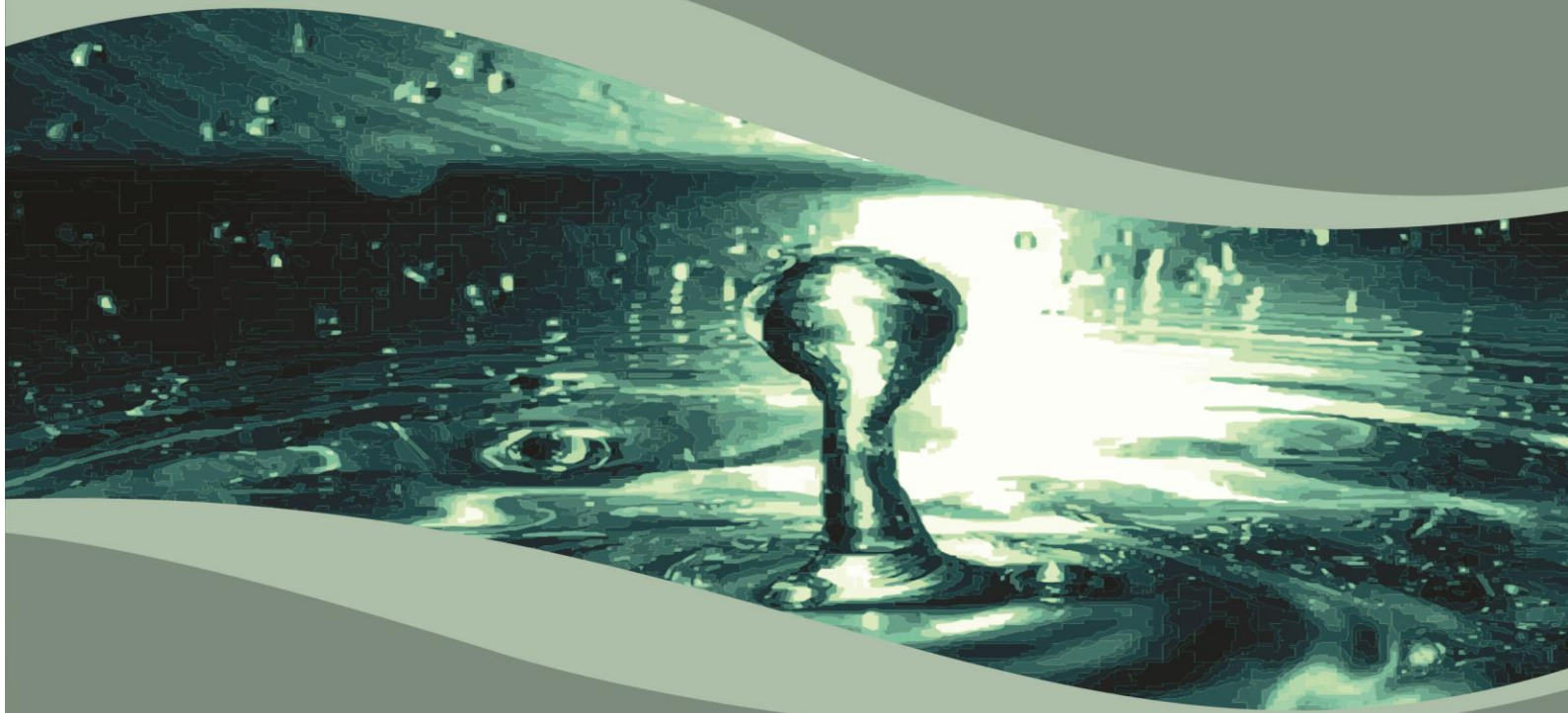


ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA SUBSIDIAR A GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ.

Relatório Final – RF
Anexo II

Bases Teóricas do Método das Diferenças Finitas para Modelos de Fluxo Subterrâneo, Sistematização dos Dados - Base Access – Maceió e Resultados das Análises Físico-Químicas, BETEX/Fenóis, Bacteriológicas e Isótopos



República Federativa do Brasil

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Ministério do Meio Ambiente

Izabella Mônica Vieira Teixeira

Ministra

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Vicente Andreu – Diretor-Presidente

Dalvino Troccoli Franca

João Gilberto Lotufo Conejo

Paulo Lopes Varella Neto

Paulo Rodrigues Vieira

Superintendência de Implementação e Programas e Projetos

Ricardo Medeiros de Andrade

Humberto Cardoso Gonçalves

Gerência de Águas Subterrâneas

Fernando Roberto de Oliveira (Gerente)

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabrcio Bueno da Fonseca Cardoso

Flávio Soares do Nascimento

Leonardo de Almeida

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Marco Vinicius Castro Gonçalves

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (ANA)

Fernando Roberto de Oliveira (ANA)

Flávio Soares do Nascimento (ANA)

Hugo Fernandes dos Santos Pedrosa (SEMARH/AL)

Jorge Francisco de Araújo (SEMARH/AL)

Rochana de Andrade Lima (SEMARH/AL)

Wilton José Silva da Rocha (SEMARH/AL)

Consórcio PROJETEC/TECHNE (Coordenação Geral)

João Guimarães Recena

Luiz Alberto Teixeira

Antonio Carlos de Almeida Vidon

Gerência do Contrato

Marcelo Casiuch

Membros da Equipe Técnica Executora

Waldir Duarte Costa (Coordenador)

Almany Costa Santos

Audrey Oliveira de Lima

Carine Antunes Correia Marinho

Dante Melo

Francis Miller Judas Virtuoso da Silva

Givanildo Oliveira

Iremar Accioly Bayma

João Manoel Filho

José Coelho de Araújo Filho

José Geilson Alves Demetrio

Maria Carolina da Motta Agra

Mario Amilde Valença dos Santos

Simone Rosa e Silva

Terezinha Matilde de Menezes Uchôa

**ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA SUBSIDIAR A GESTÃO
SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS
NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ**

Relatório Final - Anexo II

**Bases Teóricas do Método das Diferenças Finitas para Modelos de Fluxo
Subterrâneo, Sistematização dos Dados - Base Access – Maceió e
Resultados das Análises Físico-Químicas, BETEX/Fenóis,
Bacteriológicas e Isótopos**

Setembro/2011

Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L e M
CEP: 70610-200, Brasília – DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Equipe:

Agência Nacional de Águas – ANA
Superintendência de Implementação de Programas e Projetos – SIP

Elaboração e execução:

Consórcio PROJETEC-TECHNE

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió.

Relatório Final - Anexo II

Bases Teóricas do Método das Diferenças Finitas para Modelos de Fluxo Subterrâneo, Sistematização dos Dados - Base Access – Maceió e Resultados das Análises Físico-Químicas, BETEX/Fenóis, Bacteriológicas e Isótopos

Brasília: ANA, SIP, 2011.

1. Recursos hídricos
 2. Região Metropolitana de Maceió
- I. Agência Nacional de Águas
 - II. Consórcio PROJETEC-TECHNE.

SUMÁRIO

A.2 - BASES TEÓRICAS DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS PARA MODELOS DE FLUXO SUBTERRÂNEO	14
A.2.1. Introdução	14
A.2.2. Histórico	14
A.2.3. Equação Diferencial do Fluxo Subterrâneo.....	17
A.2.4. Condições de Contorno	21
A.2.5. Discretização	23
A.2.6. Método das Diferenças Finitas para o Regime Permanente	24
A.2.7. Método das Diferenças Finitas para o Regime Transitório.....	27
A.2.8. Método de Resolução dos Sistemas de Equações Lineares.....	30
A.2.9. O Modflow	33
A.2.10. Método das Diferenças Finitas para o Modflow	33
A.3 - SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS - BASE ACCESS – MACEIÓ	48
A.3.1 - Kit de Recursos Técnicos da Base de Dados Access Maceió	48
A.3.2 – Funcionalidades	67
A.3.3. Instalação do aplicativo	83
A4 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS, BETEX/FENÓIS, BACTERIOLÓGICAS E ISÓTOPOS NATURAIS	87
A.4.1. Análises Físico-Químicas	88
A.4.1.1. Análises Físico-Químicas – 1ª Campanha	91
A.4.1.2. Análises Físico-Químicas – 2ª Campanha	93
A.4.2. Análises de BETEX/FENÓIS	95
A.4.3. Análises Bacteriológicas	98
A.4.4. Análises de Isótopos Naturais	89
BIBLIOGRAFIA.....	93

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro A.2.1 - Rebaixamentos a 100 m do poço.	30
Quadro A.4.2 – Relação de localidades dos pontos de coleta de amostras para análises de BETEX e fenóis.	96
Quadro A.4.3. – Identificação e Local de Coleta de Água para as Análises Bacteriológicas.	99
Quadro A.4.4. – Localização dos poços onde foram coletadas amostras para realização de análises de isótopos naturais.	90
Quadro A.4.4. – Localização dos poços onde foram coletadas amostras para realização de análises de isótopos naturais (continuação).	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A.2.1 - Correspondência entre um aquífero (protótipo) e um modelo em papel condutor.....	16
Figura A.2.2 – Volume elementar representativo em um campo de fluxo.....	17
Figura A.2.3 - Diferentes tipos de limites de um aquífero.....	21
Figura A.2.4 – Secção transversal esquemática de um aquífero.	22
Figura A.2.5 – Concepção matemática do aquífero da figura A.2.4.	22
Figura A.2.6 - Discretização de um sistema aquífero.....	24
Figura A.2.7 - Malhas de discretização.	24
Figura A.2.8 - Malha de discretização para aproximação em diferenças finitas.	25
Figura A.2.9- Exemplo de uma região próxima a um poço tubular.....	26
Figura A.2.10 – Aquífero bidimensional com volume elementar representativo para a determinação da equação de Poisson.	27
Figura A.2.11 - Célula i,j,k e os índices para as seis células adjacentes.....	35
Figura A.2.12 - Fluxo para célula i,j,k a partir da célula $i,j-1,k$	35
Figura A.2.13 - Drenança através do leito do rio.....	38
Figura A.2.14 - Hidrógrafa para a célula i,j,k	40
Figura A.2.15 - Discretização de um aquífero e definição dos tipos de células.	42
Figura A.2.16 – Representação gráfica do método iterativo.....	44
Figura A.2.17 - Discretização de um rio.....	46
Figura A.2.18 - Drenagem através do leito de um rio em função da carga do aquífero.	47
Figura A.3.2 – Formulário do menu principal com as opções de cadastro.	68
Figura A.3.3 – Formulário de Cadastro de entrada de dados para novo poço.....	68
Figura A.3.4 – Formulário de cadastro de Infraestrutura Hídrica acessado a partir do clique no botão Infraestrutura Hídrica no formulário de Cadastro para novo poço exibindo caixa combo para escolha do tipo de reservação.	69
Figura A.3.5 – Formulário de cadastro de Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas acessado a partir do clique no botão Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas, no formulário de cadastro para novo poço e nova análise.	70

- Figura A.3.6 – Formulário de cadastro de Perfil Construtivo acessado a partir do clique no botão Perfil Construtivo no formulário de cadastro para novo poço exibindo a aba Perfuração para entrada dos dados de perfuração. 71
- Figura A.3.7 – Formulário de Cadastro de Perfil Construtivo acessado a partir do clique no botão Perfil Construtivo no formulário de Cadastro para novo poço exibindo a aba Revestimento para entrada dos dados com lista de escolha do material do revestimento. 71
- Figura A.3.8 – Formulário de Cadastro de Perfil Construtivo acessado a partir do clique no botão Perfil Construtivo no formulário de Cadastro para novo poço exibindo a aba Filtro para entrada dos dados dos filtros do poço. 72
- Figura A.3.9 – Formulário de Cadastro de Perfil Construtivo acessado a partir do clique no botão Perfil Construtivo no formulário de Cadastro para novo poço exibindo a aba Anular para entrada dos dados do espaço anular do poço e caixa combo de escolha do material do referido espaço, incluindo Duto de completação de Pré-filtro, quando for o caso..... 72
- Figura A.3.10 – Formulário de Cadastro de Perfilagens, acessado a partir do clique no botão Perfilagens no formulário de Cadastro para novo poço exibindo a aba Litológica para entrada da descrição litológica do material perfurado e o respectivo intervalo de ocorrência..... 73
- Figura A.3.11 – Formulário de Cadastro de Perfilagens do poço, acessado a partir do clique no botão Perfilagens no formulário de Cadastro para novo poço exibindo a aba Ótica para entrada do intervalo do perfil ótico observado e descrição do que foi revelado pela imagem. 73
- Figura A.3.12 – Formulário de Cadastro de Perfilagens do poço, acessado a partir do clique no botão Perfilagens no formulário de Cadastro para novo poço exibindo a aba Geofísica e caixas de entrada dos dados descritivos do tipo de perfilagem e seu intervalo no poço. 74
- Figura A.3.13 – Formulário de Cadastro de Equipamento de Bombeamento acessado a partir do clique no botão Equipamento de Bombeamento no formulário de Cadastro para novo poço e no botão Editar exibindo as caixas de texto e caixas combo para entrada dos dados..... 75
- Figura A.3.14 – Formulário de Cadastro de Teste de Bombeamento acessado a partir do clique no botão Teste de Bombeamento no formulário de Cadastro para novo poço e no botão Novo Teste exibindo as caixas de texto e caixas combo para entrada dos dados. 75
- Figura A.3.15 – Formulário de Cadastro de Novo Registro de Outorga acessado a partir do clique no botão Outorgas no formulário de Cadastro seguido de um clique no botão Novo no formulário Registro de Outorga exibindo as caixas de texto e caixas combo para entrada dos dados. 76
- Figura A.3.16 – Formulário de Cadastro de Proprietário acessado a partir do clique no submenu Cadastro Proprietário seguido de um clique no botão Novo no

formulário Cadastro de Proprietário, exibindo as caixas de texto e combo para entrada dos dados.	76
Figura A.3.17 – Menu Consulta exibindo os três sub-menus considerados: Ponto D´água, Proprietários e Outorgas.....	77
Figura A.3.18 – Formulário de Consulta de Ponto D´água acessado a partir do clique no menu Consulta exibindo o formulário Consulta de Ponto D´água Simplificada e a lista de critérios da pesquisa.	77
Figura A.3.19 – Formulário de Consulta de Ponto D´água acessado a partir do clique no menu Consulta exibindo o formulário Consulta de Ponto D´água Simplificada, a seleção do critério de busca (Aquífero), o nome do Aquífero (Barreiras) e a mensagem de 539 registros encontrados.	
Figura A.3.20 – Formulário de Busca Avançada acessado a partir do clique no botão Busca Avançada no formulário Consulta de Ponto D´água Simplificada; para o critério (Poços com Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas) e o critério adicional (Aquífero Barreiras) após clicar no botão Buscar, lê-se no canto inferior esquerdo a mensagem: Resultado: 112 registros encontrados.	78
Figura A.3.21 – Formulário de Busca Avançada acessado a partir do clique no botão Busca Avançada no formulário Consulta de Ponto D´água Simplificada; para o critério (Poços com Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas) e os critérios adicionais (Aquífero Barreiras no Bairro Tabuleiro do Martins) após clicar no botão Buscar, lê-se no canto inferior esquerdo a mensagem: Resultado: 18 registros encontrados.....	79
Figura A.3.22 – Formulário Outorgas com o resultado da consulta de poços outorgados existentes no sistema.	79
Figura A.3.23 – Consulta de poços outorgados no Bairro de Tabuleiro do Martins.	80
Figura A.3.24 – Consulta de poços outorgados por Proprietário, retornando 14 registros para o proprietário TRIKEM.	80
Figura A.3.25 – Opções de emissão de relatórios.....	81
Figura A.3.26 – Formulário de solicitação de informação e confirmação do ID do poço cujo relatório se deseja. No caso o poço pretendido é o de ID=37.	81
Figura A.3.27 – Relatório emitido para o poço ID = 37.....	82
Figura A.3.28 – Exemplo de relatório do número de poços por proprietário.	82
Figura A.3.29 - Arquivo Fornecido.	83
Figura A.3.30 - Arquivos descompactados.....	83
Figura A.3.31 - Instalação Framework .NET.	84
Figura A.3.32 - Instalação Aplicativo.....	84

Figura A.3.33 - Configuração de Instalação.....	85
Figura A.3.34 - Confirmação de Instalação.....	85
Figura A.3.35 - Procedimento de Instalação do Aplicativo.....	86
Figura A.3.36 - Confirmação de Instalação concluída com Sucesso.....	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela A.3.1. – Ponto D'água. Essa tabela representa um ponto de água - lago, lagoa, sondagens, poços tubulares, amazonas, coletores, barragem subterrânea, etc.	48
Tabela A.3.1.1 – tbDatum. Lista dos sistemas de projeção de coordenadas.	49
Tabela A.3.1.2. tbNaturezaPonto. Tabela lista dos tipos de ponto de água.	49
Tabela A.3.1.3 - Proprietario. Essa tabela contém os registros dos proprietários dos pontos de água.	51
Tabela A.3.1.4 - tBMunicipio: Tabela lista dos municípios do Estado de Alagoas.	51
Tabela A.3.1.5 – tbRegiaoHidrografica. Tabela lista das regiões hidrográficas do Estado de Alagoas.	51
Tabela A.3.1.6 – tbBaciaHidrografica. Tabela lista das bacias hidrográficas do Estado de Alagoas.	51
Tabela A.3.2 - CaracteristicasPoco. Tabela de características técnicas do poço e de identificação do responsável técnico pela construção.	52
Tabela A.3.2.1 – tbMetodoPerfuracao. Tabela lista de métodos de perfuração.	52
Tabela A.3.2.2 - SecaoPerfuracao. Tabela com os diâmetros e extensões perfuradas de acordo com o projeto da perfuração.	52
Tabela A.3.2.3 - SecaoLitologia – Tabela com descrição da seção litológica do poço.	53
Tabela A.3.2.4 – SecaoRevestimento. Tabela dos intervalos de instalação do revestimento.	53
Tabela A.3.2.4.1 - tbTipoRevestimento. Tabela lista de materiais de revestimento.	53
Tabela A.3.2.5 - SecaoFiltro. Tabela dos intervalos de instalação de filtros.	54
Tabela A.3.2.5.1 - tbTipoFiltro. Tabela lista de materiais constituintes dos filtros.	54
Tabela A.3.2.6 - SecaoAnular. Tabela dos intervalos do espaço anular com diferentes preenchimentos.	54
Tabela A.3.2.6.1 - tbMaterialAnular. Tabela lista do tipo de material de preenchimento dos intervalos do espaço anular do poço.	55
Tabela A.3.3 - Aquifero. Tabela de nome e abrangência do aquífero.	55
Tabela A.3.3.1 - tbCondicaoPorosa. Tabela lista da condição de porosidade do aquífero.	55
Tabela A.3.3.2 - tbCondicaoHidraulica. Tabela lista da condição hidráulica do aquífero.	55

Tabela A.3.3.3 – tbUnGeologicaAflorante. Tabela lista da unidade geológica aflorante no local do ponto d'água.....	56
Tabela A.3.3.4 – tbTipoSolo. Tabela lista do tipo de solo no local do ponto d'água.	56
Tabela A.3.4 - AmostraDagua. Essa tabela define as condições de coleta, de análise e principais elementos físico-químicos.....	56
Tabela A.3.4.1 - AnalisesFisicoQuimicasBacteriologicas. Tabela que identifica os valores dos constituintes físico-químicos e bacteriológicos, unidades e teores. .	57
Tabela A.3.4.1 - AnalisesFisicoQuimicasBacteriologicas. Tabela que identifica os valores dos constituintes físico-químicos e bacteriológicos, unidades e teores (continuação).	58
Tabela A.3.5 - tbUsoAgua. Tabela lista de tipos de uso da água.	58
Tabela A.3.6 - Reservatorio. Tabela de reservatório existente no ponto d'água.	58
Tabela A.3.6.1 – tbTipoReservatorio. Tabela lista de tipos de reservatório.....	59
Tabela A.3.7 – Outorgas. Tabela de outorgas de pontos de água.	59
Tabela A.3.7.1 – VazaoOutorgada. Tabela de vazão outorgada do ponto de água. ...	60
Tabela A.3.7.2 – VazaoHidrômetro. Tabela de vazão medida em hidrômetro no ponto de água.....	61
Tabela A.3.7.3 – VazaoRequerida. Tabela de vazão requerida para exploração.	61
Tabela A.3.7.4 – tbAreaRestricao. Tabela lista de áreas de restrição.	61
Tabela A.3.7.5 – tbZonaExplotacao. Tabela lista de zonas de exploração.....	62
Tabela A.3.8 – PoçoOperante. Tabela de poço existente em operação.....	62
Tabela A.3.8.1 - FontesPoluicao. Tabela da fonte de poluição e sua distância ao poço operante.....	62
Tabela A.3.8.1.1 – tbFontePoluicao. Tabela lista de nomes de fontes de poluição.	62
Tabela A.3.8.2 – EquipamentoDeBombeamento. Tabela define as especificações da unidade de bombeamento instalada no poço.....	63
Tabela A.3.8.2.1 - tbTipoEquipamentoBomb. Tabela lista de tipos de equipamentos de bombeamento.....	64
Tabela A.3.8.2.2 - tbFonteEnergia. Tabela lista de nomes da fonte de energia.	64
Tabela A.3.9 - TesteBombeamento. Tabela com o cabeçalho da ficha de teste e os resultados da interpretação.....	65
Tabela A.3.9.1 - tbTipoTesteBomb. Tabela lista de tipos de testes de bombeamento.	66

Tabela A.3.9.2 – Rebaixamento. Tabela de medições de nível dinâmico e vazão durante o teste do rebaixamento.....	66
Tabela A.3.9.3 – Recuperacao. Tabela de medições de nível dinâmico durante o teste de recuperação.....	66
Tabela A.3.9.4 - tbMetIntTesteBomb. Tabela lista de métodos de interpretação de testes de bombeamento.....	67
Tabela A.3.9.5 - tbUnidBombTeste. Tabela lista de unidades de bombeamento utilizadas em testes bombeamento.....	67

A.2 - BASES TEÓRICAS DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS PARA MODELOS DE FLUXO SUBTERRÂNEO

A.2.1. Introdução

Os modelos, de um modo geral, são ferramentas fundamentais para o planejamento e previsões de situações reais. Um exemplo simples é o mapa rodoviário, que é o modelo em papel da malha viária de uma determinada região. Através do exame de um mapa rodoviário, pode-se planejar previamente diversas rotas (simulações) para se alcançar determinado destino. Para cada rota é possível saber previamente a quilometragem, tipo de estrada, cidades, etc. Essas informações serão tanto mais precisas quanto mais detalhado for o mapa. Portanto, modelos são representações simplificadas de uma situação real, e como tal, têm suas limitações. Assim, um modelo matemático será a representação de uma realidade através de equações matemáticas. No caso da hidrogeologia, são utilizadas as equações que regem o fluxo subterrâneo.

Os modelos matemáticos na hidrogeologia tiveram um avanço considerável a partir da década de 60, quando os computadores tornaram-se velozes e com capacidade de memória compatível com o tamanho dos sistemas de equações lineares envolvidos nos modelos de fluxo subterrâneo. Atualmente os modelos matemáticos hidrogeológicos estão cada vez mais acessíveis, graças ao desenvolvimento da informática, pois os microcomputadores têm capacidade e velocidade que chegam a superar em muito os grandes computadores da década de 60, além de preços reduzidos.

No presente apêndice serão abordados apenas os modelos numéricos para o fluxo subterrâneo em meios porosos que utilizam o método de aproximação em diferenças finitas.

A.2.2. Histórico

Desde o final do século passado que se vem utilizando modelos na hidrogeologia. Segundo a ordem cronológica de utilização podem ser relacionados: Modelos em tanques de areia (escala reduzida), modelos analógicos (líquido viscoso e elétrico) e por último os modelos matemáticos numéricos (diferenças finitas e elementos finitos).

Os modelos em tanques de areia e líquido viscoso tiveram seu auge de utilização até o final da década de 40. Na década de 50 os modelos elétricos eram o que havia de mais moderno, principalmente devido ao avanço de novos componentes elétrico-eletrônicos após a 2ª guerra mundial.

A partir da década de 60, com o avanço dos computadores, os modelos matemáticos tornaram-se operacionais.

Os modelos em caixa de areia têm por base a reprodução do aquífero real, em modelo de escala reduzida em tanque ou caixa de areia. Estes modelos têm contra si a inconveniência na sua confecção e manipulação

Os modelos analógicos de fluido viscoso baseiam-se na semelhança entre o movimento da água em um meio poroso saturado, e o movimento de um fluido viscoso entre duas placas paralelas próximas. Esses modelos também são conhecidos pelo nome de Hele-Shaw.

A base matemática desses modelos está na analogia entre a lei de Darcy e as equações de Navier-Stokes, a qual diz: as velocidades médias V_x e V_z de um fluido viscoso entre duas placas paralelas e próximas são:

$$V_x = -K_m \frac{\partial h_m}{\partial x} \quad \text{e} \quad V_z = -K_m \frac{\partial h_m}{\partial x} \quad (\text{A2.1})$$

sendo:

$$K_m = \frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad - \text{condutividade hidráulica do modelo (L.T}^{-1}\text{)} \quad (\text{A2.2})$$

$$h_m = z + \frac{P}{\gamma} + \text{constante} \quad - \text{carga (L)}$$

b - distância entre as placas (L)

γ - peso específico do fluido (dinas.L⁻³)

μ - viscosidade dinâmica do fluido (poise)

Os modelos analógicos elétricos são divididos em três categorias:

- a) Modelos de Papel condutor
- b) Modelos de Resistências (R)
- c) Modelos de Resistências e Capacitores (RC)

Os modelos de papel condutor têm por objetivo a simulação do regime estacionário em aquíferos de espessura constante, homogêneos e planos. A base está na analogia entre o fluxo subterrâneo e o fluxo de corrente elétrica em um meio condutor, contínuo e de resistividade conhecida. Esta analogia deve-se a semelhança entre as leis de Darcy e Ohm.

Com auxílio da Figura A.2.1, pode-se analisar melhor esta analogia. O protótipo representa um aquífero de espessura b , extensão Δx_p e largura Δy_p , cujo fluxo através do mesmo é imposto pela diferença de carga Δh . Pela Lei de Darcy a vazão Q que atravessa a área $b\Delta y_p$ será:

$$Q = Kb\Delta y_p \frac{\Delta h}{\Delta x_p} \quad \text{ou} \quad Q = T\Delta y_p \frac{\Delta h}{\Delta x_p} \quad (\text{A2.3})$$

Enquanto no modelo, pela lei de Ohm, o fluxo de corrente que se desloca da esquerda para a direita será:

$$I = \left(\frac{1}{\rho} \right) \Delta V \frac{\Delta y_m}{\Delta x_m} \quad (\text{A2.4})$$

sendo:

I - fluxo de corrente

$1/\rho$ - condutividade elétrica do material

ΔV - diferença de potencial elétrico (tensão)

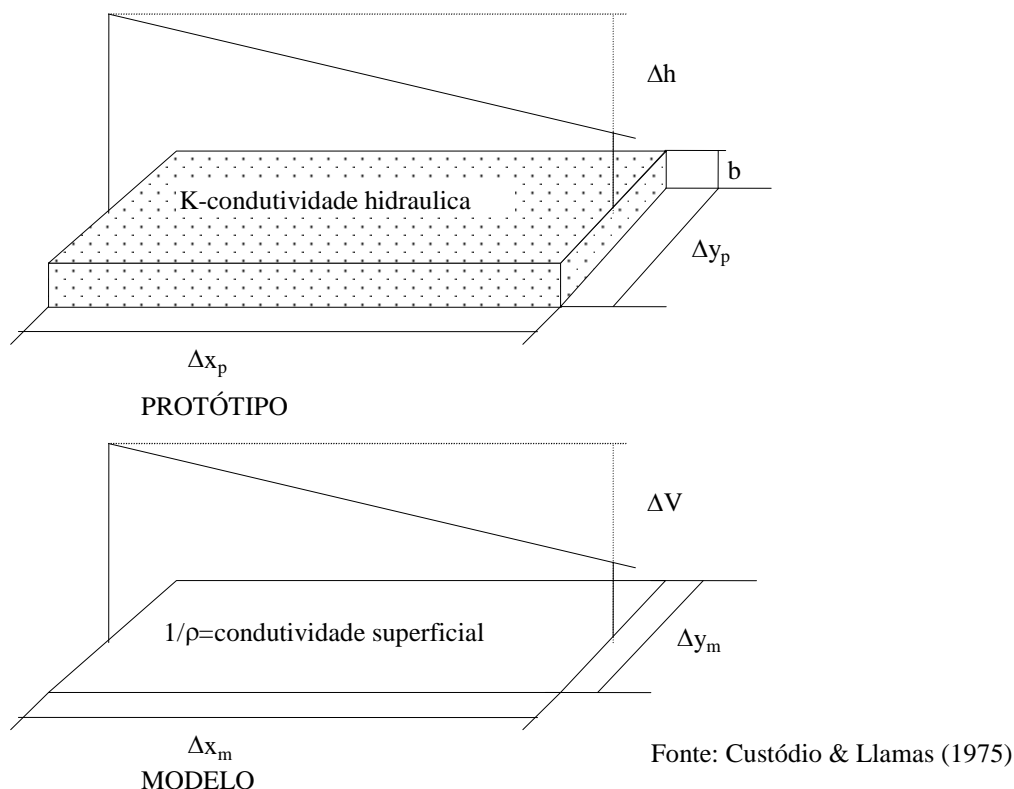


Figura A.2.1 - Correspondência entre um aquífero (protótipo) e um modelo em papel condutor.

