

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL**

**MONITORAMENTO DA FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS DE
ÁGUA EM AQUÍFEROS FREÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL DE RECARGA EM ÁREA DE AFLORAMENTO
DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM CACEQUI - RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Guilherme Viana Martelli

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**MONITORAMENTO DA FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS DE
ÁGUA EM AQUÍFEROS FREÁTICOS PARA AVALIAÇÃO
DO POTENCIAL DE RECARGA EM ÁREA DE
AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM
CACEQUI - RS**

por

Guilherme Viana Martelli

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.**

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MONITORAMENTO DA FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS DE
ÁGUA EM AQUÍFEROS FREÁTICOS PARA AVALIAÇÃO
DO POTENCIAL DE RECARGA EM ÁREA DE
AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM
CACEQUI - RS**

elaborada por
Guilherme Viana Martelli

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Luiz Silvério da Silva, Dr.
(Presidente/Orientador)

Carlos Alvin Heine, Dr. (CORSAN)
(Membro)

Mauro Kumpfer Werlang, Dr. (UFSM)
(Membro)

Santa Maria, 15 de março de 2012.

Dedicatória

A Fernanda,
minha família
e meus amigos.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria, por oportunizar ensino gratuito desde a minha formação como Geógrafo até a conclusão de meu Mestrado.

Ao CNPq e ao FINEP, pelos recursos para viabilização desse projeto.

A CAPES, pela concessão de bolsa, possibilitando a conclusão do mestrado e dedicação à pesquisa.

A Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), pela contribuição e apoio irrestrito a pesquisa, e seus funcionários Cléo, Diego, Eridson, Grillo e Jovane.

Aos Proprietários das áreas onde encontram-se os poços de monitoramento, Sr. Djalmo Dirceu Schlumpf e Sra. Madalena Foldenauer.

A Empresa Nascente Comércio e Serviços LTDA, representada pelo proprietário Cláudio, que foi responsável pela perfuração dos poços de monitoramento.

Ao professor José Luiz Silvério da Silva por sua orientação, ensinamentos, apoio, amizade e pela confiança depositada, pela dedicação, pelo auxílio e incentivo na criação e execução do projeto do qual culminou esse trabalho.

Aos professores Geraldo Lopes da Silveira, Jussara Cabral Cruz e Rafael Cabral Cruz, do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFSM, pelos ensinamentos sobre Gestão dos Recursos Hídricos.

Aos meus colegas Alexandre, Michele, Glauco, Tatiana e Vinicius, pelo convívio e amizade durante os anos do mestrado.

As colegas Carlos, Francisco e Pedro do LABHIDROGEO por todos os momentos de convívio. Em especial a Geógrafa Cristiane, pela troca de conhecimento, idealização, construção e execução desta pesquisa.

Aos Doutores Carlos Alvin Heine e Mauro Kumpfer Werlang, por aceitarem contribuir com o aprimoramento deste trabalho.

Ao Laboratório de Petrografia e Sedimentologia do Departamento de Geociência, representado pelo laboratoristas Rômulo.

Ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do departamento de Solos, representado pelo laboratorista Alex, o Doutorando André e Prof. Dr. Danilo.

Ao laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos, representado Prof. Dr. José Miguél e o Laboratorista Flávio, que realizaram o ensaio de porosidade total.

Ao colega Leônidas que me ajudou terminar a proteção dos equipamentos de monitoramento nos poços.

Ao colega Edner, pela amizade, troca de conhecimento, disposição e contribuir com o aprimoramento deste trabalho.

Ao amigo e Geógrafo Guilherme, pela contribuição no georreferenciamento realizados na área.

A meus pais Fernando e Delair, minhas irmãs e toda minha família. Pelo aprendizado da convivência, apoio e carinho recebidos e juntos sonharem meus sonhos. Amo vocês!

Aos meus amigos, Alex, Carlos, Eberton, Eder, Felipe, Felipinho, Gustavo, Lisandro, Marcos, Otavio, Rafael e Roberto, amizades para a vida inteira.

As minhas crianças, Arthur, Bianca e Clarinha, que juntos com o Juliano, fazem-me sentir uma pessoa melhor.

A Fernanda da Silva Bettega, meu norte, eterna fonte de inspiração, minha companheira e meu amor.

Agradeço a todos que de alguma forma se envolveram com este trabalho e com todos desejo compartilhar a gratidão e a alegria pela conquista de mais uma etapa.

A todos o meu sincero obrigado

EPÍGRAFE

*“Que homem é um homem
que não torna o mundo melhor”*

Jan Guillou

*“A imaginação é mais importante que a ciência,
porque a ciência é limitada, ao passo que a
imaginação abrange o mundo inteiro”*

*“Não tentes ser bem sucedido, tenta antes
ser um homem de valor”*

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria

MONITORAMENTO DA FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS DE ÁGUA EM AQUÍFEROS FREÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECARGA EM ÁREA DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM CACEQUI - RS

AUTOR: Guilherme Viana Martelli

ORIENTADOR: JOSÉ LUIZ SILVÉRIO DA SILVA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 15 de março de 2012.

Sala 1121 – Prédio 13/CCNE, Campus UFSM, às 14 hs.

Esta pesquisa visou estimar a recarga e a flutuação dos níveis da água subterrânea em áreas com retiradas de águas subterrâneas e superficiais, relacionadas à variação dos níveis freáticos e aos eventos de precipitação pluviométrica. As duas áreas de estudo encontra-se no município de Cacequi-RS, que localiza-se no sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, em Zona de Afloramentos do Sistema Aquífero Guarani, na Bacia Sedimentar do Paraná. Estas áreas foram selecionadas por terem uma ótima aplicabilidade ao tema (flutuação de nível e recarga). O estudo foi desenvolvido em áreas distintas de retiradas da água (superficial e subterrânea). Foi instalada uma Rede de Monitoramento, composta por 3 poços de monitoramento do nível da água. O período de análise foi do dia 01/02/2011 até o 21/02/2012. Durante este período hidrológico, realizaram-se campanhas para coleta das informações armazenadas e verificações quinzenais das condições dos medidores automáticos e da precisão dos registros. O método utilizado foi o *Water Table Fluctuation* (WTF) ou da Superfície Livre para estimativa da recarga em aquíferos livres. Está fundamentado na variação do nível freático registrada em sensores automáticos de hora em hora, instalados nos três poços. Realizaram-se em laboratório as análises das características físicas de solo/rocha (granulometria e porosidade total). Foram determinados os valores de rendimento específico - S_y e o somatório dos valores do nível da água extrapolados para cada curva de recessão - Δh , utilizados pelo método WTF. A recarga efetiva estimada na área com exploração superficial representou entre 11,5% e 13,9% da precipitação (1.572 mm) ocorrida durante o período hidrológico de 386 dias, a faixa de flutuação do nível obtida nesta área variou entre 1,17 a 5,15 metros, enquanto que a recarga efetiva estimada na área com exploração subterrânea representou cerca de 25% da precipitação (778,1 mm) ocorrida durante em um período hidrológico de 243 dias, e a faixa de flutuação do nível ocorreu entre 8,4 a 16,46 metros. Os resultados apresentados fornecem subsídios para uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, e também ilustram o desenvolvimento de novas pesquisas referentes a exploração das águas subterrâneas em Zona de Afloramentos de Aquífero livre.

Palavras-chave: Monitoramento; flutuação do nível; recarga; água subterrânea; WTF.

ABSTRACT

Master Degree Dissertation
Post-Graduate Program in Civil and Environmental Engineering
Federal University of Santa Maria

MONITORING THE FLUCTUATION OF THE WATER TABLE IN UNCONFINED AQUIFERS FOR EVALUATION OF THE POTENTIAL RECHARGE IN OUTCROP ZONE OF THE GUARANI AQUIFER SYSTEM IN CACEQUI - RS/BR

AUTHOR: Guilherme Viana Martelli

ADVISOR: JOSÉ LUIZ SILVÉRIO DA SILVA

Date and Location of defense: Santa Maria, March 15st 2011.

Room 1121 – Building 13/CCNE, Campus UFSM.

This research aimed to estimate the recharge and groundwater water table fluctuation in areas with withdrawals of groundwater and surface water related to the variation of groundwater levels and rainfall events. The two areas of study was inserted within the Cacequi Municipality, which is located in the Rio Grande do Sul state, southwestern Brazil, in the Guarani Aquifer System outcrops zone in the Paraná Sedimentary Basin. These two areas were selected because they have great applicability to the subject (water table fluctuation and recharge). The study was conducted in different areas of water withdrawals (surface and groundwater). It was installed a Monitoring Network, composed of three monitoring wells. The period of analysis was from February 01/2011 to 21/2012. During this hydrological period, there were executed campaigns for collection of information stored and biweekly checks of the conditions of automated dataloggers and the accuracy of records. Was used the Water Table Fluctuation (WTF) method for estimating groundwater recharge in unconfined aquifer. WTF is based on the variation of groundwater water table fluctuation recorded in automatic 3 dataloggers and 1 barologger, installed in three wells and measurements from hour to hour. Were performed in laboratory physical analyzes of the soil/rock characteristics (particle size and porosity). Were determined the values of specific yield - S_y and the sum of the values of water table fluctuations for each curve extrapolated recession - Δh used by the WTF method. The effective recharge estimated in the area with surface withdrawals accounted for between 11.5% and 13.9% of precipitation (1,572 mm) occurred during the hydrological 386 days, the range of the water table fluctuation obtained in this area from 1.17 to 5.15 meters, while the effective recharge the estimate was estimated in the area with groundwater exploitation represents about 25% of the precipitation (778.1 mm) occurring during a period of 243 days, and the range of fluctuation of the water table was between 8.4 to 16.46 meters. The present results provide subsidies for the sustainable management of groundwater resources, and also illustrate the development of new research on the exploitation of groundwater in the unconfined aquifer outcrops zone.

Keywords: Monitoring, water table fluctuation, recharge, groundwater, WTF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Distribuição global de água	28
Figura 2:	Interação de fatores intervenientes na sustentabilidade de uso dos recursos naturais	31
Figura 3	Efeitos locais do bombeamento de água em poços	36
Figura 4	Efeitos das retiradas de água superficial e subterrânea sobre a hidrologia regional	36
Figura 5	Fluxo preferencial de água subterrânea devido a camadas de diferentes permeabilidades	38
Figura 6	Sistemas de fluxo da água subterrânea	38
Figura 7	Condição efluente e influente de rios (A) e mapa idealizado de linhas de fluxos e piezométricas (B).....	40
Figura 8	Relações entre as superfícies líquidas e o nível de água subterrâneo	41
Figura 9	Interação entre rio-aquífero pelo armazenamento lateral	42
Figura 10	Condições de rede de fluxo em lagos /banhados	43
Figura 11	Interações entre banhados e fluxos subterrâneos de água	44
Figura 12	Representação esquemática demonstrando as diferentes camadas existentes em subsuperfície e o comportamento da água subterrânea	47
Figura 13	Aquíferos com respectivos níveis de pressão	52
Figura 14	Aquífero suspenso	53
Figura 15	Tipos de aquíferos em diferentes tipos de rochas e sua porosidade	55
Figura 16	Os três tipos fundamentais de Porosidade conforme diferentes materiais numa seção geológica	58
Figura 17	Representação do conceito de poros com água imóvel	61
Figura 18	Desenho do esquema simplificado e conceitual esclarecendo o conceito de porosidade total, rendimento específico e retenção específica em aquífero arenoso não confinado	62
Figura 19	Os vários mecanismos de recarga	66
Figura 20	Obtenção da linha de tendência	70
Figura 21	Localização das Áreas de estudo com exploração de água superficial e subterrânea	76
Figura 22	Localização da Área com Exploração d`água Superficial	77
Figura 23	Localização da Área com Exploração d`água Subterrânea	78
Figura 24	Localização das redes e bacias Hidrográficas	79

Figura 25	Imagem da Geomorfologia	81
Figura 26	Imagem da Geologia referente ao RADAMBRASIL de 1986	82
Figura 27	Imagem da Geologia referente a CPRM para 2008	84
Figura 28	Coluna cronológica estratigráfica do estado do Rio Grande do Sul	85
Figura 29	Mapa de Solos	87
Figura 30	Gráfico da Precipitação	88
Figura 31	Gráfico da variação diária da temperatura ano de 2011	89
Figura 32	Imagem da Fitogeografia	90
Figura 33	Área de exploração das águas subterrânea e seus poços	91
Figura 34	Área de exploração das águas superficiais e seus poços	92
Figura 35	Ponto de monitoramento do nível no Rio Ibicuí	93
Figura 36	Ilustração dos medidores automáticos, a) <i>barologger</i> e, b) <i>levelogger</i>	93
Figura 37	Imagem dos equipamentos utilizados em campo	94
Figura 38	Equipamentos de georreferenciamento utilizados em campo ...	95
Figura 39	Amostras de calha do poço de monitoramento CAC 03	96
Figura 40	LS 13 320 MW - analisador de tamanho de partícula (granulômetro) por difração a laser	97
Figura 41	Variação da granulometria de areia em oito perfis do poço CAC 01	97
Figura 42	Triângulo de classificação textural de solo	99
Figura 43	Mesa de Tensão, equipamento que determina a porosidade, denominado como método da coluna de areia	100
Figura 44	Perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 01	104
Figura 45	Perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 02	105
Figura 46	Perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 03	106
Figura 47	Variação da flutuação do nível da água subterrânea dos poços CAC 01, CAC 02 e CAC 03 relacionados com a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS	111
Figura 48	Variação da flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 01 (área de retirada de água superficial) em relação a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS	114
Figura 49	Variação da flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 02 (área de retirada de água superficial) em relação a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS	115

Figura 50	Variação da flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 03 (área de exploração de água subterrânea) em relação a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS	116
Figura 51	Seção topográfica mostrando a situação dos poços de monitoramento CAC 01 e CAC 02 na área de retirada da água subterrânea, em duas datas: 27/06/2011 a 14/01/2012, em Cacequi/RS	119
Figura 52	Variação da flutuação do nível da água do Rio Ibicuí e dos poços CAC 01 e CAC 02 (área de retirada de água superficial) durante o período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS	120
Figura 53	Cartograma da Superfície Potenciométrica e da direção do Fluxo da Água Subterrânea, nas áreas de estudo	121
Figura 54	Comportamento do poço de abastecimento P03 da CORSAN ..	123
Figura 55	Comportamento do poço de abastecimento P15 da CORSAN ..	124
Figura 56	Flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 01 e as linhas de tendência	126
Figura 57	Flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 02 e as linhas de tendência	128
Figura 58	Flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 02 e as linhas de tendência	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Distribuição da Água nos principais reservatórios naturais	27
Tabela 2	Volume de poros e tamanho de partículas em sedimento	59
Tabela 3	Variação do rendimento específico de acordo com a textura do material	60
Tabela 4	Dados obtidos no ensaio de porosidade	108
Tabela 5	Sistematização das informações de porosidade total em porcentagem e determinação do rendimento específico e retenção específica	108
Tabela 6	Sistematização das informações referente à estimativa de recarga para cada poço de monitoramento	131
Tabela 7	Porcentagem da precipitação na recarga da água subterrânea e recarga média em função da precipitação pluviométrica	132

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Equação do rendimento específico	60
Equação 2	Equação da recarga direta	69
Equação 3	Equação para determinar o nível freático medido pelos sensores de pressão	94

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

ABNT/NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASUB - Projeto Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas

BHRSM - Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria

CAC 01 - Poço de Monitoramento

CAC 02 - Poço de Monitoramento

CAC 03 - Poço de Monitoramento

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CCR - Centro de Ciências Rurais

Cfa - Clima temperado úmido quente

cm – Centímetros

CMMAD - Conselho Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CORSAN - Companhia Riograndense de Saneamento

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EARTH - *Extended Model for Aquifer Recharge and Moisture Transport Through Unsaturated Hardrock*

E - Leste

GIRH - Gestão Integrada dos Recursos Hídricos

GPS - *Global Positioning System*

H - Diferença de altitude entre o pico de uma elevação do nível e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

m - Metros

mm - Milímetros

N - Norte

ND - Nível Dinâmico

NE - Nível Estático

NW - Noroeste

ONU - Organização das Nações Unidas

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos

PSAG - Projeto Sistema Aquífero Guarani

PVC - Policloreto de vinila

P03 - Poço da CORSAN

P06 - Poço da CORSAN

P07 - Poço da CORSAN

P10 - Poço da CORSAN

P13 - Poço da CORSAN

P14 - Poço da CORSAN

P15 - Poço da CORSAN

RADAMBRASIL - Radar na Amazônia

R - Correlação

SAG - Sistema Aquífero Guarani

SBCS - Sociedade Brasileira de Ciências do Solo

SE - Sudeste

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente

SHR - Secções Hidrológicas de Referência

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SNGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SP - Superfície

Sr - Retenção específica

SUIR - *Saturated and Unsaturated Interface Region*

SW - Sudoeste

Sy - Rendimento Específico

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USDA - *United States Department of Agriculture*

UTM - Universal Transversa de Mercator

WTF - *Water Table Fluctuation*

Δt - Período total (tempo) de monitoramento

Δh - Somatório das diferenças entre os picos de recarga e o ponto baixo das curvas de recessão antecedentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	24
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivo Geral	25
1.2.2	Objetivos Específicos	25
1.3	Estrutura da Dissertação	26
2	REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1	Sustentabilidade do Uso dos Recursos Hídricos.....	27
2.2	Interação Rio e Aquífero	34
2.3	Geologia da Água Subterrânea	44
2.4	Tipos de Aquífero	50
2.4.1	Classificação dos aquíferos segundo a pressão da água	51
2.4.2	Classificação dos aquíferos quanto aos tipos de porosidade	54
2.5	Granulometria, Porosidade e Rendimento Específico.....	57
2.6	Precipitação.....	63
2.7	Recarga das Águas Subterrâneas.....	65
2.8	Método de Estimativa de Recarga WTF.....	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	75
3.1	Caracterização da Área de Estudo.....	75
3.1.1	Hidrologia.....	79
3.1.2	Geomorfologia	81
3.1.3	Geologia e Hidrogeologia.....	82
3.1.4	Pedologia	87

3.1.5	Climatologia.....	88
3.1.6	Vegetação.....	89
3.2	Procedimentos Técnicos.....	91
3.2.1	Instalação e Monitoramento dos Poços	91
3.2.2	Equipamento de Monitoramento dos Poços e Softwares Utilizados.....	93
3.2.3	Análise granulométrica	96
3.2.4	Determinação da Porosidade	99
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4.1	Granulometria	102
4.2	Porosidade Total	107
4.3	Análise da Variação da Flutuação do Nível Freático	109
4.4	Estimativa da Recarga Subterrânea pelo Método WTF.....	125
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	133
6	REFERÊNCIAS	136

1 INTRODUÇÃO

Os Recursos Hídricos são vitais e de suma importância para todos os seres vivos de nosso Planeta, além de ser um fator físico determinante para a economia e para a sociedade. Sua qualidade e quantidade são fatores condicionantes na estagnação ou no progresso de uma população.

Debates e pesquisas em âmbito nacional e internacional, referentes à gestão dos recursos hídricos tornam-se habituais devido o tema inserir-se no contexto das discussões sobre o abastecimento hídrico e sua sustentabilidade, quando estes se referem às preocupações que envolvem as políticas públicas. Hoje, tais problemas carecem de alternativas que permitam reverter às condições efêmeras de atendimento às necessidades das populações deficientes de recursos e concentradas em áreas de baixa disponibilidade hídrica (DAMBRÓS, 2011).

Considerando a inter-relação entre os componentes do ciclo hidrológico, as águas subterrâneas e as superficiais constituem um único recurso e não são componentes isolados, devendo, por isso, serem gerenciadas como partes integradas, que se relacionam no ciclo hidrológico. A compreensão dos princípios básicos dessas inter-relações é essencial para um gerenciamento e planejamento efetivos dos usos da água, como fundamentado na Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), que menciona o caráter integrado do ciclo hidrológico, considerando a unidade desse ciclo como fundamento jurídico-institucional de sua concepção. No entanto, na prática do gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, raramente é abordado o aspecto interdependente desses sistemas (SILVA, 2007).

A utilização dos recursos hídricos em um cenário crescente, a gestão mais eficaz das águas pode ser obtida ao se considerar a inter-relação entre os componentes superficiais e subterrâneos do ciclo hidrológico e ao se definir critérios de outorga que considerem o uso conjunto e integrado dos mananciais superficiais e das reservas subterrâneas, predizendo os possíveis impactos desses usos sobre a disponibilidade hídrica nas bacias, como prescrito na legislação (SILVA, 2007).

