	348,64	34,174	345,65	10,89	345,65	335,48	1,92	335,48	15,32	340,06	8,18	335,25	8,18	335,25	0,08	7,75
09/04/2009	347,49	15,79	348,69	34,179	345,53	10,77	345,53	335,45	1,89	335,45	15,28	340,02	8,14	335,21	8,14	335,21	0,09	7,74
16/04/2009	348,12	16,42	348,75	34,186	345,44	10,68	345,44	335,39	1,83	335,39	15,35	340,09	8,06	335,13	8,06	335,13	0,09	7,74
23/04/2009	349,07	17,37	348,78	34,195	345,35	10,59	345,35	335,33	1,77	335,33	15,63	340,37	6,5	335,06	6,5	335,06	0,1	7,73
30/04/2009	350,02	18,50	350,19	34,212	345,44	10,68	345,44	335,44	1,88	335,44	15,79	340,53	6,25	335,31	6,25	335,31	0,06	7,77
05/05/2009	350,58	18,88	350,42	34,219	345,57	10,81	345,57	335,49	1,93	335,49	15,79	340,53	6,28	335,28	6,28	335,28	0,07	7,76
13/05/2009	350,13	18,43	350,61	34,239	345,83	11,07	345,83	335,53	1,97	335,53	15,77	340,51	6,31	335,25	6,31	335,25	0,08	7,75
20/05/2009	350,04	18,34	350,61	34,278	345,85	11,09	345,85	335,46	1,93	335,46	15,77	340,51	6,33	335,23	6,33	335,23	0,09	7,74
26/05/2009	350,02	18,32	350,58	34,273	345,97	11,21	345,97	335,41	1,85	335,41	15,76	340,5	6,33	335,23	6,33	335,23	0,1	7,73
29/05/2009	350,02	18,32	350,57	34,271	346,06	11,3	346,06	335,36	1,80	335,36	15,75	340,49	6,33	335,23	6,33	335,23	0,12	7,71
03/06/2009	350,01	18,31	350,56	34,271	346,06	11,3	346,06	335,36	1,80	335,36	15,75	340,49	6,33	335,23	6,33	335,23	0,12	7,71
10/06/2009	349,97	18,27	350,56	34,27	346,13	11,37	346,13	335,29	1,73	335,29	15,74	340,48	6,34	335,22	6,34	335,22	0,12	7,71
16/06/2009	349,91	18,21	350,51	34,27	346,18	11,42	346,18	335,33	1,77	335,33	15,63	340,37	6,27	335,29	6,27	335,29	0,12	7,71
24/06/2009	349,82	18,12	350,47	34,268	346,26	11,5	346,26	335,36	1,80	335,36	15,56	340,3	6,22	335,34	6,22	335,34	0,13	7,7
30/06/2009	349,75	18,05	350,46	34,26	346,32	11,56	346,32	335,36	1,80	335,36	15,55	340,29	6,23	335,33	6,23	335,33	0,13	7,7
01/07/2009	349,74	18,04	350,43	34,255	346,37	11,61	346,37	335,35	1,79	335,35	15,55	340,29	6,23	335,33	6,23	335,33	0,13	7,7
11/07/2009	349,65	17,95	350,41	34,249	346,38	11,62	346,38	335,35	1,79	335,35	15,53	340,27	6,24	335,32	6,24	335,32	0,14	7,69
18/07/2009	349,59	17,99	350,29	34,243	346,43	11,67	346,43	335,34	1,78	335,34	15,51	340,25	6,24	335,32	6,24	335,32	0,14	7,69
25/07/2009	349,53	17,83	350,27	34,241	346,43	11,67	346,43	335,34	1,78	335,34	15,5	340,24	6,24	335,32	6,24	335,32	0,15	7,68
29/07/2009	349,49	17,79	350,18	34,241	346,42	11,66	346,42	335,35	1,79	335,35	15,49	340,23	6,25	335,31	6,25	335,31	0,15	7,68
06/08/2009	349,40	17,70	350,09	34,239	346,43	11,67	346,43	335,35	1,79	335,35	15,48	340,23	6,25	335,31	6,25	335,31	0,15	7,68
			350,06	34,238	346,43	11,67	346,43	335,34	1,78	335,34	15,48	340,22	6,26	335,3	6,26	335,3	0,16	7,67

Fonte: Disponibilizado pela COGERH

Tabela A5 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 02, obtidos jan a dez 2009 (continuação)