Portanto, utilizando-se os fatores de escala adequados, a perfeita correlação entre as equações (A2.3) e (A2.4), permite utilizar o papel condutor para modelação de aquíferos.

Os modelos analógicos elétricos de resistências (R), a exemplo do papel condutor, são para simulações em regime permanente. A diferença é que o papel condutor permite a medição de potencial em qualquer ponto da superfície modelada, e nos modelos de resistências só em pontos bem definidos. Estes serão estabelecidos por discretização do aquífero modelado, sendo os pontos da malha de discretização do modelo (nós) ligados entre si por resistências elétricas.

Os modelos analógicos elétricos de resistências e capacitores (RC) são os mais completos dos modelos elétricos, pois, permitem simular aquíferos de espessuras variadas, heterogêneos e simular em regime transitório. Os modelos RC baseiam-se nas semelhanças entre:

- a) Lei de Darcy e a Lei de Ohm
- b) Armazenamento no aquífero e o armazenamento de carga elétrica nos capacitores
- c) Princípio da Continuidade Elétrica (conservação de carga) e a Equação da Continuidade (conservação da massa)

Os modelos matemáticos podem ser subdivididos da seguinte forma:

- a) Modelos Conceituais
- b) Modelos Analíticos
- c) Modelos Numéricos

Os modelos conceituais são as formulações matemáticas e condições de limites dos aquíferos, sem muita utilidade prática, porém é a base para o desenvolvimento dos demais modelos.

Os modelos analíticos são aqueles que utilizam funções bem definidas, por exemplo, a equação de Theis. Na obtenção dessas funções é necessário fazer diversas simplificações, limitando sua utilização a casos particulares. Já os modelos numéricos (diferenças finitas e elementos finitos), trabalham diretamente com as equações diferenciais do fluxo subterrâneo, eliminando-se as aproximações dos modelos analíticos. Os modelos numéricos podem ser utilizados nas mais variadas situações hidrogeológicas.

A.2.3. Equação Diferencial do Fluxo Subterrâneo

a) Equação da Continuidade (Conservação da massa)

Supondo-se um volume elementar, como na Figura A.2.2, colocado em um campo de velocidades \vec{V} , em um fluido qualquer, dentro de um sistema fechado, sem que haja perda ou acréscimo de massa ao sistema (inexistência de fontes e sumidouros).

O volume do elemento será:

$$\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

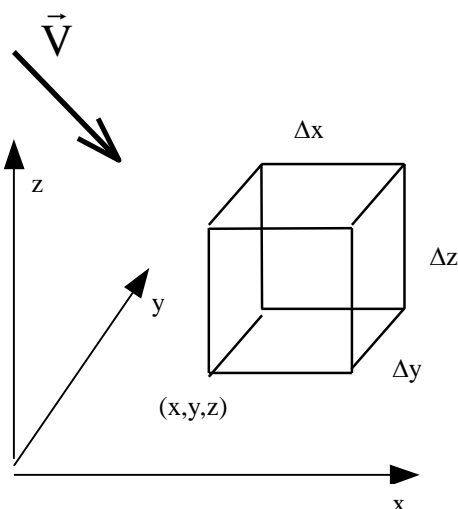
Decompondo-se o vetor velocidade nas três direções principais tem-se:

$$\vec{V} = V_1 \vec{i} + V_2 \vec{j} + V_3 \vec{k}$$

Para facilitar os cálculos será definido o vetor \vec{U} como:

$$\vec{U} = \rho \vec{V} = U_1 \vec{i} + U_2 \vec{j} + U_3 \vec{k}$$

Sendo ρ é a massa específica do fluido.



Fonte: Kreyszig, 1969

Figura A.2.2 – Volume elementar representativo em um campo de fluxo.

A quantidade de massa que entra pela face $\Delta x \Delta z$, num intervalo de tempo Δt , é dada por:

$$M_1 \approx U_2(y) \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

O volume que sairá pela face oposta por:

$$M_2 \approx U_2(y + \Delta y) \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

Como se estar procurando a variação de massa, então é feito:

$$M_2 - M_1 \approx [U_2(y + \Delta y) - U_2(y)] \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

ora,

$$U_2(y + \Delta y) - U_2(y) = \Delta U_2$$

$$M_2 - M_1 = \Delta U_2 \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

Multiplicando o segundo membro por $\Delta y / \Delta y$, tem-se:

$$M_2 - M_1 = \frac{\Delta U_2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta t}{\Delta y} = \frac{\Delta U_2 \cdot \Delta V \cdot \Delta t}{\Delta y}$$

Que é a variação de massa entre as faces $\Delta x \Delta z$. Respectivamente, de maneira similar, tem-se para as faces $\Delta x \Delta y$ e $\Delta y \Delta z$:

$$\frac{\Delta U_3 \cdot \Delta V \cdot \Delta t}{\Delta z} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta U_1 \cdot \Delta V \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

Logo a variação total de massa é dada por:

$$\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta x} + \frac{\Delta U_2}{\Delta y} + \frac{\Delta U_3}{\Delta z} \right) \cdot \Delta V \cdot \Delta t \tag{A2.5}$$

Pela conceituação de massa específica $m = \rho \Delta V$, logo para haver variação de massa, só havendo uma compressão ou descompressão do fluido no tempo, pois, ΔV é constante e o sistema é fechado. Portanto, a variação de massa é igual a:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta V \quad \text{- Taxa de variação da massa específica com o tempo, no volume elementar e no instante } t$$

Ao final do intervalo de tempo Δt tem-se:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta V \cdot \Delta t \tag{A2.6}$$

O sinal negativo de (A2.6) prende-se ao fato de que a soma das variações de massa (A2.5) e (A2.4) tem que ser nula, para que prevaleça a conservação da massa.

Igualando-se (A2.5) e (A2.6), tem-se:

$$\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta x} + \frac{\Delta U_2}{\Delta y} + \frac{\Delta U_3}{\Delta z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial t}$$

Tomando-se os limites de ambos os membros:

$$\lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0 \\ \Delta z \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta U_1}{\Delta x} + \frac{\Delta U_2}{\Delta y} + \frac{\Delta U_3}{\Delta z} \right) = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0 \\ \Delta z \rightarrow 0}} - \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{A2.7})$$

Ora,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta U_1}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{U_1(x + \Delta x) - U_1(x)}{\Delta x} = \frac{\partial U_1}{\partial x}$$

Como o limite da soma é a soma dos limites, então a equação (A2.7) pode ser rescrita como:

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial U_2}{\partial y} + \frac{\partial U_3}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{A2.8})$$

Ou

$$\text{div} \vec{U} = \text{div} \rho \vec{V} = - \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{ou} \quad \text{div} \rho \vec{V} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (\text{A2.9})$$

Que é a equação da continuidade ou conservação da massa.

Analisando-se a equação (A2.9) nota-se que, se o regime é estacionário, $\partial p / \partial t = 0$, e a equação (A2.7) fica:

$$\text{div} \rho \vec{V} = 0$$

E se o fluido é incompressível, ou seja, ρ constante, vem: $\text{div} \vec{V} = 0$

b) Equação do Fluxo Subterrâneo

Partindo da equação da continuidade e substituindo o vetor \mathbf{V} pela velocidade de Darcy, que é a velocidade da água em um meio poroso, tem-se:

$$V_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad V_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad V_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

Logo a equação da continuidade fica da seguinte forma:

$$- \frac{\partial p (K \partial h / \partial x)}{\partial x} - \frac{\partial p (K \partial h / \partial y)}{\partial y} - \frac{\partial p (K \partial h / \partial z)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{A2.10})$$

O segundo membro desta equação é definido por Walton, 1970, como:

$$\frac{\partial(\Delta M)}{\partial t \Delta V} = \theta \rho \left(\beta + \frac{\alpha}{\theta} \right) \frac{\partial P}{\partial t}$$

ora,

$P = \gamma h$ ou $\partial P = \gamma \partial h$, substituindo na equação acima fica:

$$\frac{\partial(\Delta M)}{\partial t \Delta V} = \rho \gamma \theta \beta \left(1 + \frac{\alpha}{\theta \beta} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (A2.11)$$

sendo,

β - Inverso do módulo de elasticidade volumétrica para a água.

α - Inverso do módulo de elasticidade do esqueleto aquífero.

θ - Porosidade total do aquífero.

S_s - Coeficiente de armazenamento específico.

h - Carga hidráulica.

P - Pressão hidrostática.

Levando (A2.11) em (A2.10), e admitindo-se a massa específica da água como constante, tem-se:

$$K \rho \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (A2.12)$$

Como $S_s = S/b$, ou seja, o coeficiente de armazenamento específico, é igual ao coeficiente de armazenamento dividido pela espessura do aquífero, a equação (A2.12) pode ser rescrita como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (A2.13)$$

Que é a equação diferencial do fluxo subterrâneo em meio poroso, para o regime transitório. Para o regime permanente a equação (A2.13) fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (A2.14)$$

A equação (A2.14) também é denominada de equação de Laplace.

A.2.4. Condições de Contorno

As equações (A2.13) e (A2.14) dizem apenas que a soma das derivadas parciais, de segunda ordem, da carga em relação ao espaço, é zero para o regime permanente, ou $(S/T) \cdot (\partial h / \partial t)$ para o regime transitório. Para aplicá-las na prática é necessário ainda se estabelecer as condições de contorno, ou condições dos limites, que a saber são:

- a) Cargas Conhecidas (condição de Dirichlet)
- b) Fluxo Conhecido (condição de Neumann)

Limites de carga conhecida são aqueles em que se conhece a carga hidráulica, que pode variar ou não com o tempo. Quando não há variação com o tempo o limite é dito de carga constante, o contrário é limite de carga variável. O primeiro caso pode ser exemplificado com oceanos, lagos e grandes rios, nos quais a carga hidráulica não é afetada pelas solicitações ocorridas nos reservatórios de água subterrânea.

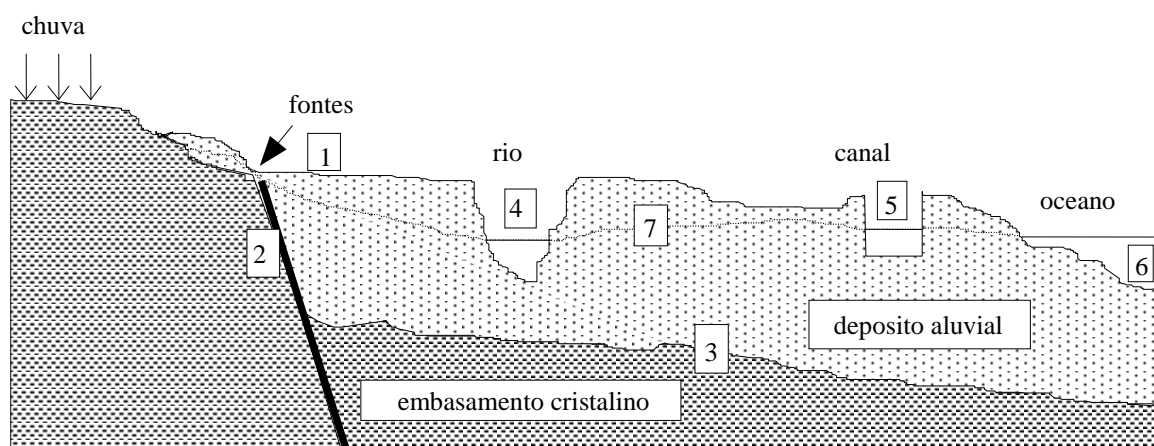
Matematicamente os limites de carga constante são expressos como sendo função apenas do espaço, ou seja, $h=f(x,y,z)$, ao passo que, os limites de carga variável no tempo, além do espaço, também são uma função do tempo $\{h=f(x,y,z,t)\}$.

Os limites de fluxo conhecido são aqueles em que se tem controle sobre o fluxo. Um caso particular é o limite de fluxo nulo, ou seja, um limite impermeável pelo qual não há fluxo. Exemplos de limites impermeáveis são: camadas de argilas bem compactadas, falhas que isolam o aquífero por rochas impermeáveis, em fim, qualquer limite impermeável de um aquífero.

Matematicamente o limite de fluxo nulo, é expresso como $q_x=0$, o que implica em $\partial h / \partial x=0$, isto para direção x, mas, semelhantemente nas outras duas direções principais.

Outros limites de fluxo conhecidos são aqueles em que certo volume de água entra, no aquífero modelado por unidade de tempo, procedente de áreas ou camadas adjacentes a este, das quais não se conhece as propriedades hidráulicas. Esses limites são simulados atribuindo-se condutividade hidráulica nula ao limite, e entrando-se com uma descarga de origem externa, positiva ou negativa (entrada ou saída), na área do modelo próximo a este limite.

A definição das condições de contorno, como se vê, é de suma importância, e definições incompletas ou inconsistentes levariam a resultados não desejados. A Figura A.2.3, mostra diferentes tipos de limite de um aquífero.



1 - Limite de fluxo conhecido; 2 e 3 - Limite de fluxo nulo (externo); 4 e 5 - Limite de fluxo constante (interno); 6 - Limite de carga constante (externo); 7 - Nível freático

Figura A.2.3 - Diferentes tipos de limites de um aquífero.

A Figura A.2.4 mostra a secção transversal de um aquífero (Toth, 1962 - *apud* Wang & Anderson, 1982), para exemplificar a aplicação da equação de Laplace.

Analisando-se esta figura, nota-se que os limites à direita, parte mais alta topograficamente, e à esquerda, vale do rio, funcionam como limites de fluxo nulo, pois, mesmo não havendo barreiras físicas são divisores de água subterrânea. O limite inferior também é de fluxo nulo, pois, o embasamento é considerado impermeável. O limite superior é representado pela linha AB', porque o modelo simplifica o aquífero a um retângulo. Então a carga ao longo da linha AB' será a altura do nível da água, que é aproximada por uma reta tracejada.

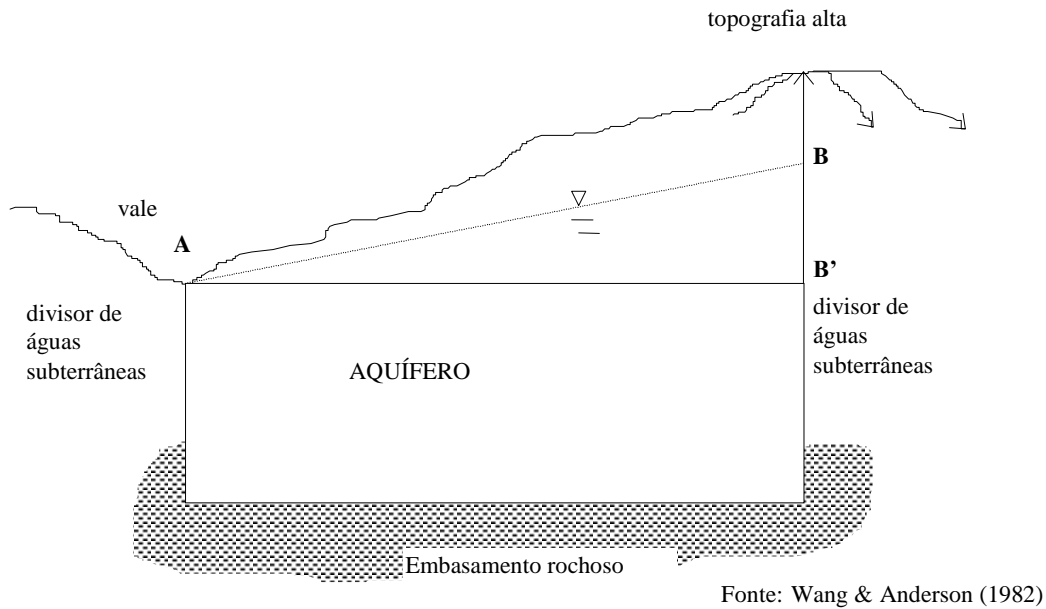
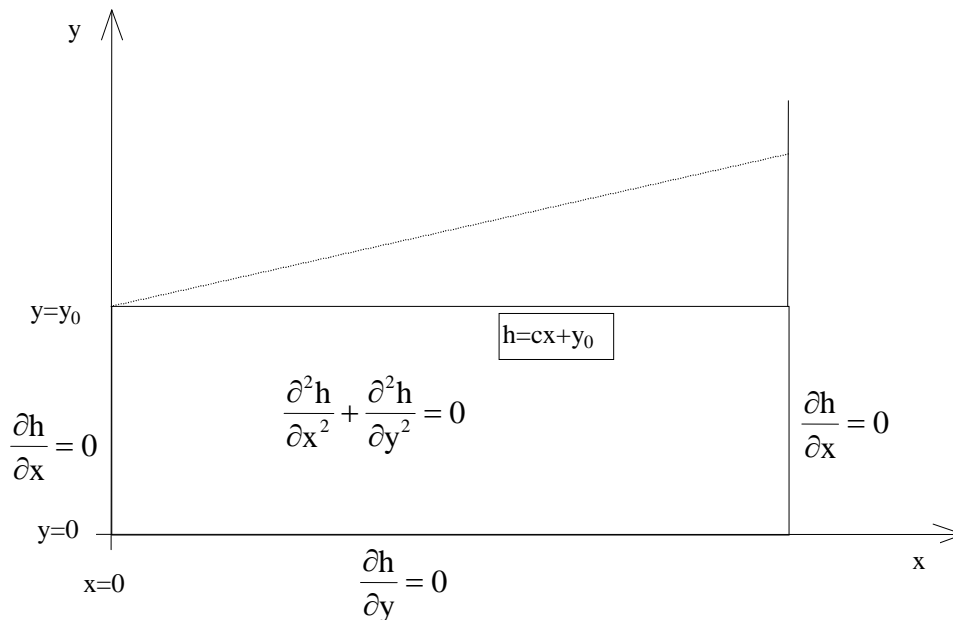


Figura A.2.4 – Secção transversal esquemática de um aquífero.



Fonte: Wang & Anderson (1982)

Figura A.2.5 – Concepção matemática do aquífero da figura A.2.4.

A Figura A.2.5 mostra a concepção matemática do modelo, na qual é definido um sistema de coordenadas e os limites são expressos por equações.

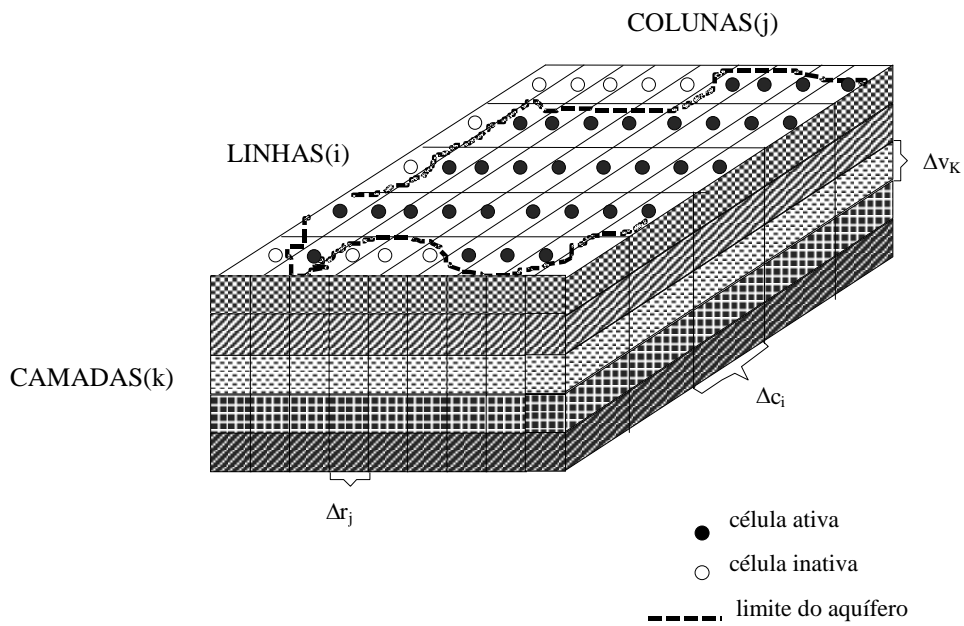
A.2.5. Discretização

Ao contrário dos modelos analíticos, cujas funções são válidas para qualquer ponto do domínio modelado, os modelos numéricos só têm as funções definidas para determinados pontos do modelo. A escolha dos pontos é feita aleatoriamente, tanto em posição como em quantidade. Esta ação denomina-se discretizar, e cada ponto escolhido é chamado de nó. Cada nó representa uma porção limitada do aquífero a ser modelado, de modo que, os parâmetros atribuídos a um nó, são considerados constantes para a região que ele representa. Deste modo, quanto maior o número de pontos, mais próximo da realidade estará o modelo. No caso da hidrogeologia, os modelos numéricos em diferenças finitas têm por objetivo o cálculo do valor da carga hidráulica em cada nó.

Embora a escolha dos nós possa ser totalmente aleatória, é mais vantajoso optar por uma malha regular retangular ou quadrada, pois facilita os cálculos. A Figura A.2.6 mostra a discretização espacial de um sistema aquífero em uma malha de nós, formando linhas, colunas e camadas. A origem do sistema de coordenadas sempre é o vértice superior esquerdo da camada mais superior. A adoção de uma malha regular, não significa que o espaçamento entre os nós deva ser constante, porém, para se variar este espaçamento é necessário seguir a regra de que as dimensões de uma célula não devem superar em 1,5 vezes as dimensões de suas vizinhas e que o lado maior deve ser no máximo dez vezes o lado menor.

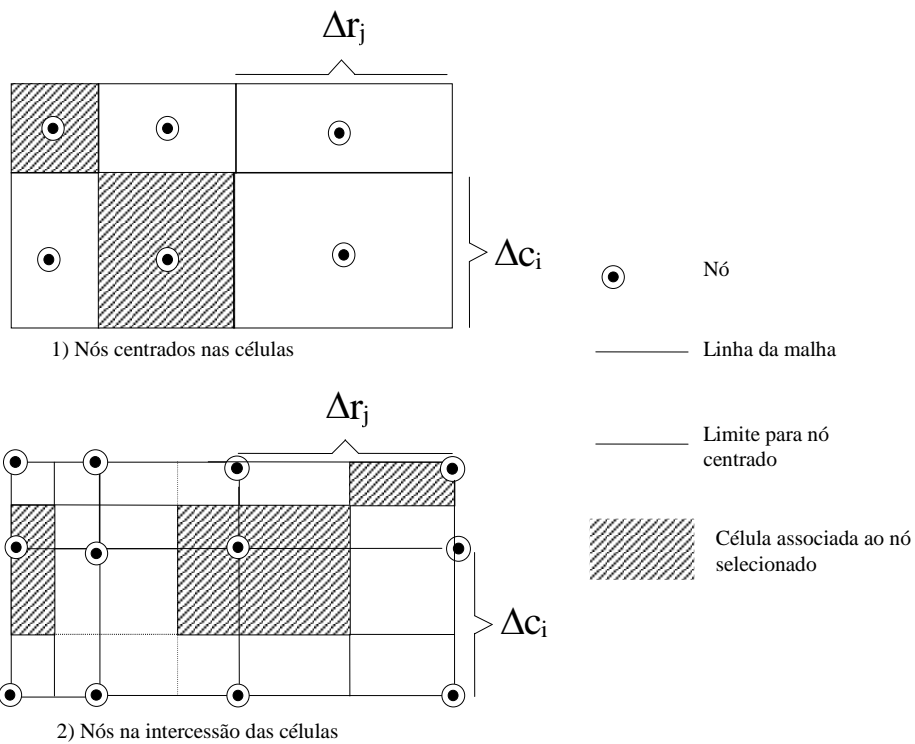
Cada prisma do aquífero formado pela malha de discretização é denominado de célula, e cada célula está associada a um nó. Desta forma, qualquer parâmetro atribuído a um nó, é válido para toda extensão da célula.

A Figura A.2.7 mostra duas convenções para definição da configuração das células com relação ao posicionamento dos nós: (1) pontos no centro da malha de discretização e (2) pontos na interseção das linhas que definem a malha. Ambos os sistemas dividem o aquífero em dois grupos de linhas paralelas perpendiculares entre si. O método das diferenças finitas pode utilizar qualquer uma das configurações indiferentemente.



Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.6 - Discretização de um sistema aquífero.



Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.7 - Malhas de discretização.

A.2.6. Método das Diferenças Finitas para o Regime Permanente

A Figura A.2.8 mostra, em duas dimensões, uma região discretizada próxima a um poço, na qual serão calculadas as cargas em cada nó.

O método das diferenças finitas procura aproximar as derivadas espaciais da carga pela diferença de carga entre os nós adjacentes.

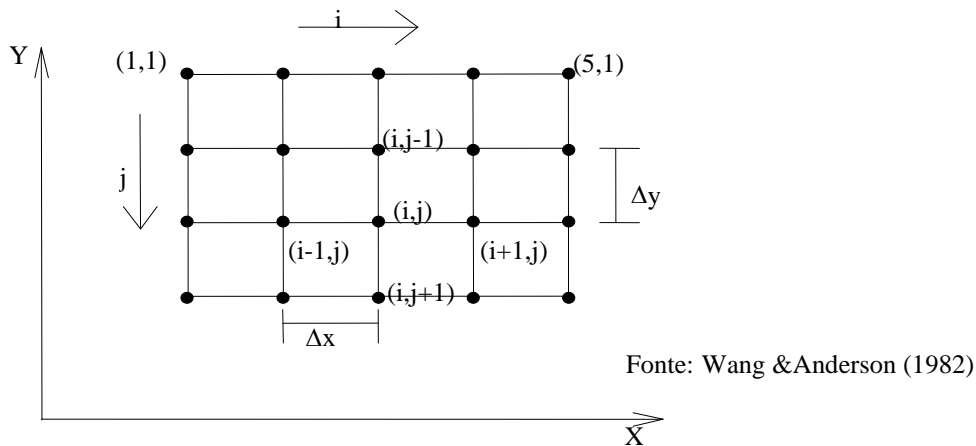


Figura A.2.8 - Malha de discretização para aproximação em diferenças finitas.

Para avaliar a derivada espacial de 2ª ordem da carga no nó (i,j), avaliam-se inicialmente as derivadas de 1ª ordem nos pontos médios entre os nós (i-1,j) e (i,j) e entre os nós (i+1,j) e (i,j), ou seja, nos pontos $(x-\Delta x/2, y)$. Essas derivadas são:

$$\frac{\partial h}{\partial x}(x - \frac{\Delta x}{2}, y) \approx \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x}(x + \frac{\Delta x}{2}, y) \approx \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x}$$

Estando o nó i,j entre dois pontos, no qual são avaliadas as derivadas primeiras de h em relação a x. A derivada segunda no ponto central i,j será aproximada, portanto, pela variação das derivadas primeiras, como mostrado a seguir:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{\frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x} - \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x}}{\Delta x}$$

Simplificando,

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{h_{i-1,j} - 2h_{i,j} + h_{i+1,j}}{(\Delta x)^2}$$

Similarmente na direção y tem-se:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \approx \frac{h_{i,j-1} - 2h_{i,j} + h_{i,j+1}}{(\Delta y)^2}$$

Logo, a equação bidimensional de Laplace pode ser escrita como abaixo indicada, considerando-se $\Delta x = \Delta y$ (malha quadrada):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \approx h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1} - 4h_{i,j} = 0 \quad (\text{A2.15})$$

Reexaminando a Figura A.2.8, percebe-se que para cada nó interno é possível definir uma equação (A2.15), no entanto, é necessário se conhecer os valores de carga nos limites. Como exemplo para esta questão, é mostrada uma região próxima a um poço - Wang & Anderson (1982), conforme a Figura A.2.9.

Os limites do problema são do tipo Dirichlet, ou seja, de cargas conhecidas. Portanto, só é necessário calcular os valores de carga em quatro nós ($h_{2,2}; h_{3,2}; h_{2,3}; h_{3,3}$):

$$h_{2,2} = \frac{h_{1,2} + h_{3,2} + h_{2,1} + h_{2,3}}{4}$$

$$h_{2,3} = \frac{h_{1,3} + h_{3,3} + h_{2,2} + h_{2,4}}{4}$$

$$h_{3,2} = \frac{h_{2,2} + h_{4,2} + h_{3,1} + h_{3,3}}{4}$$

$$h_{3,3} = \frac{h_{2,3} + h_{4,3} + h_{3,2} + h_{3,4}}{4}$$

Resolvendo-se o sistema acima, serão encontrados os valores das cargas nos quatro nós pré-determinados da malha.