Portanto a obsessão demandada por parte das instituições de gestão de recursos hídricos cresce de maneira considerável, por mais que priorizem as águas superficiais. O crescimento da demanda dos recursos hídricos subterrâneos para atendimento do abastecimento da população, da indústria, da agropecuária e no

lazer, a utilização dos Recursos Hídricos Subterrâneos (aquíferos) vem aumentando de forma substancial e, conseqüentemente, a necessidade de estudos sobre esse tema.

A resolução nº. 22 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de 24 de maio de 2002, se refere em seu art. 4, ao monitoramento dos recursos subterrâneos, e relata que os Planos de Recursos Hídricos, elaborados por bacia hidrográfica, devem contemplar o monitoramento da quantidade e qualidade dos recursos dos aquíferos, com os resultados devidamente apresentados em mapa e a definição mínima de: I. Rede de monitoramento dos níveis d'água dos aquíferos e de sua qualidade; II. Densidade dos pontos de monitoramento; e III. Frequência de monitoramento dos parâmetros (MAZIERO, 2005).

Assim a água subterrânea é alvo de crescente preocupação dos órgãos gestores no que se refere ao seu uso, em uma análise sistêmica se verifica que as transformações demográficas, modificam as relações do uso e ocupação do solo, que aliado ao incremento das áreas agricultáveis e das demandas industriais, tem provocado impactos na degradação dos recursos hídricos e perdas na diversidade ecológica. O crescimento continuado das demandas por recursos hídricos de melhor qualidade tem incentivado a uma maior procura por mananciais subterrâneos, que se não forem racionalmente utilizados, correm o risco de não estar disponíveis para as gerações futuras (HEINE, 2008).

O uso sustentável dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos, não requer, apenas, estudos sobre a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação (Foster, 2006), como vem ocorrendo de forma sistemática nos últimos anos, mas também o conhecimento dos componentes que atuam em seu comportamento hidráulico é de sua importância para o estabelecimento de medidas preventivas e/ou corretivas na sustentabilidade destes recursos (FORMAGGIO, 2009). Entende-se que, qualquer modificação ou interferência no sistema, pode comprometer seu equilíbrio como, por exemplo, o uso dos recursos naturais de forma não planejada (DAMBRÓS, 2011).

Segundo DRISCOLL (1995), o uso racional das águas subterrâneas envolve três grandes princípios: (1) desenvolvimento de tecnologias que aumentem o volume armazenado nos reservatórios de água subterrânea, (2) proteção da qualidade das águas subterrâneas, e (3) utilização das fontes de água subterrânea para os usos mais dignos ou mais preciosos na sociedade.

Como primeiro princípio, o uso racional das águas subterrâneas trata da maximização da vazão segura dos aquíferos para um longo período de tempo. A constante retirada excessiva de águas subterrâneas para abastecimento não deveria ser permitida, apoiados em propósitos de vantagens econômicas em curto prazo. A recarga por bacias de inundação, poços, e irrigação durante períodos de não desenvolvimento da cultura, são alguns meios de aumentar o volume armazenado de águas subterrâneas. A redistribuição das captações e a conservação são outras formas de melhorar o uso das águas subterrâneas.

O segundo inclui esforços feitos para minimizar impactos adversos das atividades humanas na água subterrânea. A disposição inadequada de resíduos industriais ou de lixo são exemplos de contaminantes potenciais desta águas.

O último e terceiro princípio envolvem o desenvolvimento de prioridades no modo como as águas subterrâneas serão utilizadas no futuro. O aumento das estiagens, a concentração populacional nas cidades, e a expansão industrial e agrícola têm contribuído para um aumento da crise no fornecimento de água em muitas áreas. Assim, os profissionais ligados ao abastecimento de água têm a difícil tarefa de restringir e/ou limitar o uso da água para certos usos, como por exemplo, a agricultura irrigada de arroz como ocorre em diversas bacias hidrográficas no Estado do Rio Grande do Sul, para oferecer água suficiente para o uso humano.

Depois de suprir os usos prioritários como o uso humano, a agricultura constitui-se como um dos maiores usos de água. Aproximadamente, 90% da água utilizada para o abastecimento humano ou indústria retornam diretamente ao meio ambiente, podendo ser reutilizada para outros usos. No entanto, na irrigação apenas 50% está imediatamente disponível para outros usos sendo o restante da água evaporada e/ou transpirada. Neste contexto, ganha importância na agricultura a eficiência do uso da água nos sistemas de irrigação (RIGHES, 2000).

Portanto a agricultura, através da irrigação, é a atividade que mais utiliza água em nível mundial. A agricultura irrigada utiliza cerca de 70% da água derivada de rios, lagos e mananciais subterrâneos, enquanto a indústria utiliza 23% e o abastecimento humano, somente 7% (GOMES, 2004).

Para uma produção crescente de alimentos, a alternativa está na produção agrícola por irrigação, que tem possibilitado um número maior de safras por ano, que ocorrem principalmente em países do hemisfério sul; tendo em vista ser o setor agrícola o maior usuário de água e como esta é o componente essencial e

estratégico ao desenvolvimento da agricultura, o controle e a administração adequada e confiável possibilitarão o manejo justo e equilibrado, preservando a sua qualidade e quantidade (PAZ, 2000).

Para se evitar conflitos entre os usuários diante da crescente demanda de água, especialmente das águas subterrâneas, várias medidas devem ser tomadas. Se não forem feitos estudos e planejamentos para a exploração dos recursos hídricos subterrâneos, graves danos podem ocorrer, desde problemas de rebaixamentos excessivos, que poderão inviabilizar economicamente o bombeamento. A estimativa da recarga das águas subterrâneas surge então como um pré-requisito para uma gestão eficiente e sustentável de tais recursos, uma vez que os recursos hídricos são a chave para o desenvolvimento econômico (PAIVA, 2006).

O estudo da estimativa da recarga da água subterrânea e das conexões ou inter-relações entre os recursos hídricos existentes, em determinada área, fornece os subsídios necessários para o aproveitamento racional da água subterrânea, e ainda provêem elementos quantitativos para localização de obras hidráulicas e civis de diferentes fins.

A definição de modelos que representem o sistema em questão é crucial para a análise do comportamento de um aquífero a partir dos dados coletados. As principais informações para a definição e construção de um modelo de um sistema hidrológico são a geologia e a hidrogeologia local, a precipitação, a infiltração, a recarga, a descarga e o uso do solo. Existem diversas formas de obter respostas de um modelo, como através de simulação numérica ou de balanço hídrico do sistema. Em zona de afloramentos do Sistema Aquífero Guarani, no Ribeirão da Onça no Estado de São Paulo foi realizado um balanço hídrico e uma resposta do modelo estimando uma recarga profunda. A recarga direta foi estimada através do método das flutuações do nível do aquífero (WENDLAND, 2007).

Os sistemas aquíferos são dinâmicos e se ajustam continuamente devido as mudanças no clima, a exploração, as mudanças de regime dos rios e sua exploração, e no uso da terra. As medidas do nível de água em poços de observação são a fonte principal da informação sobre os agentes hidrogeológicos que agem nos aquíferos e com estes afetam a recarga, o armazenamento, e a descarga do aquífero. O monitoramento sistemático dos níveis de água fornece dados essenciais para a avaliação das mudanças neste importante recurso para o

desenvolvimento de modelos, para prever tendências, projetar, executar, e monitorar a eficácia da gerência dos aquíferos e programas de proteção (WENDLAND, 2007).

Por esse motivo, esta dissertação, tem como foco o monitoramento da flutuação dos níveis das águas subterrâneas e a estimativa da recarga das água subterrânea em áreas com exploração das águas superficiais e subterrânea, que contribuirá com a gestão de recursos hídricos subterrâneos. Nesse sentido, esse trabalho vem contribuir com o estudo hidrogeológico dos sistemas aquíferos da área de estudo, cujos recursos hídricos são utilizados para irrigação. Principalmente no período seco do ano (dezembro a março) e são provenientes da retirada dos cursos de água locais, podendo assim afetar o nível freático local. As análises da pesquisa e as suas informações do comportamento dos reservatórios subterrâneos foram realizadas, de maneira pontual no entorno do próprio poço tubular ou de monitoramento.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram feitas leituras dos níveis estáticos da água dos poços construídos para este estudo, registrando-se uma série histórica de dados apoiadas em poços de abastecimento da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). Estes contém uma série de dados e parâmetros hidráulicos registrados tais como: a geologia de perfuração e a vazão de cada poço além de resultados físico-químicos e bacteriológicos. Parte desses dados foram submetidos às análises de série temporal o método escolhido para sintetizar os ciclos sazonais da piezometria e pluviometria através da série temporal. Ainda utilizou-se informações de captações cadastradas no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas/SIAGAS da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais/CPRM.

Portanto, a busca por respostas, ainda incompletas, sobre a funcionalidade das águas subterrâneas e suas interações com as águas superficiais, se constitui no desafio desta investigação que, além de contribuir para debates na comunidade acadêmica, poderá servir como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em escala de Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/BHRSM (ASUB/UFCG/UFAL/UFSM, 2010).

1.1 Justificativa

A justificativa para desenvolvimento deste estudo foi a necessidade do conhecimento mais detalhado das variáveis que atuam sobre o comportamento da piezometria em um determinado período hidrológico e assim compreender melhor a resposta do nível d'água em relação aos períodos de chuva e de estiagem. Nesse contexto, o estudo terá importância para dar subsídios ao melhor uso e aproveitamento dos recursos hídricos na área estudada e que desempenha uma atividade socioeconômica importante para a região.

O tipo de informação que se pretende analisar no presente trabalho é fundamental para a adequada gestão integrada dos seus recursos hídricos.

A quantificação da exploração da água subterrânea é uma tarefa árdua e de precisão duvidosa. No entanto, um sistema de monitoramento integrado (monitoramento dos recursos superficiais e subterrâneos e monitoramento hidrológico) tende a reduzir as incertezas envolvidas. Na busca do conhecimento aperfeiçoado e dinâmico, o monitoramento integrado é um item da proposta de gestão integrada dos recursos hídricos.

No intuito de disseminar a propagação dos conhecimentos sobre a água subterrânea, o presente estudo busca contribuir para a caracterização dos sistemas aquíferos livres ou não-confinados localizados em Zona de Afloramentos do Sistema Aquífero Guarani/SAG, através do desenvolvimento do conhecimento dos parâmetros quantitativos, e conseqüentemente a conscientização visando o uso racional dos recursos hídricos subterrâneos. A escolha de escala, ou seja, da priorização do enfoque nos aquíferos livres justifica-se no fato de que os processos de recarga são melhores evidenciados. Não se pretende finalizar ou mesmo pormenorizar os aspectos envolvidos no estudo sobre água subterrânea, mas de maneira clara e objetiva abordar os principais fatores de ordem quantitativa relevantes sobre este importante recurso hídrico.

Na prática atual da gestão dos recursos hídricos no Brasil, os deficitários critérios de outorga de águas subterrâneas, a desconsideração dos usos conjuntos das águas de superfície e do subsolo e da predição dos seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica nas bacias constituem a principal justificativa desse trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi estudar os principais fatores de ordem quantitativa da água subterrânea através da construção de uma rede de monitoramento e estudar a relação entre o rio e a variabilidade da piezometria em áreas do Sistema Aquífero Guarani.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Entender a variabilidade da piezometria e sua influência no rio ao longo de uma série temporal de dados e hierarquizar os condicionantes gerais envolvidos;
- Avaliação de parâmetros hidrodinâmicos e reconhecimento dos aspectos hidrogeológicos em poços de monitoramento;
- Seleção de dados hidrometeorológicos;
- Determinação das granulometrias e da porosidade drenável do solo, particularmente na zona de variação de nível d'água do aquífero freático;
- Estimar a flutuação anual do nível freático na área de estudo e possível interação com o curso de água;
- Estimativa da recarga das águas subterrâneas nas áreas de pesquisa (com exploração da água superficial e subterrânea).

1.3 Estrutura da dissertação

Com a finalidade de atender aos objetivos propostos, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

1 - Introdução onde se apresenta a contextualização, o tema da pesquisa, sua justificativa, proposição dos objetivos e o modo como foi estruturada a dissertação.

2 - Revisão de Literatura expõe-se o conteúdo relativo a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos, interação rio e aquífero, a geologia da água subterrânea, tipos de aquíferos, granulometria, a porosidade e o rendimento específico do meio sedimentar, a precipitação pluviométrica, a recarga das águas subterrâneas e o método de estimativa de recarga WTF.

3 - Materiais e Métodos descreve-se, o local onde foi realizada a pesquisa, a elaboração e aplicação dos instrumentos de coleta de dados e os procedimentos de análise.

4 - Resultados e Discussão descrevem-se os resultados obtidos e as análises realizadas.

5 - Conclusões e Recomendações sintetizam-se as considerações finais de acordo com a questão da pesquisa e os objetivos da dissertação, bem como as recomendações para trabalhos futuros em recursos hídricos subterrâneos.

6 - Referências

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sustentabilidade do Uso dos Recursos Hídricos

Elemento regulador do equilíbrio natural e da vida na Terra, a água, se faz presente em todas as etapas da dinâmica do ciclo hidrológico. E as mudanças na oferta natural da água podem comprometer o equilíbrio dos ecossistemas, que servem como fonte de alimentos e constituem a base da própria atividade humana. Assim a relação da água (quantidade e qualidade), com a vida das populações serve como indicador da sua qualidade de vida (HEINE 2008).

Os recursos hídricos superficiais representam importante reserva de água, sendo possivelmente a fonte de mais fácil captação para uso em atividades humanas. A quantidade total de água dos diferentes reservatórios do planeta, estimada em aproximadamente 1,4 milhões de km³ (tabela 1), manteve-se constante nos últimos 500 milhões de anos (REBOUÇAS, 2002). Entretanto, esses mananciais representam parcela reduzida na distribuição global de água – apenas cerca de 0,9% do total de água doce. As águas subterrâneas, por outro lado, constituem um recurso estratégico no caso de escassez outras fontes, correspondendo a cerca de 30% do total de água doce no planeta (figura 1). Esse simples balanço, executado com dados estimativos, tem motivado a preocupação internacional quanto à sustentabilidade do uso da água e da própria vida humana.

tabela 1: Distribuição da água nos principais reservatórios naturais. Fonte: (TEIXEIRA 2000).

Reservatório	Volume (km ³ x 10 ⁶)	Volume (%)	Tempo médio de permanência
Oceanos	1.370	94	4.000 anos
Geleiras e capas de gelo	30	2	10 - 1000 anos
Águas subterrâneas	60	4	2 semanas a 10.000 anos
Lagos, rios, pântanos e reservatórios artificiais	0,2	<0,01	2 semanas a 10 anos
Umidade nos solos	0,07	<0,01	2 semanas a 1 ano
Biosfera	0,0006	<0,01	1 semana
Atmosfera	0,0130	<0,01	~ 10 dias

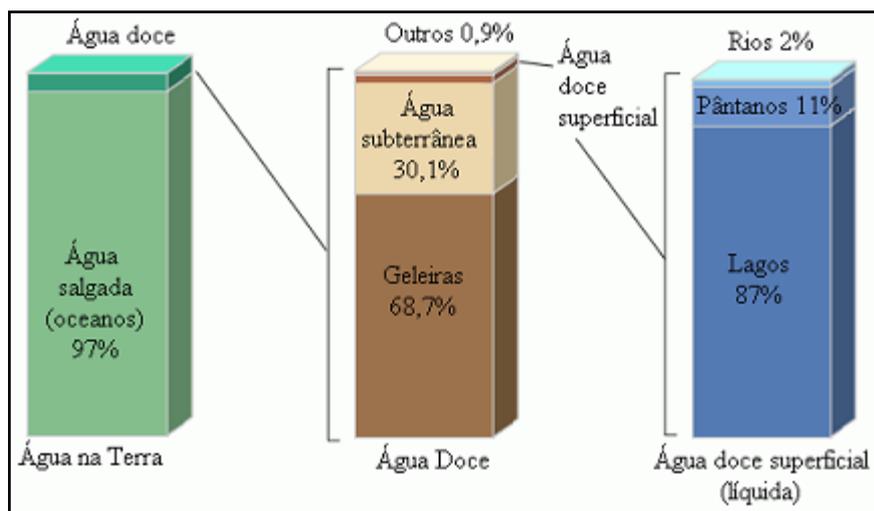


Figura 1: Distribuição global de água (fonte: GLEICK, 1996).

Para uso da água deve-se ainda considerar, além dos aspectos quantitativos e qualitativos, suas funções ambientais que são vitais para a manutenção dos ecossistemas, o que deve ser levado em conta em uma análise abrangente de sustentabilidade. Nesse sentido, devem ser conhecidas e determinadas às funções ambientais da água em cada ecossistema. Com todas as suas particularidades e especificidades, torna-se impossível determinar os limites do equilíbrio natural a serem considerados para o dimensionamento da ação humana sobre o ambiente (HEINE, 2008).

As atividades humanas, podem reduzir a conectividade entre esses sistemas, afetando as áreas físicas e ecológicas dos sistemas de águas superficiais e subterrâneas, alterando os processos de recarga e descarga do aquífero e causar contaminações orgânicas ou inorgânicas dos corpos d'água ou do próprio reservatório subterrâneo (SOPHOCLEOUS, 2002).

As águas subterrâneas e superficiais interagem no sistema hidrológico numa variedade de ambientes fisiográficos e climáticos.

A exploração desordenada dos recursos hídricos subterrâneos tem resultado numa significativa diminuição da reserva de água em muitos aquíferos pelo mundo (LLAMAS, 2004).

No Brasil, o crescimento das explorações e o aumento constante do consumo de água subterrânea se deve, principalmente, à crescente demanda de água, ao comprometimento e à poluição das reservas superficiais, ao melhor conhecimento dos aquíferos, embora ainda bastante escasso, e ao aprimoramento das empresas de perfuração de poços (CABRAL, 2006).

Portanto o aumento significativo da demanda e exploração de água subterrânea se fez possível devido, principalmente, a fatores econômicos (o verdadeiro custo da água subterrânea é geralmente baixo com relação aos benefícios econômicos diretos obtidos do seu uso); tecnológicos (progresso do conhecimento científico na ocorrência, movimento e exploração da água subterrânea); de segurança (possibilidade de enfrentar a variabilidade inter anual da precipitação); e institucionais (a exploração da água subterrânea pode ser facilmente realizada por usuários individuais, indústrias ou pequenos municípios), (SILVA, 2007).

Há um uso intenso da água subterrânea quando se extrai uma fração significativa da reserva renovável interanual dos aquíferos, de modo a se modificar expressivamente o seu regime hidrogeológico e a causar mudanças importantes na interação rio-aquífero (Espanha, 2002). Portanto os rebaixamentos descomedidos e exagerados do nível de água em poços, a degradação da qualidade da água, a subsidência ou colapso dos terrenos e os impactos em corpos d'água superficiais e no processo cíclico da água no conjunto da bacia hidrográfica, são causa importantes a serem estudadas (SILVA, 2007).

Assim, devem ser diagnosticadas e previstas nos Planos de Recursos Hídricos as ações potencialmente impactantes, e as ações de proteção e mitigação das águas subterrâneas, incluindo-se medidas emergenciais a serem adotadas em casos de contaminação e poluição acidental, visando à gestão sistêmica, integrada e participativa das águas na promoção do desenvolvimento social e ambientalmente sustentável (DAMBRÓS 2011).

A palavra sustentabilidade, tem origem do Latim *sus-tenere*, que significa sustentar, segurar ou manter. Para a Comissão Mundial Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD/ONU, 1991), a sustentabilidade, do ponto de vista socioeconômico-ambiental, entende que: uma sociedade sustentável é aquela que satisfaz suas necessidades sem diminuir as perspectivas das gerações futuras. Ou seja, a incorporação da conservação ambiental ao crescimento econômico e a equidade social (ESPINOSA, 1993).

Dentro da comunidade Européia, após várias discussões sobre o modo de desenvolvimento econômico, o termo desenvolvimento sustentável surge em 1987 através do Relatório de Brundthand, que definiu o desenvolvimento sustentável

como aquele que satisfaz as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem as suas (CMMAD,1987).