13/08/2009	349,34	17,64	5,37	17,78	350,03	#N/D	#N/D	#N/D	3,46	11,66	346,42	9,73	15,41	340,15	6,23	1,77	335,33	6,27	8,22	335,29	0,16	7,67	334,66
20/08/2009	349,25	17,55	5,42	17,73	349,98	13,1	21,9	342,3	3,46	11,66	346,42	9,81	15,33	340,07	6,23	1,77	335,33	6,28	8,21	335,28	0,16	7,67	334,66
27/08/2009	349,16	17,46	5,52	17,63	349,88	13,08	21,92	342,32	3,52	11,6	346,36	9,8	15,34	340,08	6,23	1,77	335,33	6,26	8,23	335,3	0,15	7,68	334,67
31/08/2009	349,13	17,43	5,6	17,55	349,8	13,04	21,96	342,36	3,61	11,51	346,27	9,78	15,36	340,1	6,23	1,77	335,33	6,25	8,24	335,31	0,14	7,69	334,68
03/09/2009	349,10	17,40	5,61	17,54	349,79	13	22	342,4	3,62	11,5	346,26	9,79	15,35	340,09	6,23	1,77	335,33	6,25	8,24	335,31	0,14	7,69	334,68
10/09/2009	349,02	17,32	5,63	17,52	349,77	13,14	21,86	342,26	3,65	11,47	346,23	9,84	15,3	340,04	6,26	1,74	335,3	6,27	8,22	335,29	0,16	7,67	334,66
16/09/2009	348,96	17,26	5,35	17,8	350,05	13,08	21,92	342,32	3,64	11,48	346,24	9,8	15,34	340,08	6,23	1,77	335,33	6,24	8,25	335,32	0,16	7,67	334,66
23/09/2009	348,87	17,17	5,76	17,39	349,64	13,1	21,9	342,3	3,77	11,35	346,11	9,84	15,3	340,04	6,26	1,74	335,3	6,26	8,23	335,3	0,18	7,65	334,64
30/09/2009	348,78	17,08	5,85	17,3	349,55	13,15	21,85	342,25	3,8	11,32	346,08	9,88	15,26	340	6,27	1,73	335,29	6,27	8,22	335,29	0,18	7,65	334,64
07/10/2009	348,70	17,00	5,93	17,22	349,47	13,24	21,76	342,16	3,77	11,35	346,11	9,94	15,2	339,94	6,29	1,71	335,27	6,29	8,2	335,27	0,21	7,62	334,61
14/10/2009	348,61	16,91	5,97	17,18	349,43	13,28	21,72	342,12	3,78	11,34	346,1	9,95	15,19	339,93	6,29	1,71	335,27	6,29	8,2	335,27	0,21	7,62	334,61
21/10/2009	348,51	16,81	6,01	17,14	349,39	13,32	21,68	342,08	3,79	11,33	346,09	9,96	15,18	339,92	6,29	1,71	335,27	6,29	8,2	335,27	0,21	7,62	334,61
28/10/2009	348,42	16,72	6,13	17,02	349,27	13,33	21,67	342,07	3,97	11,15	345,91	10,01	15,13	339,87	6,3	1,70	335,26	6,3	8,19	335,26	0,21	7,62	334,61
31/10/2009	348,39	16,69	6,15	17	349,25	13,34	21,66	342,06	3,99	11,13	345,89	10,02	15,12	339,86	6,3	1,70	335,26	6,31	8,18	335,25	0,21	7,62	334,61
04/11/2009	348,34	16,64	6,35	16,8	349,05	14,49	20,51	340,91	4,13	10,99	345,75	10,11	15,03	339,77	6,35	1,65	335,21	6,4	8,09	335,16	0,2	7,63	334,62
17/11/2009	348,20	16,50	6,41	16,74	348,99	14,49	20,51	340,91	4,13	10,99	345,75	10,12	15,02	339,76	6,35	1,65	335,21	6,38	8,11	335,18	0,21	7,62	334,61
20/11/2009	348,17	16,47	6,43	16,72	348,97	14,5	20,5	340,9	4,13	10,99	345,75	10,13	15,01	339,75	6,35	1,65	335,21	6,38	8,11	335,18	0,21	7,62	334,61
24/11/2009	348,13	16,43	6,43	16,72	348,97	14,5	20,5	340,9	4,13	10,99	345,75	10,13	15,01	339,75	6,35	1,65	335,21	6,38	8,11	335,18	0,22	7,61	334,6
30/11/2009	348,06	16,36	6,44	16,71	348,96	14,5	20,5	340,9	4,13	10,99	345,75	10,13	15,01	339,75	6,36	1,64	335,2	6,38	8,11	335,18	0,22	7,61	334,6
03/12/2009	348,02	16,32	6,65	16,5	348,75	13,63	21,37	341,77	4,25	10,87	345,63	10,23	14,91	339,65	6,36	1,64	335,2	6,34	8,15	335,22	0,22	7,61	334,6
16/12/2009	347,84	16,14	6,69	16,46	348,71	13,7	21,3	341,7	4,26	10,86	345,62	10,23	14,91	339,65	6,36	1,64	335,2	6,35	8,14	335,21	0,22	7,61	334,6
22/12/2009	347,79	16,09	6,76	16,39	348,64	13,72	21,28	341,68	4,27	10,85	345,61	10,28	14,86	339,6	6,37	1,63	335,19	6,46	8,03	335,1	0,22	7,61	334,6
27/12/2009	347,75	16,05	6,76	16,39	348,64	13,72	21,28	341,68	4,29	10,83	345,59	10,33	14,81	339,55	6,4	1,60	335,16	6,46	8,03	335,1	0,22	7,61	334,6
31/12/2009	347,73	16,03	6,77	16,38	348,63	13,72	21,28	341,68	4,32	10,8	345,56	10,33	14,81	339,55	6,4	1,60	335,16	6,46	8,03	335,1	0,22	7,61	334,6