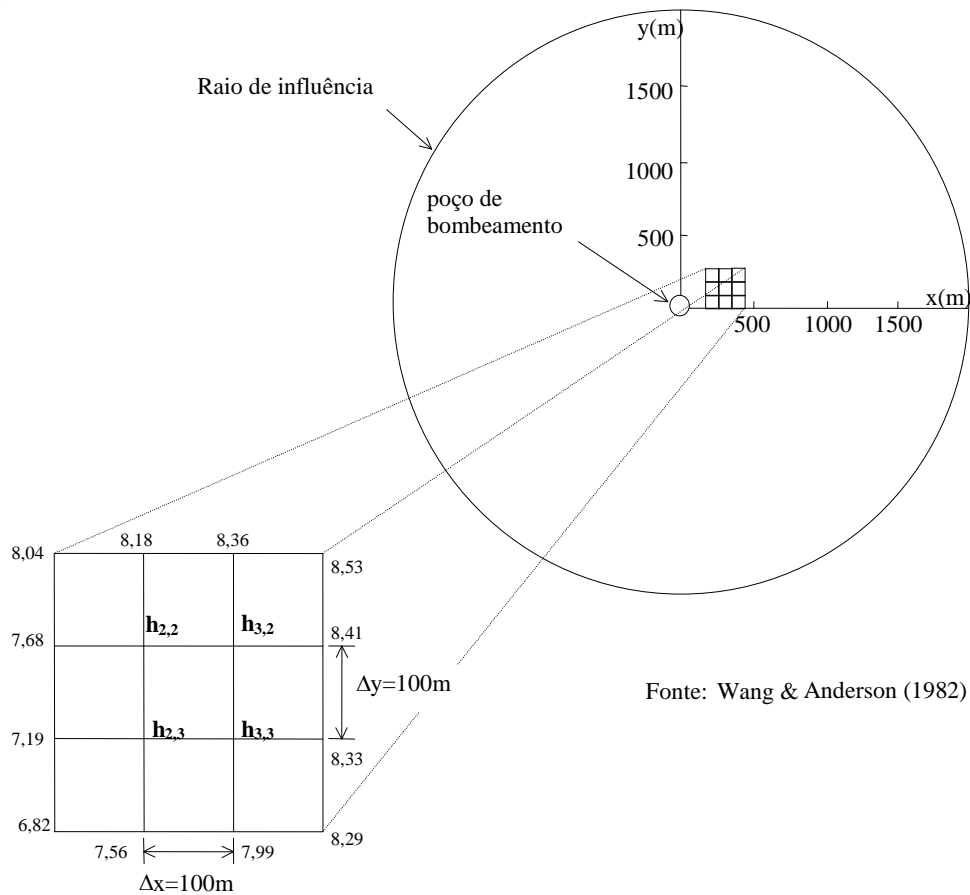


Figura A.2.9- Exemplo de uma região próxima a um poço tubular.

O desenvolvimento das equações até o presente só considerou o fluxo de célula para célula, porém, há a necessidade de um termo que considere as influências externas, como por exemplo, o bombeamento de um poço.

Considerando um aquífero bidimensional e de espessura constante b , em regime permanente, toma-se um volume elementar, como mostra a Figura A.2.10. Faz-se com que seja injetado ou retirado um volume de água $R(x,y)$, por unidade de tempo e unidade de área do aquífero. O volume que entra ou sai será igual a $R(x,y) \Delta x \Delta y$, que é igual a:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y) + \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x) = R_{(x,y)} \Delta x \Delta y$$

Usando-se a lei de Darcy, e dividindo os dois membros da equação por $-T \Delta x \Delta y$, tem-se:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{-R_{(x,y)}}{T}$$

Esta é a equação de Poisson, e se $R_{(x,y)}=0$ recai-se na equação de Laplace. O termo $R_{(x,y)}$ será positivo nos aportes (injeção de água) e negativo para as retiradas (bombeamentos).

Nos desenvolvimentos das equações a seguir não será considerado o termo $-R_{(x,y)}/T$, para simplificar a demonstração das mesmas, mas, para considerá-lo é só adicioná-lo às equações.

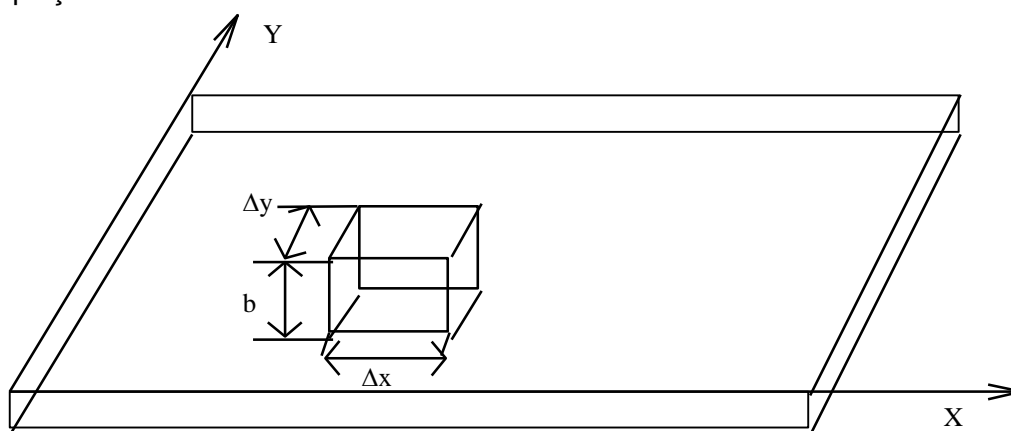


Figura A.2.10 – Aquífero bidimensional com volume elementar representativo para a determinação da equação de Poisson.

A.2.7. Método das Diferenças Finitas para o Regime Transitório

A exemplo do regime permanente, a equação em diferenças finitas para o regime transitório será também desenvolvido em duas dimensões. A equação (A2.13) modificada para duas dimensões fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A2.16})$$

Na equação (A2.16), além das derivadas segundas da carga em relação ao espaço, cuja aproximação em diferenças finitas já foi mostrada anteriormente, há também a derivada da carga em relação ao tempo. A aproximação em diferenças finitas deste termo se faz de dois modos: o explícito e o implícito, que serão explicados mais adiante.

Na solução da equação de Laplace houve a necessidade de definir os limites do modelo. Para o regime transitório além dos tipos de limites, necessita-se também das cargas iniciais em cada nó, para a partir destas ser possível o cálculo das cargas com a evolução do tempo. Se a variação de carga com o tempo é pequena pode-se aplicar as condições para o regime permanente.

a) Aproximação em Diferenças Finitas Explícita

Para aproximar a derivada da carga em relação ao tempo por uma expressão em diferenças finitas procede-se como para as derivadas espaciais, discretiza-se o tempo. Para a aproximação em diferenças finitas em um tempo m , toma-se o tempo $m+1$, que representa um "passo" de tempo a frente em relação ao tempo m , e o tempo $m-1$, que representa um "passo" atrás. Feito isto, pode-se aproximar as derivadas temporais por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i,j}^m}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad (A2.17)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h_{i,j}^m - h_{i,j}^{m-1}}{\Delta t} \quad (A2.18)$$

O sobrescrito representa o índice de tempo e Δt o intervalo de tempo ("passo"). A equação (A2.17) é denominada de diferença para frente ("*forward difference*") em relação ao tempo m , e a equação (A2.18) é dita diferença para trás ("*backward difference*").

Substituindo-se na equação (A2.16) as aproximações das derivadas espaciais, juntamente com a aproximação da equação (A2.17) tem-se:

$$\frac{h_{i+1,j}^m - 2h_{i,j}^m + h_{i-1,j}^m}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j-1}^m - 2h_{i,j}^m + h_{i,j+1}^m}{(\Delta y)^2} = \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i,j}^m}{\Delta t} \quad (A2.19)$$

É importante observar que as derivadas espaciais foram aproximadas para o tempo conhecido m . Fazendo $\Delta x = \Delta y = a$, tem-se que:

$$h_{i,j}^{m+1} = \frac{4T\Delta t}{Sa^2} \left[\frac{h_{i+1,j}^m + h_{i-1,j}^m + h_{i,j+1}^m + h_{i,j-1}^m}{4} \right] + \left[1 - \frac{4T\Delta t}{Sa^2} \right] h_{i,j}^m \quad (A2.20)$$

A equação (A2.19) é denominada de aproximação explícita, porque a carga $h_{i,j}^{m+1}$ é estimada a partir das cargas conhecidas no tempo m , anterior ao tempo $m+1$, nos nós vizinhos e no próprio nó i,j .

A aproximação explícita se diz satisfatória quando a solução aproximada pelas diferenças finitas converge para a solução exata no nó considerado, e é dita estável, se os erros não são ampliados no processo de resolução das equações. Para a solução explícita ser estável, foi demonstrado que o termo $T\Delta t/Sa^2$ da equação (A2.20), deve ser suficientemente pequeno - Wang & Anderson (1982). Para fluxo

unidimensional deve ser menor que 0,5. No caso de duas dimensões e $\Delta x = \Delta y = a$, deve ser menor que 0,25.

b) Aproximação em Diferenças Finitas Implícitas

Na equação (A2.21), a aproximação em diferenças finitas das derivadas espaciais foi feita entre o tempo m e o tempo $m+1$. Porém, entre estes dois instantes de tempo as cargas em todos os nós variam, e o uso das cargas no tempo (m) para aproximar as derivadas espaciais é válido somente para pequenos valores de Δt , como visto anteriormente. A aproximação das derivadas espaciais pode ser melhorada escolhendo-se um ponto qualquer entre $t=m\Delta t$ e $t=(m+1)\Delta t$. Isto significa na utilização de um valor ponderado entre m e $m+1$, sendo o parâmetro de ponderação igual a α , que tem valor entre 0 e 1. Se for utilizado para o tempo ($m+1$) o fator de ponderação igual a α , para o tempo m tem-se $(1-\alpha)$. A derivada segunda da carga em relação a x será:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \alpha \frac{h_{i+1,j}^{m+1} - 2h_{i,j}^{m+1} + h_{i-1,j}^{m+1}}{(\Delta x)^2} + (1-\alpha) \frac{h_{i+1,j}^m - 2h_{i,j}^m + h_{i-1,j}^m}{(\Delta x)^2} \quad (\text{A2.21})$$

Na direção y é escrita uma expressão similar, para a aproximação de $\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$.

Substituindo estas expressões na equação (A2.16), e utilizando uma notação para a média das cargas dos quatro pontos adjacentes ao nó (i,j) como:

$$\tilde{h}_{i,j}^m = \frac{h_{i-1,j}^m + h_{i+1,j}^m + h_{i,j-1}^m + h_{i,j+1}^m}{4} \quad (\text{A2.22})$$

A equação para o regime transitório ficará:

$$\alpha(\tilde{h}_{i,j}^{m+1} - h_{i,j}^{m+1}) + (1-\alpha)(\tilde{h}_{i,j}^m - h_{i,j}^m) = \frac{a^2 S}{4T} \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i,j}^m}{\Delta t} \quad (\text{A2.23})$$

Portanto, se $\alpha=0$ a equação (A2.23) reduz-se a fórmula explícita da (A2.20).

A equação (A2.23) é chamada de aproximação implícita porque $h_{i,j}^{m+1}$ não é expressa explicitamente a partir de valores conhecidos.

A aproximação implícita requer que as cargas no tempo ($m+1$), sejam obtidas a partir da solução de um sistema de equações lineares, pois não há possibilidades de se calcular ponto a ponto como na equação (A2.20).

Passando-se todas as incógnitas da equação (A2.23) para o lado esquerdo, e todos os valores conhecidos para o lado direito, e multiplicando-se ambos os membros por -1 , tem-se:

$$\left[\frac{a^2 S}{4T\Delta t} + \alpha \right] h_{i,j}^{m+1} - \tilde{h}_{i,j}^{m+1} = \frac{a^2 S}{4T\Delta t} h_{i,j}^m + (1-\alpha)(\tilde{h}_{i,j}^m - h_{i,j}^m) \quad (\text{A2.24})$$

Expressando a equação (A2.24) em termos de $h_{i,j}^{m+1}$, que é o valor que se estar procurando, tem-se:

$$h_{i,j}^{m+1} = \frac{1}{[(a^2 S / 4T\Delta t) + \alpha]} \left[\alpha \tilde{h}_{i,j}^{m+1} + \frac{a^2 S}{4T\Delta t} h_{i,j}^m + (1 - \alpha)(\tilde{h}_{i,j}^m - h_{i,j}^m) \right] \quad (\text{A2.25})$$

A partir da equação (A2.25) é montado um sistema de equações lineares para $h_{i,j}$ no tempo $m+1$, que a exemplo da equação (A2.15) poderá ser resolvido por qualquer método. A diferença é que no regime transitório há a necessidade de se calcular um sistema de equações para cada intervalo de tempo ("time step").

O parâmetro α é escolhido a critério do modelador. Para $\alpha=1$, a aproximação das derivadas espaciais é feita unicamente no tempo $(m+1)$, e a aproximação é dita totalmente implícita ("fully implicit"). O uso desta aproximação implica que os valores das derivadas espaciais num tempo futuro é considerado como a melhor solução. Para $\alpha=0$, recai-se na aproximação explícita. Para $\alpha=1/2$, admite-se que o melhor tempo para aproximação das derivadas espaciais está exatamente entre m e $m+1$, ou entre m e $m-1$. Para esse valor de α , o método é chamado de Crank-Nicolson.

A título de ilustração é apresentado no Quadro A.2.1, o resultado da simulação, realizada por diversos métodos, entre eles o método analítico de Theis, do bombeamento de um poço em um aquífero confinado, com descarga constante de $83,3 \text{ m}^3/\text{h}$, transmissividade de $3,47 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, coeficiente de armazenamento igual a $0,002$ e alcance de 13 dias. A malha de discretização é quadrada com $\Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}$. Analisando o Quadro A.2.1, nota-se que o método explícito é rapidamente instável, e que os outros métodos, Crank-Nicolson e totalmente implícito, estão mais em conformidade com os resultados analíticos obtidos pela equação de Theis. Isto deve-se ao fato da aproximação explícita necessitar de valores pequenos de Δt , por isto a partir de $\Delta t > 0,05$ a solução por este método tornou-se instável, pois $T\Delta t/Sa^2 > 0,25$.

Quadro A.2.1 - Rebaixamentos a 100 m do poço.

T (dias)	Δt (dias)	EXPLÍCITO	CRANK-NICOLSON		IMPLÍCITO		(h ₀ -h) Solução p/ Theis
		(h ₀ -h) Para $\alpha=0$	(h ₀ -h) P/ $\alpha=1/2$	Nº de Iterações	(h ₀ -h) P/ $\alpha=1$	Nº de Iterações	
0,01	0,01	0,00	0,05	4	0,06	4	0,04
0,05	0,02	0,46	0,41	5	0,38	6	0,42
0,13	0,05	0,83	0,88	7	0,82	9	0,86
0,49	0,17	$0,22 \cdot 10^3$	1,55	14	1,49	19	1,51
1,13	0,38	$0,27 \cdot 10^6$	1,98	22	1,92	31	1,94
5,12	1,95	$0,60 \cdot 10^{14}$	2,81	59	2,71	74	2,80
13,12	4,38	$0,10 \cdot 10^{20}$	3,26	101	3,10	114	3,23

A.2.8. Método de Resolução dos Sistemas de Equações Lineares

A solução dos sistemas de equações geradas pelo método das diferenças finitas, exposto anteriormente, pode ser de dois tipos: exata ou aproximada por iteração. A solução exata seria aquela obtida a partir de substituições das variáveis, porém, a precisão dos valores das cargas ao final de um intervalo de tempo está diretamente ligada ao número de trocas feitas por este processo. Como no modelo numérico podem estar envolvidos grandes sistemas de equações, chegando a ordem de milhares de incógnitas, pode haver problemas de natureza numérica com o método de

substituição, que torne o processo não mais preciso do que uma solução aproximada por iteração.

O método iterativo parte de uma solução aproximada, a qual é utilizada para o cálculo de uma solução provisória, que deve se aproximar o máximo da solução do sistema de equações. Assim o processo é repetido sucessivamente até os valores da solução provisória estejam muito próximos dos valores da solução procurada, ou seja, haja uma convergência. Chama-se a cada uma destas repetições de iteração. A cada nova iteração os valores da solução provisória anterior passam a ser os valores para solução aproximada no processo seguinte.

O valor da solução é dito aproximadamente igual à solução provisória, quando a diferença entre a carga aproximada e a carga provisória, em cada nó, é menor do que um valor estabelecido arbitrariamente pelo usuário, o qual denomina-se de critério de convergência. Deste modo, durante um intervalo de tempo, matrizes de cargas provisórias são geradas sucessivamente, contendo um valor provisório da carga para cada nó.

O processo iterativo produz apenas uma aproximação da solução do sistema de equações em diferenças finitas, para cada intervalo de tempo. A precisão desta aproximação depende do critério de convergência que foi utilizado, entretanto, é importante salientar que: se uma solução exata para o sistema de equações em diferenças finitas fosse obtida a cada intervalo, esta solução exata seria uma aproximação para a equação diferencial do fluxo. A diferença entre a carga obtida por uma solução do sistema de equações em diferenças finitas é a carga obtida por uma solução formal da equação diferencial no mesmo ponto e instante, é denominada erro de truncamento e, este erro será tanto maior quanto maior for o espaçamento da malha de discretização e o intervalo de tempo.

A seguir serão mostrados alguns métodos iterativos, que por motivos de simplificação serão desenvolvidos em duas dimensões.

a) Método Iterativo de Jacob

Para ilustrar este método será utilizado o exemplo da Figura 6.31, no qual empregou-se a equação (A2.15) para cada nó interno do problema. Como não se conhece os valores de carga destes nós, foram arbitrados valores para os mesmos (solução aproximada inicial) e iniciado o cálculo das cargas pelo método iterativo conforme a equação (A2.26) abaixo, sendo que n representa o índice de iteração.

$$h_{i,j}^{n+1} = \frac{h_{i-1,j}^n + h_{i+1}^n + h_{i,j-1}^n + h_{i,j+1}^n}{4} \quad (\text{A2.26})$$

A iteração parte de n=1 com os valores inicialmente estimados, até que a diferença entre a carga calculada numa iteração anterior e a carga calculada na iteração atual, em todos os nós, seja menor do que o critério de convergência.

b) Método Iterativo de Gauss-Seidel

O método de Gauss-Seidel trabalha sempre iniciando as operações do nó i=2 e j=2, e movimenta-se da esquerda para a direita, e de cima para baixo, como no ato da leitura, segundo a equação abaixo:

$$h_{i,j}^{n+1} = \frac{h_{i-1,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1} + h_{i+1,j}^n + h_{i,j+1}^n}{4} \quad (\text{A2.27})$$

A equação (A2.27) utiliza as cargas dos nós à esquerda e acima da iteração atual n+1, e as cargas à direita e abaixo da iteração anterior n.

c) "Sucessive Over Relaxation"- SOR

A diferença entre uma iteração atual e uma anterior pode ser expressa da seguinte maneira:

$$h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n = c \quad (\text{A2.28})$$

Sendo c é denominado de resíduo.

O método da "Sucessive Over-Relaxation" - SOR consiste em minimizar este resíduo, multiplicando-o por um fator de relaxação ω , cujo valor situa-se entre 1 e 2 (Wang & Anderson, 1982), de modo que, a equação (A2.28) ficará da seguinte forma:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n - \omega c \quad (\text{A2.29})$$

Que é a equação SOR para atualização da carga $h_{i,j}$ na iteração $n+1$. Substituindo-se a equação (A2.27) na equação (A2.28), e o resultado na equação (A2.29), tem-se:

$$h_{i,j}^{n+1} = (1 - \omega)h_{i,j}^n + \omega \frac{h_{i-1,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1} + h_{i+1,j}^n + h_{i,j+1}^n}{4} \quad (\text{A2.30})$$

d) "Strongly Implicit Procedure"

Outro método de solução simultânea das equações lineares, que é utilizado pelo "MODFLOW", denominando-se SIP ("Strongly Implicit Procedure").

Considerando um fluxo em apenas uma direção, a equação para o regime transitório ficará da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A2.31})$$

Aproximando-se as derivadas espacial e temporal (totalmente implícita) pelo método das diferenças finitas, tem-se:

$$\frac{h_{i-1}^{m+1} - 2h_i^{m+1} + h_{i+1}^{m+1}}{(\Delta x)^2} = \frac{S}{T} \frac{h_i^{m+1} - h_i^m}{\Delta t} \quad (\text{A2.32})$$

Supondo-se um problema unidimensional no qual há 6 nós, dos quais, o primeiro e o último são limites de carga conhecida. O primeiro passo será escrever um sistema de equações lineares utilizando a equação (A2.32), modificada de forma que os termos para o tempo $m+1$ fiquem a esquerda e o termo no tempo m fique a direita do sinal, a qual ficará escrita da seguinte forma:

$$h_{i-1}^{m+1} + \left(-2 - \frac{S(\Delta x)^2}{T\Delta t} \right) h_i^{m+1} + h_{i+1}^{m+1} = - \frac{S(\Delta x)^2}{T\Delta t} h_i^m \quad (\text{A2.33})$$

Escrevendo o sistema na forma de matriz, e passando os valores de h_2 e h_6 para o lado direito, pois são valores conhecidos, fazendo $-2 - \frac{S(\Delta x)^2}{T\Delta t} = A$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} A & 1 & 0 & 0 \\ 1 & A & 1 & 0 \\ 0 & 1 & A & 1 \\ 0 & 0 & 1 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_2^{m+1} \\ h_3^{m+1} \\ h_4^{m+1} \\ h_5^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Bh_2^m - h_1 \\ Bh_3^m \\ Bh_4^m \\ Bh_5^m - h_6 \end{bmatrix}$$

sendo $B = -2 - \frac{S(\Delta x)^2}{\Delta t}$

A partir da equação matricial acima é feita uma série de operações até serem obtidos os valores de cargas que satisfaçam a condição imposta pelo critério de convergência adotado. As técnicas de manipulação das matrizes não serão abordadas neste Apêndice.

A.2.9. O Modflow

O MODFLOW é um programa para a modelação matemática do fluxo subterrâneo, em diferenças finitas, tridimensional, desenvolvido na linguagem FORTRAN 77, por G. McDonald e Arler W. Harbough do *U.S. Geological Survey*, em 1984.

O programa é desenvolvido numa estrutura modular, consistindo de um programa principal e uma série de módulos chamados de pacotes ("PACKAGES"). Cada módulo representa uma situação hidrogeológica específica, tais como: simular os efeitos de um rio, o bombeamento de um poço, galerias drenantes, recarga por chuva e evapotranspiração.

Ainda há os módulos de solução das equações lineares (SIP e SSOR) e para imprimir os resultados. Ao todo o programa possui 10 módulos, mas está preparado para receber mais 12, conforme as necessidades do usuário.

Esta divisão em módulos permite ao usuário examinar cada aspecto hidrogeológico independentemente, bem como facilita a adição de novos módulos ao "software", e alteração dos já existentes.

O fluxo subterrâneo em um aquífero é simulado pela aproximação em diferenças finitas, cujos nós estão centrados nas células da área discretizada. Os aquíferos podem ser simulados como confinados, não confinados (livres), ou uma combinação de ambos, e o regime hidráulico pode ser escolhido entre o permanente e o transitório.

Os métodos iterativos para solução dos sistemas de equações lineares são o SIP (*Strongly Implicit Procedure*) e o SSOR (*Slice-Successive Overrelaxation*).

A.2.10. Método das Diferenças Finitas para o Modflow

a) Modelo Matemático

O fluxo de água através de um meio poroso pode ser escrito na forma de derivadas parciais como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A2.34})$$

sendo:

- x,y,z - são as coordenadas cartesianas.
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} - condutividade hidráulica nas três dimensões principais.
- h - carga hidráulica.
- W - fluxo por unidade de volume, podendo ser tanto um aporte como uma retirada d'água.
- S_s - coeficiente de armazenamento específico do aquífero.
- t - tempo.

Os termos S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} são funções do espaço, enquanto h e W podem ser funções do espaço e do tempo, se forem consideradas as condições de não equilíbrio.

b) Equação em Diferenças Finitas para o MODFLOW

O desenvolvimento da equação do fluxo subterrâneo sob a forma de diferenças finitas, tem como premissa a validade da equação da continuidade, ou seja, a soma de todo fluxo que entra e sai da célula deve ser igual a variação no armazenamento da célula, desde que a água tenha densidade constante (incompressível). A equação que expressa o balanço de uma célula é:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (\text{A2.35})$$

sendo:

- $\sum Q_i$ = fluxos para a célula.
- S_s = Coeficiente de armazenamento específico.
- ΔV = Volume da célula.
- Δh = Variação da carga hidráulica no intervalo de tempo Δt .

O termo à direita da equação (A2.35) equivale ao volume de água retido ou cedido pelo armazenamento, em um intervalo de tempo Δt , para uma variação de carga Δh .

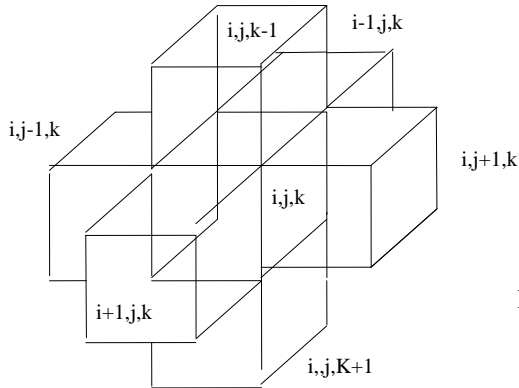
A Figura A.2.11 representa uma célula i,j,k e seis outras células adjacentes (i-1,j,k; i+1,j,k; i,j-1,k; i,j+1,k; i,j,k-1; i,j,k+1). O fluxo que entra na célula i,j,k na direção das linhas a partir da célula i,j-1,k, de acordo com a lei de Darcy, é dado por:

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (\text{A2.36})$$

sendo:

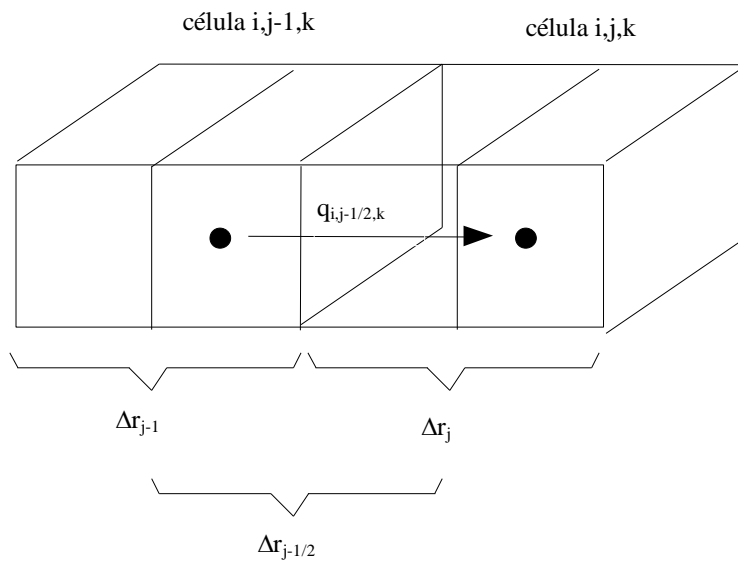
- $q_{i,j-1/2,k}$ = vazão entre as faces da célula i,j,k e a célula i,j-1,k
- $Kr_{i,j-1/2,k}$ = condutividade hidráulica ao longo das linhas entre os nós i,j,k e i,j-1,k.
- $r_{j-1/2}$ = distância entre os nós i,j,k e i,j-1,k.

O índice $j-1/2$ é usado para indicar o espaço entre os nós da célula i,j,k e célula $i,j-1,k$ da Figura A.2.12, não indicando necessariamente um ponto exatamente entre os dois nós. Por exemplo, $KR_{i,j-1/2,k}$ representa a condutividade hidráulica da região entre os i,j,k e $i,j-1,k$.



Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.11 - Célula i,j,k e os índices para as seis células adjacentes.



Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.12 - Fluxo para célula i,j,k a partir da célula $i,j-1,k$.

Expressões similares podem ser escritas para as outras cinco faces restantes, isto é, o fluxo na direção da linha através das faces entre as células i,j,k e $i,j+1,k$, é dado por:

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (A2.37)$$

Na direção das colunas, o fluxo na face da frente da célula é:

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i+1/2}} \quad (\text{A2.38})$$

Na face detrás da célula é:

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-1/2}} \quad (\text{A2.39})$$

Na direção vertical, o fluxo na face inferior é:

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}} \quad (\text{A2.40})$$

Enquanto o fluxo da face superior é:

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} \quad (\text{A2.41})$$

Cada uma das equações acima expressa o fluxo através de cada face da célula i,j,k em função das cargas, dimensões da malha e condutividade hidráulica. As dimensões da malha de discretização e a condutividade hidráulica permanecem constantes durante o processo de resolução, assim a notação pode ser simplificada combinando-se as constantes em uma única constante, a qual multiplicará as cargas. Esta constante chamar-se-á Condutância Hidráulica ou simplesmente Condutância, por exemplo:

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k / \Delta r_{j-1/2} \quad (\text{A2.42})$$

sendo:

$CR_{i,j-1/2,k}$ é a condutância na linha i da camada k entre os nós i,j,k e $i,j-1,k$.

A condutância é o produto entre a condutividade hidráulica e a área transversal ao fluxo, dividido por um comprimento, neste caso, a distância entre os nós.

Substituindo esta expressão na equação (A2.36), tem-se:

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (\text{A2.43})$$

Similarmente, as equações (A2.36)-(A2.40) podem ser rescritas como:

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (\text{A2.44})$$

$$q_{i-1/2,j,k} = CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (\text{A2.45})$$

$$q_{i+1/2,j,k} = CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (\text{A2.46})$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (\text{A2.47})$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (\text{A2.48})$$

Nas quais as condutâncias são definidas analogamente a $CR_{i,j-1/2,k}$ na equação (A2.42).