Buscando atender as necessidades humanas no presente, a sustentabilidade, mantém a manutenção da vida sem degradar as fontes de recursos naturais, respeitando a capacidade de suporte dos ecossistemas para que gerações futuras possam ter as suas necessidades de manutenção da vida sem comprometer o meio ambiente. Ser sustentável significa prever a continuidade dos recursos e seu uso de modo suportável respeitando assim a capacidade e o limite de carga do meio ambiente.

O desenvolvimento sustentável é pensar numa visão a longo prazo, assim como pensar nos ritmos naturais da vida e da matéria, sugerindo o respeito á capacidade de resiliência dos ecossistemas. O desenvolvimento sustentável deve ser pensado como um processo que se elabora em longo prazo e de forma sistêmica onde a participação dos atores sociais na elaboração de indicadores e torna-se imprescindível na operacionalização deste conceito enquanto campo pragmático da sua efetivação (FURLANETTO, 2010).

Defende-se que, a sustentabilidade é uma das providências ou intenções que visam perspectivas futuras de disponibilidade dos recursos naturais. Contudo, suas metas são colocadas em nível internacional, incluídas em estratégias segmentadas para diversas atividades humanas, considerando sempre o tripé: sociedade, economia e ambiente (DAMBRÓS, 2011).

A sustentabilidade provém de uma contínua inter-relação de etapas que se sustentam na (1) comunicação; (2) participação; (3) coordenação; (4) informação; e (5) aprendizado (DALAL-CLAYTON e BASS, 2002). Estas etapas envolvem diretamente a sociedade, por meio do surgimento de lideranças, planejamento e implementação de ações distribuídas e o respectivo monitoramento, aprendizado e adaptação das mesmas. Assim, como em qualquer área ou setor, a participação pública e o engajamento político são ingredientes essenciais para atingir os objetivos da sustentabilidade nos recursos hídricos (RAUCH, 2005).

Essas considerações, como apresentado no diagrama da (figura 2), sugerem que a análise do uso sustentável dos recursos hídricos deve ser realizada com enfoque sistêmico.

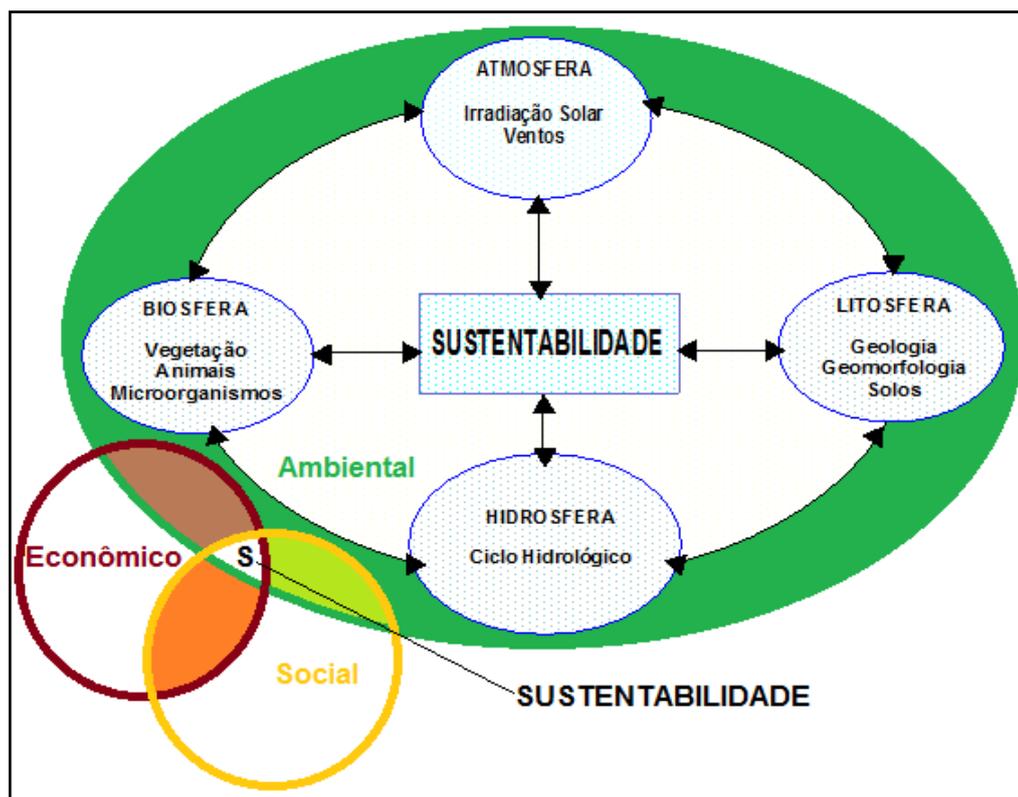


Figura 2- Interação de fatores intervenientes na sustentabilidade de uso dos recursos naturais. (fonte: adaptado de HEINE, 2008).

Surgem diversas propostas de sistemas de medição que buscam identificar os significados de sustentabilidade. Estes significados podem ser identificados por meio de indicadores, que se constituem como valiosas e úteis ferramentas capazes de subsidiar os processos de tomada de decisão na gestão e no desenvolvimento de projetos, programas e políticas setoriais relacionados à água, sob a égide da sustentabilidade.

A necessidade de um conjunto de indicadores que avaliem a viabilidade, desempenho e a sustentabilidade de um sistema é especialmente urgente na gestão ambiental em todos os níveis e aplicações, inclusive no planejamento, gestão e análise de recursos hídricos e de bacias hidrográficas.

A sustentabilidade é um dos indicadores de um ecossistema, sendo eles: “estabilidade (constância de produtividade em face de flutuação), produtividade (rendimento), equitatividade (igualdade de distribuição aos beneficiários) e sustentabilidade (capacidade de o sistema manter a produtividade)”, (CONWAY, 1997). Assim, em uma análise conjunta dos três primeiros indicadores, referidos pelo autor, pode-se saber quanto produz e quanto produzirá um determinado sistema, no caso o sistema água subterrânea (DAMBRÓS, 2011).

A configuração complexa que alcançam os problemas de medição de indicadores, constitui-se em um importante desafio motivador para os gestores, que buscam a idealização e o estabelecimento de indicadores e seus modelos de gestão, de forma a oferecer como informação significativa sobre as distintas dimensões da sustentabilidade.

Entende-se que a implantação do desenvolvimento que vise à sustentabilidade necessita ser tomada por todos os gestores tornando a sustentabilidade uma ação global, onde as questões sociais e ambientais devem associar-se ao crescimento econômico e onde os diversos atores sociais de localidade possam assumir a sua participação na sistematização das informações necessárias e que sinalizem aspectos que mais tem fragilizado as relações socioambientais de um determinado contexto.

O processo de análise e gestão ambiental, recorrendo aos princípios de sustentabilidade, exige ações de previsão, avaliação e acompanhamento de atividades e intervenções humanas, incidindo na necessidade de diferentes instrumentos para planejamento, controle e monitoramento ambiental.

O controle e o monitoramento ambiental constituem-se em procedimentos essenciais para o processo de planejamento e gestão ambiental do uso de recursos naturais, dentre eles os hídricos, e desta forma, exigem indicadores e instrumentos que possibilitem medir e documentar sistematicamente o processo de transformações socioambientais em bacias hidrográficas.

O gerenciamento dos recursos hídricos envolve os processos de planejamento, articulação, controle e regulação do uso racional das águas, compreendendo ações de avaliação da conformidade das condições atuais com as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Recursos Hídricos que são exercidas por meio de instrumentos de gestão (BRASIL, 1997, 2000, 2005). A concepção dos instrumentos de gestão de recursos hídricos e planejamento de bacias hidrográficas deve assegurar a equidade de acesso dos usuários da água e dos recursos naturais, a fim de configurar oportunidades concretas da busca pela sustentabilidade.

A gestão dos recursos hídricos no Brasil obedece a uma série de Leis e Resoluções, contidas na Lei Nº. 9.433, da República Federativa do Brasil, de 1997. Onde considera-se a bacia hidrográfica como unidade de gestão. Também reconhece que a captação de águas subterrâneas, por ser obra de engenharia,

deve obter a autorização para que seja feita sua instalação e operação. As normas culminam na Resolução nº. 15 de 11 de janeiro de 2001, do CNRH, que reconhece a indissociável interação entre água superficial e subterrânea, necessitando de uma gestão integrada, e que, nem sempre os limites de um aquífero coincidem com os de uma bacia hidrográfica (DAMBRÓS 2011).

Para o planejamento de uma bacia hidrográfica, os itens mínimos estão contemplados na Resolução Nº. 17 de 29 de maio de 2001. A Resolução Nº. 22, de 24 de maio de 2002, estabelece que o Plano de Recursos Hídricos deva considerar os múltiplos usos das águas subterrâneas; as peculiaridades; os aspectos qualitativos obtidos por monitoramento, com seus resultados devidamente apresentados em mapas, além de caracterizá-lo, definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais, subterrâneos e com o meio; obter informações hidrogeológicas sendo estas indispensáveis (DAMBRÓS 2011).

Neste sentido está a resolução que estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro, Resolução 92/2008, do CNRH, estabelecendo a necessidade de promover a utilização racional das águas subterrâneas e sua gestão integrada com as águas superficiais, de forma sustentável.

Portanto o cumprimento das leis e resoluções referidas, se fiscalizadas e obedecidas, poderão ter não só um retorno maior em termos sócio-econômicos, como a segurança na disponibilidade dos recursos naturais (DAMBRÓS 2011).

Assim, o desenvolvimento de ferramentas, diretrizes e procedimentos metodológicos confiáveis e integradores para gerenciamento de recursos hídricos, tornam-se prioritários, a fim de auxiliar no avanço dos processos de tomada de decisões, na comunicação e disseminação de riscos ambientais, na solução e providências de conflitos, no planejamento e gestão de bacias hidrográficas. Tornando as bases do conhecimento científico (fundamentadas na sustentabilidade) e as aplicações práticas referência para modelos propostos.

2.2 Interação Rio e Aquífero

Nos últimos anos, o interesse em estudos relacionados à interação entre as águas superficiais e subterrâneas tem aumentado, visando incluir os efeitos de sua exploração sobre rios, lagos, banhados e estuários (WINTER, 1999). A perspectiva em se considerar a interação que um manancial exerce sobre o outro é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos dentro de uma visão integrada do ciclo hidrológico na bacia.

Componentes do sistema hidrológico, as águas subterrâneas e superficiais não atuam de forma isoladas, ao contrário, interagem numa variedade de ambientes fisiográficos e climáticos. Atribui-se a essa complexidade, a multiplicidade de variáveis que intervêm no ciclo hidrológico, que por sua vez, não são absolutamente independentes entre si. Portanto, o uso ou contribuição de um recurso tem, normalmente, efeito sobre o outro. Por isso, um profundo entendimento dos princípios básicos de interações entre água subterrânea e superficial é necessário para o gerenciamento efetivo dos recursos hídricos.

A extração de água de corpos hídricos superficiais, principalmente daqueles com características predominantemente influentes, ou seja, que contribuem para o fluxo subterrâneo, pode provocar a diminuição da contribuição superficial ao aquífero e, conseqüentemente, promover uma depleção do lençol freático. Da mesma forma, todo volume de água subterrânea retirado de um aquífero implica, também, em uma redução da sua contribuição aos corpos hídricos superficiais. Por isso, as alocações de água superficial e subterrânea de forma segregada não são apropriadas em virtude dos efeitos inter-relacionados entre esses sistemas.

Extremamente complexas, as interações entre água subterrânea e superficial são dependentes de um grande número de fatores, como clima, topografia, da forma do rio (largura, declividade e tortuosidade), das propriedades hidráulicas sub-superficiais, das variações temporais da precipitação, dos padrões de fluxo subterrâneo e do nível d'água no rio (CEY et al., 1998). Níveis d'água do rio e características topográficas são certamente as principais causas da entrada de fluxo subterrâneo através das margens de rios (LAMBS, 2004).

Os estudos de Sophocleous (2002) descreveram que as interações hidrológicas entre água superficial e sub-superficial ocorrem por fluxo lateral através

da zona não-saturada e por infiltração (fluxo descendente) ou exfiltração (fluxo lateral) de água da zona saturada, através do leito do rio.

O aquífero freático contribui para o rio com o denominado fluxo de base ou escoamento básico. O fluxo de base é a parcela do escoamento em corpos d'água proveniente da água subterrânea, e é responsável pela perenidade e regularização das vazões em rios em períodos de estiagem.

Para pesquisar a contribuição de água subterrânea que pode ser feita de um aquífero para um rio, ou o oposto, a recarga que um reservatório subterrâneo pode receber de um curso d'água superficial, é fundamental conhecer o tipo de conexão hidráulica que se apresenta entre ambas. Os tipos de conexão podem ser divididos, principalmente, considerando dois fatores: 1) a situação das formações geológicas permeáveis em relação ao leito do rio; e 2) a situação relativa aos níveis do rio e os níveis piezométricos na zona do aquífero contígua ao rio (CUSTODIO E LLAMAS, 1976).

A direção do processo de troca depende da altura hidráulica, enquanto que o fluxo depende da condutividade hidráulica da formação. A precipitação altera a altura hidráulica e desse modo induz a mudanças na direção do fluxo.

Alguns estudos mostraram que as interações entre água subterrânea e superficial podem provocar alterações hidrológicas, como produção de escoamento, flutuações no nível piezométrico e modificação da hidrologia superficial (WADDINGTON et al , 1993, WHITELEY e IRWIN, 1986; DEVITO e DILLON, 1993; DEVITO et al., 1996, KATZ et al ., 1997). E as afirmações de CEY (1998) expõem que as interações entre água subterrânea e superficial influenciam as condições químicas e biológicas nas proximidades dos rios.

Segundo Sophocleous (2002) a integridade dos sistemas subterrâneos e superficiais é freqüentemente modificada por atividades humanas, reduzindo a conectividade, alterando os processos de trocas e promovendo a contaminação tóxica ou orgânica. Custodio e Llamas (1976) afirmaram que a canalização de rios altera sensivelmente a interação entre os recursos superficiais e subterrâneos.

Os principais mecanismos físicos que controlam e que se relacionam com as interações entre as águas superficiais e subterrâneas, as quais podem ser avaliadas dentro de uma visão pontual (escala local, figura 3) ou de uma visão integral na bacia (escala regional, figura 4).

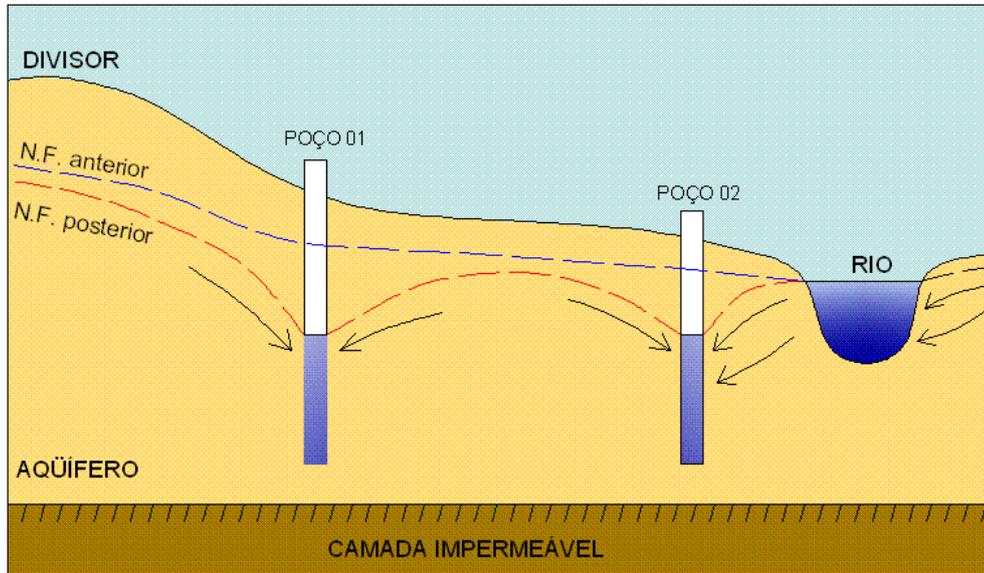


Figura 3: Efeitos locais do bombeamento de água em poços. (fonte: SILVA, 2007).

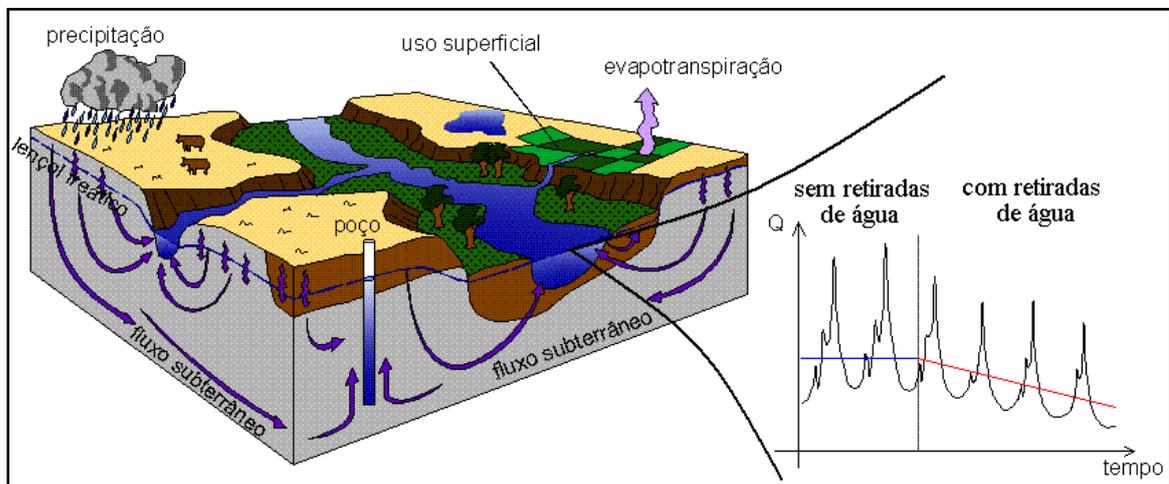


Figura 4: Efeitos das retiradas de água superficial e subterrânea sobre a hidrologia regional. (fonte: SILVA, 2007).

Em abordagens pontuais ou localizadas as interações são consideradas em áreas específicas da bacia, ou seja, em uma escala local restrita (pontual). Geralmente, as práticas comuns de planejamento de uso dos recursos hídricos subterrâneos consideram apenas essa abordagem, ao levar em conta, exclusivamente, a análise do efeito do bombeamento de poços em áreas de sua

proximidade, isto é, em determinar a extensão e influência do cone de depleção provocado pela retirada de água do aquífero pelos poços (SILVA, 2007).

Nesta pesquisa, é importante salientar que a abordagem utilizada para simulação dos usos superficiais e subterrâneos da água, representa os efeitos de interação local, tendo suma importância e, por isso, tem sido discutido.

Ao se considerar uma escala mais ampla, isto é, a escala regional é possível analisar de forma mais integrada as interrelações entre as águas superficiais e subterrâneas porque se podem avaliar os impactos dos usos dos recursos hídricos sobre a hidrologia regional da bacia, uma vez que todas as fases do ciclo hidrológico, ou pelo menos as mais importantes, e também as características gerais da bacia (clima, topografia, geologia e usos do solo) estão mais conectadas (DINGMAN, 2002).

A geologia e a topografia interferem de forma significativa na dinâmica de trocas entre os corpos superficiais e os aquíferos. Geralmente, em um aquífero não-confinado, a linha freática segue forma semelhante à da topografia do terreno, sendo, também, bastante dependente das características geológicas da região. Esses dois mecanismos, por outro lado, determinam apenas a distribuição espacial das zonas de recarga e descarga, e não as taxas em que elas ocorrem, as quais são mais influenciadas pelo clima. Dessa forma, os efeitos da topografia, geologia e clima, tornam-se o principal responsável pela interação entre águas superficiais e subterrâneas (TÓTH, 1970).

Para a geologia os fatores que são mais relevantes para a análise da interação entre rio e aquífero na dinâmica do fluxo de água subterrânea são (DINGMAN, 2002):

- Estrutura pedológica: relaciona-se com a disposição, o arranjo e a posição relativa das formações.
- Estratigrafia: relações geométricas entre as formações das camadas do solo (tipicamente em camadas);
- Litologia: relaciona-se com a composição mineral, a distribuição granulométrica e a forma das rochas ou grãos do solo, os quais controlam a distribuição da condutividade hidráulica;

Esses três fatores estão diretamente relacionados ao modo como se distribuem espacialmente os aquíferos e às principais características do movimento da água subterrânea (FREEZE; CHERRY, 1979).