Fonte: Disponibilizado pela COGERH



Tabela A6 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 03, obtidos em 10 de dezembro de 2009 (continuação)

25/07/2009	349,53	17,83	4,14	19,81	351,26	13,51	21,87	341,89	3,01	11,76	346,87	13,61	11,61	336,27	4,01	4,29	337,55	6,15	8,05	335,41	1,04	5,2	/1,04	0,66	5,58	334,54
29/07/2009	349,49	17,79	4,19	19,76	351,21	13,51	21,87	341,89	3,07	11,7	346,81	13,67	11,55	336,21	4,01	4,29	337,55	6,15	8,05	335,41	1,04	5,2	/1,04	0,67	5,57	334,53
06/08/2009	349,40	17,70	4,21	19,74	351,19	13,62	21,76	341,78	3,08	11,69	346,8	13,68	11,54	336,2	4	4,3	337,56	6,15	8,05	335,41	1,04	5,2	/1,04	0,67	5,57	334,53
13/08/2009	349,34	17,64	4,25	19,7	351,15	13,7	21,68	341,7	3,12	11,65	346,76	13,8	11,42	336,08	3,91	4,39	337,65	6,16	8,04	335,4	1,05	5,19	/1,05	0,67	5,57	334,53
20/08/2009	349,25	17,55	4,28	19,67	351,12	13,75	21,63	341,65	3,18	11,59	346,7	13,81	11,41	336,07	3,81	4,49	337,75	6,18	8,02	335,38	1,05	5,19	/1,05	0,69	5,55	334,51
27/08/2009	349,16	17,46	4,45	19,5	350,95	13,75	21,63	341,65	3,21	11,56	346,67	13,84	11,38	336,04	3,71	4,59	337,85	6,15	8,05	335,41	1,05	5,19	/1,05	0,68	5,56	334,52
31/08/2009	349,13	17,43	4,5	19,45	350,9	13,77	21,61	341,63	3,29	11,48	346,59	13,85	11,37	336,03	3,57	4,73	337,99	6,12	8,08	335,44	1,05	5,19	/1,05	0,67	5,57	334,53
03/09/2009	349,10	17,40	4,51	19,44	350,89	13,78	21,6	341,62	3,3	11,47	346,58	13,84	11,38	336,04	3,57	4,73	337,99	6,13	8,07	335,43	1,06	5,18	/1,06	0,68	5,56	334,52
10/09/2009	349,02	17,32	4,55	19,4	350,85	13,81	21,57	341,59	3,32	11,45	346,56	13,96	11,26	335,92	3,57	4,73	337,99	6,16	8,04	335,4	1,09	5,15	/1,09	0,7	5,54	334,5
16/09/2009	348,96	17,26	4,55	19,4	350,85	13,77	21,61	341,63	3,3	11,47	346,58	13,85	11,37	336,03	3,46	4,84	338,1	6,14	8,06	335,42	1,06	5,18	/1,06	0,69	5,55	334,51
23/09/2009	348,87	17,17	4,67	19,28	350,73	13,8	21,58	341,6	3,4	11,37	346,48	13,89	11,33	335,99	3,75	4,55	337,81	6,15	8,05	335,41	1,08	5,16	/1,08	0,7	5,54	334,5
30/09/2009	348,78	17,08	4,77	19,18	350,63	13,82	21,56	341,58	3,46	11,31	346,42	13,91	11,31	335,97	3,9	4,4	337,66	6,17	8,03	335,39	1,09	5,15	/1,09	0,72	5,52	334,48
07/10/2009	348,70	17,00	4,85	19,1	350,55	13,81	21,57	341,59	3,51	11,26	346,37	13,91	11,31	335,97	3,86	4,44	337,7	6,19	8,01	335,37	1,1	5,14	/1,1	0,72	5,52	334,48