As equações (A2.43) a (A2.48) consideram o fluxo entrando, ou saindo, da célula i,j,k pelos seus seis lados, a partir das células adjacentes. Para se ter em conta os fluxos oriundos de solicitações externas ao aquífero, tais como, infiltração através do leito de rio, drenos, áreas de recarga (precipitação), evapotranspiração e poços, necessita-se de termos adicionais. Estes fluxos (solicitações) podem depender das cargas das células que são afetadas diretamente por estes, e não dependerem das cargas das demais células, ou podem ser totalmente independentes das cargas das células afetadas. O fluxo vindo de fora do aquífero pode ser representado pela seguinte expressão:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (A2.49)$$

sendo:

$a_{i,j,k,n}$ representa o fluxo da n -ésima fonte externa para a célula i,j,k , $p_{i,j,k,n}$ e $q_{i,j,k,n}$ são constantes.

Por exemplo, supondo-se uma célula que recebe fluxo a partir de duas fontes externas, recarga por poço e infiltração de um rio. Para a primeira fonte ($n=1$), deste que o fluxo a partir do poço não depende da carga da célula, $p_{i,j,k,1}$ é zero e $q_{i,j,k,1}$ é a recarga do poço, neste caso;

$$a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad (A2.50)$$

Para a segunda fonte ($n=2$), a infiltração é proporcional a diferença de carga entre o rio e a carga da célula i,j,k , Figura A.2.13, portanto;

$$a_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2}(R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (A2.51)$$

sendo:

$CRIV_{i,j,k,2}$ é a condutância do leito do rio na célula i,j,k
 $R_{i,j,k}$ é a carga hidráulica do rio

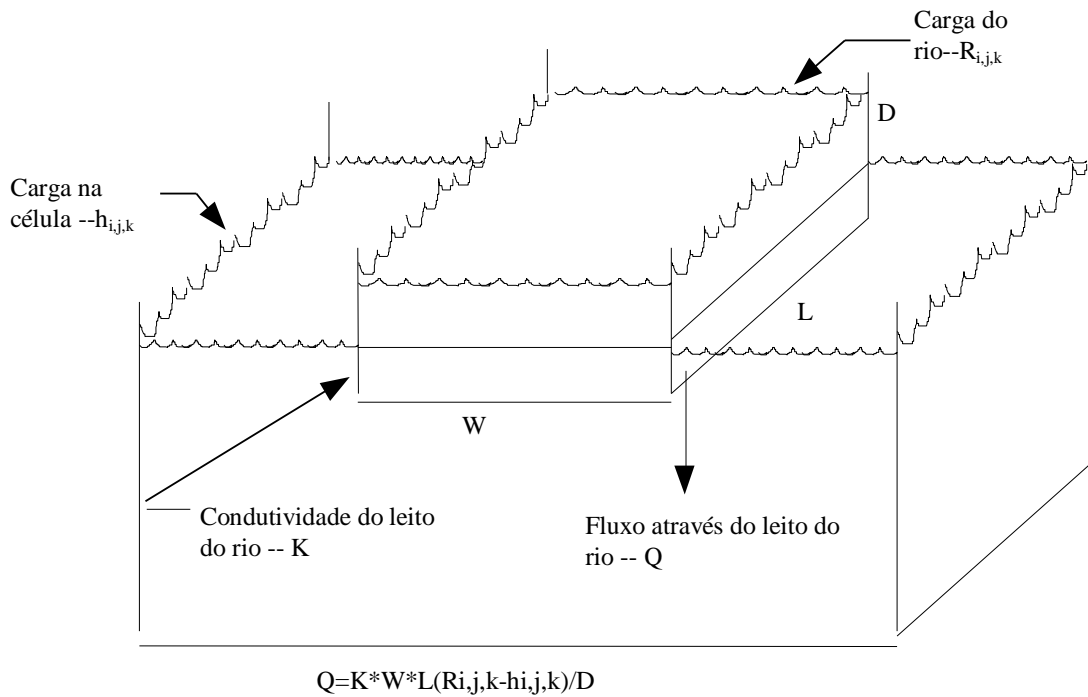


Figura A.2.13 - Drenança através do leito do rio.

A equação (A2.52) pode ser rescrita como:

$$a_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k,2} h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k} \quad (A2.52)$$

A condutância $CRIV_{i,j,k,2}$ corresponde a $p_{i,j,k,2}$ e o termo $CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k}$ corresponde a $q_{i,j,k,2}$. Similarmente toda fonte externa ou solicitação pode ser representada por uma expressão na forma da equação (A2.52). Genericamente, se há n fontes externas ou solicitações afetando uma célula, o fluxo será expresso por:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^n p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^n q_{i,j,k,n} \quad (A2.53)$$

Definido $P_{i,j,k}$ e $Q_{i,j,k}$ como:

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n p_{i,j,k,n} ,$$

$$Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n q_{i,j,k,n}$$

Substituindo na equação (53), tem-se:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (A2.54)$$

Retornando a equação (A2.34), e desenvolvendo-a entre o nó i,j,k e as seis células adjacentes, e adicionando-se o fluxo de fontes externas QS , tem-se:

$$\begin{aligned}
& q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i,j,k+1/2} + q_{i,j,k-1/2} \\
& + QS_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k
\end{aligned} \tag{A2.55}$$

sendo:

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ é uma aproximação para a variação de carga em relação ao tempo

$Ss_{i,j,k}$ é o coeficiente de armazenamento específico

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ é o volume da célula i,j,k .

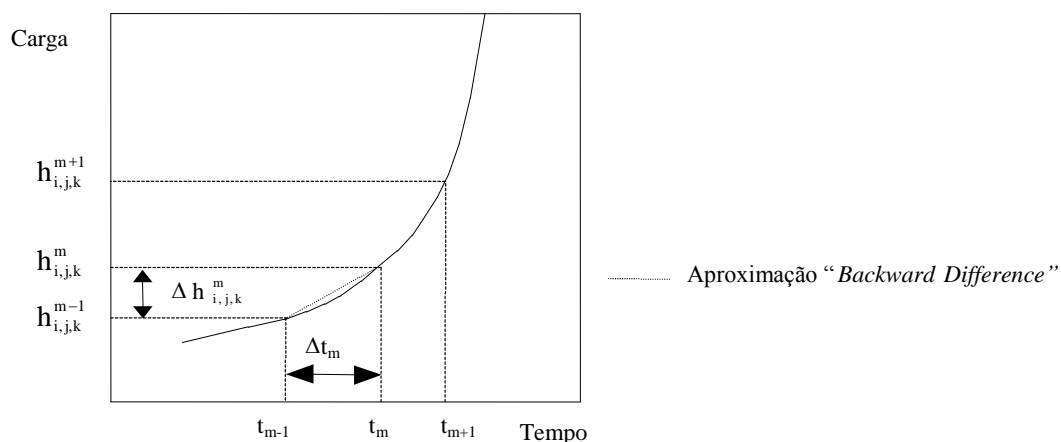
Substituindo as equações (A2.42) a (A2.47) e (A2.48) na equação (A2.55) tem-se uma aproximação em diferença finita para a célula i,j,k como :

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\
& + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
& + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\
& + P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \Delta h_{i,j,k} / \Delta t
\end{aligned} \tag{A2.56}$$

O cálculo de $\Delta h_{i,j,k}$ deve está relacionado aos valores de carga que foram utilizados para calcular os fluxos que entram e saem da célula i,j,k . Na hidrógrafa da célula i,j,k , Figura A.2.14, dois valores de tempo, t_m e t_{m-1} , são marcados no eixo horizontal (tempo), aos quais correspondem valores de carga $h_{i,j,k}^m$ e $h_{i,j,k}^{m-1}$ no eixo vertical (cargas).

O ângulo da linha pontilhada é $\frac{\Delta h_{i,j,k}^m}{\Delta t_m}$. No método de cálculo utilizado, os termos de fluxo da equação (A2.56) são calculados no tempo t_m , de modo que, a tangente do ângulo da linha pontilhada ($\Delta h / \Delta t$), é dada por:

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}^m}{\Delta t} = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \tag{A2.57}$$



Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.14 - Hidrógrafa para a célula i,j,k .

Desta forma, a tangente do ângulo da linha pontilhada, ou a derivada do tempo, é aproximada pela razão entre diferença de carga no tempo atual, em que se está calculando a nova carga, e a carga conhecida no instante de tempo anterior, pelo intervalo de tempo que separa os dois momentos de cálculo das cargas. No caso o MODFLOW utiliza a "*Backward Difference*" para a aproximação de $\partial h/\partial t$.

A equação (A2.57) pode ser reescrita na forma de "*backward difference*" pela especificação dos termos t_m , ao fim do intervalo de tempo, e aproximando-se a derivada da carga em relação ao tempo no intervalo t_{m-1} a t_m , deste modo a equação é modificada para:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}}
 \end{aligned} \tag{A2.58}$$

Nesta equação, a carga $h_{i,j,k}^{m-1}$ no começo do intervalo de tempo e todas as condutâncias e coeficientes relacionados ao nó i,j,k são conhecidos. As sete cargas ao final do intervalo de tempo, no instante t_m , são desconhecidas, isto é, elas fazem parte da distribuição de cargas que se está tentando calcular. Desta forma, a equação (A2.51) não pode ser resolvida independentemente, pois, tem-se uma única equação para sete incógnitas. Entretanto, uma equação deste tipo pode ser escrita para cada uma das células do modelo, permitindo assim a montagem de um sistema de "n" equações para "n" incógnitas, o qual poderá ser resolvido por qualquer método iterativo. O termo "n" representa o número de células do modelo. Dito isto, é fácil perceber que o MODFLOW utiliza a aproximação em diferenças finitas totalmente implícita ("*fully implicit*") para o regime transitório.

Na maioria dos casos o número de equações é menor do que o número total de células. O número de equações é igual ao número de células de carga variável, ou seja, células cujas cargas variam com o tempo. Células que não são de carga variável, tanto podem ser de carga constante ou célula de fluxo nulo.

Células de carga constante são aquelas onde a carga permanece a mesma com o tempo, de forma que não é necessário aplicar uma equação (A2.58) para elas. As equações das células de carga variável adjacentes a esse tipo de célula conterão valores diferentes de zero para as condutâncias entre elas. Células de fluxo nulo são aquelas onde não há fluxo para as células vizinhas, ou seja, são impermeáveis, e aos termos que representam as condutâncias entre ela e suas vizinhas é atribuído o valor zero.

Estes diferentes tipos de células são usados para representar os diversos tipos de limites. Em geral os tipos de limites que podem ser imposto ao modelo incluem carga constante, fluxo nulo, carga dependente do fluxo e fluxo constante. Um exemplo do uso de fluxo nulo e células de carga constante para simular as condições de limite é mostrado na Figura A.2.15. Limites de fluxo constante e carga dependente do fluxo são representadas por uma combinação de células de carga variável e fontes externas.

O objetivo da simulação para o regime transitório é prever uma distribuição de cargas para sucessivos intervalos de tempo, onde se fornece a distribuição de cargas

iniciais e as condições de limites. A distribuição de cargas iniciais consiste dos valores de $h_{i,j,k}^1$ em cada nó da malha no tempo t_1 , o qual representa o instante inicial da discretização no eixo do tempo, conforme o processo das diferenças finitas. O primeiro passo no processo de solução é o cálculo dos valores $h_{i,j,k}^2$ isto é, as cargas no tempo t_2 , o qual marca o fim do primeiro intervalo de tempo. Na equação (A2.56) o sobrescrito m assume o valor 2, uma vez que o sobrescrito $m-1$, que aparece uma única vez, tem o valor 1. Ficando a equação escrita como a seguir:

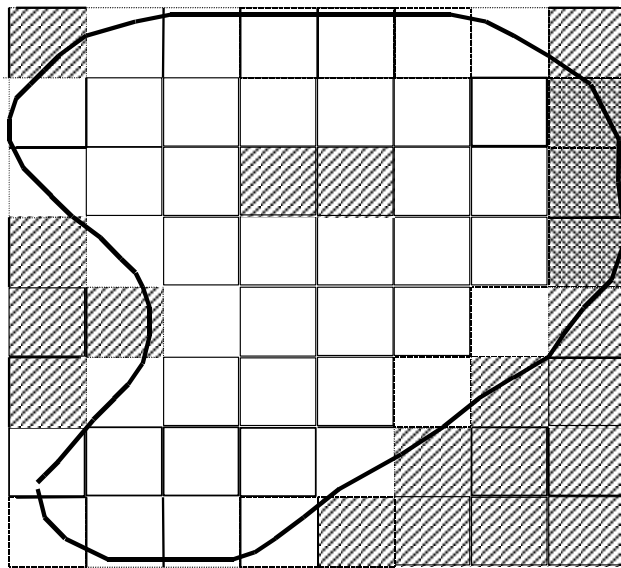
$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^2 - h_{i,j,k}^2) \\
& + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^2 - h_{i,j,k}^2) \\
& + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^2 - h_{i,j,k}^2) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^2 - h_{i,j,k}^2) \\
& + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^2 + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{(h_{i,j,k}^2 - h_{i,j,k}^1)}{t_2 - t_1}
\end{aligned} \tag{A2.59}$$

Obtidos os valores de t_2 , o processo se repete para o cálculo das cargas no tempo t_3 , fim do segundo intervalo de tempo. Para isto, a equação (A2.57) é reaplicada, usando-se o valor 2 para o sobrescrito $m-1$ e 3 para o sobrescrito m .

Novamente um sistema de “ n ” equações e “ n ” incógnitas é formulado, onde as incógnitas são as cargas ao final de t_3 , sendo este grupo de equações resolvidas simultaneamente.


Este processo é repetido por quantas vezes se fizer necessário, até atingir o tempo total definido para a simulação.

É importante ressaltar que o conjunto de equações em diferenças finitas é reformulado a cada intervalo de tempo, e que, a cada intervalo de tempo é resolvido simultaneamente um novo sistema. As cargas ao final do intervalo de tempo constituirão as incógnitas, as cargas no início do intervalo estão entre os termos conhecidos da equação.




----- Limite impermeável do modelo

———— Limite do aquífero

 Células de carga constante

 Células inativas

 Células de carga variável

Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.15 - Discretização de um aquífero e definição dos tipos de células.

O processo de solução é repetido a cada intervalo de tempo, produzindo uma nova matriz de cargas ao final do intervalo de tempo.

c) Iteração

O método iterativo parte de uma solução aproximada, que é utilizada para o cálculo de uma solução provisória. Esta solução passa a ser a nova solução aproximada do sistema, repetindo-se o processo até haver uma convergência, isto é, até que em uma iteração a solução provisória esteja muito próxima da solução aproximada.

O valor da solução aproximada é dito aproximadamente igual à solução provisória, quando a diferença entre a carga aproximada e a carga provisória, em cada nó, é menor do que critério de convergência. Deste modo, durante um intervalo de tempo, matrizes de cargas provisórias são geradas sucessivamente, contendo esta matriz um valor provisório de carga para cada nó. Na Figura A.2.16, estas matrizes são representadas por um reticulado em três dimensões, com um sobrescrito para indicar o nível de iteração. Assim $h_{i,j,k}^{m,0}$ representa o valor aproximado inicial para a carga no nó i,j,k , e $h_{i,j,k}^{m,1}$ é a carga provisória calculada durante uma iteração e o valor aproximado para a iteração 2. Inicialmente $h_{i,j,k}^{m,2}$ é o valor provisório da iteração e o valor aproximado para iteração 3.

Para o tempo t_m , os valores de $h_{i,j,k}^{m-1}$ (cargas ao final de um intervalo de tempo precedente) são consideradas constantes, mantendo o mesmo valor de uma iteração para a seguinte, sem se modificar durante o processo iterativo. Quando o processo é completado para o tempo t_m , os cálculos para o tempo t_{m+1} são iniciados. Os valores de cargas computados para o tempo t_m serão agora constantes para o cálculo das cargas no tempo t_{m+1} .

Em suma, o fluxo subterrâneo pode ser simulado escrevendo-se a equação da continuidade para cada célula, equação (A2.58), e resolvendo-se o sistema de equações resultantes. É conveniente rearranjar a equação (A2.58) de modo que os termos que dependem das cargas ao final do intervalo de tempo corrente sejam agrupados ao lado esquerdo do sinal de igualdade e os termos independentes de carga à direita. Logo a equação ficará:

$$\begin{aligned}
 & CV_{i,j,k-1/2}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m \\
 & + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} \\
 & - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m \\
 & + CC_{i+1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}
 \end{aligned} \tag{60}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
 HCOF_{i,j,k} &= P_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} / (t_m - t_{m-1}); \\
 RHS_{i,j,k} &= Q_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1}); \text{ e} \\
 SC1_{i,j,k} &= Ss_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k.
 \end{aligned}$$

A equação (A2.54) é a equação em diferenças finitas que é utilizada no desenvolvimento do sistema de equações lineares, a partir da qual as cargas são calculadas e é a base do modelo matemático para o fluxo subterrâneo MODFLOW.

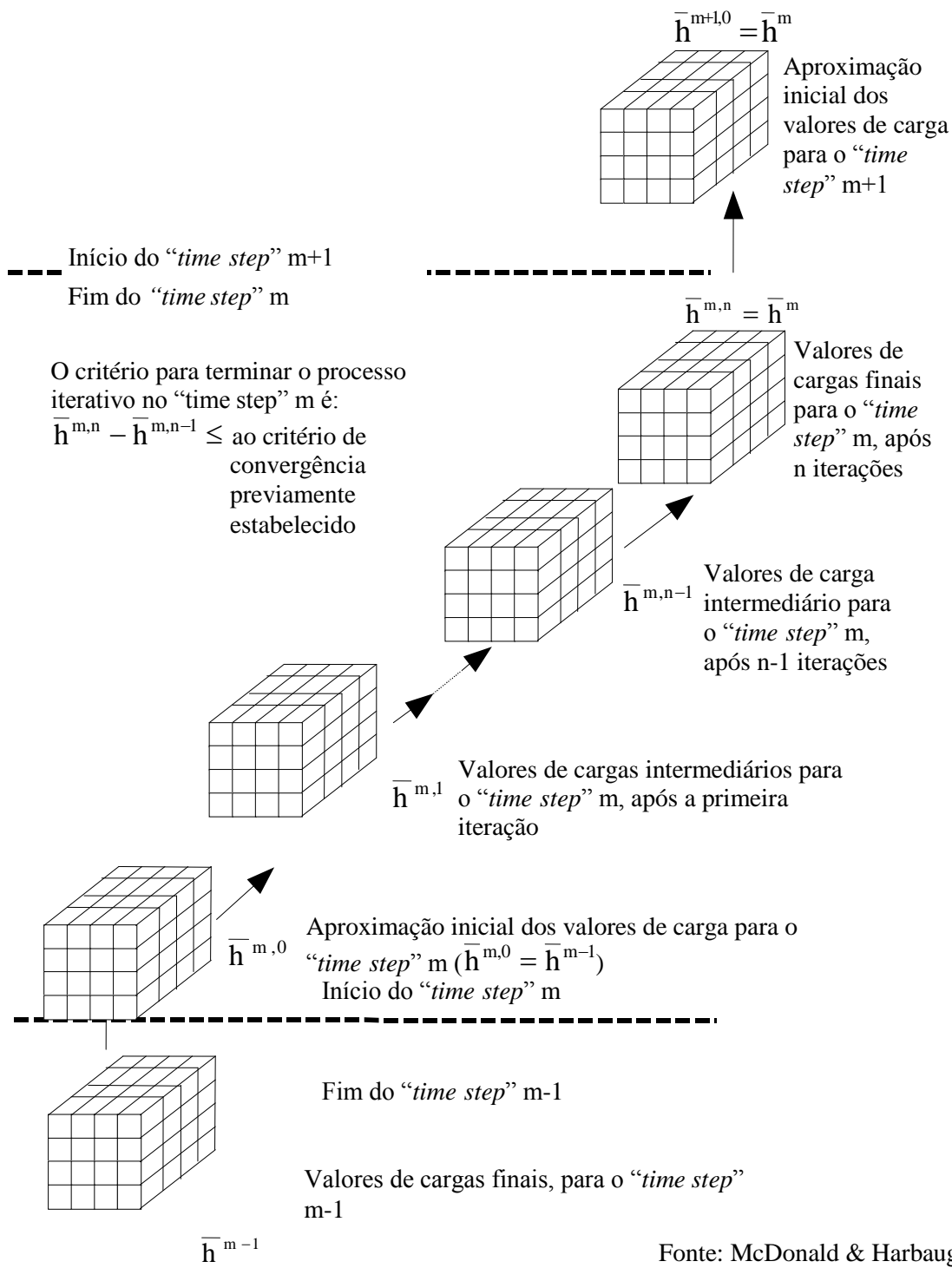


Figura A.2.16 – Representação gráfica do método iterativo.

d) Módulo Básico

O módulo básico tem por finalidade administrar as tarefas a serem executadas pelo programa. É neste módulo onde são escolhidos os módulos a serem utilizados (rios, poços, drenos, precipitação, etc.), o tipo de simulação em relação ao tempo (transitório ou permanente), tipos de células, número de linhas, colunas e camadas do modelo, cargas iniciais, discretização do tempo e impressão dos resultados através do submódulo "output". Por isto, este é o único módulo que não é opcional.

e) Módulo BCF ("Block-Centered Flow")

O módulo BCF calcula as condutâncias da equação em diferenças finitas, a qual determina o fluxo entre células adjacentes. Também calcula os termos que representam as descargas que entram ou saem do armazenamento, para tanto, o modelo utiliza uma configuração onde os nós estão centrados nas células, daí o nome do módulo.

Além do cálculo das condutâncias e trocas no armazenamento, o BCF calcula termos de correção de fluxo, que são adicionados a HCOF e RHS, para compensar o excessivo fluxo vertical que a equação de fluxo calcula quando parte de um aquífero inferior torna-se livre.

f) Módulo Poços

Um poço de recarga pode ser visualizado como uma fonte de água que não é afetada pela carga do aquífero. O poço para bombeamento nada mais é do que um poço de recarga com vazão negativa. Toda célula que tenha um poço terá a vazão deste (negativa ou positiva) adicionada no termo RHS da equação em diferenças finitas.

Os parâmetros de entrada do módulo consistem de uma lista na qual estão contidas as seguintes informações para cada poço: linha, coluna, camada e a vazão.

g) Módulo Rios

Os rios tanto podem contribuir com água para um aquífero, como drenar água do mesmo, tudo vai depender da relação de cargas existentes entre o rio e o aquífero. É exatamente para calcular esta troca de fluxo, entre um rio e um aquífero, que se destina este módulo.

Para simular o efeito da recarga de um rio no modelo, são adicionados na equação de fluxo os termos que representam esta drenagem, para cada célula. O rio é dividido em diversos trechos, de modo que, cada um destes trechos esteja contido em uma única célula, Figura A.2.17.

A drenagem através do leito do rio de cada trecho é aproximada pela lei de Darcy como:

$$QRIV = KLW(HRIV - HAQ)/M \quad (A2.61)$$

Onde:

QRIV - drenagem através do leito do rio.

K - condutividade hidráulica do leito do rio.

L - comprimento do trecho de rio.

W - largura do rio.

M - espessura do leito do rio.

HAQ - carga hidráulica do aquífero na célula que contém o trecho do rio.

HRIV - carga do rio.

A equação acima em termos de condutância ficará da seguinte forma:

$$QRIV = CRIV(HRIV - HAQ) \quad (A2.62)$$

sendo:

CRIV - condutância do leito rio (CRIV = KLW/M).

A diferença de carga HRIV - HAQ vai depender do valor da carga no aquífero em relação ao leito do rio. Se a carga do aquífero for maior do que a cota do leito do rio, HAQ será igual a carga na célula, e a equação (A2.62) passará a ser escrita na seguinte forma:

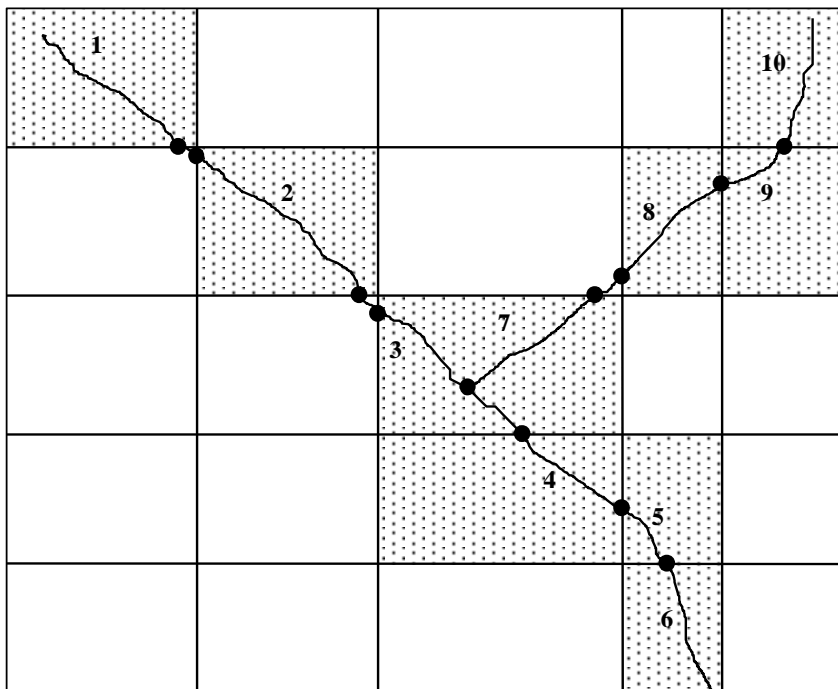
$$QRIV = CRIV(HRIV - H) \quad (A2.63)$$

onde:

H - carga hidráulica da célula

Porém, se a carga da célula é inferior a cota da base do leito do rio, ou seja, há uma zona não saturada, a carga HAQ será então RBOT, que é a cota da base do leito do rio, sendo a equação (A2.63) rescrita como:

$$QRIV = CRIV(HRIV - RBOT) \quad (A2.64)$$



Fonte: McDonald & Harbaugh (1984)

Figura A.2.17 - Discretização de um rio.

A Figura A.2.18 mostra a relação entre a recarga de um rio e a carga na célula.



Figura A.2.18 - Drenagem através do leito de um rio em função da carga do aquífero.

h) Módulo Recarga por Precipitação

A infiltração em geral ocorre em grandes áreas, e é expressa em termos de uma taxa de fluxo (vazão) por unidade de área, reduzindo-se deste modo a uma altura por unidade de tempo. O volume de infiltração é calculado pela seguinte equação:

$$QRCH_{i,j,k} = I_{i,j,k} \cdot DELR_i \cdot DELC_j \quad (A2.65)$$

onde:

$I_{i,j,k}$ é a infiltração na célula i,j,k

$DELR_j$ e $DELC_i$ são as dimensões horizontais da célula.

Como o valor da infiltração não depende da carga da célula, este termo é, portanto, adicionado ao termo RHS da equação (A2.59).

A.3 - SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS - BASE ACCESS – MACEIÓ

A sistematização dos dados dos poços cadastrados foi feita em uma base de dados relacional ACCESS 2007, cuja estrutura de tabelas e relacionamentos é mostrada na figura A.3.1.

Em detalhe, a definição dos tipos de dados e a descrição dos campos pertencentes a cada uma das tabelas são apresentadas no kit de recursos técnicos que segue.

A.3.1 - Kit de Recursos Técnicos da Base de Dados Access Maceió

Tabelas de acervo de dados e de lista de códigos.

Tabela A.3.1. – Ponto D'água. Essa tabela representa um ponto de água - poços tubulares, amazonas, piezômetros, cisternas, barragem subterrânea, etc.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
CodigoPoco	Inteiro Longo	Um outro número padrão deste item. Determinado a partir de tbMunicipio.Cod (7 dígitos) + 5 últimos dígitos de PontoDagua.ID . Exigido.
CASAL	Texto	Sigla da instituição. Opcional
CPRM	Texto	Sigla da instituição. Opcional.
SEMARH	Texto	Sigla da instituição. Opcional.
ANA-MACEIO	Texto	Sigla da instituição. Opcional.
IDProprietario	Inteiro Longo	ID do Proprietário. Referência estrangeira a Proprietario.ID . Opcional.
Bairro	Texto	Nome do bairro. Opcional.
Local	Texto	Localidade do ponto cadastrado. Opcional.
CodMunicipio	Inteiro Longo	Referência estrangeira a tbMunicipio.Cod . Opcional.
UF	Texto	Sigla do Estado. Opcional.
UTM_E	Inteiro Longo	Coordenada UTM ESTE do ponto. Opcional.
UTM_N	Inteiro Longo	Coordenada UTM NORTE do ponto. Opcional.
Longitude	Texto	Coordenada Geográfica. Opcional.
Latitude	Texto	Coordenada Geográfica. Opcional.
Data	Data/Hora	Data do cadastro do ponto. Opcional.
EmpresaPerfuracao	Texto	Empresa executora da perfuração. Opcional.
IDNaturezaPonto	Inteiro Longo	ID da natureza do ponto. Referência estrangeira a tbNaturezaPonto.ID . Opcional.
IDDatum	Inteiro Longo	Identificação do datum. Referência estrangeira a tbDatum.ID . Opcional.

Tabela A.3.1. – Ponto D’água. Essa tabela representa um ponto de água - poços tubulares, amazonas, piezômetros, cisternas, barragem subterrânea, etc. (continuação).