Formações geológicas de diferentes permeabilidades podem afetar sobremaneira a distribuição das infiltrações e exfiltrações; por exemplo, numa camada altamente permeável, confinada entre camadas menos permeáveis, o fluxo de água subterrânea na direção do corpo superficial tende a seguir um caminho preferencial por essa camada, como representado na figura 5, independentemente da configuração topográfica do terreno.

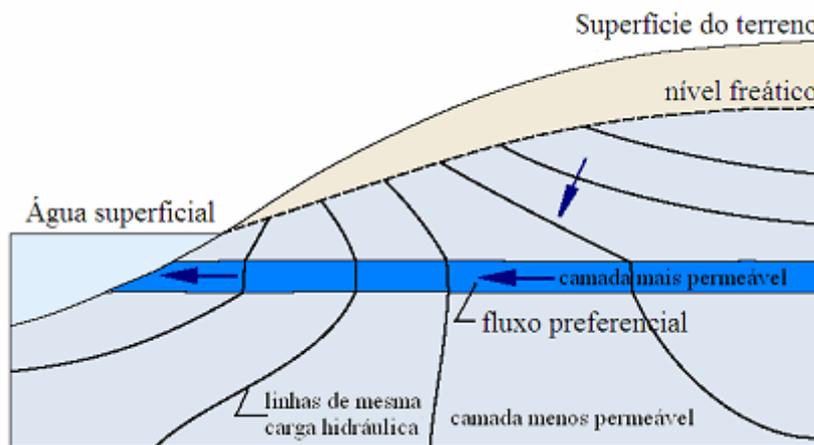


Figura 5: Fluxo preferencial de água subterrânea devido a camadas de diferentes permeabilidades. Fonte: (WINTER, 1998).

Já os efeitos da topografia na relação entre rio e aquífero pode criar um complexo padrão de fluxo da água subterrânea dominante em uma região que, por sua vez, exerce uma influência mútua nas águas superficiais e subterrâneas (Freeze; Cherry, 1979). Assim dependendo das características topográficas, os fluxos subterrâneos podem ser classificados em (figura 6): 1- Sistemas de fluxo local; 2- Sistemas de fluxo intermediário; e 3 - Sistemas de fluxo regional.

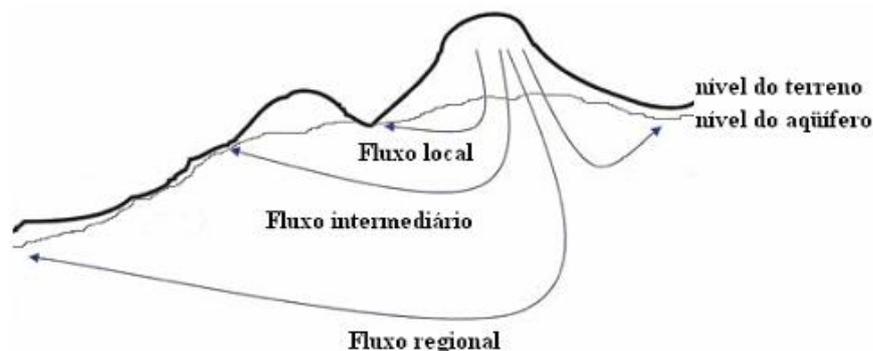


Figura 6: Sistemas de fluxo da água subterrânea (fonte: AUSTRÁLIA, 2006).

Assim os sistemas de fluxos locais respondem mais rapidamente ao movimento da água subterrânea, sendo as zonas de recarga e de descarga bastante próximas (cerca de alguns quilômetros uma da outra). Os fluxos intermediários apresentam características entre as dos fluxos locais e dos fluxos regionais, estando as zonas de descarga entre 5 e 10 quilômetros dos locais de recarga. Por fim, Os sistemas de fluxos regionais ocorrem em zonas com maior capacidade de armazenamento e permeabilidade do que os fluxos locais, sendo as áreas de descarga muito distantes (50 quilômetros ou mais) das de recarga, respondendo, por isso, mais lentamente ao movimento da água subterrânea (SOPHOCLEOUS, 2002).

Segundo Winter (1998) os sistemas de fluxos locais são mais dinâmicos, portanto, têm uma maior ligação com os corpos superficiais. Entretanto, por serem de resposta mais rápida, sua contribuição, em termos de volume e ao longo do tempo, pode ser menos significativa que a contribuição dos sistemas de fluxos intermediários ou regionais.

Os efeitos climáticos mostram que a variação do clima está diretamente relacionada às intensidades e configurações em que as interações entre as águas superficiais e subterrâneas ocorrem. Como exemplo as regiões que tem clima predominantemente úmido tendem a ter corpos superficiais mais influenciados pela regularização subterrânea, do que regiões de clima mais seco, ainda que apresentem características fisiográficas semelhantes (SILVA, 2007).

Segundo Sophocleous, (2002) os efeitos climático estão vigorosamente relacionados com as taxas entre recargas e descargas na bacia. De maneira geral, sob condições de baixa precipitação, o fluxo nos corpos superficiais resulta, em sua maior parte, da contribuição subterrânea, causando uma diminuição do nível freático. Por outro lado, em condições de alta precipitação, o aumento gradativo dos níveis superficiais de água pode elevar a infiltração para o aquífero, aumentando a recarga na direção subterrânea.

Para Winter (1998) as condições hidroclimáticas afetam, geralmente, os padrões de infiltração próximos às margens dos corpos superficiais, nas quais o lençol freático intercepta a superfície. Desta forma nessas áreas, a água infiltrada durante ou após um evento chuvoso pode elevar rapidamente o nível freático,

resultando no aumento do fluxo subterrâneo de água para o corpo superficial (sistema de fluxo local).

Os rios podem estabelecer três configurações com os sistemas de fluxo subterrâneo, figura 7 (Larkin; Sharp, 1992): (1) condição efluente, onde o reservatório subterrâneo contribui para o fluxo superficial; e (2) condição influente, onde a água superficial contribui para o fluxo sub-superficial. (3) rios em ambas as condições: os rios contribuem ou recebem água subterrânea durante algumas épocas do ano, ou mesmo em uma posição ou outra de seu curso. O caráter efluente ou influente do rio pode variar ao longo do ano na mesma área. Por outro lado, a presença de fluxos transitórios pode alterar a condutividade hidráulica da formação local via processos de erosão e deposição, e conseqüentemente afetar a intensidade das interações entre o rio e o aquífero (SOPHOCLEOUS, 2002).

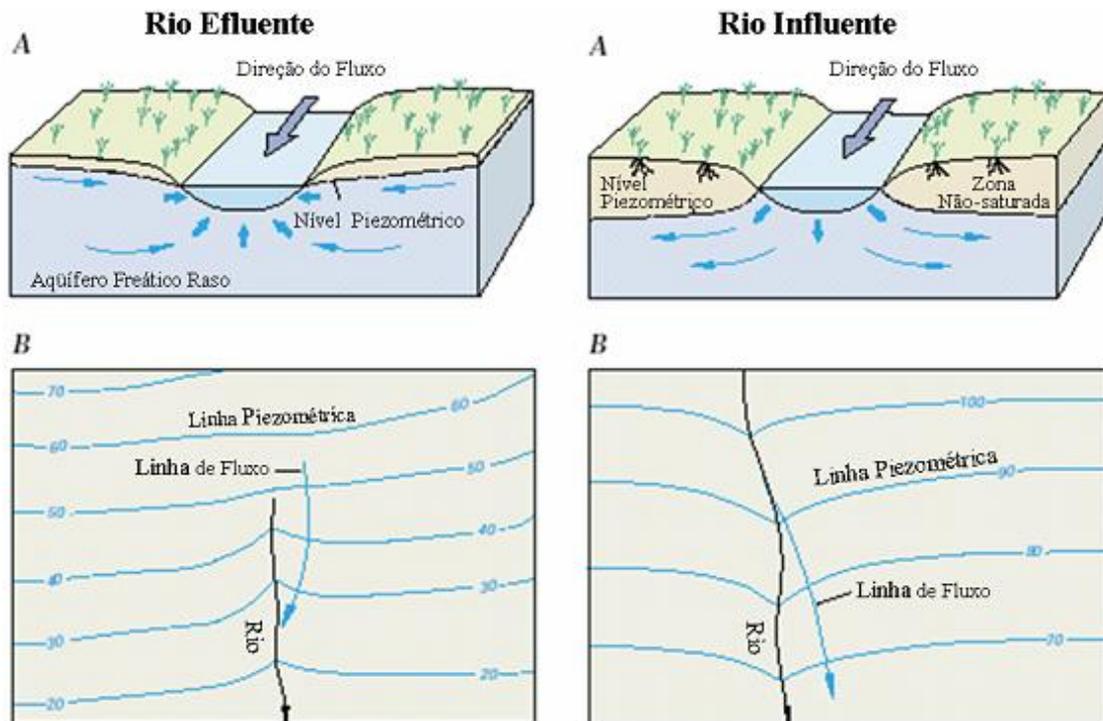


Figura 7: Condição efluente e influente de rios (A) e mapa idealizado de linhas de fluxos e piezométricas (B) (Fonte: WINTER et al., 1998).

Geralmente, para haver descarga subterrânea em um canal, na condição efluente, a altura do nível do lençol freático nas proximidades do rio deve ser maior que a altura da água no canal. No caso oposto, para a água superficial infiltrar no reservatório subterrâneo, condição influente, a altura do nível freático próximo ao rio deve ser menor que a altura de água na sua calha (SILVA, 2007).

Sophocleous (2002) diferencia três relações físicas entre os rios e o nível de água subterrâneo: o sistema hidráulicamente conectado em condição efluente, o sistema hidráulicamente conectado em condição influente e o sistema hidráulicamente desconectado.

Assim quando o nível subterrâneo intercepta o nível do canal, o sistema superfície-aquífero é dito hidráulicamente conectado, e nele, dependendo da distribuição do potencial hidráulico, pode haver uma condição efluente ou influente (Figuras 8a e 8b, respectivamente). Entretanto, quando há uma camada não-saturada entre o nível subterrâneo e o nível superficial, o sistema é dito hidráulicamente desconectado (figura 8c e figura 8d).

Para Silva (2007) no sistema hidráulicamente desconectado, pode haver uma elevação da linha freática abaixo do leito do rio, caso a taxa de recarga através da zona não-saturada no fundo do canal seja maior que a taxa de recarga em suas áreas laterais. Desta forma, ainda há interações entre o aquífero e a superfície líquida, ocorrendo uma redução no nível freático ocasionando perdas no canal. Essa interação pode ocorrer por influência da franja capilar, na qual a água ocupa os espaços na região não-saturada do solo acima da superfície do lençol freático. Assim, ao ser bombeada água do aquífero, a altura da franja capilar pode diminuir e afetar a contribuição subterrânea no escoamento do rio por meio da zona não-saturada. Apenas no caso de profundidades críticas do lençol freático (Figura 8d), pode ser desconsiderada a influência da ascensão capilar (BOUWER; MADDOCK, 1997).

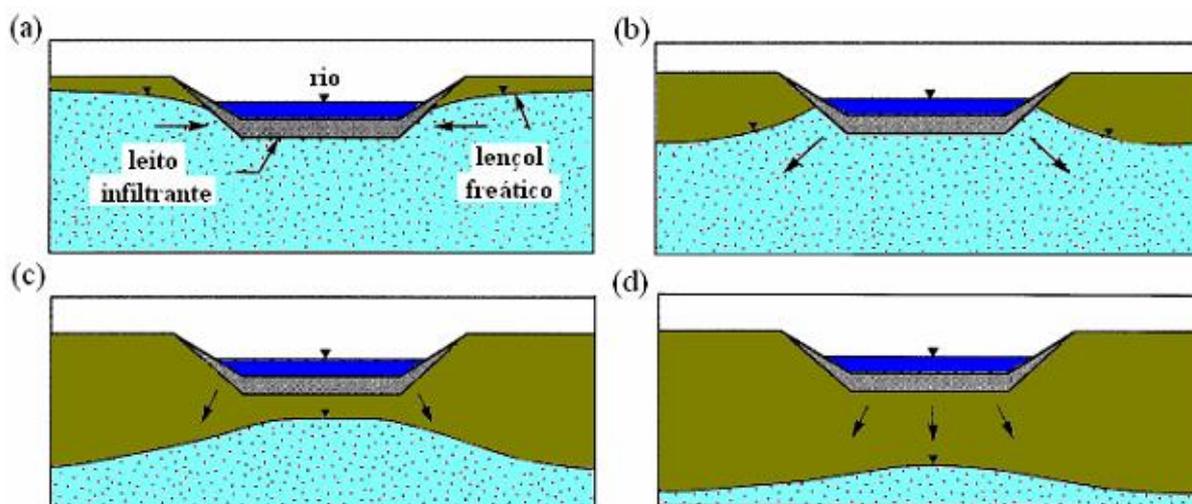


Figura 8: Relações entre as superfícies líquidas e o nível de água subterrâneo: (a) sistema superfície-aquífero hidráulicamente conectado (condição efluente); (b) sistema hidráulicamente conectado (condição influente); (c) sistema hidráulicamente

desconectado (nível freático alto); (d) sistema hidráulicamente desconectado (nível freático baixo). (Fonte: SILVA, 2007, apud SOPHOCLEOUS, 2002).

Um caso corriqueiro na interação entre quase todos os tipos de rios e aquíferos ocorre durante uma rápida elevação do nível da água na calha do rio, devido a chuvas intensas ou descargas de reservatórios. Desta forma, a água pode mover-se lateralmente na direção das margens dos rios, e se armazenar nessas zonas (armazenamento lateral) - figura 9. Durante o processo de retenção lateral, enquanto o nível d'água no rio não se eleva acima da sua calha, a maior parte do volume armazenado lateralmente a ele retorna após alguns dias ou semanas. Na medida em que o nível no rio se eleva, até ocupar a planície de inundação, a água pode infiltrar no solo e passar a contribuir para a recarga do aquífero. Neste caso, o retorno da água de recarga para o rio pode levar de semanas a anos, dependendo das características topográficas e geológicas na região (SILVA, 2007).

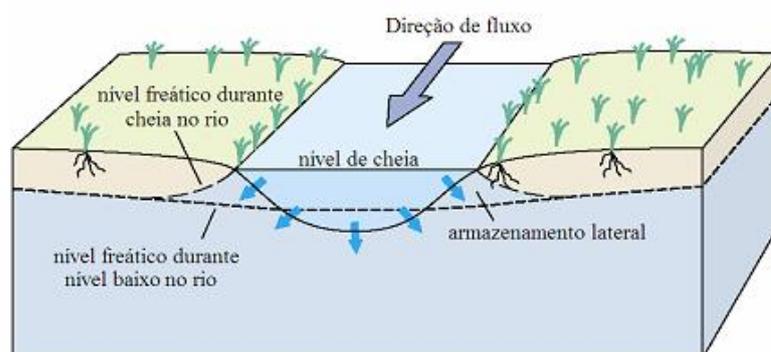


Figura 9: Interação entre rio-aquífero pelo armazenamento lateral (Fonte: SILVA (2007), adaptado de WINTER et al., 1998).

Segundo Silva (2007) os tipos de descarga da água subterrânea nos cursos fluviais, podem ser identificados três formas de rios: perene, intermitente e efêmero, os quais dependem da regularidade com que o aquífero contribui na vazão de base. Em rios perenes, a vazão de base é, aproximadamente, contínua no tempo, ao contrário dos rios intermitentes, os quais recebem água apenas durante certo período do ano, o que os torna influente ou efluente dependendo da época do ano. Já em rios efêmeros, o nível de água subterrânea encontra-se sempre abaixo do canal, o que o torna exclusivamente influente quando há escoamento.

Por fim, os efeitos ou relações entre a água subterrânea, lagos e banhados podem estabelecer três configurações de interação com as águas subterrâneas: condição efluente (figura 10a); condição influente (figura 10b) e condição

efluente/influente (figura 10c), sendo esta última configuração a mais freqüente (WINTER et al., 1998).

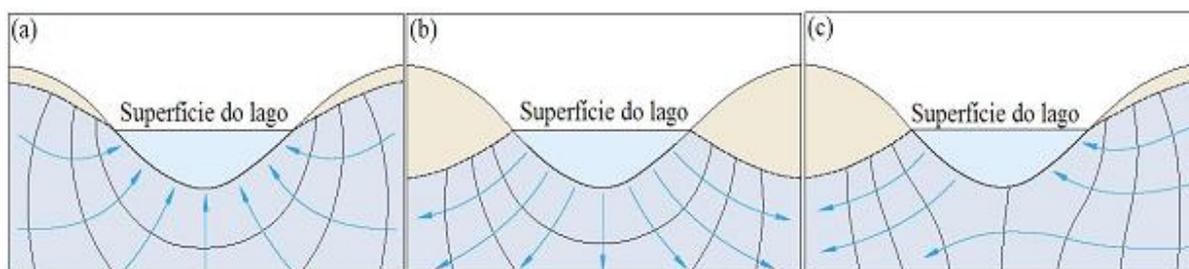


Figura 10: Condições de rede de fluxo em lagos /banhados: (a) condição efluente; (b) condição influente; (c) condição efluente/influente (Fonte: SILVA (2007), adaptado de WINTER, 1998).

Segundo Winter (1998) ainda que as configurações de fluxo superficial-subterrâneo em lagos sejam semelhantes às dos rios, as interações entre elas diferem em vários aspectos. Nos lagos, o nível da freático não altera-se tão rapidamente, assim, o armazenamento lateral é de menor importância; a evaporação em lagos é geralmente maior, devido a maior área superficial e a menor freqüência de reposição das águas; e os lagos freqüentemente têm em seus leitos uma quantidade maior de depósitos orgânicos, que podem afetar a distribuição de zonas de maior e menor permeabilidade e de trocas bioquímicas entre as águas superficiais e subterrâneas

Geralmente os banhados, situam-se em áreas onde há descarga de água subterrânea ou lugares onde a drenagem de água a partir da superfície é muito lenta. Ao contrário dos rios e lagos, no entanto, os banhados nem sempre ocupam áreas mais baixas do relevo ou depressões (Winter et al., 1998). Assim em áreas de maior declividade ou quando há mudanças na inclinação do lençol freático, o aquífero pode interceptar a superfície do terreno e nela descarregar diretamente, permitindo o crescimento da vegetação típicas de banhado (figura 11a); descontinuidades geológicas de sub-superfície podem também alterar o sistema de fluxo local e propiciar o afloramento da água (figura 11b). Outros tipos de banhados são formados ao longo do curso de rios, especialmente naqueles de menor velocidade (figura 11c). E em regiões de maior altitude ou regiões planas extensas, podem ser formados banhados de características influentes, cujo acúmulo de água se dá, predominantemente, pela contribuição de precipitações ou descarga de rios (figura 11d) (SILVA, 2007).