14/10/2009	348,61	16,91	4,92	19,03	350,48	13,85	21,53	341,55	3,53	11,24	346,35	13,93	11,29	335,95	3,85	4,45	337,71	6,2	8	335,36	1,1	5,14	/1,1	0,73	5,51	334,47
21/10/2009	348,51	16,81	4,97	18,98	350,43	13,89	21,49	341,51	3,55	11,22	346,33	13,95	11,27	335,93	3,84	4,46	337,72	6,21	7,99	335,35	1,1	5,14	/1,1	0,74	5,5	334,46
28/10/2009	348,42	16,72	5,07	18,88	350,33	13,92	21,46	341,48	3,57	11,2	346,31	13,97	11,25	335,91	3,79	4,51	337,77	6,22	7,98	335,34	1,11	5,13	/1,11	0,74	5,5	334,46
31/10/2009	348,39	16,69	5,07	18,88	350,33	13,92	21,46	341,48	3,62	11,15	346,26	13,97	11,25	335,91	3,79	4,51	337,77	6,22	7,98	335,34	1,14	5,1	/1,14	0,75	5,49	334,45
04/11/2009	348,34	16,64	5,32	18,63	350,08	13,99	21,39	341,41	3,9	10,87	345,98	13,98	11,24	335,9	3,84	4,46	337,72	6,24	7,96	335,32	1,16	5,08	/1,16	0,74	5,5	334,46
17/11/2009	348,20	16,50	5,34	18,61	350,06	13,99	21,39	341,41	3,91	10,86	345,97	13,98	11,24	335,9	3,78	4,52	337,78	6,24	7,96	335,32	1,16	5,08	/1,16	0,76	5,48	334,44
20/11/2009	348,17	16,47	5,34	18,61	350,06	14	21,38	341,4	3,91	10,86	345,97	13,99	11,23	335,89	3,71	4,59	337,85	6,25	7,95	335,31	1,15	5,09	/1,15	0,76	5,48	334,44
24/11/2009	348,13	16,43	5,38	18,57	350,02	14,01	21,37	341,39	3,92	10,85	345,96	14	11,22	335,88	3,71	4,59	337,85	6,27	7,93	335,29	1,14	5,1	/1,14	0,76	5,48	334,44
30/11/2009	348,06	16,36	5,38	18,57	350,02	14,02	21,36	341,38	3,92	10,85	345,96	14,01	11,21	335,87	3,62	4,68	337,94	6,3	7,9	335,26	1,14	5,1	/1,14	0,78	5,46	334,42
03/12/2009	348,02	16,32	5,56	18,39	349,84	14,13	21,25	341,27	4,01	10,76	345,87	14	11,22	335,88	3,97	4,33	337,59	6,3	7,9	335,26	1,14	5,1	/1,14	0,3	5,94	334,9
16/12/2009	347,84	16,14	5,63	18,32	349,77	14,13	21,25	341,27	4,01	10,76	345,87	14,01	11,21	335,87	3,97	4,33	337,59	6,3	7,9	335,26	1,14	5,1	/1,14	0,38	5,86	334,82
22/12/2009	347,79	16,09	5,73	18,22	349,67	14,14	21,24	341,26	4,03	10,74	345,85	14,01	11,21	335,87	3,97	4,33	337,59	6,3	7,9	335,26	1,14	5,1	/1,14	0,51	5,73	334,69
27/12/2009	347,75	16,05	5,74	18,21	349,66	14,14	21,24	341,26	4,03	10,74	345,85	14,02	11,2	335,86	3,97	4,33	337,59	6,31	7,89	335,25	1,14	5,1	/1,14	0,69	5,55	334,51
31/12/2009	347,73	16,03	5,74	18,21	349,66	14,14	21,24	341,26	4,05	10,72	345,83	14,02	11,2	335,86	3,97	4,33	337,59	6,31	7,89	335,25	1,14	5,1	/1,14	0,69	5,55	334,51