Campo	Tipo	Descrição
IDRegiaoHidrografica	Inteiro Longo	ID da região hidrográfica. Referência estrangeira a tbRegiaoHidrografica.ID . Opcional.
SubBaciaHidrografica	Texto	Nome da sub-bacia hidrográfica.Opcional.
SituaçãoOperacional	Texto	Situação da operação do poço. Opcional.
MotivoInoperabilidade	Texto	Motivo da situação operacional. Opcional.
IDBaciaHidrografica	Inteiro Longo	ID da bacia hidrográfica. Referência estrangeira a tbBaciaHidrografica.ID . Opcional.
IDAquifero	Inteiro Longo	ID do aquífero. Referência estrangeira a Aquifero.ID . Opcional.

Tabela A.3.1.1 – tbDatum. Lista dos sistemas de projeção de coordenadas.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome dos elipsóides de projeção de coordenadas geográficas (SAD 69, WGS 84, etc). Exigido.

Tabela A.3.1.2. tbNaturezaPonto. Tabela lista dos tipos de ponto de água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome do tipo de ponto d’água. Exigido.

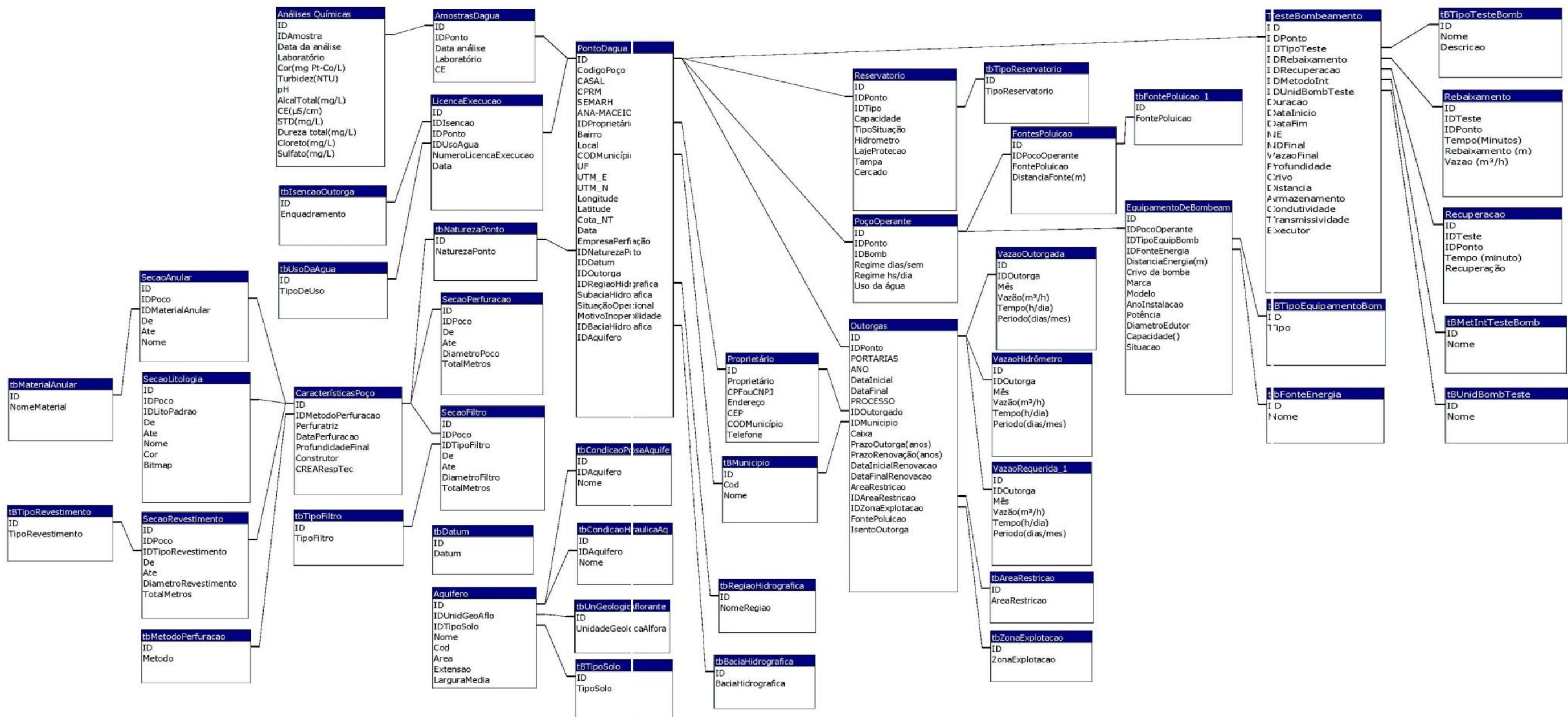


Figura A.3.1 – Diagrama dos relacionamentos propostos para a base de dados ACCESS - Maceió.

Tabela A.3.1.3 - Proprietario. Essa tabela contém os registros dos proprietários dos pontos de água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente. Exigido.
Proprietario	Texto(50)	Nome descritivo desse proprietário de ponto d' água. Exigido.
CodMunicípio	Inteiro Longo	Outro número padrão Código do Município. Referência estrangeira a tBMunicípio.Cod . Exigido.
Endereco	Texto(100)	Endereço do proprietário. Opcional.
CEP	Texto(20)	Código de endereçamento postal. Opcional.
Telefone	Texto(20)	Telefone do proprietário. Opcional.
CPFouCNPJ	Texto(20)	Número do CPF ou CNPJ do proprietário. Opcional.

Tabela A.3.1.4 - tBMunicípio: Tabela lista dos municípios do Estado de Alagoas.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Cod	Texto	Outro número padrão para a PK dessa tabela. Opcional.
Nome	Texto	Nome do município. Exigido.

Tabela A.3.1.5 – tbRegiaoHidrografica. Tabela lista das regiões hidrográficas do Estado de Alagoas.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome da região hidrográfica do Estado de Alagoas. Exigido.

Tabela A.3.1.6 – tbBaciaHidrografica. Tabela lista das bacias hidrográficas do Estado de Alagoas.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome da bacia hidrográfica do Estado de Alagoas. Exigido.

Tabela A.3.2 - CaracterísticasPoco. Tabela de características técnicas do poço e de identificação do responsável técnico pela construção.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. Gerado automaticamente.ID. Exigido.
IDNaturezaPonto	Inteiro Longo	Referência estrangeira a NaturezaPonto.ID . Exigido.
IDMetodoPerfuração	Duplo	Referência estrangeira a tbMetodoPerfuracao . Opcional.
Perfuratriz	Duplo	Tipo de perfuratriz usada na construção do poço. Opcional.
DataPerfuracao	Data/Hora	Data de conclusão do poço. Opcional.
ProfTotalPoco	Duplo	Profundidade total do poço. Opcional.
Construtor	Texto	Nome da empresa construtora do poço. Opcional.
CREARespTec	Duplo	Registro no CREA do responsável técnico. Opcional.

Tabela A.3.2.1 – tbMetodoPerfuracao. Tabela lista de métodos de perfuração.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome descritivo do método de perfuração usado na construção do poço. Exigido.

Tabela A.3.2.2 - SecaoPerfuracao. Tabela com os diâmetros e extensões perfuradas de acordo com o projeto da perfuração.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. Gerado automaticamente. Exigido.
IDPoco	Inteiro Longo	ID do poço. Referência estrangeira a CaracteristicasPoco.ID . Exigido.
De	Duplo	Profundidade inicial do intervalo perfurado neste diâmetro. Opcional.
Ate	Duplo	Profundidade final do intervalo perfurado neste diâmetro. Opcional.
DiametroPoco	Duplo	Valor deste diâmetro em polegadas no intervalo considerado. Opcional.

Tabela A.3.2.3 - SecaoLitologia – Tabela com descrição da seção litológica do poço.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. ID gerado automaticamente. Exigido.
IDPoco	Inteiro Longo	ID do Ponto d'água. Referência estrangeira a Poco.ID . Exigido.
De	Duplo	Profundidade inicial do material encontrado. Opcional.
Ate	Duplo	Profundidade final do material encontrado. Opcional.
Nome	Texto(250)	Descrição litológica da seção perfurada do poço ou furo. Opcional.

Tabela A.3.2.4 – SecaoRevestimento. Tabela dos intervalos de instalação do revestimento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. ID gerado automaticamente. Exigido.
IDPoco	Inteiro Longo	ID do Ponto d' Água. Referência estrangeira a PontoDagua.ID. Exigido.
IDTipoRevestimento	Inteiro Longo	ID do Material de revestimento. Referência estrangeira a tBMaterialRev.ID. Exigido.
De	Duplo	Profundidade inicial do intervalo revestido neste diâmetro. Opcional.
Ate	Duplo	Profundidade final do intervalo revestido neste diâmetro. Opcional.
Altura da boca	Duplo	Altura do revestimento acima do nível do terreno natural. Opcional.
Tubo guia	Duplo	Extensão do tubo guia existente para medição do nível da água. Opcional.
DiametroPolegadas	Duplo	Valor deste diâmetro em polegadas no intervalo considerado. Opcional.

Tabela A.3.2.4.1 - tbTipoRevestimento. Tabela lista de materiais de revestimento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. ID gerado automaticamente. Exigido.
Nome	Texto(50)	Nome do material de revestimento. Exigido.

Tabela A.3.2.5 - SecaoFiltro. Tabela dos intervalos de instalação de filtros.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. ID gerado automaticamente. Exigido.
IDPoco	Inteiro Longo	ID do Ponto d' Água. Referência estrangeira a PontoDagua.ID. Exigido.
IDTipoFiltro	Inteiro Longo	ID do Material dos filtros. Referência estrangeira a tBMaterialFiltro.ID. Exigido.
De	Duplo	Profundidade inicial do intervalo de instalação de filtros neste diâmetro. Opcional.
Ate	Duplo	Profundidade final do intervalo de instalação de filtros neste diâmetro. Opcional.
Abertura(mm)	Duplo	Largura da ranhura de abertura do filtro. Opcional.
DiametroPolegadas	Duplo	Valor deste diâmetro em polegadas no intervalo considerado. Opcional.

Tabela A.3.2.5.1 - tbTipoFiltro. Tabela lista de materiais constituintes dos filtros.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. ID gerado automaticamente. Exigido.
Nome	Texto(50)	Nome do material de revestimento-filtro. Exigido.

Tabela A.3.2.6 - SecaoAnular. Tabela dos intervalos do espaço anular com diferentes preenchimentos.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária gerado automaticamente. Exigido.
IDPonto	Inteiro Longo	ID do Ponto d'Água. Referência estrangeira a Ponto D'água .ID. Exigido.
IDMaterialAnular	Inteiro Longo	ID do material de preenchimento desse intervalo do anular. Referência estrangeira a tBMaterialAnular.ID . Opcional.
De	Duplo	Profundidade inicial desse intervalo do anular. Opcional.
Ate	Duplo	Profundidade final do intervalo considerado do anular. Opcional.
Nome	Texto	Nome do material de preenchimento do intervalo e/ou indicação de duto de completação de pré-filtro no intervalo quando for o caso. Opcional.
Total(m)	Texto	Extensão do intervalo De – Até. Opcional.

Tabela A.3.2.6.1 - tbMaterialAnular. Tabela lista do tipo de material de preenchimento dos intervalos do espaço anular do poço.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária gerado automaticamente. Exigido.
Nome	Texto (50)	Nome descritivo do material de preenchimento do anular. Exigido.

Tabela A.3.3 - Aquifero. Tabela de nome e abrangência do aquífero.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDUnidGeoAflo	Inteiro Longo	ID da unidade geológica aflorante. Referência estrangeira. tbUnGeologicaAflorante.ID . Exigido.
Nome	Texto(50)	Nome descritivo do aquífero. Exigido.

Tabela A.3.3.1 - tbCondicaoPorosa. Tabela lista da condição de porosidade do aquífero.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDAquifero	Inteiro Longo	ID do Aquífero. Referência estrangeira a Aquifero.ID . Exigido
Nome	Texto(50)	Nome da condição de porosidade do aquífero. Exigido.

Tabela A.3.3.2 - tbCondicaoHidraulica. Tabela lista da condição hidráulica do aquífero.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDAquifero	Inteiro Longo	ID do Aquífero. Referência estrangeira a Aquifero.ID . Exigido
Nome	Texto	Nome da condição hidráulica do aquífero. Exigido.

Tabela A.3.3.3 – tbUnGeologicaAflorante. Tabela lista da unidade geológica aflorante no local do ponto d'água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDAquifero	Inteiro Longo	ID do Aquífero. Referência estrangeira a Aquifero.ID . Exigido.
Nome	Texto	Nome da unidade geológica aflorante no local do ponto d'água. Exigido.

Tabela A.3.3.4 – tbTipoSolo. Tabela lista do tipo de solo no local do ponto d'água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDAquifero	Inteiro Longo	ID do Aquífero. Referência estrangeira a Aquifero.ID . Exigido
Nome	Texto	Nome do tipo de solo na lista. Exigido.

Tabela A.3.4 - AmostraDagua. Essa tabela define as condições de coleta, de análise e principais elementos físico-químicos.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. Gerado automaticamente. Exigido.
Nome	Texto	Nome descritivo da amostra d'água. Exigido.
DataColeta	Data/Hora	Data da coleta da amostra de água. Opcional.
ResponsavelColeta	Texto	Nome do químico ou da equipe responsável pela análise conforme laudo. Opcional.

Tabela A.3.4.1 - Análises Físico-Químicas Bacteriológicas. Tabela que identifica os valores dos constituintes físico-químicos e bacteriológicos, unidades e teores.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. Gerado automaticamente Exigido.
IDAmostra	Inteiro Longo	ID da amostra d'água. Referência estrangeira a AmostraDagua.ID . Exigido.
DataAnalise	Data/Hora	Data da análise físico-química e bacteriológica. Opcional.
Laboratorio	Texto	Nome do laboratório que efetuou a análise da água. Opcional.
Cor(mg Pt-Co/L)	Texto	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Turbidez(NTU)	Texto	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
pH	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
AlcalTotal(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
CE(µS/cm)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
STD(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
DurezaTotal(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor
Cloreto(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Sulfato(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Carbonato(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Bicarbonato(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Nitrito(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor
Nitrato(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Cálcio(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Magnésio(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.

Tabela A.3.4.1 - Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas. Tabela que identifica os valores dos constituintes físico-químicos e bacteriológicos, unidades e teores (continuação).

Campo	Tipo	Descrição
Potássio(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
FerroTotal(mg/L)	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Odor	Texto	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Temperatura	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Eh	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
NitrogenioAmoniacal	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
Fenóis	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
BTEX	Duplo	Nome do constituinte químico e sua unidade de teor.
ColiformesTotais	Duplo	Número de coliformes por 100 ml de água.
ColiformesTermotolerantes	Duplo	Número de coliformes por 100 ml de água.

Tabela A.3.5 - tbUsoAgua. Tabela lista de tipos de uso da água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome descritivo da bomba em uso no ponto d'água. Exigido.

Tabela A.3.6 - Reservatorio. Tabela de reservatório existente no ponto d'água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
IDPonto	Inteiro Longo	ID do Ponto d' Água. Referência estrangeira a PontoDagua.ID . Exigido.
IDTipo	Inteiro Longo	Referência estrangeira a tbTipoReservatorio.ID . Exigido.
Capacidade	Inteiro	Capacidade do reservatório.
TipoSituacao	Texto(20)	Em atividade. Desativado.
Hidrometro	booleano	Reservatório possui hidrômetro?

Tabela A.3.6 - Reservatorio. Tabela de reservatório existente no ponto d'água (continuação).

Campo	Tipo	Descrição
LajeProtecao	booleano	Reservatório possui laje de proteção?
Tampa	booleano	Reservatório possui tampa?
Cercado	booleano	Reservatório possui cercado?
AbastecimentoPublico	booleano	É abastecimento público?
PlanoReservacao	Texto	Reservatório elevado, terrestre, sem reservação.

Tabela A.3.6.1 – tbTipoReservatorio. Tabela lista de tipos de reservatório.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto	Nome do tipo de reservatório do ponto d'água. Exigido.

Tabela A.3.7 – Outorgas. Tabela de outorgas de pontos de água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDPonto	Inteiro Longo	Referência estrangeira a PontoDagua.ID . Exigido.
Portaria	Inteiro Longo	Número da Portaria de concessão da outorga. Opcional.
Ano	Texto(4)	Ano da concessão de outorga. Opcional.
DataInicial	Data/Hora	Data de início da outorga. Opcional.
DataFinal	Data/Hora	Data final da concessão outorgada. Opcional.
Processo	Texto(30)	Referência do processo de outorga. Opcional.
IDMunicipio	Inteiro Longo	ID do município. Referência estrangeira a tbMunicipio.ID . Exigido.
IDOutorgado	Inteiro Longo	ID do outorgado. Referência estrangeira a Outorgas.ID . Exigido.
ND	Duplo	Nível dinâmico do poço.
NE	Duplo	Nível estático do poço.
Caixa	Duplo	Caixa.
Prof (m)	Duplo	Profundidade do poço.
UnidProdutora	Texto	Nome da unidade produtora.
PossuiLicenca	Sim/não	Se possui licença de execução.
LicencaExecucao	Texto	Número da licença de execução.

Tabela A.3.7 – Outorgas. Tabela de outorgas de pontos de água (continuação).

Campo	Tipo	Descrição
PrazoOutorga(anos)	Texto(30)	Prazo da outorga em anos. Opcional.
PrazoRenovacao(anos)	Texto(30)	Prazo da renovação da outorga em anos. Opcional.
DataInicialRenovacao	Data/Hora	Data de início da renovação da outorga. Opcional.
DataFinalRenovacao	Data/Hora	Data de vencimento da outorga. Opcional.
VolumeOutorgado(m³/dia)	Número	Volume outorgado do poço em m³/dia.
VazãoOutorgada(m³/dia)	Número	Vazão outorgada do poço em m³/dia.
AreaRestricao	Booleano	O ponto de água se encontra em área de restrição?
IDAreaRestricao	Inteiro Longo	ID da área de restrição. Referência estrangeira a tbAreaRestricao.ID . Exigido.
IDZonaExplotacao	Inteiro Longo	ID da zona de exploração. Referência estrangeira a tbZonaExplotacao.ID . Exigido.
IsentoOutorga	Booleano	O ponto de água é isento de outorga?
Motivolsencao	Texto	Motivo da isenção.
RegimeOutorgado(H/d)	Número	Regime outorgado em horas/dia.
RegimeOutorgado(d/s)	Número	Regime outorgado em horas/semana.

Tabela A.3.7.1 – VazaoOutorgada. Tabela de vazão outorgada do ponto de água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDOutorga	Inteiro Longo	Referência estrangeira a Outorgas.ID . Exigido.
Mes	Duplo	Mês de concessão da outorga. Opcional.
Vazao	Duplo	Vazão outorgada (m³/h). Exigido.
RegimeDia	Inteiro	Regime operacional diário autorizado (horas/dia). Opcional.
RegimeMes	Inteiro	Regime operacional mensal autorizado (dias/mês). Opcional.

Tabela A.3.7.2 – VazaoHidrômetro. Tabela de vazão medida em hidrômetro no ponto de água.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDOutorga	Inteiro Longo	Referencia estrangeira a Outorgas.ID . Exigido.
Mes	Duplo	Mês de concessão da outorga. Opcional.
Vazao	Duplo	Vazão medida no hidrômetro (m ³ /h). Exigido.
RegimeDia	Inteiro	Regime operacional diário autorizado (horas/dia). Opcional.
RegimeMes	Inteiro	Regime operacional mensal autorizado (dias/mês). Opcional.

Tabela A.3.7.3 – VazaoRequerida. Tabela de vazão requerida para exploração.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDOutorga	Inteiro Longo	Referência estrangeira a Outorgas.ID . Exigido.
Mes	Duplo	Mês de concessão da outorga. Opcional.
Vazao	Duplo	Vazão requerida pelo proprietário (m ³ /h). Exigido.
RegimeDia	Inteiro	Regime operacional diário autorizado (horas/dia). Opcional.
RegimeMes	Inteiro	Regime operacional mensal autorizado (dias/mês). Opcional.

Tabela A.3.7.4 – tbAreaRestricao. Tabela lista de áreas de restrição.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDOutorga	Inteiro Longo	Referência estrangeira a Outorgas.ID . Exigido.
Nome	Texto	Nome da área de restrição.

Tabela A.3.7.5 – tbZonaExplotacao. Tabela lista de zonas de exploração.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDOutorga	Inteiro Longo	Referência estrangeira a Outorgas.ID . Exigido.
Nome	Texto	Nome da zona de exploração.

Tabela A.3.8 – PoçoOperante. Tabela de poço existente em operação.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
IDPoco	Inteiro Longo	ID do Poço. Referência estrangeira a Poco.ID . Exigido.
Vazao	Duplo	Vazão do Ponto D'água.
NE	Duplo	Nível Estático.
ND	Duplo	Nível Dinâmico.
Horas/Semana	Duplo	Horas por semana do regime de bombeamento.
Meses/Ano	Duplo	Meses por ano do regime de bombeamento.
Horas/Dia	Duplo	Horas por dia do regime de bombeamento.
Dias/Semana	Duplo	Dias por semana do regime de bombeamento.

Tabela A.3.8.1 - FontesPoluicao. Tabela da fonte de poluição e sua distância ao poço operante.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDPocoOperante	Inteiro Longo	Referência estrangeira a PocoOperante.ID . Exigido.
FontePoluicao	Texto	Nome descritivo da fonte de poluição do ponto d'água. Exigido.
DistanciaFonte(m)	Duplo	Distância da fonte de poluição ao poço operante. Opcional.

Tabela A.3.8.1.1 – tbFontePoluicao. Tabela lista de nomes de fontes de poluição.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
FontePoluicao	Texto	Nome na lista, descritivo da fonte de poluição do ponto d'água. Exigido.

Tabela A.3.8.2 – EquipamentoDeBombeamento. Tabela define as especificações da unidade de bombeamento instalada no poço.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
IDPocoOperante	Inteiro Longo	ID do Ponto d'água. Referência estrangeira a PocoOperante.ID . Exigido.
IDTipoEquipBombeamento	Inteiro Longo	ID do tipo de equipamento de bombeamento em uso no poço. Referência estrangeira a tBTipoEquipamentoBombeamento.ID . Exigido.
IDFonteEnergia	Inteiro Longo	ID do nome da fonte de energia usada pelo equipamento de bombeamento. Referência estrangeira a tbFonteEnergia.ID . Exigido.
DistanciaEnergia(m)	Duplo	Distância da fonte de energia. Opcional
CrivoDaBomba	Duplo	Profundidade do crivo do equipamento de bombeamento. Opcional.
Marca	Texto(30)	Marca da bomba instalada no poço. Opcional.
Modelo	Texto(30)	Modelo da bomba instalada no poço. Opcional.
AnoInstalacao	Texto(4)	Ano em que o equipamento foi instalado. Opcional.
Potencia	Duplo	Potência do motor da bomba instalada no poço.(HP/CV). Opcional.
DiametroEdutor	Duplo	Diâmetro do tubo edutor. Opcional.
Capacidade	Duplo	Capacidade do equipamento de bombeamento. Opcional.
Situacao	Texto	Situação ou estado do equipamento. Opcional.

Tabela A.3.8.2.1 - tbTipoEquipamentoBomb. Tabela lista de tipos de equipamentos de bombeamento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto(50)	Nome descritivo do equipamento em uso no ponto d'água. Exigido.

Tabela A.3.8.2.2 - tbFonteEnergia. Tabela lista de nomes da fonte de energia.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária. É gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto(50)	Nome descritivo da fonte de energia em uso no ponto d'água. Exigido.

Tabela A.3.9 - Teste Bombeamento. Tabela com o cabeçalho da ficha de teste e os resultados da interpretação.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
IDPoco	Inteiro Longo	ID do Ponto d' Água. Referência estrangeira a PontoDagua.ID. Exigido.
IDTipoTeste	Inteiro Longo	ID do tipo de teste. Referência estrangeira a tBTipoTesteBomb.ID. Opcional.
IDRebaixamento	Inteiro Longo	ID do Rebaixamento. Referência estrangeira a Rebaixamento.ID. Opcional.
IDRecuperacao	Inteiro Longo	ID da Recuperação. Referência estrangeira a Recuperacao.ID. Opcional.
IDMetodoI	Inteiro Longo	ID do método de interpretação do teste de bombeamento. Referência estrangeira a tBMetodoIntTesteBomb.ID. Opcional.
IDUnidBombTeste	Inteiro Longo	ID da unidade de bombeamento do teste. Referência estrangeira a tBUnidBombTeste.ID. Opcional.
Duracao	Texto(20)	Duração do teste de bombeamento em horas. Opcional.
DataInicio	Data/Hora	Data de início do teste de bombeamento. Opcional.
DataFim	Data/Hora	Data de encerramento do teste de bombeamento. Opcional.
NE	Duplo	Profundidade do nível estático. Opcional.
NDFinal	Duplo	Nível dinâmico final do teste. Opcional.
VazaoFinal	Duplo	Vazão final do teste em m ³ /h. Opcional.
Profundidade	Duplo	Profundidade do poço testado ou observado.
Crivo	Duplo	Profundidade do crivo da bomba no poço bombeado.
Distancia	Duplo	Raio do poço bombeado ou distância do poço bombeado ao observado.
Armazenamento	Duplo	Coefficiente de armazenamento avaliado no teste. Opcional.
Condutividade	Duplo	Condutividade hidráulica avaliada no teste. Opcional.
Transmissividade	Duplo	Transmissividade avaliada no teste. Opcional.

Tabela A.3.9.1 - tbTipoTesteBomb. Tabela lista de tipos de testes de bombeamento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto (100)	Nome do tipo de teste de bombeamento. Exigido.
Descrição	Texto (150)	Descreve o conceito adotado para o tipo de teste. Exigido.

Tabela A.3.9.2 – Rebaixamento. Tabela de medições de nível dinâmico e vazão durante o teste do rebaixamento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária gerado automaticamente. Exigido.
IDTeste	Inteiro Longo	ID do teste de bombeamento. Referência estrangeira a TesteBombeamento.ID. Exigido.
IDPonto	Inteiro Longo	ID do ponto testado. Referência estrangeira a Poco.ID. Exigido.
Tempo(Minutos)	Inteiro	Tempo decorrido de bombeamento no instante das leituras (de ND e vazão).
Rebaixamento(m)	Duplo	Rebaixamento medido no decorrer do tempo de bombeamento.
Vazão(m ³ /h)	Duplo	Vazão medida no decorrer do tempo de bombeamento.

Tabela A.3.9.3 – Recuperacao. Tabela de medições de nível dinâmico durante o teste de recuperação.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária gerado automaticamente. Exigido.
IDTeste	Inteiro Longo	ID do teste de bombeamento. Referência estrangeira a TesteBombeamento.ID. Exigido.
IDPonto	Inteiro Longo	ID do ponto testado. Referência estrangeira a Poco.ID. Exigido.
Tempo(minutos)	Duplo	Tempo decorrido de bombeamento no instante das leituras de ND.
Recuperacao	Duplo	Recuperação calculada com base no ND.
tb/t' + 1	Duplo	Tempo adimensional para o gráfico de recuperação.

Tabela A.3.9.4 - tbMetIntTesteBomb. Tabela lista de métodos de interpretação de testes de bombeamento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto(30)	Nome do método de interpretação teste de bombeamento. Exigido.

Tabela A.3.9.5 - tbUnidBombTeste. Tabela lista de unidades de bombeamento utilizadas em testes bombeamento.

Campo	Tipo	Descrição
ID	Inteiro Longo	Chave primária; gerado automaticamente; Exigido.
Nome	Texto(50)	Nome da unidade de bombeamento do teste. Exigido.

A.3.2 – Funcionalidades

Nessa base de dados *ACCESS*, prevista nos termos de referência, edições e consultas podem ser feitas das mais diversas maneiras, bem como podem ser extraídos os respectivos relatórios conforme se deseje, dentro do próprio programa, que constitui um completo sistema de gerenciamento de base de dados relacional (*RDBMS.mdb*).

O aplicativo, embora seja limitado em relação às capacidades do *ACCESS*, tem a vantagem de facilitar a edição e consulta de dados até um nível especificado ou pré-definido de interesse, o que pode ser considerado bastante útil na prática.

A estrutura do aplicativo contempla um menu principal com opções de *Cadastro*, *Consultas* e *Relatórios* contendo os seguintes itens:

- **Cadastro**
 - Ponto d'água, com opções para Novo e Editar.
 - Outorgas, com opções para Novo e Editar.
 - Proprietários, com opções para Novo e Editar.
 - Infraestrutura hídrica.
 - Análises físico-químicas e bacteriológicas.
 - Perfil construtivo.
 - Perfilagens.
 - Equipamento de bombeamento.
 - Teste de bombeamento.
- **Consulta**
 - Ponto d'água.
 - Proprietário.
 - Outorgas.
- **Relatórios**
 - Poço.
 - Maiores proprietários.
 - Participação dos municípios: número de poços por município.

- Quantidade de poços por aquífero.
- Listagem de todos os poços.