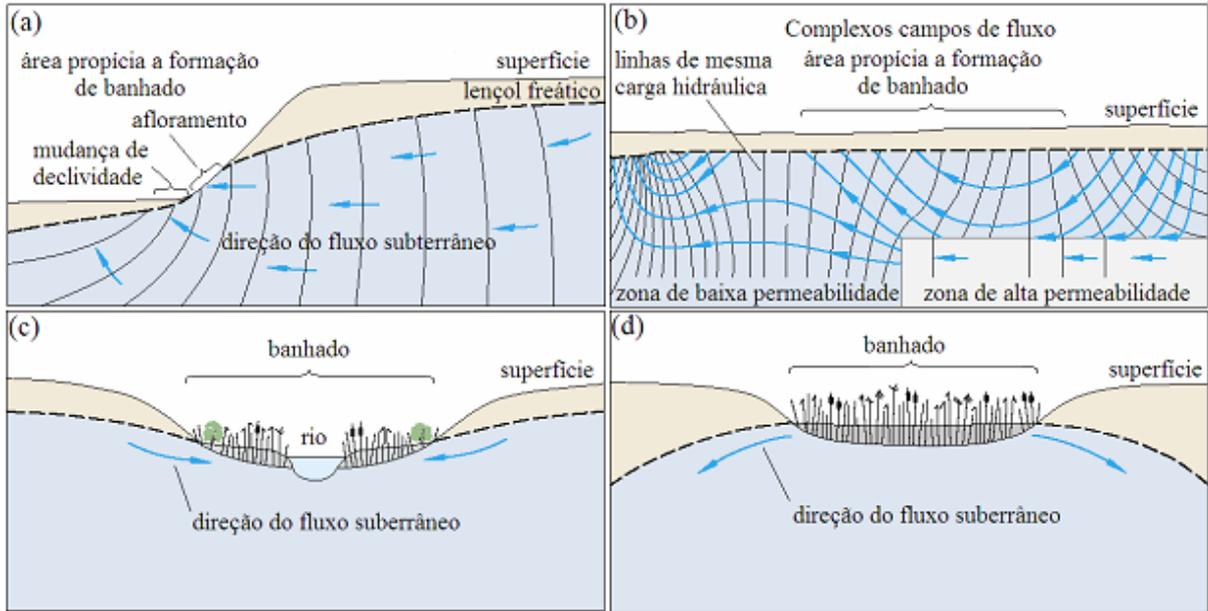


Figura 11: Interações entre banhados e fluxos subterrâneos de água: (a) em regiões de grande declividade ou com mudanças de inclinação do lençol; (b) em regiões de discontinuidades geológicas; (c) ao longo do curso de rios; (d) em regiões de maior altitude ou extensamente planas (Fonte: SILVA, 2007, adaptado de WINTER et al., 1998).

Muitos banhados e lagos dependem de um fluxo relativamente estável de contribuição subterrânea durante as mudanças climáticas, por isso, eles podem ser muito sensíveis aos efeitos da exploração intensiva de água subterrânea e às mudanças de uso do solo, que podem modificar a recarga e o fluxo subterrâneo de água para a sua área (SILVA, 2007).

2.3 Geologia da Água Subterrânea

No sistema geológico, a natureza e a distribuição dos aquíferos e aquíferos são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura das formações geológicas (FEITOSA, 2008).

A litologia trata da distribuição do tamanho dos grãos e do grau de compactação dos sedimentos ou rochas que constituem o arcabouço geológico.

Outro meio que controla o sistema geológico é a estratigrafia que trata as relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos que constituem o sistema geológico.

As camadas ou formações geológicas onde estão presentes às águas subterrâneas devem ser identificadas, assim como sua estrutura em termos de

capacidade de retenção e produção de água. Permitindo-se que as condições hidrológicas forneçam água ao subsolo, as camadas subterrâneas é que governarão sua distribuição e movimento. Mostrando portanto o importante papel da geologia na hidrologia das águas subterrâneas (TODD, 1967).

Em geral, as águas subterrâneas são armazenadas ou em rochas sedimentares porosas e permeáveis, ou em rochas não-porosas, mas fraturadas. Neste último caso, as fraturas geram um efeito físico similar ao da permeabilidade. Um caso menos frequente é o das rochas calcáreas, nas quais até mesmo a baixa acidez das águas da chuva é capaz de abrir verdadeiros túneis, por onde flui a água subterrânea.

Para o abastecimento de águas subterrâneas, os depósitos sedimentares granulares são da maior importância. As porosidades nesses depósitos dependem da forma, do arranjo das partículas, da distribuição granulométrica e do grau de cimentação e compactação. Nas formações consolidadas, a remoção do material mineral por dissolução e o grau de fraturamento, são importantes.

Os estudos das águas subterrâneas podem iniciar-se com a análise de sedimentos. Como exemplo os sedimentos pouco consolidados apresentam muitas vantagens do ponto de vista do aproveitamento de águas subterrâneas. Assim, as pesquisas para águas subterrâneas comumente começa com investigações neste tipo de material. Há fortes razões para esta preferência (DAVIS; DEWIEST, 1966) como:

1- Depósitos são fáceis de perfurar ou escavar, tornando a exploração mais rápida e barata;

2- Os depósitos encontram-se geralmente em lugares favoráveis com respeito à recarga de lagos e rios;

3- Os depósitos são mais propensos de serem encontrados em vales, onde os níveis de água subterrânea são próximos a superfície e onde, como consequência, as alturas de bombeamento são menores;

4- Suas permeabilidades são muito maiores que em outros materiais naturais, com a exceção de algumas rochas vulcânicas recentes e calcários cavernosos.

5- Os Sedimentos não consolidados têm, normalmente, produção específica maior que outros materiais;

Entre os sedimentos pouco consolidados, os principais são os aluviões, as dunas, alguns depósitos coluvionares e argilas e areias lacustrinos. Os solos residuais, embora não sejam depósitos sedimentares no sentido usual da expressão, tem muitas características hidrogeológicas em comum com aluviões e colúvios.

A distribuição nos depósitos aluvionares de argila, silte, areia e cascalho é muito complexa, devido o movimento dos leitos dos rios e às variações freqüentes de velocidade de sedimentação das partículas sólidas. Assim à grande variação das características texturais, as aluviões apresentam muita heterogeneidade na distribuição das propriedades hidráulicas.

Características como porosidade, permeabilidade, e produção específica são todos dependentes da forma, arranjo, distribuição dos tamanhos e cimentação das partículas constituintes dos sedimentos inconsolidados.

Na área dos sedimentos consolidados, os argilitos, folhelhos e siltitos e outras rochas detríticas de granulação fina geralmente apresentam 50% aproximadamente de todas as rochas sedimentares. Ainda que as rochas detríticas de granulação fina terem porosidades relativamente altas, suas permeabilidades apresentam valores bem baixos. A porosidade de sedimentos de granulação fina diminui com a profundidade e com o tempo, embora a relação não seja nem simples nem universal (DAVIS; DEWIEST, 1966).

As melhores rochas como aquíferos são aquelas que apresentam de regular a boa permeabilidade. Porque as rochas pouco permeáveis, como arenitos muito argilosos e siltitos, comportam-se como aquíferos, devido à sua baixa capacidade de transmissão de água. Os aquíferos formados por filitos, xistos, argilitos e folhelhos, são praticamente impermeáveis.

Para Paiva (2006) em alguns ambientes geológicos, pode existir uma zona local de saturação que terá seu nível acima do nível d'água regional. Esta situação pode ocorrer quando um pequeno estrato impermeável dentro da zona vadosa intercepta a água que percola verticalmente e causa o seu acúmulo sobre este estrato. A superfície superior destas águas subterrâneas neste caso é chamada superfície freática suspensa.

Portanto para a subsuperfície, existem todas as gradações, desde água fluindo livremente e água firmemente fixada na estrutura cristalina dos minerais. As águas abaixo da superfície do terreno ocorre geralmente em dois tipos de ambiente.

Primeiro uma zona de água vadosa e depois uma zona de água freática ou subterrânea. Na zona vadosa, existem três tipos separados de água: água do solo, água na zona intermediária vadosa e água capilar. A figura 12 mostra estas distribuições.

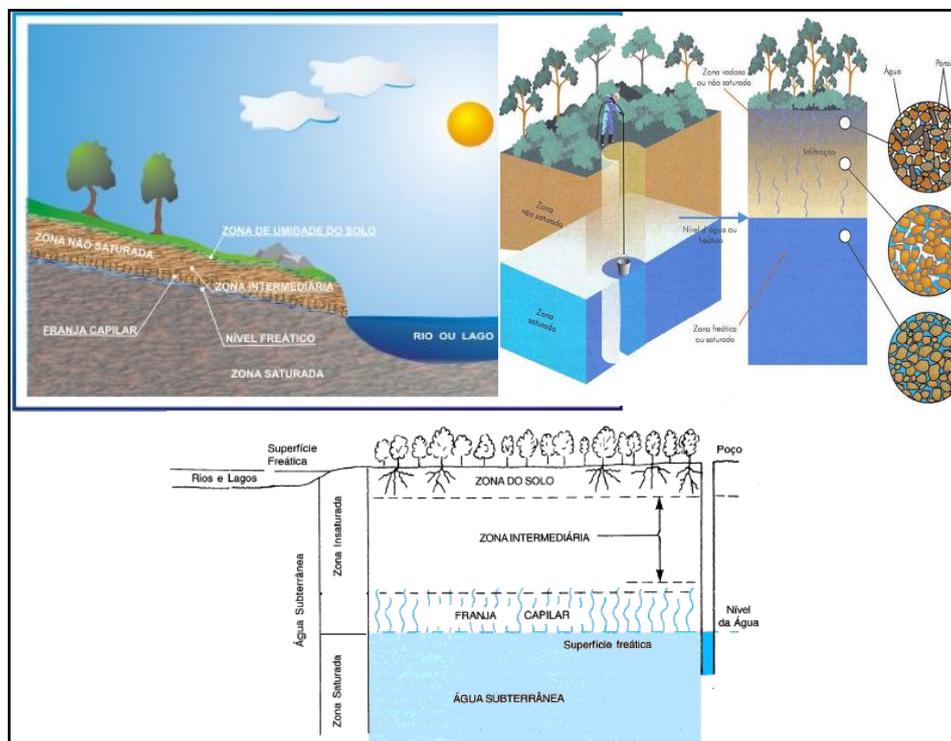


Figura 12 - Representação esquemática demonstrando as diferentes camadas existentes em subsuperfície e o comportamento da água subterrânea. Fonte: Teixeira (2000), Feitosa (2008), BOSCARDIN BORGHETTI et al. (2004) e HEATH, (1983).

A zona saturada ou zona de saturação, é a região abaixo da zona não saturada, isto é, limitada superiormente pela superfície freática em que todos os vazios (poros ou fraturas da rocha) estão todos preenchidos com água. A superfície freática é definida como o lugar geométrico dos pontos em que a água se encontra submetida à pressão atmosférica ou onde a pressão de referência é igual a zero. Portanto as águas atingem esta zona por gravidade, através dos poros ou fraturas até alcançar uma profundidade limite, onde as rochas estão tão saturadas que a água não pode penetrar mais.

A zona não saturada, também chamada de zona de aeração ou zona vadosa (“vadoso” deriva do latim “vadosus” que significa raso) situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno, ou seja, é a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona, pequenas quantidades de água distribuem-se uniformemente, sendo que as suas moléculas se aderem às superfícies dos grãos do solo. Tem alguma pequena porção (parte mais baixa da zona capilar) saturada

permanentemente, e outras em que ocasionalmente também pode ocorrer saturação, mas transcorrido algum tempo estas últimas deixam de estar saturadas ao perder água (CUSTODIO; LLAMAS, 1983). Nesta zona ocorre o fenômeno da transpiração pelas raízes das plantas, de filtração e de autodepuração da água, essa zona divide-se em três partes:

Zona capilar ou franja de capilaridade, que se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água, ou seja, é a região mais próxima ao nível d'água do lençol freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada logo abaixo. A sua espessura depende principalmente da distribuição de tamanho dos poros e da homogeneidade do solo. Como a umidade decresce de baixo para cima, na parte inferior, próximo da superfície freática, os poros encontram-se praticamente saturados. Nas partes mais superiores, somente os poros menores estão preenchidos com água, de modo que o limite superior dessa zona tem uma forma irregular, também é influenciada pelas mudanças no nível d'água e pela recarga.

Zona intermediária, compreendida entre a zona de umidade do solo e da franja capilar, com umidade menor do que nesta última e maior do que a da zona superficial do solo, ou seja, é a região compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o limite das raízes das plantas. A umidade existente nessa zona origina-se de água capilar isolada, fora do alcance das raízes, e de água de retenção por forças capilares. Em áreas onde o nível freático está próximo da superfície, a zona intermediária pode não existir, pois a franja capilar atinge a superfície do solo. São brejos e alagadiços, onde há uma intensa evaporação da água subterrânea.

Zona de umidade do solo ou zona de água do solo ou também zona de evapotranspiração, é a parte mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. situada entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno. A sua espessura, portanto, pode variar de poucos centímetros (na ausência de cobertura vegetal) até vários metros em regiões de vegetação abundante. A água contida nesta zona é utilizada pelas plantas, e pode ser perdida por transpiração, evaporação e percolação, quando ocorrer uma saturação excessiva. Assim esta zona serve de suporte fundamental da biomassa vegetal natural ou cultivada da Terra e da interface atmosfera / litosfera.

A Hidrologia da água subterrânea depara-se com as camadas confinantes da crosta terrestre. Essas camadas são unidades geológicas que restringem o movimento da água subterrânea e/ou que proporcionam a ocorrência da água subterrânea.

A seguir descrevem-se as camadas e o seu comportamento hidrológico:

Aquíferos - (do Latim *aqua* + *ferre*) que significa “suportar a água”: São formações subterrâneas contendo água com permeabilidade suficiente para transmitir e produzir água em quantidades aproveitáveis, mais especificamente, são unidades rochosas ou de sedimentos, porosas e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea passíveis de, se economicamente viável, serem explorados pela sociedade (CLEARY, 2007).

Como exemplos de materiais aquíferos têm-se os aluviões dos rios, formados por camadas de areias e cascalhos, arenitos pouco cimentados, alguns tipos de rochas vulcânicas, formações calcárias muito carstificadas, gnaisses fraturados, etc.

A conceituação fornecida pela Resolução nº15/2001 do CNRH diz que aquífero é o corpo hidrogeológico com capacidade de acumular (reservatório) e transmitir água através de seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos.

Aquícludes - (do Latim *aqua* + *cludere*) que significa “água fechada”: São unidades geológicas que, apesar de saturadas, e com grandes quantidades de água absorvida lentamente, são incapazes de transmitir um volume significativo de água com velocidade suficiente para abastecer poços ou nascentes, por serem rochas relativamente impermeáveis, ou seja, é uma formação que contém água em seu interior, podendo até estar saturada, mas não a transmite, tornando impraticável sua exploração. Formam limites superiores e/ou inferiores de um sistema de fluxo de água subterrânea. Exemplos de aquícludes são as argilas, os xistos e os filitos.

Aquíardos - (do Latim *aqua* + *tardus*) que significa “lentidão das águas”: São formações geológicas que produzem água, mas em quantidades insuficientes até mesmo para atendimento de demandas modestas, mas, que em áreas pobres em água pode ser chamado de aquífero, mesmo produzindo pequenas quantidades de água, ou seja, são unidades geológicas que podem armazenar água e transmitir lentamente de um para outro aquífero, mas não são capazes de transmitir

quantidades economicamente viáveis para fontes e poços de exploração, porém, podem ser de grande valia na recarga de outras formações aquíferas.

Aquifugos - (do Latim *aqua* + *fugere*) que significa “fugir da água”: São unidades geológicas que não apresentam poros interconectados e não absorvem e nem transmitem água, ou seja, é um extrato ou formação geológica, que nem contém nem transmite água. Incluem-se neste grupo, todas as rochas duras, cristalinas, metamórficas e vulcânicas, sem fraturamento ou alteração. Esses materiais podem aparecer, na natureza, isolados ou formando pacotes de dois ou mais estratos, ocorrendo a profundidades de poucos metros a centenas de metros. (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 1998).

Portanto a utilização dos termos aquífero e aquitarde para expressar a comparação da capacidade de produção de água de unidades rochosas, diz que a unidade com mais produção de água corresponde ao aquífero, e a menos produtiva ao aquitarde. Exemplificando, numa seqüência de estratos intercalados de arenitos e siltitos, os arenitos são mais permeáveis do que os siltitos e correspondem ao aquífero, e os siltitos que são menos permeáveis, correspondem ao aquitarde. Em outra seqüência, formada de siltitos e argilitos, os siltitos podem representar o aquífero e os argilitos, o aquitarde.

Assim o aquitarde é correspondente à camada ou unidade geológica relativamente menos permeável numa determinada seqüência estratigráfica. Bons aquíferos são os materiais com média a alta condutividade hidráulica, como sedimentos inconsolidados (por exemplo, cascalhos e areias), rochas sedimentares (por exemplo, arenitos, conglomerados e alguns calcários), além de rochas vulcânicas, plutônicas e metamórficas com alto grau de fraturamento (TEIXEIRA, 2000).

2.4 Tipos de Aquífero

O aquífero é uma camada hidrogeológica, formada por rochas permeáveis, que armazena água em seus poros ou fraturas. Outro conceito refere-se a aquífero como sendo, somente, o material geológico capaz de servir de depositório e de transmissor da água aí armazenada. Assim, uma litologia só será aquífera se, além de ter seus poros saturados (cheios) de água, permitir a fácil transmissão da água

armazenada. E quando solos ou rochas apresentam transmissividade de água em sua zona saturada, de forma economicamente viável, constituem um aquífero.

Para Grabher et al. (2006), os aquíferos são formações geológicas, capazes de armazenar e fornecer significativas quantidades de água, sendo que as principais formações portadoras de aquíferos são as constituídas de rochas sedimentares.

A água nos aquíferos existem sob duas condições físicas completamente diferentes. A primeira condição a mais comum, é quando a superfície das águas subterrâneas está exposta à atmosfera. Este tipo de aquífero é chamado de não-confinado, livre ou freático. A segunda condição é quando a água subterrânea ocorre sob condições de confinamento, em que ela está isolada da atmosfera no ponto de descarga por formações geológicas impermeáveis, e geralmente sujeitas a pressões maiores que a pressão atmosférica. Condições de não-confinamento existem, entretanto, em áreas de recarga de aquíferos confinados.

2.4.1 Classificação dos aquíferos segundo a pressão da água

Os aquíferos, conforme a pressão da água são classificados em:

Aquíferos Livres ou não-confinados: a água está sob a pressão exercida pela camada sobrejacente de água e sob a pressão atmosférica. Devido à pressão atmosférica ser mais ou menos constante em um local, ela usualmente não é levada em conta no cálculo da energia disponível para causar o movimento das águas subterrâneas (DRISCOLL, 1995). Isto é os aquíferos livres têm sua superfície freática em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Segundo Oliveira e Souza (2008), estes são os aquíferos mais comuns e mais explorados pelas populações, sendo também os que mais apresentam problemas de contaminação.

Aquíferos livres são aqueles cujo topo é demarcado pelo nível freático, estando em contato com a atmosfera (figura 13). Normalmente ocorrem a profundidades de alguns metros a poucas dezenas de metros da superfície, associados ao regolito, sedimentos de cobertura ou rochas (TEIXEIRA et al., 2000).

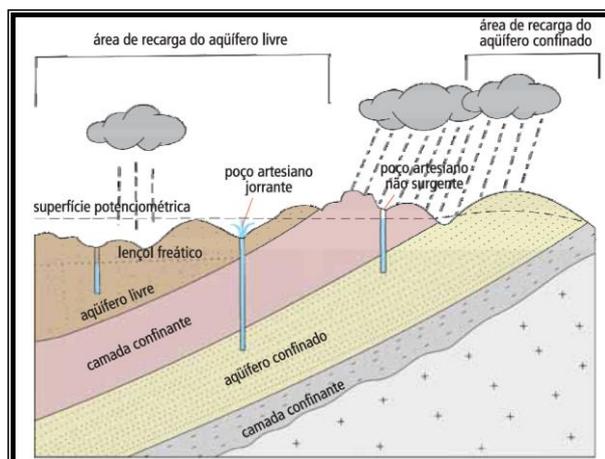


Figura 13: Aquíferos com respectivos níveis de pressão. Fonte: IRITANI; EZAKI (2008).

Aquíferos Confinados: é quando a presença de uma camada de menor permeabilidade (confinante) que submete as águas a uma pressão superior à atmosférica, caso da porção central do Sistema Aquífero Guarani (MMA, 2007). Nos aquíferos confinados os poços tubulares profundos podem apresentar artesianismo, isto é, a água jorra do poço sem necessidade de equipamento de bombeamento (figura 13).

Os Aquíferos confinados ocorrem quando um estrato permeável (aquífero) está confinado entre duas unidades pouco permeáveis (aquitardes) ou impermeáveis. Representam situações mais profundas, a dezenas, várias centenas ou até milhares de metros de profundidade, onde a água está sob ação da pressão não somente atmosférica, mas também de toda a coluna de água localizada no estrato permeável (TEIXEIRA et al., 2000).

Água subterrânea também pode ocorrer sob condições de confinamento, encontrando-se isolada da atmosfera no ponto de descarga por formações geológicas impermeáveis. Geralmente sujeitas a pressões maiores que a pressão atmosférica. Então quando um poço é perfurado através de uma camada de cobertura impermeável em um aquífero confinado, a água se eleva no poço a um nível acima do topo do aquífero. O nível d'água no poço representa a pressão de confinamento no topo do aquífero. Pressão de confinamento é definida como a distância vertical entre o nível d'água no poço e o topo do aquífero. Esta é equivalente à pressão hidrostática, expressada em metros de coluna de água, e recebe o nome de nível potenciométrico. Sob condições de confinamento, a superfície potenciométrica é uma superfície imaginária representando a pressão de

confinamento (pressão hidrostática) em todas as partes do aquífero (GOMES, 2006).