Fonte: Disponibilizado pela COGERH



Tabela A9 - Níveis nos piezômetros e nos medidores de nível de água da seção instrumentada 03, obtidos jun 2022

DATA	NAA		NA.3.1.1			PZ.3.1.1			NA.3.2.1			PZ.3.2.1			NA.3.3.1			PZ.3.3.1		
	Cota leito (m)	Altura NA (m)	Cota furo (m)		Cota Piez. (m)	Cota furo (m)		Cota NA (m)	Cota furo (m)		Cota Piez. (m)	Cota furo (m)		Cota NA (m)	Cota furo (m)		Cota Piez. (m)	Cota furo (m)		Cota Piez. (m)
			Prof. (m)	Altura NA (m)		Prof. (m)	Altura NA (m)		Prof. (m)	Altura NA (m)		Prof. (m)	Altura NA (m)		Prof. (m)	Altura NA (m)		Prof. (m)	Altura NA (m)	
14/06/2022	350,00	18,30	13,3	10,65	342,1	3,64	31,74	351,76	13,93	0,84	335,95	4,66	20,56	345,22	4,06	4,24	337,5	5,9	8,3	335,66
15/06/2022	350,00	18,30	13,31	10,64	342,09	3,64	31,74	351,76	13,93	0,84	335,95	4,62	20,6	345,26	4,13	4,17	337,43	5,87	8,33	335,69
16/06/2022	350,00	18,30	13,33	10,62	342,07	3,65	31,73	351,75	13,95	0,82	335,93	4,6	20,62	345,28	4,18	4,12	337,38	5,87	8,33	335,69
17/06/2022	350,00	18,30	13,36	10,59	342,04	3,65	31,73	351,75	13,95	0,82	335,93	4,54	20,68	345,34	4,23	4,07	337,33	5,87	8,33	335,69
18/06/2022	350,00	18,30	13,39	10,56	342,01	3,65	31,73	351,75	13,95	0,82	335,93	4,5	20,72	345,38	4,25	4,05	337,31	5,87	8,33	335,69
20/06/2022	349,99	18,29	13,4	10,55	342	3,7	31,68	351,7	13,94	0,83	335,94	4,5	20,72	345,38	4,43	3,87	337,13	5,87	8,33	335,69
21/06/2022	349,97	18,27	13,41	10,54	341,99	3,72	31,66	351,68	13,93	0,84	335,95	4,47	20,75	345,41	4,4	3,9	337,16	5,88	8,32	335,68
22/06/2022	349,95	18,25	13,48	10,47	341,92	3,71	31,67	351,69	14,2	0,57	335,68	4,42	20,8	345,46	4,41	3,89	337,15	6,13	8,07	335,43
23/06/2022	349,94	18,24	13,54	10,41	341,86	3,71	31,67	351,69	14,23	0,54	335,65	4,4	20,82	345,48	4,44	3,86	337,12	6,15	8,05	335,41
24/06/2022	349,93	18,23	13,55	10,4	341,85	3,71	31,67	351,69	14,22	0,55	335,66	4,31	20,91	345,57	4,44	3,86	337,12	6,16	8,04	335,4
25/06/2022	349,92	18,22	13,57	10,38	341,83	3,71	31,67	351,69	14,22	0,55	335,66	4,34	20,88	345,54	4,43	3,87	337,13	6,17	8,03	335,39
26/06/2022	349,92	18,22	13,59	10,36	341,81	3,71	31,67	351,69	14,22	0,55	335,66	4,3	20,92	345,58	4,42	3,88	337,14	6,18	8,02	335,38
27/06/2022	349,91	18,21	13,53	10,42	341,87	3,74	31,64	351,66	14,2	0,57	335,68	4,31	20,91	345,57	4,46	3,84	337,1	6,16	8,04	335,4
28/06/2022	349,90	18,20	13,5	10,45	341,9	3,76	31,62	351,64	14,19	0,58	335,69	4,31	20,91	345,57	4,48	3,82	337,08	6,15	8,05	335,41

Fonte: Disponibilizado pela COGERH