Menu de Cadastro e Formulários Associados

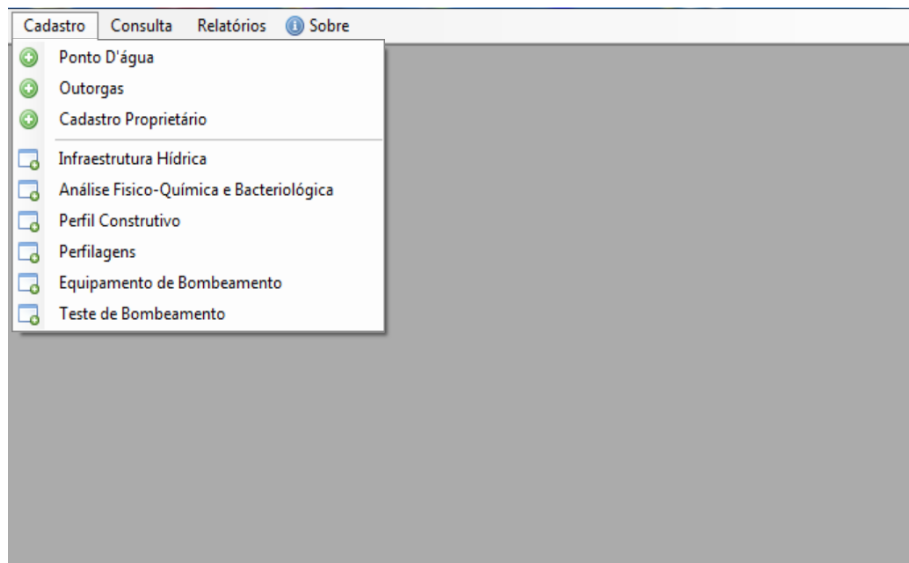


Figura A.3.2 – Formulário do menu principal com as opções de cadastro.

A imagem mostra o formulário de cadastro de um novo poço. O título da janela é 'Banco de Dados das Águas Subterrâneas de Alagoas - [Cadastro de novo Ponto D'água]'. O menu principal contém as opções: Cadastro, Consulta, Relatórios e Sobre. O formulário possui os seguintes campos e seções:

- Botões de Ação:** Deletar, Novo, Salvar, Cancelar, Relatório.
- Campos de Identificação:** ID (2209), Código do Poço (2209).
- Campos de Registro:** Infraestrutura Hídrica, Perfil Construtivo, Equipamentos de Bombeamento, Análises Físico-Química e bacteriológicas, Perfilagens, Teste de Bombeamento.
- Seção Cadastro:** Código ANA, Hidroremac, CASAL, SEMARH, CPRM, Proprietário do Poço.
- Seção Localização:** UF, Município, Bairro, Datum, Localidade, UTM E, UTM N, Longitude, Latitude, Região Hidrográfica, Bacia Hidrográfica, Sub Bacia Hidrográfica.
- Seção Características:** Empresa perfuração, Data de perfuração, Cota NT (m), Aquífero, Natureza do ponto, Unidade Geo. Aflorante, Profundidade total do poço (m), Situação Operacional, Motivo Inoperabilidade, Método de perfuração, Nome do Responsável Técnico, CREA do Responsável.

Figura A.3.3 – Formulário de Cadastro de entrada de dados para novo poço.

The image shows a software interface for water infrastructure management. The main window is titled 'Banco de Dados das Águas Subterrâneas de Alagoas' and contains a menu with 'Cadastro', 'Consulta', 'Relatórios', and 'Sobre'. A sub-window titled 'Infraestrutura Hídrica' is open, displaying a form for recording well information. The form is divided into several sections:

- Informações do Poço:** Includes fields for 'Hidroremac', 'Código do poço', 'CASAL', 'CPRM', 'SEMARH', and 'ANA-MACEIÓ'. Below these are fields for 'Proprietário do poço' and 'Município'.
- Reservatório:** Features a dropdown for 'Tipo de Reservatório' (currently open), 'Situação do reservatório', 'Vol. da Reservação (m³)', and 'Plano da Reservação'. Below this are checkboxes for 'Público', 'Laje de proteção', 'Cercado', and 'Instalação do hidrômetro'.
- Localização:** Includes fields for 'UF', 'Localidade', 'Outro', 'UTM E', 'UTM N', 'Longitude', and 'Latitude'.
- Região Hidrográfica:** Includes dropdowns for 'Região Hidrográfica', 'Bacia Hidrográfica', and 'Sub Bacia Hidrográfica'.
- Características:** Includes fields for 'Empresa perfuração', 'Data de perfuração', 'Cota NT (m)', 'Aquífero', 'Natureza do ponto', and 'Unidade Geo. Aflorante'.
- Operational Data:** Includes fields for 'Profundidade total do poço (m)', 'Situação Operacional', and 'Motivo Inoperabilidade'.

Figura A.3.4 – Formulário de cadastro de *Infraestrutura Hídrica* acessado a partir do clique no botão *Infraestrutura Hídrica* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo caixa combo para escolha do tipo de reservação.

Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas

1 de 1

Nova Análise Deletar Salvar Cancelar

informações do poço

Hidroremac: Código Poço: CASAL: CPRM: SEMARH: ANA-MACEIO:

Proprietário: Município do Poço:

Data da análise:

Laboratório:

Dados da análise

Cor(mg Pt-Co/L): <input type="text"/>	Magnésio(mg/L): <input type="text"/>
Turbidez(NTU): <input type="text"/>	Sódio(mg/L): <input type="text"/>
p H: <input type="text"/>	Potássio(mg/L): <input type="text"/>
Alcal Total(mg/L): <input type="text"/>	Silica(mg/L): <input type="text"/>
CE(μ S/cm): <input type="text"/>	Ferro total(mg/L): <input type="text"/>
STD(mg/L): <input type="text"/>	Odor: <input type="text"/>
Dureza total(mg/L): <input type="text"/>	Temperatura: <input type="text"/>
Cloreto(mg/L): <input type="text"/>	EH: <input type="text"/>
Sulfato(mg/L): <input type="text"/>	Nitrogenio Amoniacal: <input type="text"/>
Carbonato(mg/L): <input type="text"/>	Fenóis: <input type="text"/>
Bicarbonato(mg/L): <input type="text"/>	BTEX: <input type="text"/>
Nitrito(mg/L): <input type="text"/>	Coliformes Totais: <input type="text"/>
Nitrato(mg/L): <input type="text"/>	Coliformes Termotolerantes: <input type="text"/>
Cálcio(mg/L): <input type="text"/>	

Figura A.3.5 – Formulário de cadastro de *Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas* acessado a partir do clique no botão *Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas*, no formulário de cadastro para novo poço e nova análise.

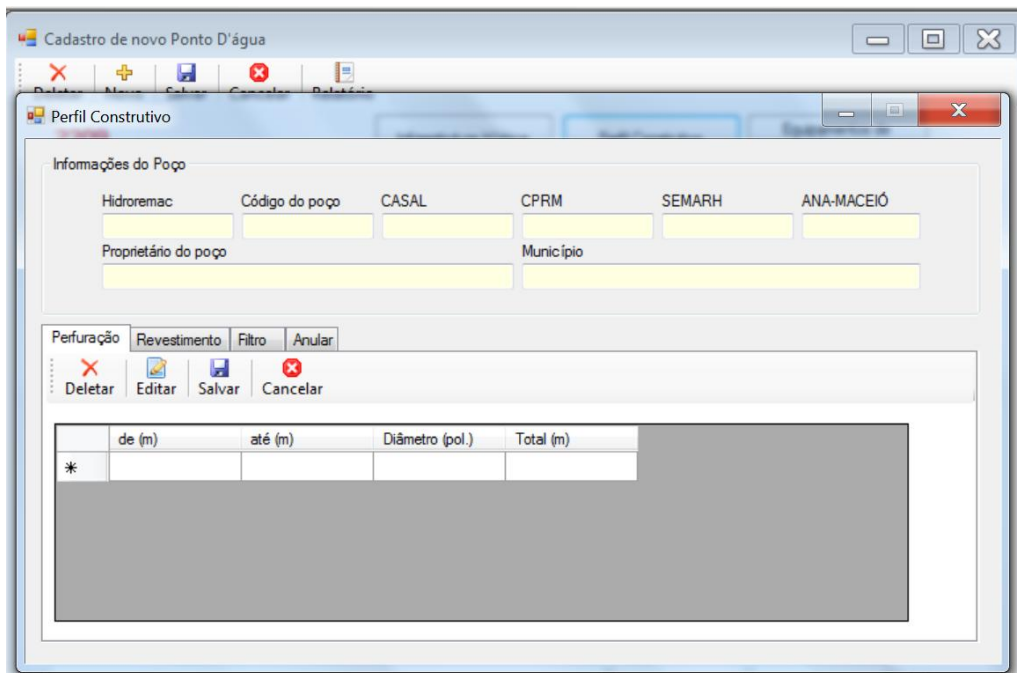


Figura A.3.6 – Formulário de cadastro de *Perfil Construtivo* acessado a partir do clique no botão *Perfil Construtivo* no formulário de cadastro para novo poço exibindo a aba *Perfuração* para entrada dos dados de perfuração.

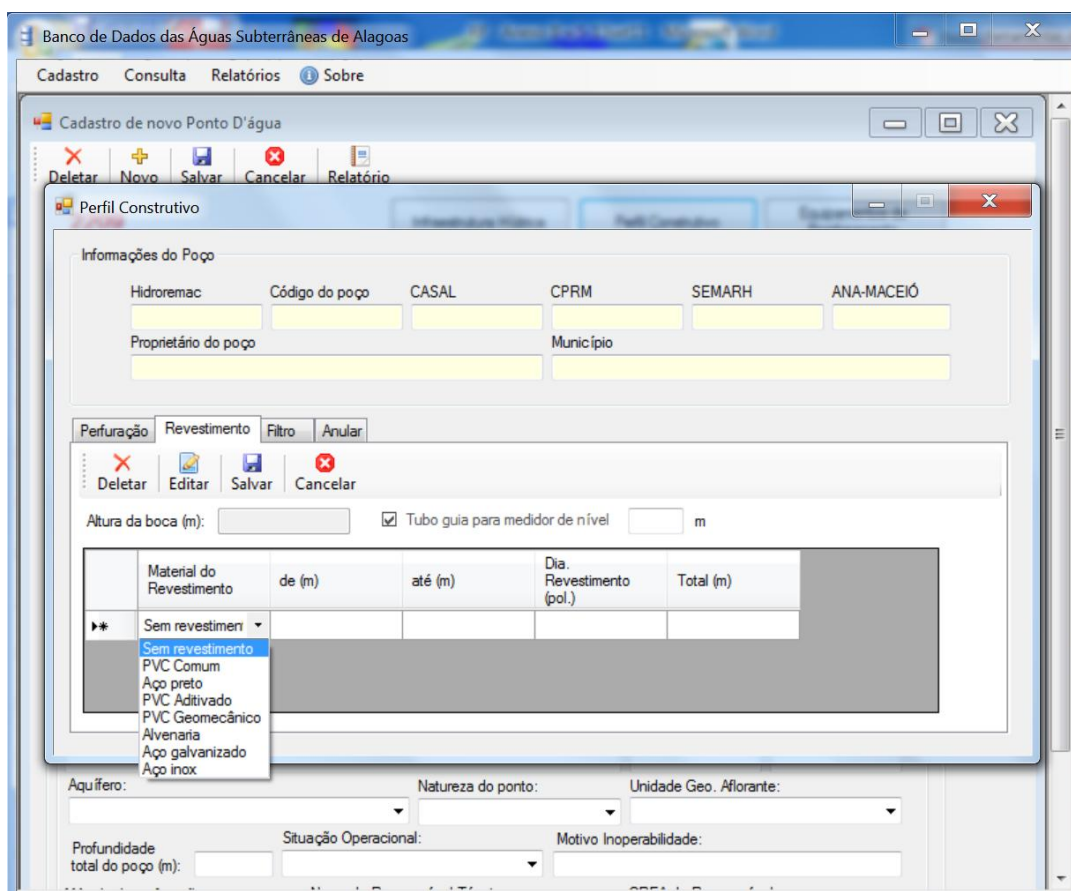


Figura A.3.7 – Formulário de *Cadastro de Perfil Construtivo* acessado a partir do clique no botão *Perfil Construtivo* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo a aba *Revestimento* para entrada dos dados com lista de escolha do material do revestimento.

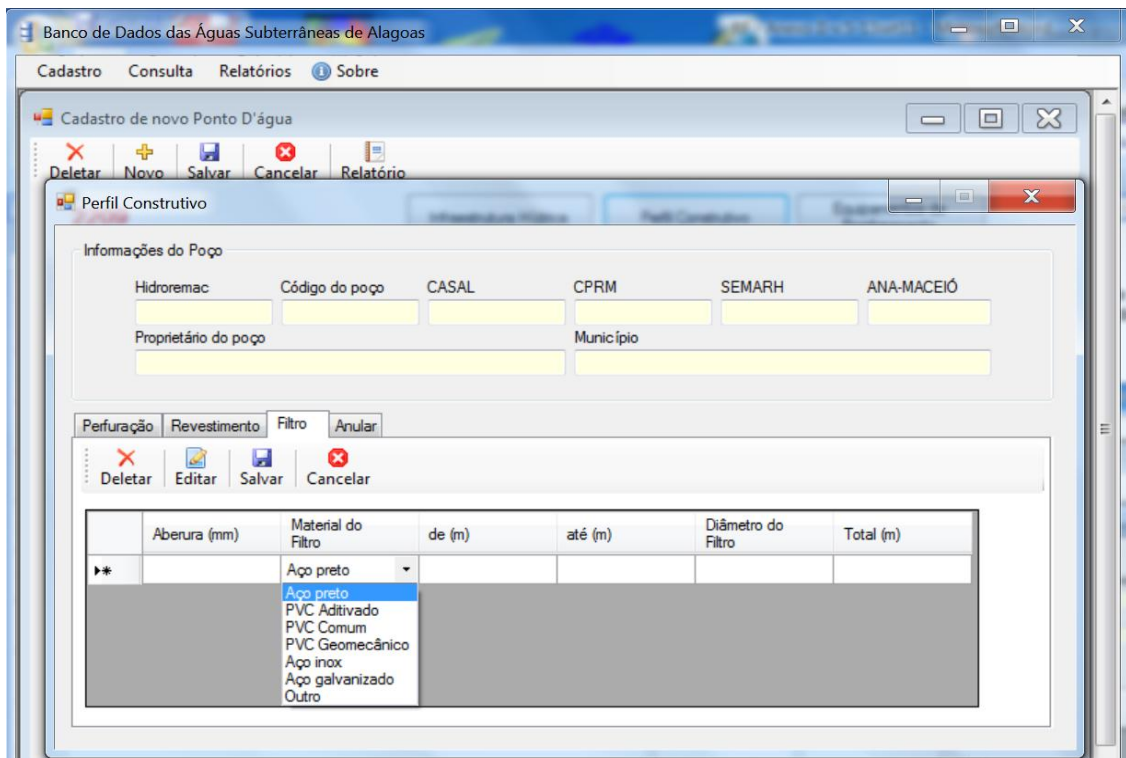


Figura A.3.8 – Formulário de *Cadastro de Perfil Construtivo* acessado a partir do clique no botão *Perfil Construtivo* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo a aba *Filtro* para entrada dos dados dos filtros do poço.

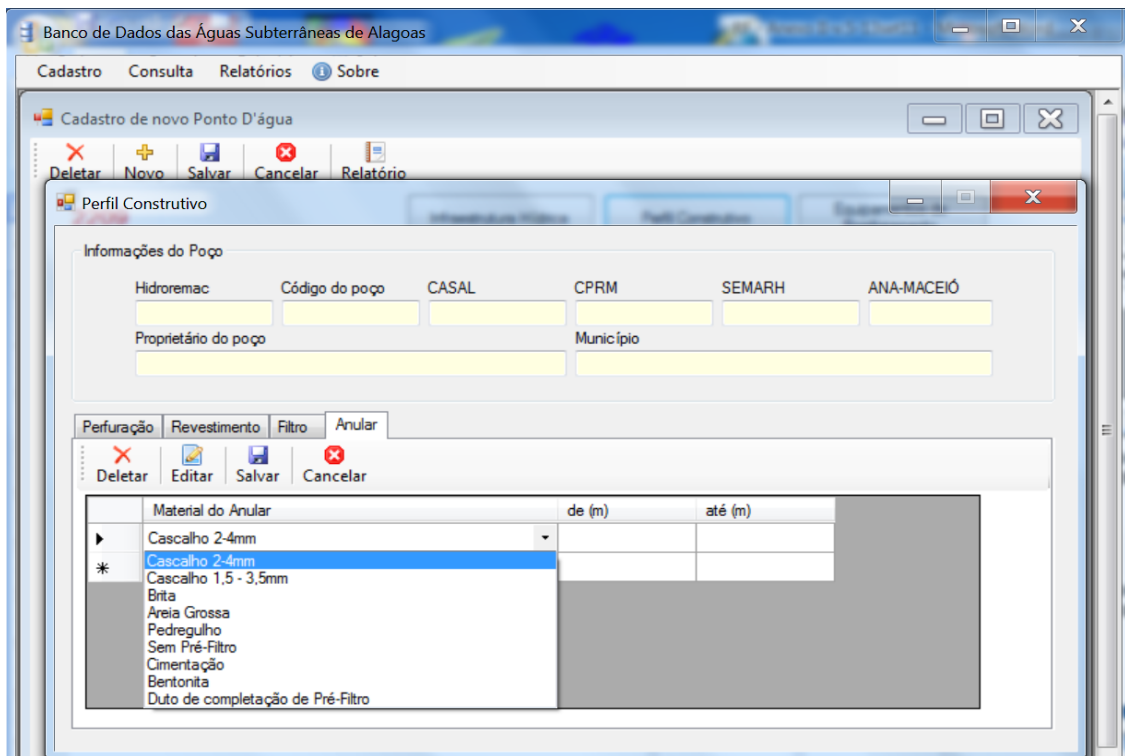


Figura A.3.9 – Formulário de *Cadastro de Perfil Construtivo* acessado a partir do clique no botão *Perfil Construtivo* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo a aba *Anular* para entrada dos dados do espaço anular do poço e caixa combo de escolha do material do referido espaço, incluindo duto de conclusão de pré-filtro, quando for o caso.

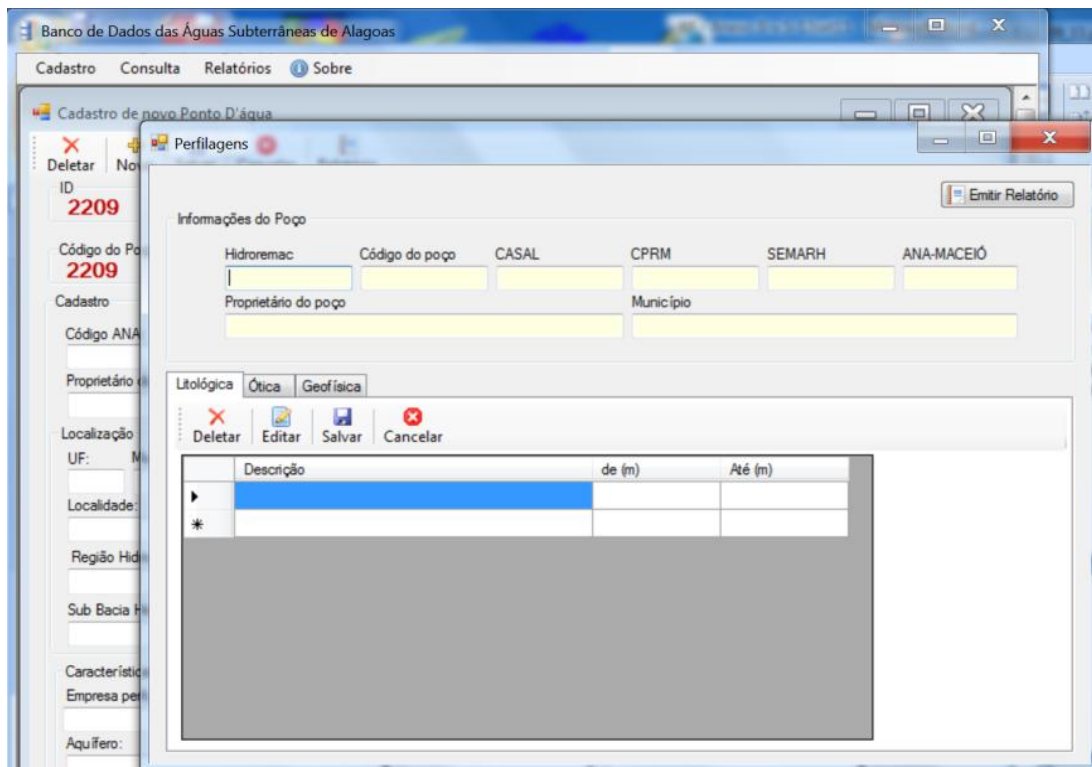


Figura A.3.10 – Formulário de *Cadastro de Perfilagens*, acessado a partir do clique no botão *Perfilagens* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo a aba *Litológica* para entrada da descrição litológica do material perfurado e o respectivo intervalo de ocorrência.

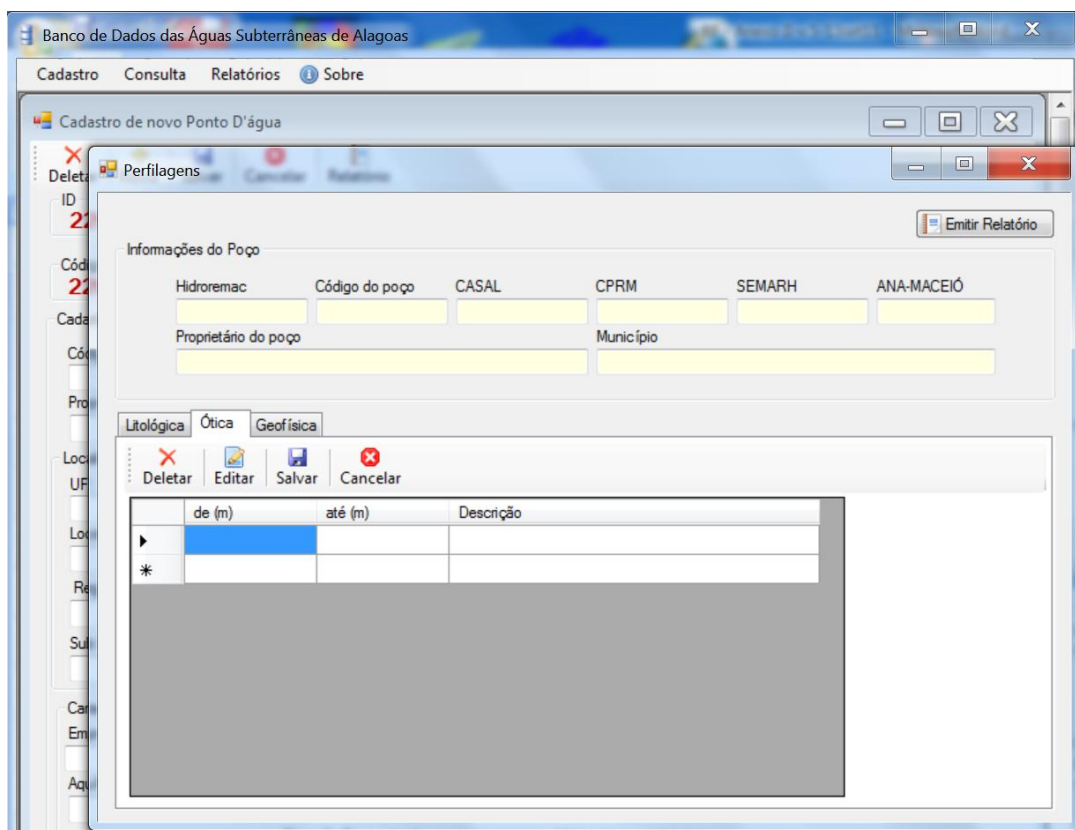


Figura A.3.11 – Formulário de *Cadastro de Perfilagens* do poço, acessado a partir do clique no botão *Perfilagens* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo a aba *Ótica* para entrada do intervalo do perfil ótico observado e descrição do que foi revelado pela imagem.

Banco de Dados das Águas Subterrâneas de Alagoas

Cadastro Consulta Relatórios Sobre

Cadastro de novo Ponto D'água

Deletar Novo Salvar Cancelar Relatório

Perfilagens

Informações do Poço

Hidroremac Código do poço CASAL CPRM SEMARH ANA-MACEIÓ

Proprietário do poço Município

Litológica Ótica Geofísica

Deletar Editar Salvar Cancelar

	Descrição	de (m)	até (m)
▶*			

Figura A.3.12 – Formulário de *Cadastro de Perfilagens* do poço, acessado a partir do clique no botão *Perfilagens* no formulário de *Cadastro* para novo poço exibindo a aba *Geofísica* e caixas de entrada dos dados descritivos do tipo de perfilagem e seu intervalo no poço.

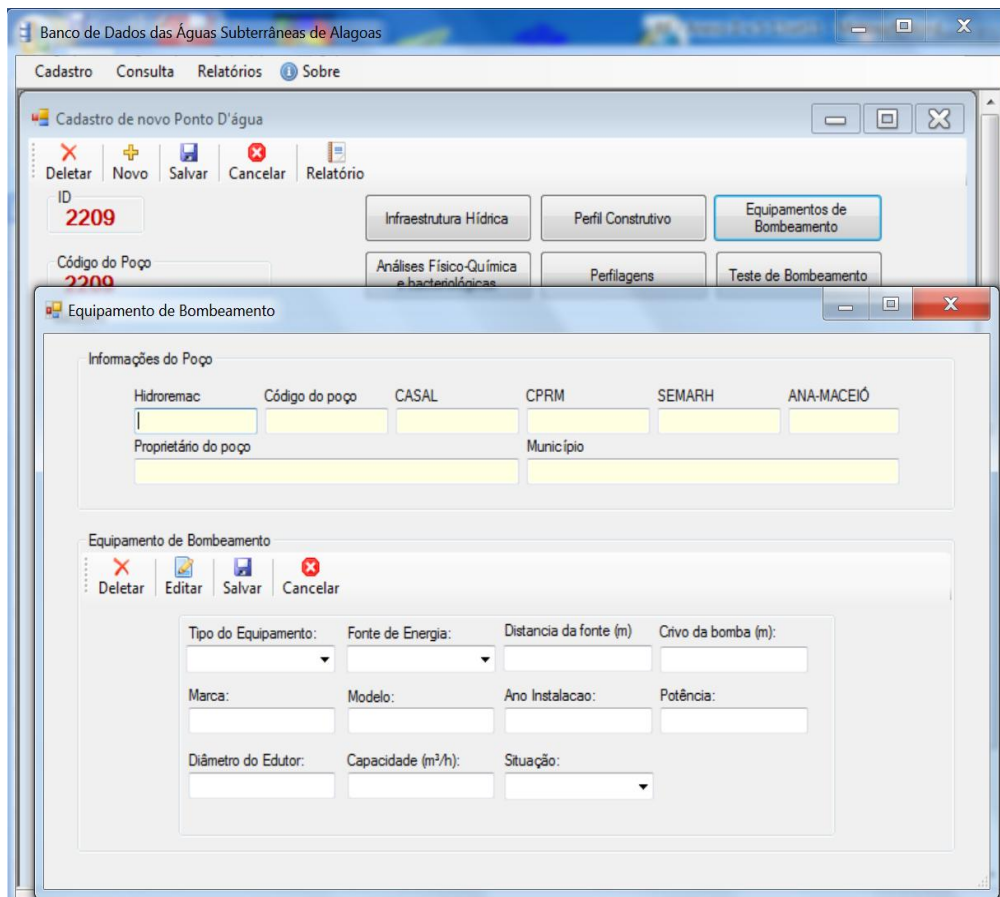


Figura A.3.13 – Formulário de *Cadastro de Equipamento de Bombeamento* acessado a partir do clique no botão *Equipamento de Bombeamento* no formulário de *Cadastro para novo poço* e no botão *Editar* exibindo as caixas de texto e caixas combo para entrada dos dados.

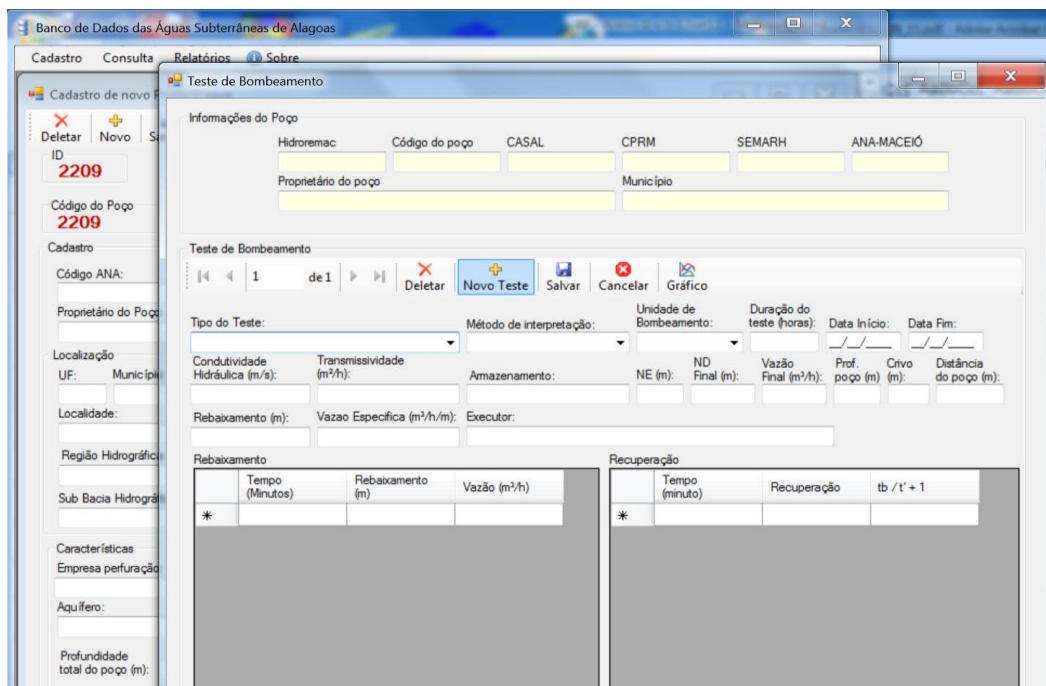


Figura A.3.14 – Formulário de *Cadastro de Teste de Bombeamento* acessado a partir do clique no botão *Teste de Bombeamento* no formulário de *Cadastro para novo poço* e no botão *Novo Teste* exibindo as caixas de texto e caixas combo para entrada dos dados.