Existe uma subdivisão de cada tipo de aquífero diz respeito à permeabilidade das camadas limítrofes dos aquíferos. Contendo dois subtipos: drenantes e não drenantes. Um aquífero confinado não drenante é aquele em que suas camadas limítrofes, superior e inferior, são impermeáveis.

Para Feitosa (2008) o aquífero confinado drenante tem pelo menos uma destas camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos pelo topo e/ou pela base. A exemplo dos aquíferos confinados, os aquíferos livres também se classificam em drenantes (ou base semipermeável) e não drenantes (ou base impermeável).

Tanto em aquífero livre como no confinado há a presença da zona vadosa, da zona saturada e da franja capilar. Porém, é no aquífero livre que as forças capilares são mais eminentes e tem-se a franja capilar mais definida.

Aquíferos Suspensos (figura 14): É um tipo especial de aquífero que ocorrem quando a água infiltrada encontra uma barreira, com dimensão restrita na zona não saturada, acumulando-se e ficando ali armazenada temporariamente. Em épocas sem chuva, quando não há recarga, estes aquíferos suspensos podem se esgotar (IRITANI; EZAKI, 2008).

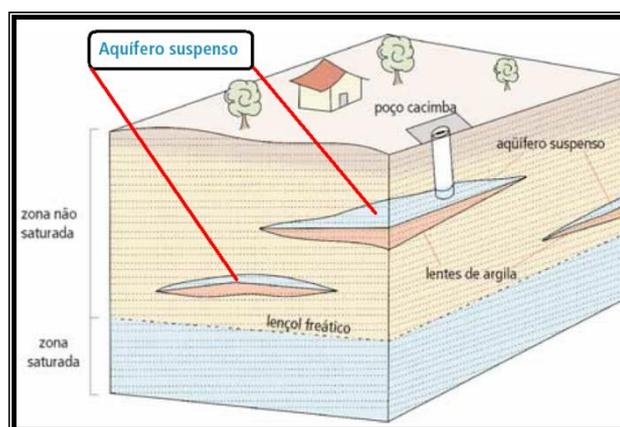


Figura 14: Aquífero suspenso, (IRITANI; EZAKI, 2008).

As superfícies por onde ocorre o abastecimento do aquífero é chamada zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. O escoamento de parte da água do aquífero ocorre na zona de descarga (ANA, 2001).

Zona de recarga direta: são aquelas regiões onde as águas da chuva se infiltram diretamente no aquífero, através de suas áreas de afloramento e fissuras

de rochas sobrejacentes. Portanto, a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Nos aquíferos confinados, o reabastecimento ocorre preferencialmente nos locais onde a formação portadora de água aflora à superfície.

Zona de recarga indireta: é aquela área onde o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem (filtração vertical) superficial das águas e do fluxo subterrâneo indireto, ao longo do pacote confinante sobrejacente, nas áreas onde a carga potenciométrica favorece os fluxos descendentes.

Zona de descarga: são os lugares por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios e jorrando com pressão por poços artesianos.

Nas áreas planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres ocorrem as maiores taxas de recarga. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada (REBOUÇAS et al., 2002).

2.4.2 Classificação dos aquíferos quanto aos tipos de porosidade (geologia do material saturado)

Ela é referente a litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras) é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua qualidade como reservatório. Essa litologia é decorrente da sua origem geológica, que pode ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcáreas), determinando os diferentes tipos de aquíferos. E estes tipos de aquíferos, conforme sua porosidade (figura 15) são classificados em:

- Porosos, granulares ou intergranulares: areias e cascalheiras, (figura 15a);
- Fissurais ou de fraturas: rochas magmáticas e metamórficas, (figura 15b);
- Cársticos ou de condutos: rochas calcárias, (figura 15c).

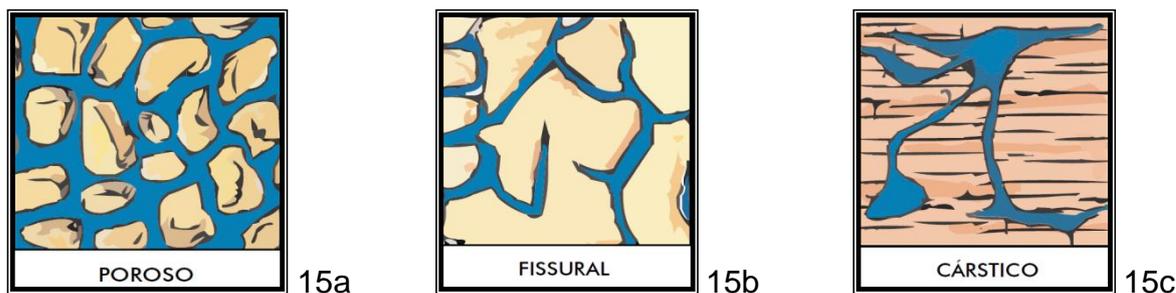


Figura 15: Tipos de aquíferos em diferentes tipos de rochas e sua porosidade. Fonte: MMA (2007).

Aquífero poroso ou sedimentar - são aqueles formados por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde o Fluxo (circulação) da água se faz nos espaços (poros) formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada, isto é, ocorrem no regolito e em rochas sedimentares clásticas com porosidade primária. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. Esses aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos. Os arenitos, de modo geral, são excelentes aquíferos deste tipo. A produtividade em água dos arenitos diminui com o seu grau de cimentação. Uma particularidade desse tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia.

Salienta-se que existem aquíferos porosos como maior ou menor homogeneidade granulométrica. Como exemplo a Bacia Sedimentar do Paraná que é constituída por diferentes formações rochosas sedimentares que apresentam, entre suas características de identificação, diferentes graus de homogeneidade granulométrica. Neste caso, têm-se como exemplos formações geológicas pertencentes ao SAG. A Formação Botucatu apresenta granulometria selecionada por tamanho ou mais homogênea, devido a sua origem eólica. Já a Formação Pirambóia apresenta granulometria com maior grau de heterogeneidade devido sua origem eólico-fluvial que contem frações de silte e argila (CPRM, 2008).

Aquífero fraturado ou fissural - formam-se em consequência de deformação tectônica, na qual processos de dobramento e falhamento geram sistemas de fraturas, normalmente seladas, devido à profundidade, ou seja, ele é formado por rochas ígneas, cristalinas ou metamórficas, podendo ser duras e/ou maciças, onde o fluxo (circulação) da água se faz nas fraturas, falhas e fendas,

geradas devido aos movimentos tectônicos. Ex.: basalto, granitos, gabros, etc. Salienta-se que a capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água. O fluxo de água somente se instala quando as fraturas que compõem o sistema estão conectadas. Poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora, sendo que a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão somente, desse poço interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Nesses aquíferos, a água só pode fluir onde houverem fraturas, que, quase sempre, tendem a ter orientações preferenciais. São ditos, portanto, aquíferos anisotrópicos. Fraturas não tectônicas, do tipo disjunção colunar em rochas vulcânicas, como nos derrames de basaltos, podem ser geradas durante as etapas de resfriamento e contração, possibilitando que estas rochas tornem-se posteriormente importantes aquíferos e/ou condutos de recarga.

Aquífero cárstico (Karst) ou Aquíferos de condutos - caracterizam-se pela porosidade cárstica, geradas pela dissolução de rochas carbonáticas ou seja, ele é formado em rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando, nesse caso, verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais. As rochas são os calcários, dolomitos e mármore. Portanto constituem aquíferos com grandes volumes de água, mas extremamente vulneráveis à contaminação, devido à baixa capacidade de filtração deste tipo de porosidade (TEIXEIRA et al., 2000).

Portanto, a importância dos aquíferos mostra que ele ajudam a manter os cursos de águas superficiais estáveis (função de produção), ajudando a evitar seu transbordamento, absorvendo o excesso da água da chuva intensa (função de regularização). Assim segundo Rebouças (2002) os aquíferos podem cumprir as seguintes funções:

- Função de produção: corresponde à sua função mais tradicional de produção de água para o consumo humano, industrial ou irrigação.
- Função de estocagem e regularização: utilização do aquífero para estocar excedentes de água que ocorrem durante as enchentes dos rios, correspondentes à capacidade máxima das estações de tratamento durante os períodos de demanda baixa, ou referentes ao reuso de efluentes domésticos e/ ou industriais.

- Função de filtro: corresponde à utilização da capacidade filtrante e de depuração bio-geoquímica do maciço natural permeável. Para isso, são implantados poços a distâncias adequadas de rios perenes, lagoas, lagos ou reservatórios, para extrair água naturalmente clarificada e purificada, reduzindo substancialmente os custos dos processos convencionais de tratamento.

- Função ambiental: a hidrogeologia evoluiu de enfoque naturalista tradicional (década de 40) para hidráulico quantitativo até a década de 60. A partir daí, desenvolveu-se a hidroquímica, em razão da utilização intensa de insumos químicos nas áreas urbanas, indústrias e nas atividades agrícolas. Na década de 80 surgiu a necessidade de uma abordagem multidisciplinar integrada da geohidrologia ambiental.

- Função transporte: o aquífero é utilizado como um sistema de transporte de água entre zonas de recarga artificial ou natural e áreas de extração excessiva.

- Função estratégica: a água contida em um aquífero foi acumulada durante muitos anos ou até séculos e é uma reserva estratégica para épocas de pouca ou nenhuma chuva. O gerenciamento integrado das águas superficiais e subterrâneas de áreas metropolitanas, inclusive mediante práticas de recarga artificial com excedentes da capacidade das estações de tratamento, os quais ocorrem durante os períodos de menor consumo, com infiltração de águas pluviais e esgotos tratados, originam grandes volumes hídricos. Esses poderão ser bombeados para atender o consumo essencial nos picos sazonais de demanda, nos períodos de escassez relativa e em situações de emergência resultantes de acidentes naturais, como avalanches, enchentes e outros tipos de acidentes que reduzem a capacidade do sistema básico de água da metrópole em questão.

- Função energética: utilização de água subterrânea aquecida pelo gradiente geotermal como fonte de energia elétrica ou termal.

- Função mantenedora: mantém o fluxo de base dos rios (WREGG, 1997).

2.5 Granulometria, Porosidade e Rendimento Específico

A textura do solo é relativa a proporção do tamanho das partículas minerais do solo. A textura constitui-se no fator mais importante do solo, pois esta característica não pode ser modificada e pode determinar o valor econômico (GAVANDE, 1976).

Segundo Kiehl (1979) a textura do solo é estudada pela análise granulométrica, que permite classificar os componentes sólidos do solo em classes de acordo com os seus diâmetros, sendo divididos em areia, silte e argila.

Os parâmetros hidráulicos do solo definem a capacidade de água que pode ser infiltrada e armazenada nas zonas não saturadas e saturadas do solo (VILELLA; MATTOS, 1975). A dinâmica da água no solo está relacionada com diversas propriedades hidráulicas, entre elas estão a porosidade e o rendimento específico (Sy).

Para o processo de variação de nível ou armazenamento em aquífero livre (sujeito à pressão atmosférica), a porosidade é a mais importante das propriedades físicas dos solos ou rochas, a ser determinada.

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra (porosidade primária). Além da porosidade primária, há aquela referente às fraturas e cavidades de dissolução (porosidade secundária), as quais resultam de uma gama de processos físicos e químicos. Estas formas de porosidades são apresentadas na figura 16.

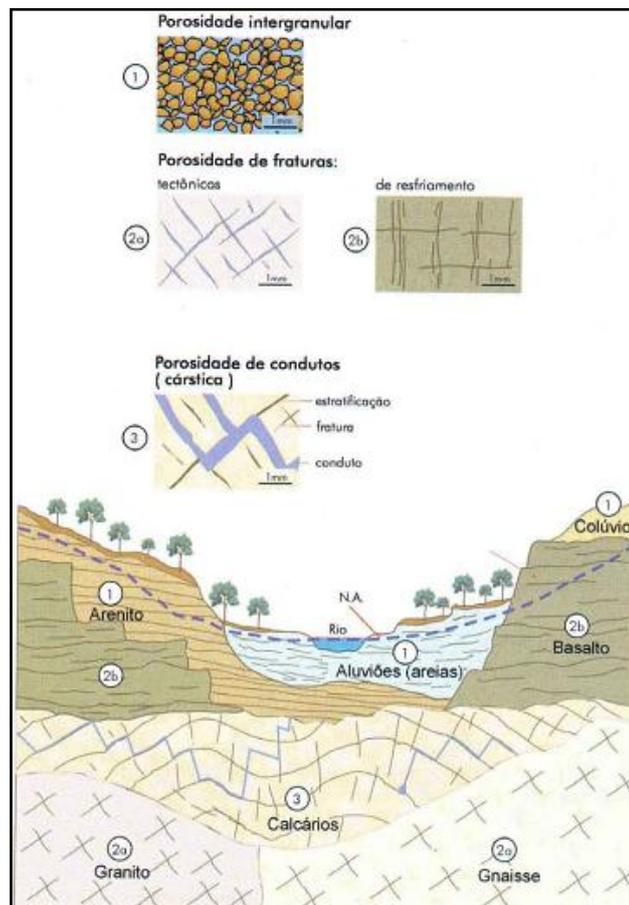


Figura 16: Os três tipos fundamentais de Porosidade conforme diferentes materiais numa seção geológica. Fonte: TEIXEIRA (2000) e CUSTÓDIO; LLAMAS (1983).

Em muitas rochas e solos, os espaços porosos já estão parcialmente ocupado por água aderida antes da elevação do nível do aquífero. Portanto a água poderá infiltrar somente na porção de poros que não estava previamente saturada. Nos períodos de rebaixamento do nível do aquífero, os poros não são drenados completamente, mas certa quantidade de água fica aderida aos grãos.

A qualidade da estrutura do solo tem sido comumente analisada por parâmetros como a porosidade e a densidade. Esses parâmetros são de fácil

determinação e possibilitam a verificação do efeito de sistemas de manejo sobre a estrutura do solo.

Para um mesmo solo, a porosidade (tabela 2) é inversamente proporcional à densidade do solo. Segundo Hillel (1980), a porosidade total expressa o volume poroso do solo, mas não demonstra a distribuição dos poros. Assim, para melhor caracterização da porosidade do solo realiza-se uma divisão conforme o tamanho.

Oliveira (1968) considera como limite de separação entre a macro e microporosidade uma tensão de 0,6 metros de coluna d'água (mca) ou 6 kPa, a qual corresponde aos poros de diâmetros maiores ou iguais a 0,05 mm. Assim a forma mais usual de classificação é a divisão em macroporos e microporos. Os macroporos estão situados nos espaços interagregados e são responsáveis pela infiltração de água, trocas gasosas com a atmosfera e é onde ocorre o desenvolvimento radicular das plantas. Os microporos são capilares intra-agregados com diâmetro menor que 0,05 mm, responsáveis pela retenção da água no solo. Quanto menor o diâmetro dos poros, maior é a força de retenção da água (HILLEL, 1980).

Para Brady; Weill (2002) a divisão dos diâmetros da porosidade do solo são: macroporo, quando o diâmetro do poro for maior que 0,08 mm. Se o poro for menor ou igual a 0,08 mm, o poro é denominado microporo. Segundo o autor, os microporos são conhecidos como os poros capilares responsáveis pela retenção da água no solo. No entanto, os macroporos representam os poros responsáveis pela drenagem e aeração do solo.

Tabela 2: Volume de poros e tamanho de partículas em sedimento. Fonte: (TEIXEIRA, 2000)

Material	Tamanho das partículas, mm	Porosidade %	Permeabilidade
Cascalho	7 a 20	35,2	Muito alta
Areia grossa	1 a 2	37,4	Alta
Areia fina	0,3	42	Alta a média
Siltos e argila	0,04 a 0,006	50 a 80	Baixa a muito baixa

Geralmente os macroporos são poros entre os agregados, enquanto os microporos são poros que estão dentro dos agregados. Portanto a porosidade do solo interfere na aeração, condução e retenção de água, resistência à penetração e à ramificação de raízes. Com isso, conseqüentemente, interferem no

aproveitamento da água e dos nutrientes disponíveis para as plantas (RIBEIRO, 2007).

Para Millar (1988) o rendimento específico, equivale à macroporosidade do material, que pode ser determinado pela diferença entre os conteúdos de água no solo na saturação e na capacidade de campo.

Portanto o rendimento específico (S_y) do solo ou rocha (Equação 1), também denominado de porosidade útil, é a taxa de volume de água que após a saturação pode ser drenada pela gravidade para seu próprio volume, pois:

$$S_y = \frac{V_g}{V_t}$$

Equação 1: Equação do rendimento específico (S_y)

onde V_g é o volume de água drenada e V_t é o volume total da rocha ou solo. Assim Johnson (1967) determinou a média e o intervalo de variação do S_y utilizando diferentes técnicas e vários experimentos para cada classe de textura dos materiais, como apresentado na tabela 3. A variabilidade do coeficiente de rendimento específico, mais acentuada nos materiais mais grosseiros, é atribuída à heterogeneidade natural dos materiais geológicos, aos métodos utilizados e à quantidade de tempo destinada para a sua determinação.

Portanto, este coeficiente não é constante, variando principalmente de acordo com a profundidade do lençol freático.

Tabela 3 - Variação do rendimento específico de acordo com a textura do material (Fonte: JOHNSON, 1967).

Material	Rendimento específico (%)			Número de determinações
	Mínimo	Média	Máximo	
Argila	0	2	5	15
Argilo-arenoso	3	7	12	12
Silte	3	18	19	16
Areia fina	10	21	28	17
Areia média	15	26	32	17
Areia grossa	20	27	35	17
Cascalho	20	25	35	15
Cascalho fino	21	25	35	17
Cascalho médio	13	23	26	14
Cascalho grosso	12	22	26	13

No Glossário de Termos Hidrológicos da Agência Nacional das Águas (ANA), os termos porosidade efetiva (n_e) e rendimento específico (S_y) são considerados sinônimos, que os define como a relação entre o volume de água que um material permeável previamente saturado pode drenar por gravidade e o volume total do material. Esta propriedade é expressa como uma porcentagem da unidade de volume total da amostra do material inicialmente saturado.

Para Ramos et al. (1989), este sinônimo é inadequado, uma vez que a porosidade efetiva também é usada, para indicar os espaços porosos interconectados, através dos quais ocorre o fluxo saturado, e seu valor pode ser diferente do rendimento específico. Tal fato ocorre principalmente em solos que apresentam poros não interconectados ou com água imóvel, também chamados *dead end pores* (figura 17), o que resulta em uma porosidade efetiva para o fluxo menor que o rendimento específico.

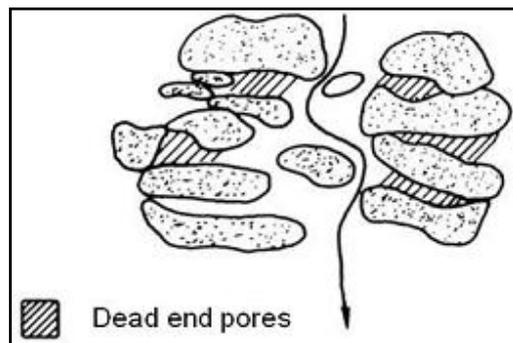


Figura 17: Representação do conceito de poros com água imóvel (*dead end pores*). Fonte: Ramos et al. (1989).

Onde as áreas hachuradas representam os poros com água imóvel (*dead end pores*) que serão drenadas por gravidade e, assim, este valor será incluído no rendimento específico. Entretanto, essas áreas não estão disponíveis como espaços porosos interconectados e, desta forma, não seriam incluídas na definição de porosidade efetiva. Portanto, a porosidade efetiva é igual ou menor que o rendimento específico.

Para solos arenosos ou outros tipos de solo que não possuam água imóvel em quantidade apreciável, não existe distinção entre os dois usos de porosidade efetiva e, pode-se assumir que a porosidade efetiva é igual à vazão específica (RAMOS et al., 1989). A figura 18 apresenta os conceitos de porosidade total (n), rendimento específico (S_y) e retenção específica (S_r), para um aquífero freático formado por solo arenoso.

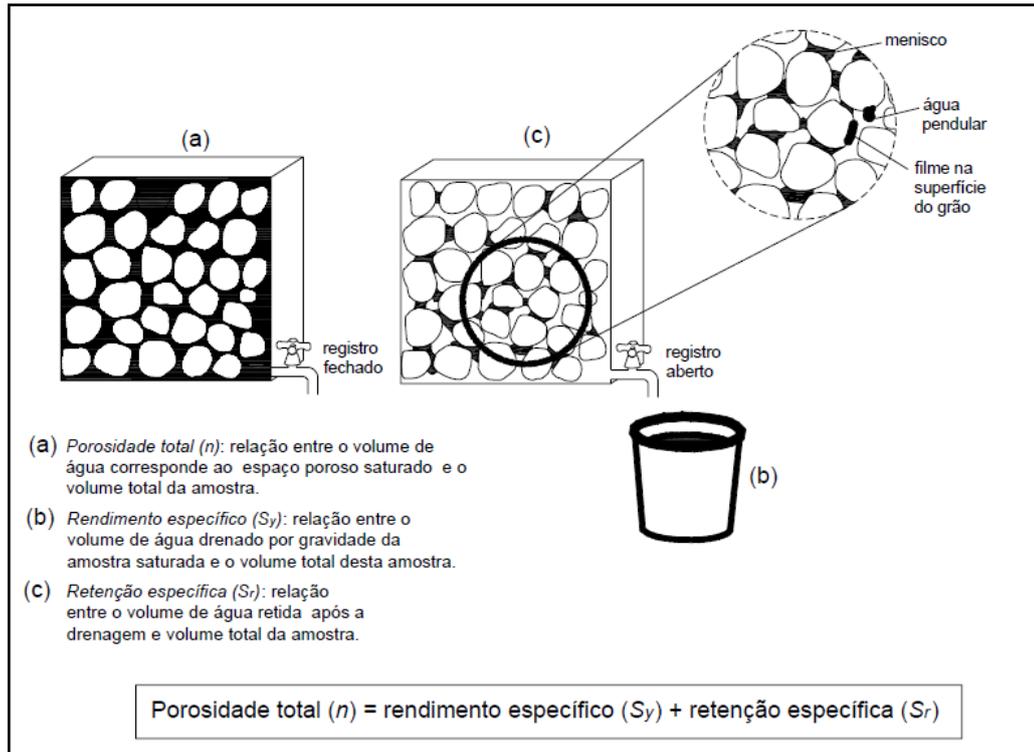


Figura 18: Desenho do esquema simplificado e conceitual esclarecendo o conceito de porosidade total, rendimento específico e retenção específica em aquífero arenoso não confinado. Fonte: YOUNGER (2007).

Assim a água retida na zona não saturada depois de drenada sob a ação da gravidade é denominada retenção específica (S_r) e corresponde numericamente à diferença entre a porosidade total (n) e o rendimento específico (S_y). Esta água que fica nos poros após a drenagem está presa por atração de forças eletrostáticas entre as moléculas de água e a superfície dos grãos minerais. Os poros estreitos favorecem a retenção da umidade na zona não saturada.

Portanto a porosidade e o rendimento específico constitui um parâmetro de grande importância no estudo da variação da altura do aquífero freático e nos estudos de modelos matemáticos relacionados a aquíferos.

2.6 Precipitação

O regime hidrológico de uma região é determinado por suas características físicas, geológicas e topográficas, e por seu clima. A precipitação, por ser a principal entrada, torna-se o mais importante fator climático do balanço hidrológico de uma região, bem como sua distribuição e modos de ocorrência (VILLELA; MATTOS, 1975).

O principal mecanismo natural de restabelecimento dos recursos hídricos da superfície terrestre, é a precipitação, nas formas de chuva, neve e granizo (TUBELIS e NASCIMENTO, 1937). Assim a chegada da água atmosférica que atinge a superfície terrestre em estado líquido ou sólido recebe o nome de precipitação. E como citado acima é o componente mais importante do ciclo hidrológico, tendo em vista que constitui a principal fonte das descargas dos rios e da recarga dos aquíferos (MANOEL FILHO, 2008).

Os ciclos ou regime das chuvas são a chave na determinação da sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, ou seja, se eles podem oferecer abastecimento de água confiável a longo prazo. Embora aquíferos potenciais possam ser encontrados em muitas partes do mundo, a recarga pode não ser suficiente para atender o ritmo da demanda (DRISCOLL, 1995).

Com poucas exceções, a utilização a longo prazo de abastecimento de águas subterrâneas deve ser governada pelas taxas de recarga em diferentes escalas, que podem ser: local e regional. Em áreas de precipitação e recarga limitadas, cuidado deveria ser tomado na determinação de taxas de rebaixamento adequadas, para que o rebaixamento não exceda a recarga dos aquíferos (DRISCOLL, 1995).

Comumente, muitos rios e lagos perenes são suportados pelo nível das águas subterrâneas. Muitos sedimentos próximos à borda de lagos e às margens de rios são altamente permeáveis, assim a água pode infiltrar e/ou percolar facilmente para o sistema aquífero, uma vez que o rio ou lago tenha se elevado temporariamente acima do lençol freático. Esta recarga ocorre durante e algum tempo após a chuva.

Por muitos anos, o nível das águas subterrâneas pode sustentar o nível dos lagos e rios, porém, nos períodos de muita chuva, os rios podem fornecer grandes

volumes de água para recarregar os aquíferos. Durante períodos de seca, estas águas irão sustentar os recursos hídricos superficiais (DRISCOLL, 1995).

Ao contrário das outras variáveis meteorológicas, a precipitação, é um fenômeno descontínuo, que varia no espaço e no tempo. Para que a precipitação ocorra é necessário que haja ascensão de uma massa de ar na atmosfera, para que ela esfrie e alguns dos seus conteúdos úmidos condensem e caiam sobre a superfície terrestre. As três principais formas de ascensão das massas são as frontais, onde o ar quente é ascendido sobre o ar mais frio por passagem frontal; as convectivas, onde o ar é puxado para cima por ação convectiva, provocado por um aquecimento das massas de ar nas proximidades da superfície do solo; e as orográficas, onde uma massa de ar sobe para passar sobre uma cadeia de montanhas (VILLELA; MATTOS, 1975).

Existem muitas maneiras de medir a precipitação em uma determinada área. As formas mais conhecidas e utilizadas são através de aparelhos denominados de pluviômetros e pluviógrafos, sendo o primeiro mais utilizado do que o segundo devido ao baixo custo. Santos et al. (2001) mencionam a utilização de radares e imagens de satélites como outras alternativas para determinar a precipitação, porém muitos erros ainda estão associados a eles quando se deseja uma quantificação exata. O Radar Meteorológico, mede a chuva com base na frequência e possui melhor distribuição espacial da chuva, apesar dos custos e necessidade de um permanente aferimento e posterior ajuste com base nos dados medidos pelos aparelhos tradicionais. Já a precipitação por satélite são medidas com base em satélites que estabelecem relações com variáveis meteorológicas estimadas por dispositivos existentes em satélites. Geralmente possui pouca precisão para áreas específicas.

Para determinar a medidas mais precisas de precipitação ocorrida em determinado local, utiliza-se instrumentos como os pluviômetros e Pluviógrafos. A medida da precipitação consiste na determinação da lâmina de água que se depositaria sobre a superfície monitorada, desconsiderando para esta lâmina de água, os processos de evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração no solo (TUBELIS; NASCIMENTO, 1937). A captação da água contida no pluviômetro deve ser realizada diariamente por um observador em um horário pré-determinado e anotado em uma planilha. Sua instalação deve ser feita a uma altura de 1,5 m acima do nível do solo (TUCCI, 1993).

Medida em termos de volume de água precipitada por unidade de área, teremos a quantidade de precipitação pluviométrica, enquanto a intensidade de precipitação pluviométrica é medida em termos de volume de água precipitada por unidade de área e de tempo. A medida feita por pluviômetros, que são instrumentos coletores de precipitação pluviométrica (CARLESSO, 2007).

Os pluviógrafos são semelhantes aos pluviômetros, porém são capazes de registrar de maneira continuada as precipitações, permitindo o estudo da relação duração-intensidade-freqüência.

2.7 Recarga das Águas Subterrâneas

A definição do termo recarga de águas subterrâneas, a princípio, pode ser confundido com a definição de infiltração. Portanto, a infiltração é a água que percola da superfície para a zona não saturada. A recarga é, porém, uma porção desta infiltração, aquela que realmente atinge o nível da água, ou seja, é a quantidade de água que entra na zona saturada.

A chuva é mais importante fonte de recarga, ela pode penetrar o solo diretamente e percolar para a zona de águas subterrânea. A recarga de aquíferos também pode ocorrer pela infiltração de rios, canais e lagos e por fenômenos induzidos por atividades humanas, como irrigação e a urbanização.

Segundo HEALY; COOK (2002), as taxas preliminares de recarga podem ser avaliadas usando dados meteorológicos disponíveis e dados de parâmetros hidrológicos do solo aplicados a um modelo da zona não-saturada. E também os dados hidrológicos também podem ser avaliados, incluindo vazão de rios e profundidade do nível d'água. Variações na geomorfologia refletem diferenças na topografia, vegetação e tipo de solo, que podem afetar a recarga. Esta, em regiões úmidas, é normalmente considerada como ocorrendo em topografias mais altas e a descarga em topografias mais baixas, enquanto que a recarga em regiões de vales aluviais áridos é geralmente concentrada nas partes topográficas mais baixas, tais como canais de rios temporários.

Existe uma diversidade de métodos para estimativa da recarga. Estes métodos produzem estimativas ao longo de várias escalas de tempo e espaço e

podem ser usados em uma gama de complexidades e adversidades (HEALY; COOK, 2002).

Os três tipos de mecanismos da recarga foram conceitualmente definidos por LERNER et al. (1990) e estão ilustrados na figura 19, como:



Figura 19 - Os vários mecanismos de recarga (Adaptado de LERNER,1990).

Recarga direta : é aquela que abastece de água o aquífero pela percolação vertical direta que atravessa toda a zona não-saturada, isto é, o processo que acontece abaixo do ponto de impacto da precipitação por movimento vertical através da zona não-saturada. A recarga direta pode ser definida como a parcela da precipitação que vence a zona não-saturada e soma-se à reserva subterrânea;

Recarga indireta: corresponde à percolação da água para os aquíferos por meio dos cursos d'água superficiais. Isto deve-se aos processos em que a recarga ocorre por características introduzidas pela urbanização, assim como por rios e depressões de superfícies topográficas (reservatórios, lagos, etc.);

Recarga localizada: uma forma intermediária de recarga dos aquíferos é resultante de concentrações horizontais de água próximas à superfície na ausência de canais bem definidos. Ela é feita pelo acúmulo de água próximo ao solo, em superfícies planas, com ausência de canais bem definidos.

Um dos fatores mais importantes é a diferença entre o tempo da entrada da água na zona saturada e a manifestação desta água como uma fonte de água efetivamente explorável (Balek 1987). Isto se deve ao fato de que a água que atinge o aquífero pode ser extraída subseqüentemente por evapotranspiração (de Vries; Simmers 2002). Fetter (2001) afirma que o tempo de movimentação da água

infiltrante é função da espessura da zona não saturada e da condutividade hidráulica não saturada vertical e pode ser desde poucas horas em regiões úmidas, solos muito grossos e nível da água raso até alguns anos em regiões áridas e níveis da água profundos.

A escala temporal é uma condição decisiva na interpretação da recarga da água subterrânea. Dependendo da escala utilizada, pode-se determinar se certo sistema local é considerado como parte da recuperação do reservatório em longo prazo (de Vries; Simmers 2002). Os principais tipos de recarga com relação ao tempo são (Balek 1987):

Recarga de curto-prazo : que ocorre após grandes eventos de chuva, principalmente em regiões onde não há estações seca e úmida bem marcadas;

Recarga sazonal: ocorre durante períodos chuvosos (estação úmida) em regiões com estações secas e chuvosas bem definidas e no início do derretimento (degelo) da neve nas regiões temperadas;

Recarga perene: pode ocorrer em partes dos trópicos úmidos, onde há fluxo descendente de água praticamente constante;

Recarga histórica : aquela que ocorreu há muito tempo atrás, contribuindo para a formação dos recursos hídricos subterrâneos atuais. O conceito é basicamente o do tempo de residência das águas subterrâneas, sendo que o maior já encontrado foi descrito por Airey et al. (1978 apud Balek 1987), de 350.000 anos.

Para quantificar a recarga, é necessário medir alguns de fenômenos, dos quais é possível estimar a recarga por subtração. Portanto, erros nas medidas destes fenômenos traduzem-se em incertezas na magnitude estimada da recarga.

Segundo de Vries; Simmers (2002), a recarga pode ser estimada por diversos modos dependendo da resolução temporal requerida. Para o propósito da estimativa da recarga direta, uma das técnicas mais apropriadas, segundo Healy; Cook (2002), é o estudo da variação de nível do aquífero d'água. Para estimar a recarga por este método, é necessário conhecer os valores do rendimento específico. Estes valores são obtidos em ensaios de campo e/ou laboratório. Uma vez obtido um valor confiável para o rendimento específico, a simples multiplicação deste valor pela elevação do nível do aquífero freático no período de interesse é suficiente para obter a altura equivalente de água adicionada à zona saturada.

Segundo Lerner (1990) muitos estudos detalhados de recarga têm sido empreendidos em pelo mundo. Em tais estudos, verificou-se amplo relacionamento entre a taxa de precipitação anual total e recarga anual. Muitas estimativas de taxas de recarga natural estão compreendidas na faixa de 5% a 25% da precipitação. Entretanto, é importante examinar qualquer estimativa de recarga que exceda 30% do total precipitado na área de estudo, pois são relativamente incomuns na prática.

Portanto o uso das águas subterrâneas é de fundamental importância para a expansão urbana, agrícola e industrial de uma região, principalmente quando estas estão localizadas em zonas áridas e semi-áridas. O conhecimento da taxa atual de recarga e o monitoramento dos aquíferos são, portanto, pré-requisitos para uma gestão eficiente e sustentável das águas subterrâneas, onde tais fontes são a chave para o desenvolvimento econômico em algumas regiões. (VRIES; SIMMERS, 2002; BANERJEE, 2009).

2.8 Método de Estimativa de Recarga WTF

Existem muitos métodos para se realizar estimativas de recarga subterrânea, cada um deles assumindo premissas e incertezas. O WTF é um método que assume a precipitação pluviométrica anual como fonte de recarga de um aquífero livre. Estudos relacionados à flutuação do nível da água subterrânea e avaliações de recarga pelo método WTF, ocorrem desde 1920, sendo que este método mantém-se atual e amplamente aplicado por hidrogeólogos brasileiros e estrangeiros (DAMBRÓS, 2011).

O Método de Flutuação da Superfície Livre (WTF – Water Table Fluctuation) é a técnica mais amplamente usada (MAZIERO, 2005). Este método é aplicável somente aos aquíferos não-confinados e requer o conhecimento do rendimento específico ou porosidade drenável. As vantagens desta aproximação incluem sua simplicidade e uma sensibilidade aos mecanismos do movimento da água na zona não-saturada (HEALY; COOK, 2002).

O método WTF pode ser usado de duas formas: para estimativas de eventos (dias, semana, mês) ou em períodos mais extensos (anos), sendo também possível à estimativa em escala local e regional, este método foi considerado o mais sensível dos três métodos analisados (WAHNFRIED; HIRATA, 2005).

Nota-se que o método WTF, além de ser sensível à estimativa de recarga, supre algumas deficiências que os outros métodos apresentam. Assim, este e outros trabalhos serviram como base de apoio para seleção do método WTF na busca da estimativa da recarga das águas subterrâneas. Portanto este método foi desenvolvido para determinar a recarga das águas subterrâneas a partir dos dados de monitoramento da variação (flutuação) do nível de água.

Assim o método de Flutuação da Superfície Livre (WTF) possibilita estimar a recarga, a partir da relação entre a capacidade específica do meio penetrado pela perfuração na zona saturada e a variação anual da altura do nível da água. Destaca-se que este método tenha melhor resultado quando os níveis de água subterrânea mostram uma resposta rápida aos eventos de precipitação em áreas individuais de uma zona vadosa relativamente fina (Healy; Cook, 2002).

Portanto o método WTF baseia-se na premissa de que as elevações nos níveis da água subterrânea em aquíferos não-confinados (aquíferos livres) ocorrem devido à água de recarga subterrânea que chega à superfície livre (HEALY; COOK, 2002).

Equação 2, da recarga direta é calculada como (HEALY; COOK, 2002):

$$R_d = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

em que:

R_d = Recarga direta [LT^{-1}];

S_y = rendimento específico [adimensional];

Δh = variação da altura do nível freático [L];

Δt = tempo de observação do nível [T].

A equação 2 assume que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todos os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo (evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subsuperficial) são nulos durante o período de recarga.

Para o método WTF, o rendimento específico (S_y) de um aquífero livre é virtualmente igual ao coeficiente de armazenamento, sendo da ordem da macroporosidade do meio. Ressalta-se, ainda, que rendimento específico “expressa quanta água está disponível para uso humano”, enquanto que a retenção específica

“expressa quanta água esta retida na rocha (reservatório) após ser drenada por gravidade” (MAZIERO, 2005).

Healy; Cook (2002) definiram que a aplicação da equação da recarga direta é para cada elevação individual do nível d’água, que determina uma estimativa da recarga direta, em que Δh é igual à diferença entre o pico da curva de variação de nível e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico. A curva de recessão antecedente extrapolada é o tracejado que a curva do poço de monitoramento teria na ausência de elevação do nível d’água (figura 20).



Figura 20: Obtenção da linha de tendência, que é um aumento do nível de água hipotético, em resposta à precipitação. Δh é igual à diferença entre o pico da elevação e o ponto baixo da curva de recessão extrapolada antecedente (linha tracejada) na hora do pico. Fonte: HEALY; COOK (2002).

Assim Moon et al (2004) afirmam que, geralmente, o nível d’água subterrânea varia de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de outras variáveis hidrogeológicas (topografia, espessura da zona não-saturada e composição dos materiais da Formação).

O método WTF foi usado em vários estudos de recarga subterrânea e é descrito em detalhes por HEALY e COOK (2002) e MAZIERO (2005), que trazem uma discussão teórica sobre os métodos que estimam a recarga do lençol freático. Eles afirmam que a estimativa de recarga é extremamente importante para a gestão do sistema de águas subterrâneas e destacam a fácil aplicabilidade do método WTF. Este método é uma simplificação grosseira de um fenômeno complexo, ou seja, do movimento da água subterrânea e do lençol freático. Recomendam, ainda, o uso deste método quando necessário e destacam, para futuros estudos, seu uso

para minimizar os erros quando a definição do rendimento específico e a inclinação da curva de recessão do hidrograma acusarem ausência de recarga.

Wahnfried e Hirata (2004) utilizaram o método WTF, o método do balanço hídrico e aproximação darcyniana para o estudo da recarga do aquífero sedimentar na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo (USP). Os autores concluíram que para a área estudada, o WTF foi o método que apresentou melhores resultados.

Foram realizados por Maziero (2005) estudos sobre aspectos quantitativos da água subterrânea em área intensamente urbanizada, no município de São Carlos/SP. Estes estudos demonstraram que a recarga estimada pelo WTF foi de 16,4% da precipitação pluviométrica ocorrida durante um ano hidrológico. Estes resultados apresentam subsídios para a discussão do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos e estimulam o desenvolvimento de novas pesquisas em aquíferos sob centros urbanos ou em áreas rurais.

O estudo realizado por Barreto (2006) Propôs-se elaborar um balanço hídrico da bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, localizada no estado de São Paulo. E neste estudo a estimativa de recarga subterrânea foi determinada pelo método WTF e o resultado indicou um percentual entre 29 e 31% da precipitação. Advertiu, também, que poços onde o nível está próximo à superfície podem não representar uma variabilidade temporal. Na continuidade da pesquisa nesta mesma bacia pertencente ao SAG, Gomes (2008) apresentou dados de recarga direta variaram entre 14% a 38% e a recarga profunda entre 0,4% a 2,4% relativos a precipitação do período.

Sharda et al (2006) que realizou estudos na região semi-árida localizada no oeste da Índia, e estimou a recarga em 7,3% e 9,7% da precipitação anual para os anos de 2003 e 2004, respectivamente, com a utilização do método WTF.