Figura A.3.15 – Formulário de *Cadastro de Novo Registro de Outorga* acessado a partir do clique no botão *Outorgas* no formulário de *Cadastro* seguido de um clique no botão *Novo* no formulário *Registro de Outorga* exibindo as caixas de texto e caixas combo para entrada dos dados.

Figura A.3.16 – Formulário de *Cadastro de Proprietário* acessado a partir do clique no submenu *Cadastro Proprietário* seguido de um clique no botão *Novo* no formulário *Cadastro de Proprietário*, exibindo as caixas de texto e combo para entrada dos dados.

Para poços já cadastrados, os dados podem ser vistos a partir do menu *Cadastro* e do submenu desejado.

Menu Consulta e Formulários Associados

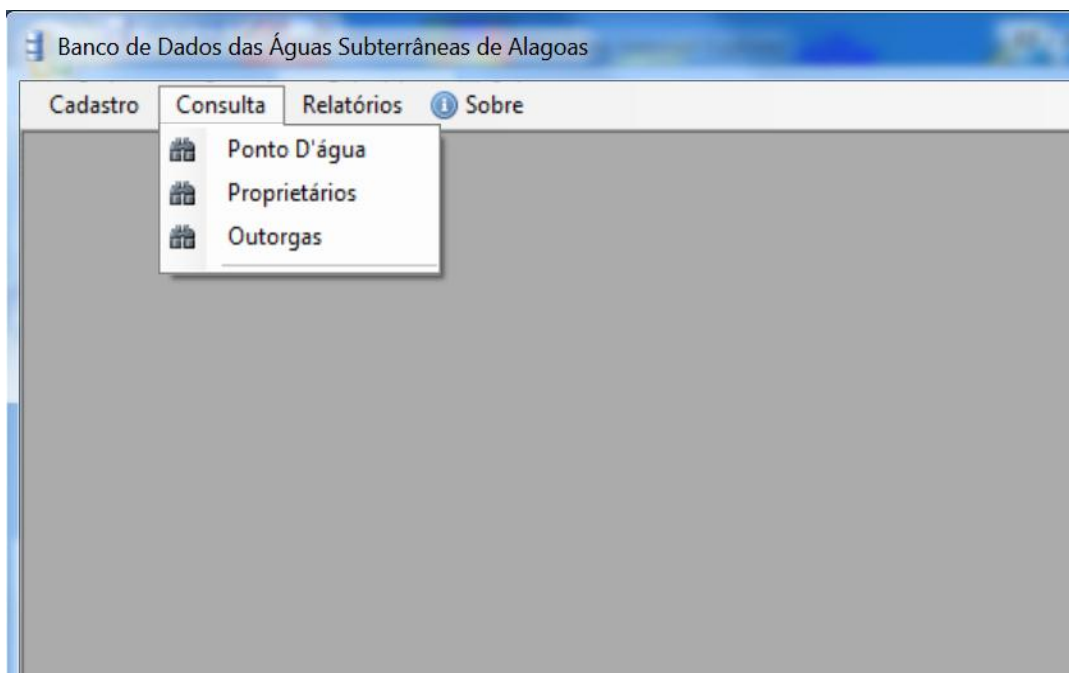


Figura A.3.17 – Menu *Consulta* exibindo os três submenus considerados: *Ponto D'água*, *Proprietários* e *Outorgas*.

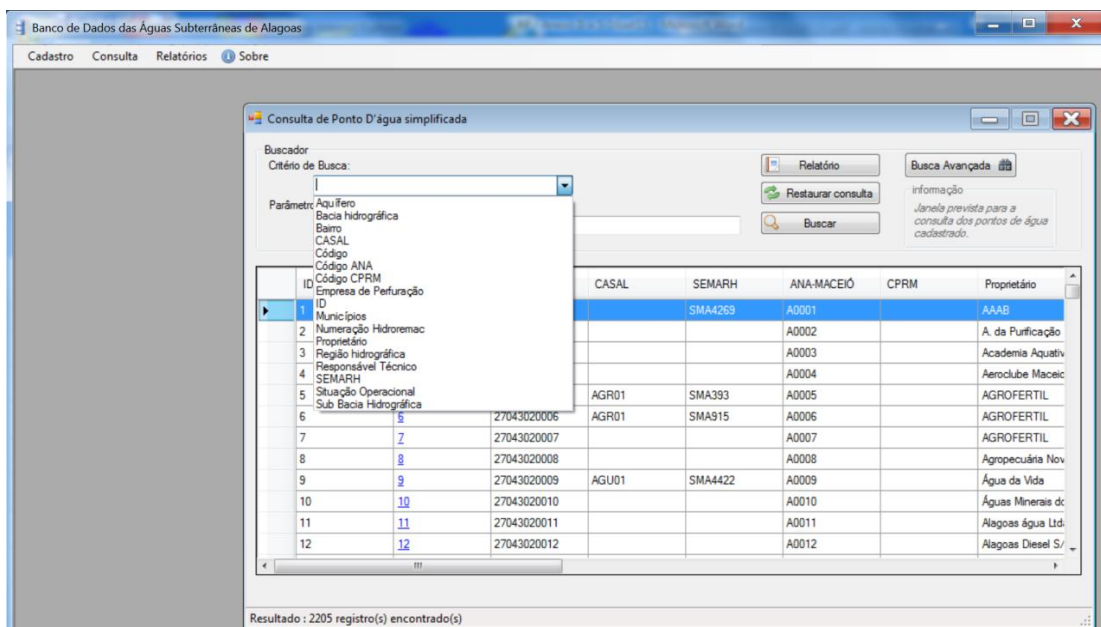


Figura A.3.18 – Formulário de *Consulta de Ponto D'água* acessado a partir do clique no menu *Consulta* exibindo o formulário *Consulta de Ponto D'água Simplificada* e a lista de critérios da pesquisa.

Para uma *busca simplificada* (botão *Buscar*) baseada em apenas um critério, por exemplo, busca de poços por *Aquífero (Barreiras)*, usamos o formulário de busca simplificada (**figura A.3.19**), o qual como se observa retorna 539 registros de poços existentes no aquífero Barreiras.

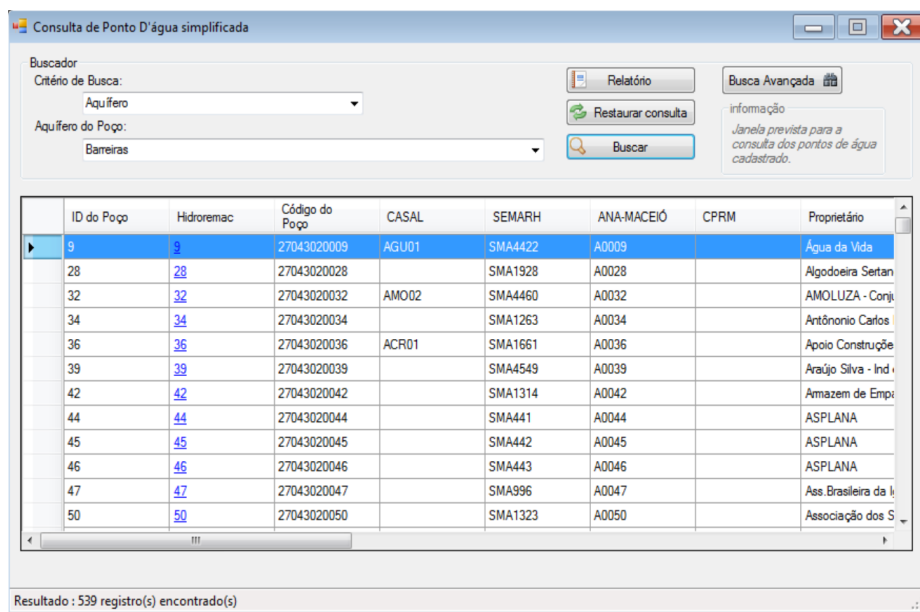


Figura A.3.19 – Formulário de *Consulta de Ponto D'água* acessado a partir do clique no menu *Consulta* exibindo o formulário *Consulta de Ponto D'água Simplificada*, a seleção do critério de busca (*Aquífero*), o nome do Aquífero (*Barreiras*) e a mensagem de 539 registros encontrados.

O botão de *Busca Avançada* é previsto para efetuar consultas que envolvam mais de um critério: por exemplo: queremos todos os poços com *Análises Físico-Químicas* no *Aquífero Barreiras*. A pesquisa retorna 112 registros (figura A.3.2.3).

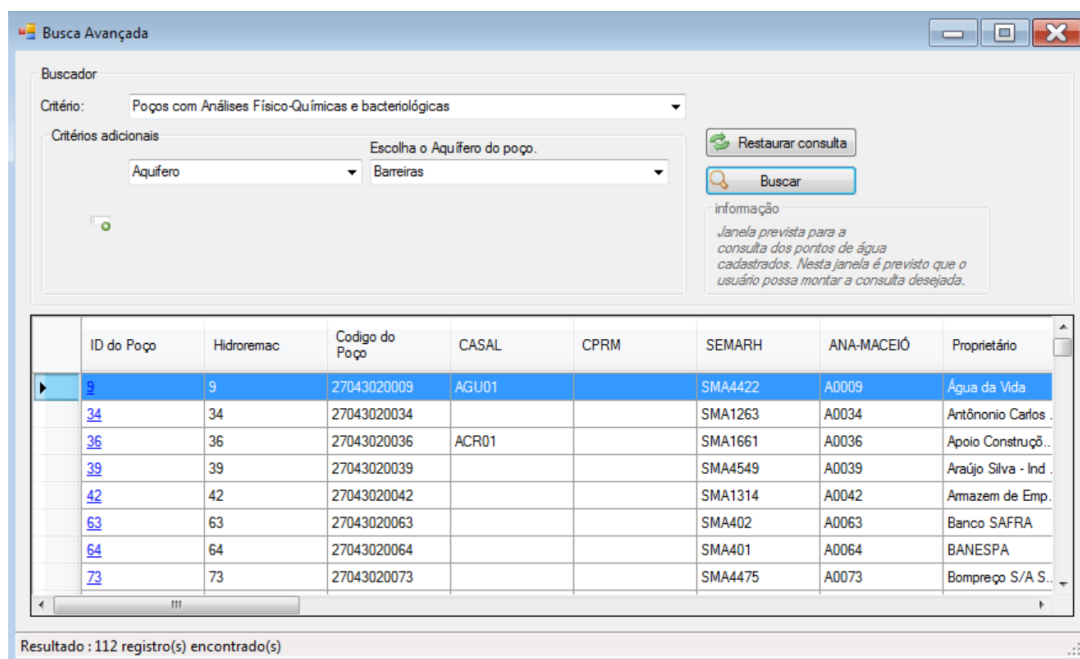


Figura A.3.20 – Formulário de *Busca Avançada* acessado a partir do clique no botão *Busca Avançada* no formulário *Consulta de Ponto D'água Simplificada*; para o critério (*Poços com Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas*) e o critério adicional (*Aquífero Barreiras*) após clicar no botão *Buscar*, lê-se no canto inferior esquerdo a mensagem: Resultado: 112 registros encontrados.

Clicando no pequeno botão verde abaixo da caixa de *critérios adicionais*, podemos adicionar mais um critério à busca anterior, por exemplo, *Bairro*, procurando saber quantos dos 112 registros correspondem ao *Bairro de Tabuleiro do Martins*: o aplicativo retorna 18 registros (**Figura A.3.21**).

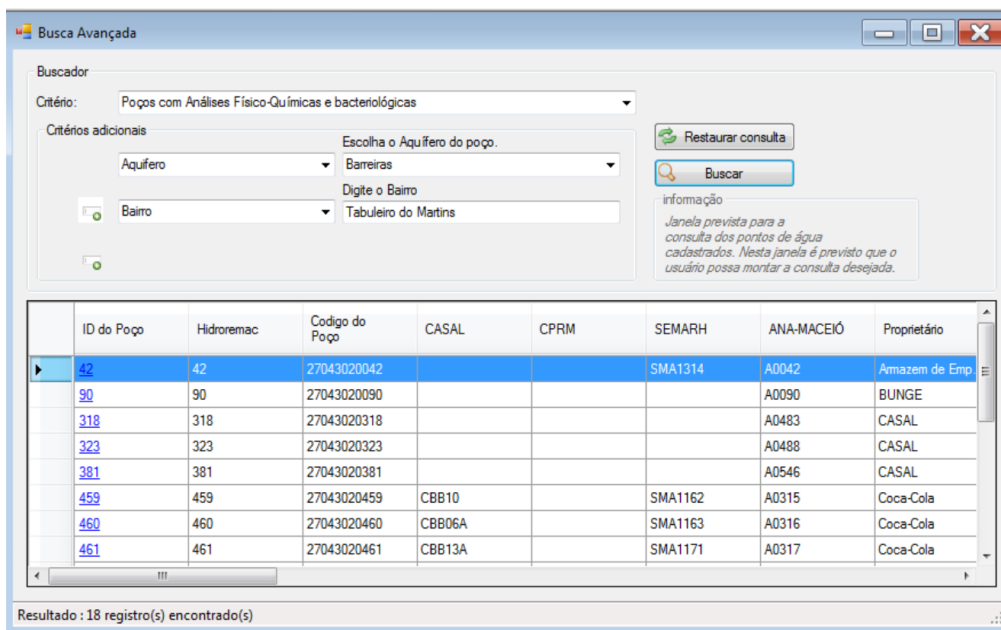


Figura A.3.21 – Formulário de *Busca Avançada* acessado a partir do clique no botão *Busca Avançada* no formulário *Consulta de Ponto D'água Simplificada*; para o critério (*Poços com Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas*) e os critérios adicionais (*Aquífero Barreiras no Bairro Tabuleiro do Martins*) após clicar no botão *Buscar*, lê-se no canto inferior esquerdo a mensagem: Resultado: 18 registros encontrados.

Consulta de Outorgas

Depois de clicar no menu *Consulta | Outorgas* o usuário já abre o formulário *Outorgas* com o resultado da consulta, que retorna 194 registros de poços outorgados (**figura A.3.22**).

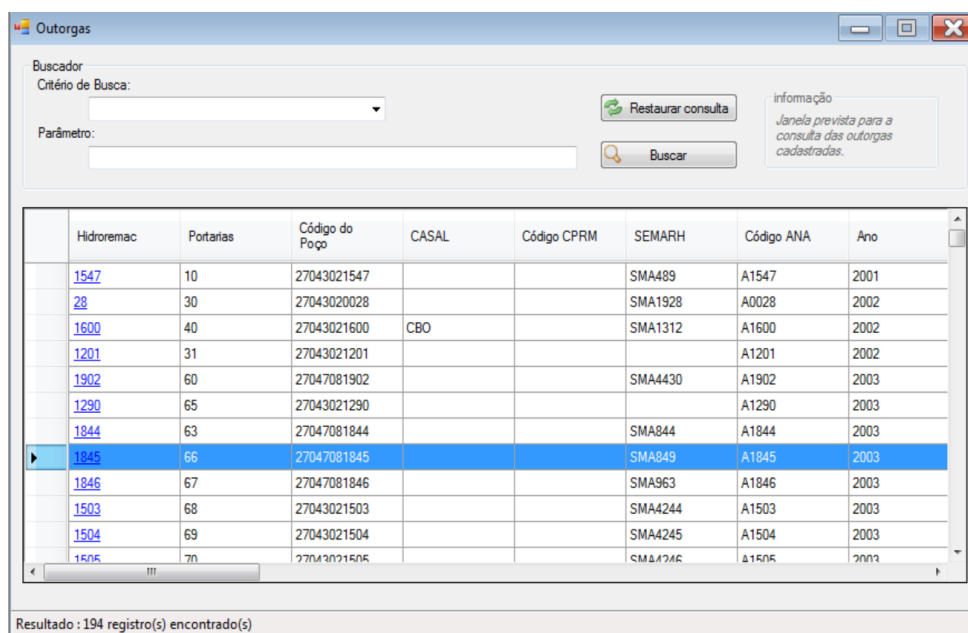


Figura A.3.22 – Formulário *Outorgas* com o resultado da consulta de poços outorgados existentes no sistema.

Ao mesmo tempo em que exibe essa primeira consulta automática, o formulário *Outorgas*, permite a execução de pesquisa mais detalhada usando-se a caixa combo de critério de busca (por exemplo, *Bairro*) e a caixa de texto para entrada do segundo critério desejado (no caso, *Tabuleiro do Martins*). Essa consulta retorna 37 poços outorgados no mencionado Bairro.

	Hidroremac	Portarias	Código do Poço	CASAL	Código CPRM	SEMARH	Código ANA	Ano
▶	1201	31	27043021201				A1201	2002
	90	136	27043020090				A0090	2004
	1634	86	27043021634			SMA4306	A1634	2004
	1287	89	27043021287			SMA390	A1287	2004
	35	218	27043020035			SMA2049	A0035	2005
	1553	216	27043021553			SMA1967	A1553	2005
	1654	167	27043021654			SMA2400	A1654	2005
	971	186	27043020971			SMA2329	A0971	2005
	1065	189	27043021065				A1065	2005
	1660	213	27043021660			SMA1663	A1660	2005
	1661	214	27043021661			SMA4313	A1661	2005
	1662	215	27043021662			SMA4417	A1662	2005

Resultado : 37 registro(s) encontrado(s)

Figura A.3.23 – Consulta de poços outorgados no *Bairro de Tabuleiro do Martins*.

Consulta semelhante é mostrada na figura **A3.24** contemplando o Proprietário, TRIKEM.

	Hidroremac	Portarias	Código do Poço	CASAL	Código CPRM	SEMARH	Código ANA	Ano
▶	1844	63	27047081844			SMA844	A1844	2003
	1845	66	27047081845			SMA849	A1845	2003
	1846	67	27047081846			SMA963	A1846	2003
	1503	68	27043021503			SMA4244	A1503	2003
	1504	69	27043021504			SMA4245	A1504	2003
	1505	70	27043021505			SMA4246	A1505	2003
	1506	71	27043021506			SMA4247	A1506	2003
	1507	74	27043021507			SMA4248	A1507	2003
	1508	75	27043021508			SMA4249	A1508	2003
	1954	82	27047081954			SMA2356	A1954	2004
	1955	92	27047081955			SMA2353	A1955	2004
	1956	93	27047081956			SMA2354	A1956	2004

Resultado : 14 registro(s) encontrado(s)

Figura A.3.24 – Consulta de poços outorgados por *Proprietário*, retornando 14 registros para o proprietário *TRIKEM*.

Relatórios

São oferecidas opções de emissão de relatórios por poço e relatórios por proprietários, número de poços por município, poços por aquífero e listagem de todos os poços (figura A.3.25).

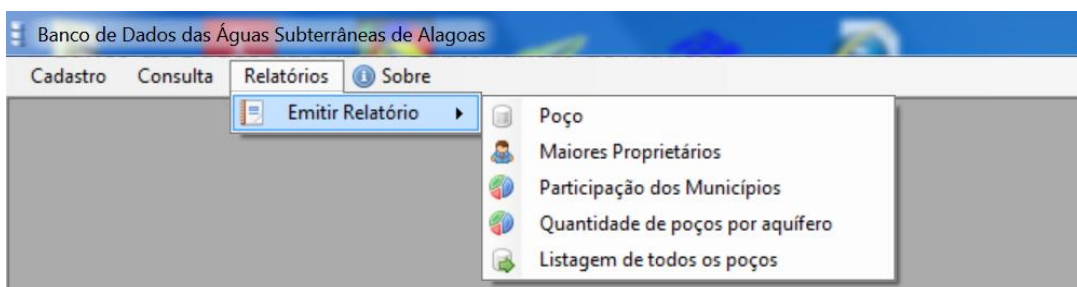


Figura A.3.25 – Opções de emissão de relatórios.

Para emitir um relatório de poço o usuário é solicitado a informar e confirmar o ID do poço desejado (figura A.3.26).

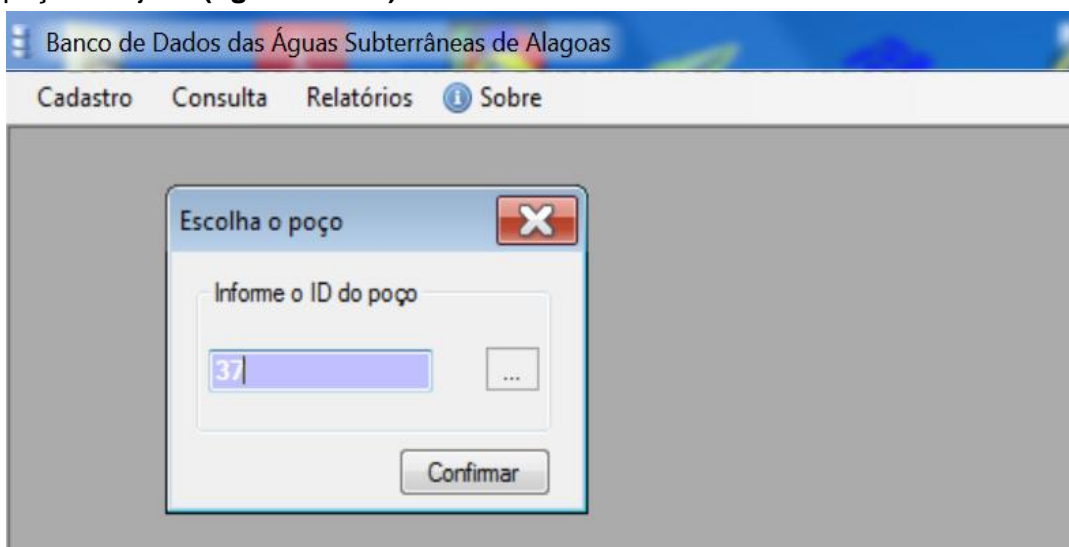


Figura A.3.26 – Formulário de solicitação de informação e confirmação do ID do poço cujo relatório se deseja. No caso o poço pretendido é o de ID=37.

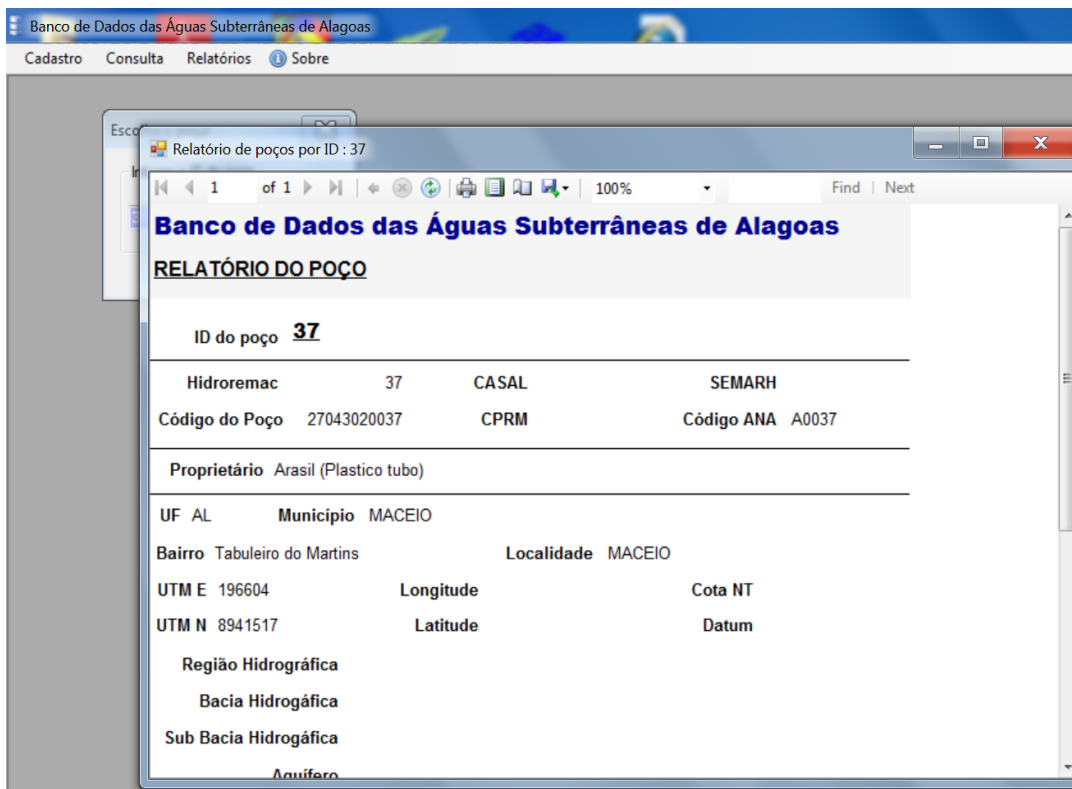


Figura A.3.27 – Relatório emitido para o poço ID = 37.

Um exemplo de relatório do número de poços existentes por proprietário é ilustrado na figura A.3.28.

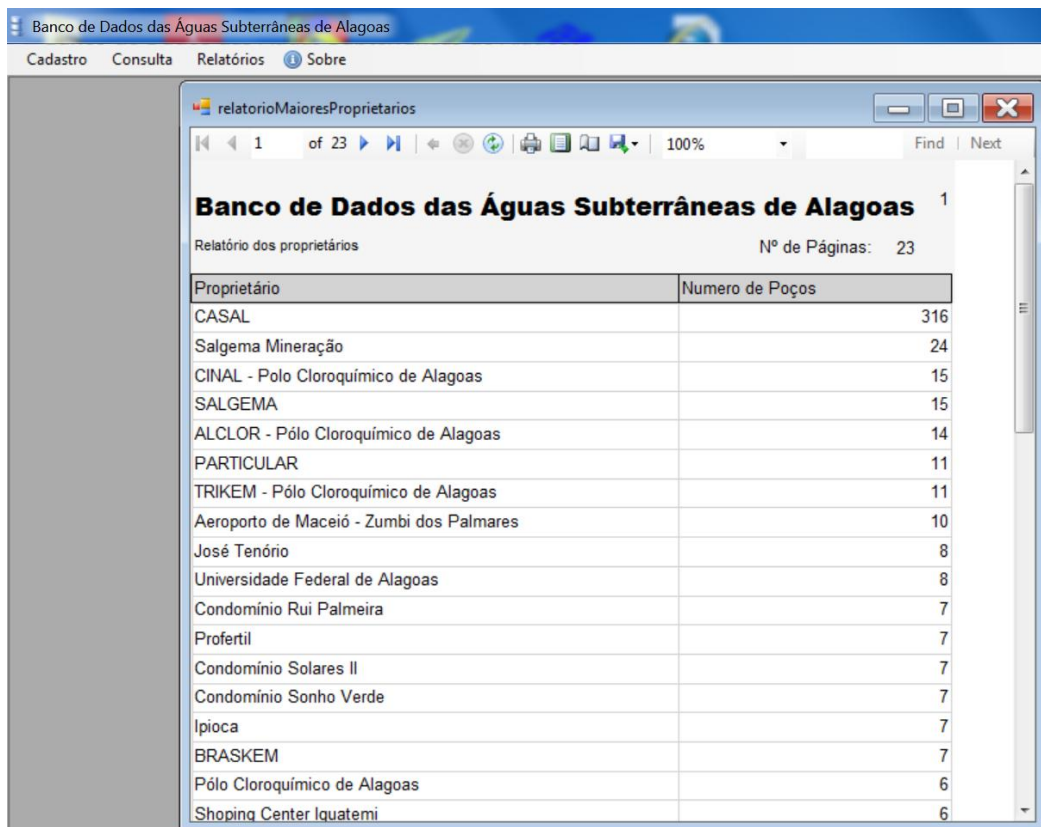


Figura A.3.28 – Exemplo de relatório do número de poços por proprietário.

A.3.3. Instalação do aplicativo

O aplicativo é fornecido através do arquivo compactado: ([SETUP] – Projeto Maceió v5.2.1.zip).

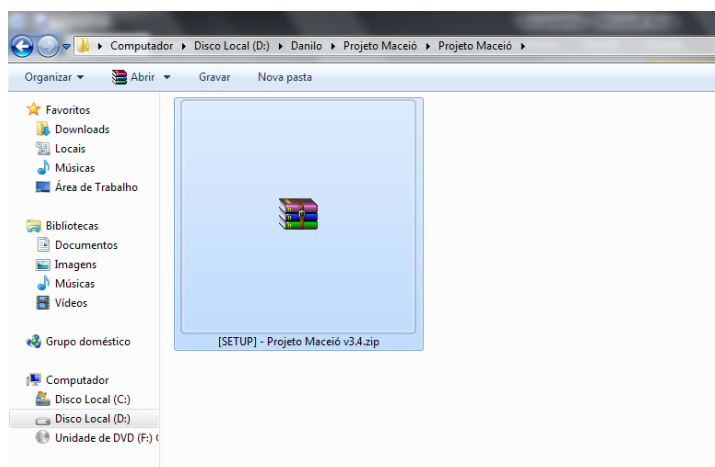


Figura A.3.29 - Arquivo fornecido.

Após a descompactação do arquivo, aparecerão dois outros arquivos:

- Setup Projeto Maceió.msi
Responsável pela instalação do sistema.
- Setup.exe
Responsável pela instalação do *framework* .NET 3.5 ou superior, que é pré-requisito para o funcionamento do arquivo *Setup Projeto Maceió.msi*.

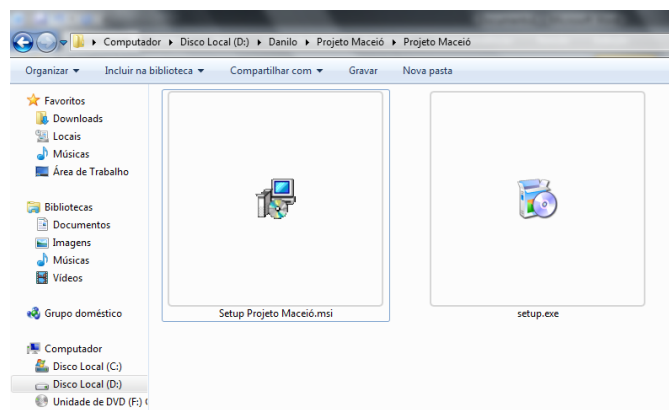


Figura A.3.30 - Arquivos descompactados.

A Instalação do Aplicativo, de maneira geral é muito simples e intuitiva. Ela aqui foi dividida em passos para simplificar ainda mais a compreensão.

Passo 1: Clique no arquivo “[Setup Projeto Maceió.msi](#)”. Caso o computador no qual esteja sendo instalado o produto não tenha o framework.NET 3.5, ou superior, será solicitada uma instalação, na qual se estabelecerá uma conexão com a internet. Clique em “Aceito” e aguarde a instalação.

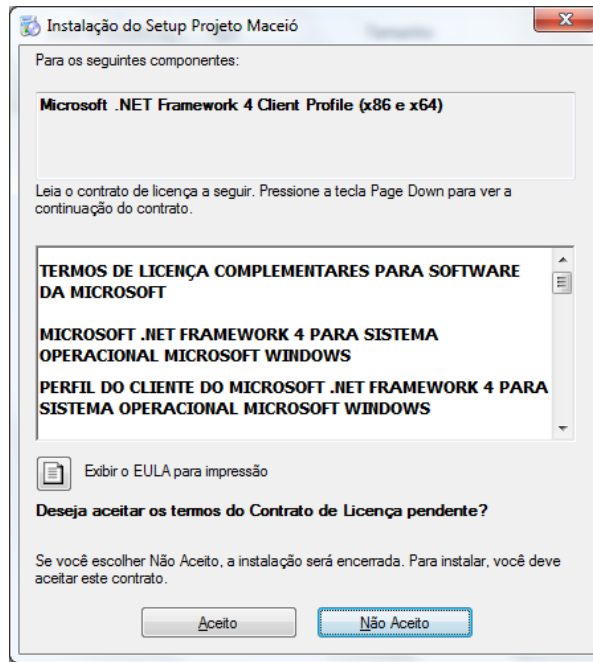


Figura A.3.31 - Instalação Framework.NET.

Passo 2: Após a instalação do Framework.NET, a instalação do Aplicativo é liberada, Clique em Avançar para seguir com a instalação.

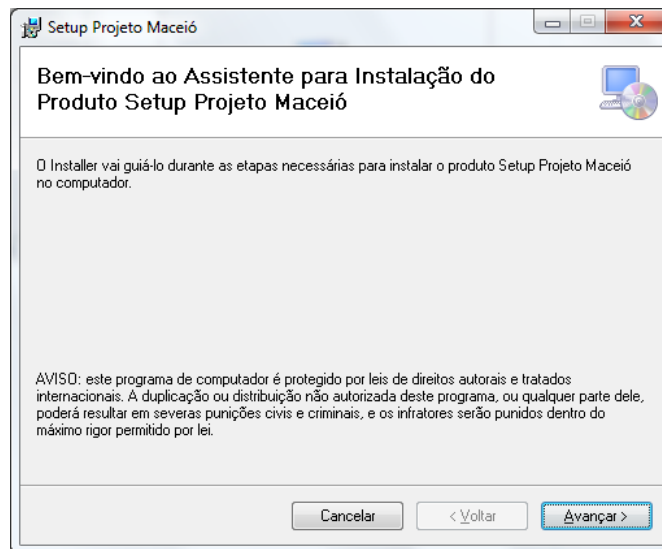


Figura A.3.32 - Instalação Aplicativo.

Passo 3: Será solicitada a pasta de instalação do sistema, caso seja necessário mudar de diretório, clique em "Procurar". Nesta mesma janela tem a opção de instalar o Projeto para todos os usuários ou apenas para o usuário atual da máquina. Clique em "Avançar" para seguir com a instalação.

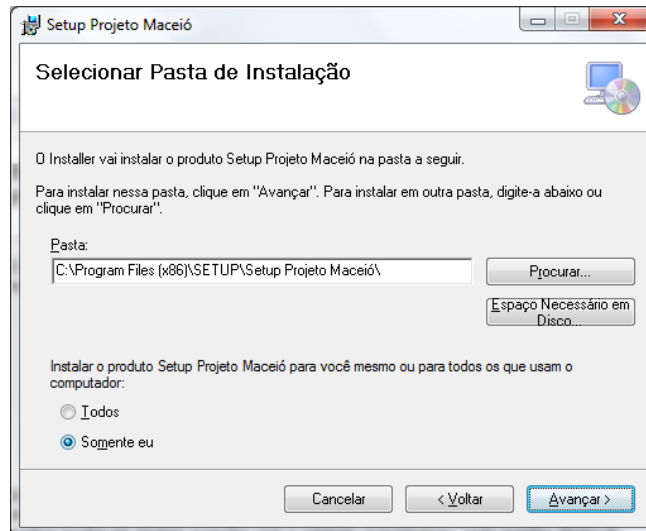


Figura A.3.33 - Configuração de Instalação.

Passo 4: Confirme a instalação do Aplicativo, clicando em “Avançar”, de acordo com as configurações feitas.

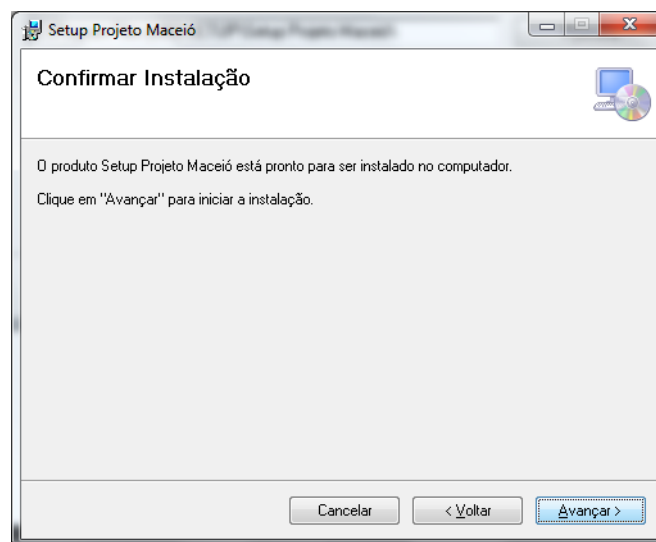


Figura A.3.34 - Confirmação de Instalação.

Passo 5: Aguarde a instalação ser concluída, espere a janela de confirmação de instalação e clique em “Fechar” para sair do assistente de instalação.

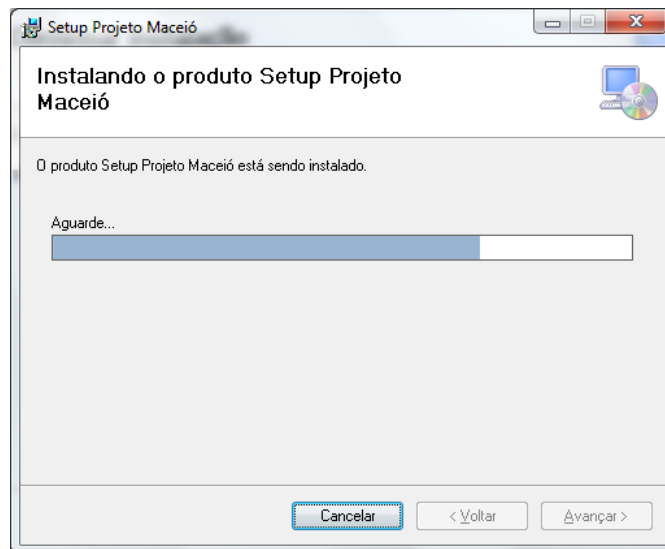


Figura A.3.35 - Procedimento de Instalação do Aplicativo.

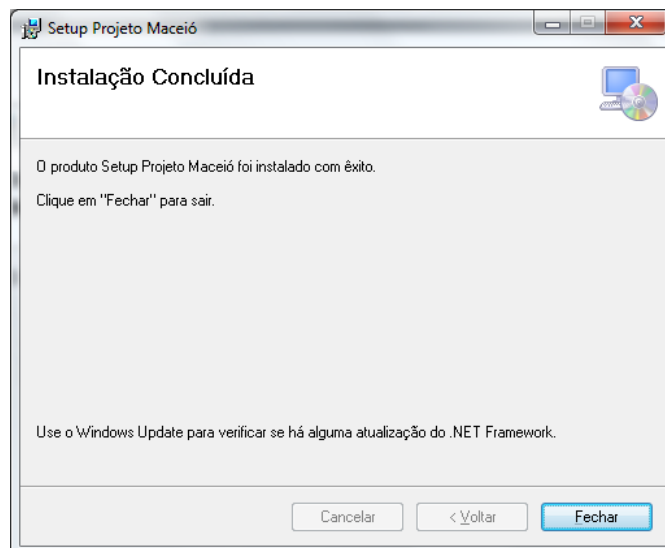


Figura A.3.36 - Confirmação de Instalação concluída com Sucesso.

Após a instalação será disponibilizado na área de trabalho e no “Menu Iniciar -> Todos os Programas -> Aplicativo” o atalho para executar o Protótipo do Sistema.

A4 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS, BETEX/FENÓIS, BACTERIOLÓGICAS E ISÓTOPOS NATURAIS

Apresentam-se a seguir os resultados das Análises Físico-Químicas, BETEX/Fenóis, Bacteriológicas e Isótopos Naturais realizadas com as amostras de água coletadas nas duas campanhas realizadas ao longo do estudo.

A.4.1. Análises Físico-Químicas

Quadro A.4.1 – Identificação e Local de Coleta de Água para as Análises Físico-Químicas.

Dados de Localização					Aquífero	Prof. (m)
Número Laboratório	Local	Município	Coordenadas UTM			
			N	E		
101684	ETA Cardoso - PBEB-08	Maceió	8934981	198492	Bar/Mar	117,00
101685	Benedito Bentes - PBEB-10	Maceió	8942321	200360	Bar/Mar	90,00
101686	Cely Loureiro - Cacheiro do Meirim	Maceió	8937180	198910	Bar/Mar	92,00
101687	Distrito Industrial - PT-05	Maceió	8941190	196400	Bar/Mar	116,00
101688	Eustáquio Gomes - PEGM-01	Maceió	8944204	193569	Bar/Mar	83,00
101689	Cidade Universitária (PCU 01)	Maceió	8943256	196546	Bar/Mar	150,00
101690	Sítio São Jorge - PBD-05	Maceió	8935575	201904	Bar/Mar	133,00
101691	Murilópolis - PMUR -01	Maceió	8936080	200440	Bar/Mar	169,00
101692	Salvador Lira - PSL-03	Maceió	8941716	198419	Bar/Mar	121,00
101693	Rua Ceará - PBD-03	Maceió	8935462	201206	Bar/Mar	104,00
101694	Praça Antônio Carlos Magalhães	Maceió	8934601	201129	Bar/Mar	203,00
101695	Dubeaux Leão - PJDL-02	Maceió	8941208	198275	Barreiras	
101696	Samamabia - PS-02	Maceió	8936316	201687	Bar/Mar	93,00
101697	Carajás - PCC-02	Maceió	8937547	201249	Barreiras	
101698	José Tenório - PJTL-01	Maceió	8937479	201361	Barreiras	
101699	José Tenório - PJTL-05	Maceió	8937419	201347	Barreiras	
101700	Jardim Serraria	Maceió	8937440	201253	Bar/Mar	107,00
101701	Ouro Preto (POP 02)	Maceió	8936387	200315	Bar/Mar	120,00
101702	Benedito Bentes - PBEB-01	Maceió	8942740	199250	Bar/Mar	73,00
101703	João Sampaio - PCJS-02	Maceió	8937064	196888	Bar/Mar	110,00
101704	Santa Lúcia - PLSL 04	Maceió	8940477	197307	Bar/Mar	100,00
101705	Santa Lúcia - PLSL 05	Maceió	8940898	197858	Barreiras	
101706	Colina Dos Eucaliptos - PCE	Maceió	8938802	195456	Barreiras	
101707	Henrique Equelman -PHE-01	Maceió	8940902	199203	Barreiras	
101708	Clima Bom - PCB-06	Maceió	8940669	193690	Barreiras	
101709	Osman Loureiro - POL-02	Maceió	8940310	195110	Barreiras	
101710	Monte Alegre - Pma-03	Maceió	8936618	198483	Bar/Mar	192,00
101711	Bebedouro - PBEB-04	Maceió	8935523	198423	Bar/Mar	150,00
103207	Conjunto Elias Pontes Bonfim	Maceió	8938185	206068	Barreiras	84,00
103187	Posto Liderança	Maceió	8938317	195601	Bar/Mar	140,00
102691	Colégio Santa Úrsula	Maceió	8931967	203563	Bar/Mar	174,00
102698	Blumare Veículos	Maceió	8931838	201367	Barreiras	86,00
103206	G.Barbosa - Serraria	Maceió	8936175	201830	Barreiras	20,00
103191	Vila Emater	Maceió	8935484	204047	Bar/Mar	59,00
103190	Instituto Da Visão	Maceió	8931872	200397	Barreiras	80,00
102687	Troia	Maceió	8941163	196573	Bar/Mar	100,00
103205	Cj. Dom Adelmo Machado	Maceió	8933552	203252	Barreiras	
103186	Polícia Rodoviária Federal	Maceió	8941364	195128	Barreiras	52,00
103188	Chacara da Lagoa	Maceió	8939758	193912	Bar/Mar	120,00
102693	Petrosynergy	Maceió	8935497	197735	Bar/Mar	100,00
102699	Posto Portugal	Maceió	8935497	197735	Bar/Mar	
102690	Bunge Fertilizantes	Maceió	8942099	197286	Barreiras	
103192	SEMARN	Maceió	8935249	204139	Barreiras	
102696	IGAL	Maceió	8934078	202740		
102685	Transpotável	Maceió	8934362	202236		
102692	Manguaba Petróleo	Maceió	8940848	193526	Bar/Mar	116,00
103204	ACQUA/Santa Laura	Maceió	8936629	203701	Barreiras	
103305	Casa de Saúde Ulisses Pernambuco	Maceió	8934386	196182		
103303	Colégio Batista	Maceió	8930804	200331	Barreiras	62,00
102695	Aldebaran Água Mineral	Maceió	8938498	199340		

Quadro A.4.1 – Identificação e Local de Coleta de Água para as Análises Físico-Químicas
(continuação).

Dados de Localização					Aquífero	Prof. (m)
Número	Local	Município	Coordenadas UTM			
Laboratório			N	E		
102697	GRANGELO	Maceió	8940050	208064	Barreiras	30,00
102684	Cristalvivo	Maceió	8937068	100231	Barreiras	
102686	Mc DONALDS	Maceió	8932914	203621	Bar/Mar	154,00
102694	Posto Jacutinga	Maceió	8940550	199550	Bar/Mar	64,00
102689	Posto Rotary	Maceió	8934890	200379	Barreiras	80,00
103304	Hospital do Açúcar	Maceió	8935050	199390	Bar/Mar	111,00
103306	Shopping Iguatemi	Maceió	8932172	201954	Bar/Mar	194,00
103302	Shopping Pátio Maceió	Maceió	8939000	200234	Barreiras	
103307	Água da Vida Transportes	Maceió	8935348	201087	Barreiras	104,00
101712	Conjunto Zé Dias - PT-03	Marechal Deodoro	8924126	181174	Barreiras	72,00
101713	Povoado Malhado - PT-07	Marechal Deodoro	8918590	184260		
101714	Sítio Volta D'água	Marechal Deodoro	8927423	189549	Barreiras	84,00
101715	Loteamento Laguna	Marechal Deodoro	8927075	208626	Barreiras	90,00
101716	Sítio Seribó	Marechal Deodoro	8925116	209709	Bar/Coq.	191,00
101717	Posto Aliança	Marechal Deodoro	8925261	182314	Barreiras	
101718	Loteamento Arquipelago do Sol	Barra de São Miguel	8911613	182781	Barreiras	36,00
101719	Loteamento Alta Vista	Barra de São Miguel	8911932	181048	Barreiras	110,00
101720	Povoado São Sebastião	Barra de São Miguel	8913289	179010	Barreiras	60,00
103198	Posto Rosa Maria-Tabuba	Barra de Sto. Antonio	8955895	222721	Barreiras	27,00
103199	Santa Luzia 04	Barra de Sto. Antonio	8956104	223242	Barreiras	22,00
103200	Santa Luzia 03	Barra de Sto. Antonio	8956084	222926	Barreiras	27,00
103201	Condomínio Bosque Rio Mar	Barra de Sto. Antonio	8957658	224156	Barreiras	56,00
103202	Loteamento Rume Farias - PT-05	Barra de Sto. Antonio	8959494	224399	Barreiras	36,00
103203	Loteamento Rume Farias - PT-06	Barra de Sto. Antonio	8959400	224344	Barreiras	40,00
103170	Reservatório CASAL - Centro	Coqueiro seco	8933026	192290	Barreiras	
103171	Brasília Nova	Coqueiro seco	8933016	192096	Bar/Maceió	84,00
103167	Posto Flecha	Messias	8958705	188171	Barreiras	49,00
103168	Posto Pichilau	Messias	8958616	188124	Barreiras	53,00
103169	SUB-ESTAÇÃO CHESF-BR 101	Messias	8959162	188047	Barreiras	49,00
103193	Porto di Mare	Paripueira	8954790	222067	Barreiras	35,00
103194	Alto da Boa Vista	Paripueira	8952884	219129		120,00
103195	Loteamento Porto Belo	Paripueira	8952248	219008	Sed. de Praia	32,00
103196	Alto da Boa Vista	Paripueira	8952758	219533	Barreiras	92,00
103197	Condomínio Sonho Verde	Paripueira	8954033	221505	Barreiras	28,00
102688	Canavialis	Paripueira	8949588	212783	Barreiras	
103182	Loteamento Manguaba	Pilar	8938433	175907	Bar/Poçoão	90,00
103183	Escola Presidente Medici	Pilar	8940965	174200	Bar/Poçoão	75,00
103184	Loteamento Edite França	Pilar	8938067	174414		
103185	Loteamento Frei Damiao	Pilar	8938697	174741	Bar/Poçoão	89,00
103176	Residencial Chacara São Bento	Rio largo	8946682	191962	Barreiras	74,00
103177	OAS	Rio largo	8948613	191244	Barreiras	74,00
103178	Aeroporto Zumbi 02	Rio largo	8947100	193308	Bar/Poçoão	100,00
103179	Aeroporto 01	Rio largo	8947360	192327	Bar/Poçoão	100,00
103180	UTE Rio Largo	Rio largo	8947794	188809	Barreiras	32,50
103181	Mafripes	Rio largo	8949563	188182	Barreiras	28,70
103172	Quilombo	Sta.Luzia do Norte	8936526	190505		
103173	Posto Ecologico	Sta.Luzia do Norte	8938102	190241		
103174	Guardiano	Sta.Luzia do Norte	8938742	189918		

A.4.1.1. Análises Físico-Químicas – 1ª Campanha

INSERIR CÓPIAS EM .PDF DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA 1ª. CAMPANHA

A.4.1.2. Análises Físico-Químicas – 2ª Campanha

INSERIR CÓPIAS EM .PDF DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA 2ª. CAMPANHA

A.4.2. Análises de BETEX/FENÓIS

Quadro A.4.2 – Relação de localidades dos pontos de coleta de amostras para análises de BETEX e fenóis.

Reg. Nº	Local	Município	UTM N	UTM E
012	Posto Shopping	Maceió	8.932.668	202.739
005	Posto Aliança	Mal. Deodoro	8.925.261	182.314
003	Posto Clean Car	Maceió	8.936.407	201.634
006	Posto Jacutinga	Maceió	8.940.550	199.550
014	Posto Hannah	Maceió	8.938.686	200.531
017	Posto Rotary	Maceió	8.934.890	200.379
009	Posto Portugal	Maceió	8.935.497	197.735
010	Petrosynergy	Maceió	8.935.497	197.735
002	Posto Liderança	Maceió	8.938.317	195.601
013	Posto Avenida	Maceió	8.919.794	179.939
011	Posto Rosa Maria	Barra de Santo Antonio	8.955.895	222.721
019	Posto Porto Bello	Paripueira	8.952.187	218.962
007	Posto Flecha	Rio Largo	8.958.705	188.171
016	Posto Pichilau	Maceió	8.958.616	188.124
008	Manguaba Petróleo	Maceió	8.940.848	193.526
020	Posto Ponto 10	Satuba/Pilar	8.938.932	183.918
004	Posto Ecológico	Santa Luzia	8.938.102	190.241
001	Posto R2	Maceió	8.931.783	201.731
015	Posto Shammah	Maceió	8.932.355	200.733
018	Mc Donalds	Maceió	8.932.914	203.621

INSERIR CÓPIAS EM .PDF DAS ANÁLISES DE BETEX/FENOIS

A.4.3. Análises Bacteriológicas

Quadro A.4.3. – Identificação e Local de Coleta de Água para as Análises Bacteriológicas.

Número Laboratório	Local	Município	Coordenadas UTM		Aquífero	Profundidade (m)
			N	E		
107257	Cidade Universitária (PCU01)	Maceió	8943256	196546	Barreiras/Marituba	150
107273	Sítio São Jorge - PBD-05	Maceió	8935575	201904	Barreiras/Marituba	133
107274	Rua Ceará - PBD-03	Maceió	8935462	201206	Barreiras/Marituba	104
107252	Pça Antônio C.Magalhães-PAM 01	Maceió	8934601	201129	Barreiras/Marituba	203
107261	Dubeaux Leão - PJDL-02	Maceió	8941208	198275	Barreiras	?
107250	Jardim Serraria	Maceió	8937440	201253	Barreiras/Marituba	107
107254	Benedito Bentes PBBE-01	Maceió	8942740	199250	Barreiras/Marituba	73
107253	Santa Lúcia - PLSL 04	Maceió	8940477	197307	Barreiras/Marituba	100
107259	Colina dos Eucaliptos - PCE	Maceió	8938802	195456	Barreiras/Pré-Barreiras	?
107264	Osman Loureiro - POL-02	Maceió	8940310	195110	Barreiras	?
107251	Posto Liderança	Maceió	8938317	195601	Barreiras/Marituba	140
107269	Vila Emater	Maceió	8935484	204047	Barreiras/Marituba	59

Quadro A.4.3. – Identificação e Local de Coleta de Água para as Análises Bacteriológicas (continuação).

Número Laboratório	Local	Município	Coordenadas UTM		Aquífero	Profundidade (m)
			N	E		
107262	Instituto da Visão	Maceió	8931872	200397	Barreiras	80
107270	Cj. Dom Adelmo Machado	Maceió	8933552	203252	Barreiras	?
107249	Chácara da Lagoa	Maceió	8939758	193912	Barreiras/Marituba	120
107265	Petrosynergy	Maceió	8935497	197735	Barreiras/Marituba	100
107266	Posto Portugal	Maceió	8935497	197735	Barreiras/Marituba	?
107255	Bunge Fertilizantes	Maceió	8942099	197286	Barreiras	?
107268	Semarh	Maceió	8935249	204139	Barreiras	?
107263	Manguaba Petróleo	Maceió	8940848	193526	Barreiras/Marituba	116
107256	Casa de Saúde U.Pernambucano	Maceió	8934386	196182	?	?
107258	Colégio Batista	Maceió	8930804	200331	Barreiras	62
107260	Cristalvidro	Maceió	8937068	100231	Barreiras	?
107267	Posto Rotary	Maceió	8934890	200379	Barreiras	80
107271	Santa Luzia 04	Barra Sto. Antonio	8956104	223242	Barreiras	22
107272	Loteamento Frei Damião	Pilar	8938697	174741	Barreiras/Marituba	89

Quadro A.4.3. – Identificação e Local de Coleta de Água para as Análises Bacteriológicas (continuação).

Número Laboratório	Local	Município	Coordenadas UTM		Aquífero	Profundidade (m)
			N	E		
107275	Adefal	Maceió	8935497	197735	Barreiras	?
107277	Copra	Maceió	8942099	197286	Barreiras	?
107278	Sempma	Maceió	8935249	204139	Barreiras	?
107276	Unicompra Cambona	Maceió	8935497	197735	Barreiras	?

INSERIR CÓPIAS EM .PDF DAS ANÁLISES BACTERIOLÓGICAS

A.4.4. Análises de Isótopos Naturais

Quadro A.4.4. – Localização dos poços onde foram coletadas amostras para realização de análises de isótopos naturais.

N ^o	Local	Município	Coordenadas UTM	
			N	E
1	E.T.A. Cardoso	Maceió	8.934.854	198.445
2	Bebedouro Pb 04	Maceió	8.935.132	198.279
3	Benedito Bentes Pbb 01	Maceió	8.941.901	858.562
4	Osman Loureiro Pol 02	Maceió	8.939.742	853.284
5	Praça Antonio Carlos Magalhães	Maceió	893.4603	201.133
6	Bunge	Maceió	8.942.099	197.286
7	SEMARH	Maceió	8.935.329	204.179
8	Conj. Elias Pontes Bonfim	Maceió	8.938.185	206.068
9	Instituto da Visão	Maceió	8.931.865	200.347
10	Residencial Dom Adelmo Machado	Maceió	8.933.258	861.562
11	Mun. Santa Luzia - Pov. Quilombo	Santa Luzia	8.936.410	190.360
12	Mun. Barra de St. Antonio-Pov. Sta. Luzia Pt04	Barra de Santo Antonio	8.956.043	223.062
13	Vila Emater	Maceió	8.933.620	203.108
14	Mun. Barra de Santo Antonio - Pt 05	Barra de Santo Antonio	8.958.773	229.718
15	Mun. Coqueiro Seco – Reserv. CASAL Centro	Coqueiro Seco	8.933.347	193.026
16	Cond. Sonho Verde	Paripueira	8.955.052	222.211
17	G. Barbosa	Maceió	8.934.298	203.673
18	Igal	Maceió	8.934.078	202.740
19	Posto Rosa Maria - Tabuba	Barra de Santo Antonio	8.955.895	222.721
20	Petrosynerg	Maceió	8.935.496	197.735
21	Posto Liderança	Maceió	8.937.227	201.213
22	Mc Donald's	Maceió	8.932.293	203.551
23	Posto Pichilau	Maceió	8.938.670	197.410
24	Posto Flecha	Rio Largo	8.956.314	188.460
25	Ute Rio Largo	Rio Largo	8.947.794	188.809
26	Casa de Saúde Ulisses Pernambucano	Maceió	8.934.386	196.182

Quadro A.4.4. – Localização dos poços onde foram coletadas amostras para realização de análises de isótopos naturais (continuação).

N ^o	Local	Município	Coordenadas UTM	
			N	E
27	Colégio Santa Úrsula	Maceió	8.931.967	203.563
28	Mun. Marechal Deodoro - Cond. Laguna	Marechal Deodoro	8.927.075	208.626
29	Mun. Barra de São Miguel – Lot. Alta Vista	Barra de São Miguel	8.911.932	181.048
30	Shopping Iguatemi	Maceió	8.932.381	202.230

INSERIR CÓPIAS EM .PDF DAS ANÁLISES DE ISÓTOPOS

BIBLIOGRAFIA

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R., **Hidrología Subterránea**, Editorial Omega, Barcelona, Espanha, 2 vol., 2350 p., 1975

KREYSZING, E., **Matemática Superior, Vol.I** - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 299 p. , 1969.

McDONALD, M.G & HARBAUGH, A.W., **A Modelar Three-Dimensional Finite-Diference Ground-Water Flow Model (MODFLOW)**, U. S. Geological Survey Resource, Virginia, E.U.A., 187 p., 1984.

WALTON, C.W., **Groundwater Resource Evaluation**, McGraw-Hill, E.U.A., 664 p., 1970.

WANG, H.F. & ANDERSON, M.P., **Introduction to Groundwater Modeling**, W.H. Freeman and Company, São Francisco, E.U.A., 320 p.,1982.