Em outro estudo desenvolvido por Paiva (2006), estimou a recarga em uma unidade dendrítica de uma sub-bacia do Rio Piranga, localizado no estado de Minas Gerais. Segundo o autor, o estudo mesmo analisando dados de apenas um poço, manteve-se confiável devido à localização do mesmo, e sua taxa de recarga foi de 183,3 mm/ano. Mesmo assim, o dado manteve-se no esperado, quando comparado a resultados de outros pesquisadores.

Carnier Neto (2006) aplicou o método WTF no aquífero Rio Claro, localizado no estado de São Paulo, no período de 2002 a 2005, e resultou em avaliações do

nível freático em séries temporais de alta e baixa frequência, período menor e maior que 24 horas, respectivamente, e para a estimativa da recarga anual se aplicou o método WTF. Nesta pesquisa destaca-se a importância do aquífero como reserva reguladora da água superficial na área estudada.

Estudando a influência da precipitação e das características do solo na variação do nível da água subterrânea, Gouvêa (2009) concluiu diante dos resultados, que a partir da variação mensal do nível da água e da precipitação mensal acumulada, tem-se a não existência de uma relação imediata. Em períodos menores a correlação é maior, também encontrou a existência de um padrão de sazonalidade. Afirma que a evapotranspiração tem maior influência do que a porosidade na variação do nível da água. Para finalizar, a autora destaca a importância de estudos mais aprofundados sobre uso e cobertura do solo e infiltração.

Estudos realizados em áreas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG), elaborados por pesquisadores uruguaios e argentinos, obtiveram respostas distintas quanto à estimativa de recarga. Para Montañó e Carrion (1990), o valor global estimado foi de 3% da precipitação média anual, ou seja, 1300 mm para toda a área aflorante, portanto 39 mm/ano. Já Perez e Rocha (2002) encontram cerca de 170 a 190 mm/ano representando uma taxa de recarga estimada de 13,1% e 14,6% respectivamente. Por outro lado, Pacheco (2004), detalhando área contígua Rivera/Uruguai, assumindo uma precipitação de 1400 mm/ano, estimou em 3,6% (isto representa 50,4mm). Silva Busso (1999) sugeriu como taxa de recarga, 3,5% da precipitação média anual.

DAMBRÓS (2011) em seu estudo sobre Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo, concluiu que houve relação entre a flutuação do nível freático e a precipitação pluviométrica. Nas sub-bacias hidrográficas estudadas houve pelo menos 80% da variação do nível da água subterrânea em relação à precipitação pluviométrica. E a aplicação do método WTF para a estimativa de recarga. Obteve-se recarga da água subterrânea de 3,50% da precipitação pluviométrica, na para sub-bacia hidrográfica de campo, enquanto que para a sub-bacia hidrográfica floresta, obteve-se 4,20% da precipitação pluviométrica na recarga da água subterrânea, para a sub-bacia hidrográfica florestada.

Deste modo, analisando os resultados obtidos pelas fontes consultadas e referidas, destaca-se a unanimidade entre os autores ao afirmarem que se deve dar continuidade aos trabalhos de observação e pesquisa para avançar no conhecimento sobre o comportamento dos aquíferos com o objetivo de subsidiar as políticas de gestão sustentável.

Assim método WTF é amplamente utilizado na determinação da recarga direta, pois oferece como vantagens a simplicidade e a sensibilidade aos mecanismos do movimento da água na zona não-satura (HEALY; COOK, 2002).

O método de Flutuação da Superfície Livre (WTF) pode ser visto como uma aproximação integrada e não como uma medida pontual quando comparado com os métodos aplicados na zona não-saturada. Segundo Healy; Cook (2002), o método WTF apresenta as seguintes limitações:

1- O método é mais bem aplicado a níveis freáticos rasos que exibem súbitas elevações e declínios do nível d'água. Aquíferos profundos podem não exibir súbitas variações, resultado de frentes de umidade que tendem a dispersar-se ao percorrer longas distâncias verticais (HEALY; COOK, 2002; SCANLON et al., 2002);

2- As taxas de recarga variam substancialmente dentro de uma bacia, devido a diferenças na topografia, geologia, declividade da superfície do terreno, vegetação, arranjo da partículas sólidas, grau de cimentação e outros fatores. A maior dificuldade está na locação dos poços de observação que representem espacialmente as fontes de recarga (HEALY; COOK, 2002).

3- As taxas de recarga e descarga não podem ser constantes e iguais para o evento. Se a taxa de recarga for constante e igual à taxa de descarga, os níveis d'água não mudariam e o método WTF estimaria recarga nula (HEALY; COOK, 2002).

4- O nível da água subterrânea sofre alterações (sobe e desce) em resposta a muitos fenômenos diferentes e as flutuações nem sempre são indicativas de recarga ou descarga de água subterrânea (HEALY; COOK, 2002). MOON et al. (2004), comentaram que, geralmente, níveis d'água subterrânea flutuam de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de várias variáveis hidrogeológicas (topografia, espessura da zona não-saturada e composição dos materiais da zona saturada e não-saturada da formação).

5- A incerteza gerada por este método está relacionada à precisão com que o rendimento específico pode ser determinado e até que ponto as suposições inerentes ao método são válidas (HEALY; COOK, 2002).

6- Arantes (2003) monitorando aquíferos muito rasos (< 2m) observou uma influência da ordem de centímetros nas mudanças na carga hidráulica devido às mudanças na pressão atmosférica.

Healy; Cook (2002) concluíram que uma elevação do nível d'água representa os efeitos combinados da recarga para um evento de precipitação e da precedente condição de descarga.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

Ao mesmo tempo que o potencial hidrogeológico e a diversidade ambiental na extensão do território brasileiro, além da estabilização econômica e o fim das restrições ao ingresso de capitais externos, permitem no momento a reativação do setor agroindustrial, põem em risco nossas reservas naturais. Assim, a hidrogeologia está hoje mais preparada em termos de recursos humanos e de equipamentos laboratoriais.

As áreas de estudo (figura 21) encontram-se dentro do Município de Cacequi. Estes locais foram escolhidos devido ao Município ter uma ótima aplicabilidade do tema (recarga e flutuação) desenvolvido em áreas distintas de exploração (superficial e subterrânea) da água. Outros fatores importantes para a seleção destas áreas deve-se: a) A localização do Município estar dentro de duas bacias hidrográficas importantes para o Estado do Rio Grande do Sul, a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/BHRSM (U-70) e a Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (U-50) ambas pertencentes a Região Hidrográfica do Rio Uruguai (SEMA, 2005). b) No Município encontra-se também uma rede de poços que serve como única fonte de abastecimento público dentro dele. Estes poços pertencem a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

Cacequi localiza-se no sudoeste do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas de 29°53'01" de latitude sul e 54°49'30" de latitude oeste. O município pertence Microrregião de Santa Maria. A área municipal é de 2.370,02 km² representando 0.8814% do estado do RS.

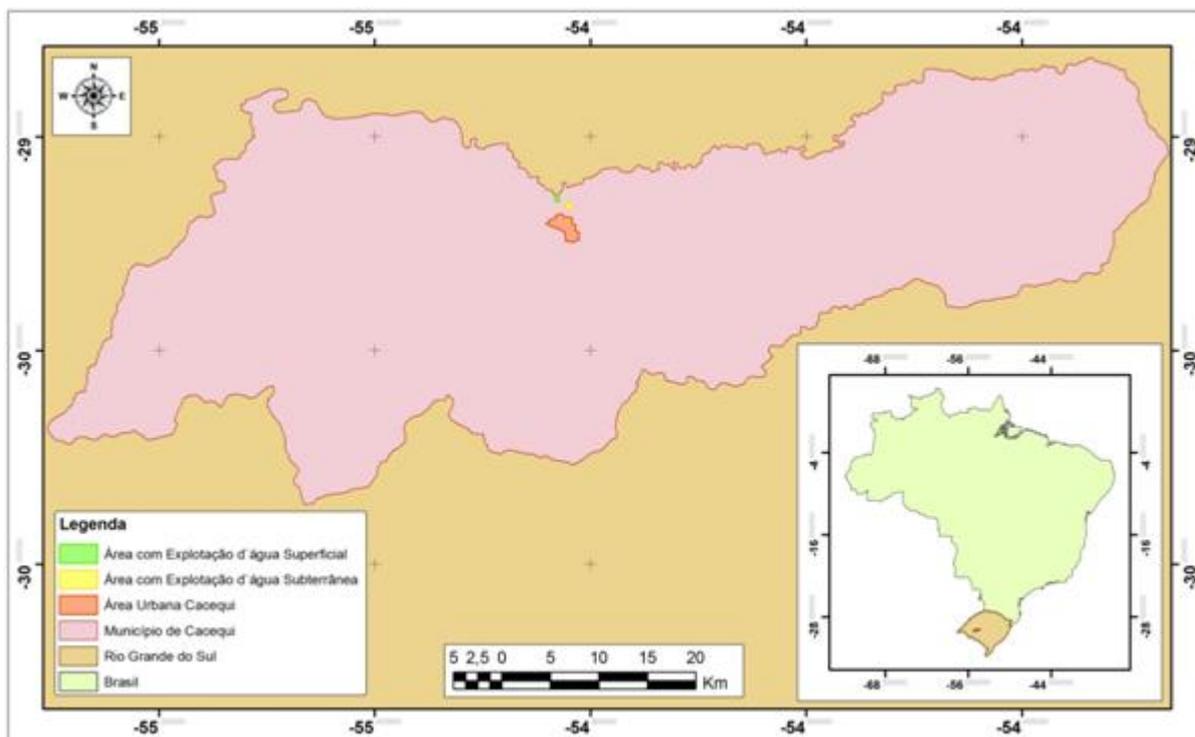


Figura 21: Localização das Áreas de estudo com exploração de água superficial e subterrânea.

Portanto, a escolha do município para área de exploração da água superficial (figura 22) levou-se em conta a grande importância da orizicultura irrigada na economia local, posto que este setor desempenha um papel de destaque na conformação do Produto Interno Bruto municipal. O Município de Cacequi ocupou, na safra 2003/2004, a 21ª colocação no *ranking* da produção de arroz entre 133 municípios do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2004). Além disso, Cacequi possui três principais rios, Rio Santa Maria, Rio Cacequi e Rio Ibicuí, sendo estes os principais rios que fornecem água para a irrigação das lavouras de arroz do Município. Assim foram construídos dois poços (com distâncias distintas do Rio Ibicuí) para o monitoramento da recarga e flutuação da água subterrânea desta área com retirada da água superficial, fazendo com que pudesse ser analisada a relação entre rio e aquífero, atendendo com isso o tema proposto.

Foram perfurados dois poços de monitoramento CAC-01 e CAC-02 em dezembro de 2010 com profundidades de cerca de 50 m e 40 m respectivamente.

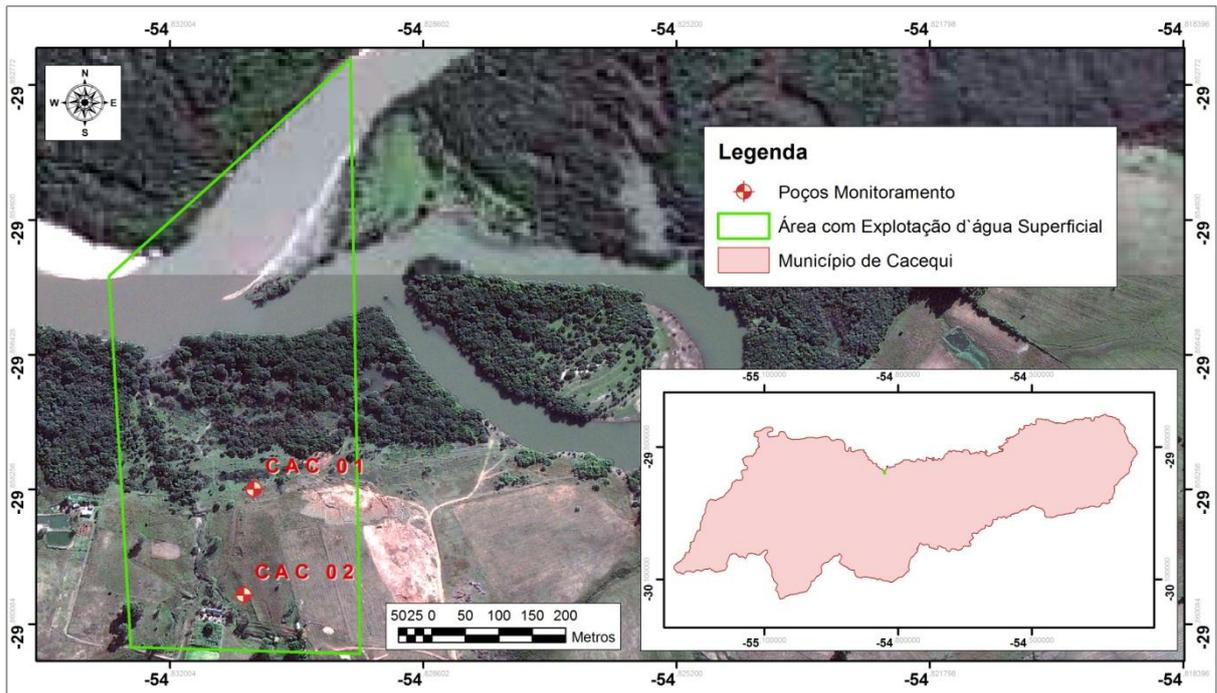


Figura 22: localização da Área com Exploração d'água Superficial.

E para a escolha do município referente as áreas com retirada de água subterrânea (figura 23) deu-se a uma boa malha de poços de abastecimento público, pertencentes a Companhia Riograndense de Saneamento e Abastecimento (CORSAN). Assim foi construído um poço de monitoramento CAC-03, na profundidade de 70m, visando ampliar os conhecimentos relativos a recarga subterrânea direta e flutuação das águas subterrâneas desta área. Ainda buscou-se uma parceria com a CORSAN para que houvesse também o monitoramento do nível da água de seus poços de abastecimento ativos.

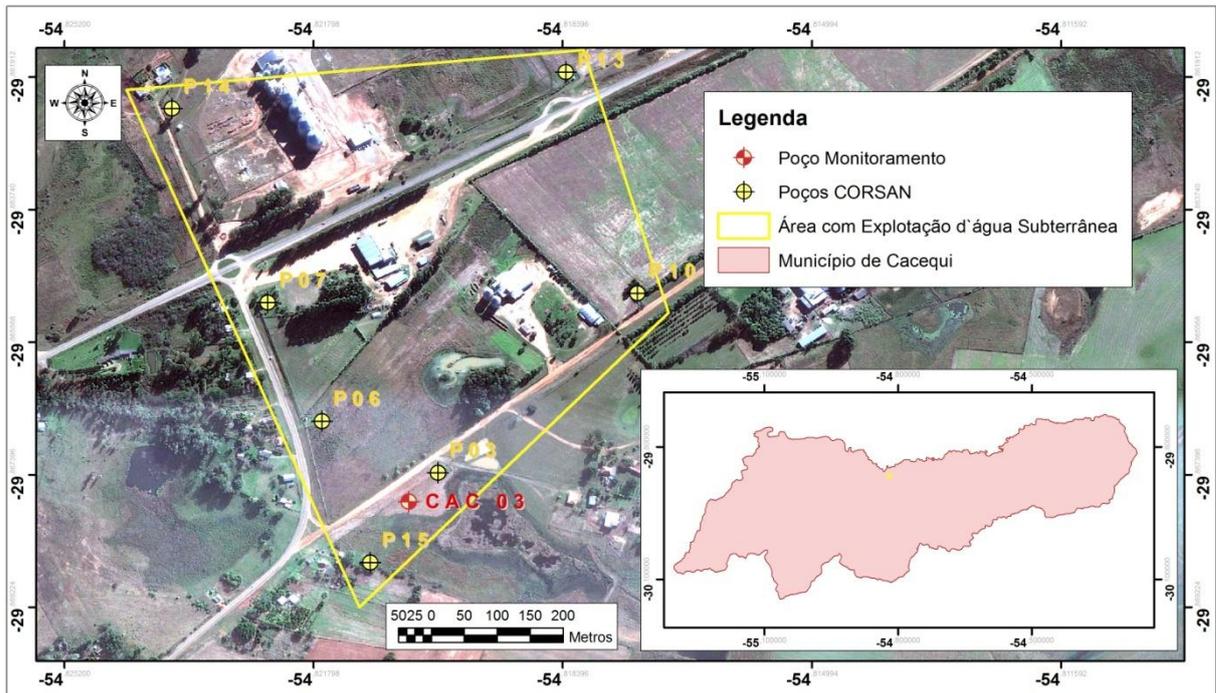


Figura 23: Localização da Área com Exploração d'água Subterrânea.

Então a necessidade de conhecermos detalhadamente alguns aspectos que condicionam as particularidades do objeto de estudo, assim foram realizadas algumas discussões a respeito do Município de Cacequi e das áreas estudadas, quanto a aspectos: hidrologia, geologia e hidrogeologia, geomorfológicos, pedológicos, climatológicos e vegetação.

3.1.1 Hidrologia

Em relação à hidrografia (figura 24) o Município insere-se dentro de duas Bacias Hidrográficas, quais sejam, a Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (U-50) e a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (U-70).

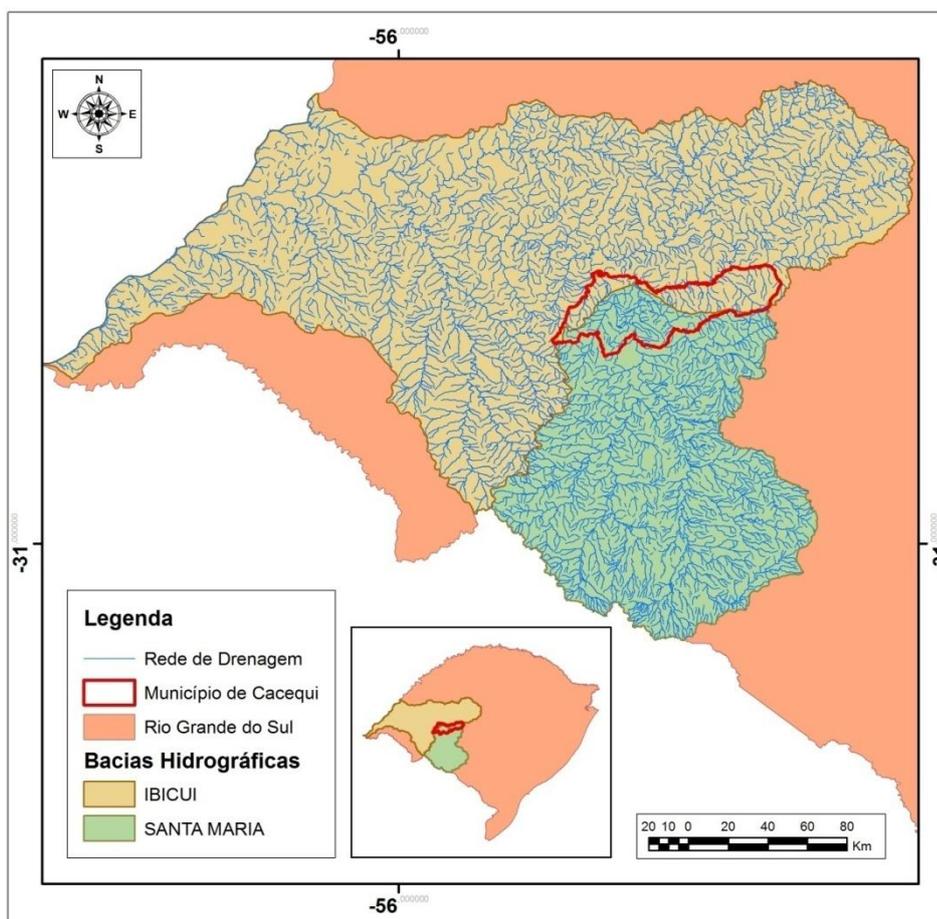


Figura 24: Localização das redes e bacias Hidrográficas.

Localizada no oeste do Rio Grande do Sul, a Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. Com uma área total de 35.439,25 km² ela engloba aproximadamente 414.321 habitantes. Sua precipitação média anual é em torno de 1.588 mm sendo a vazão média da bacia mais próxima da foz cerca de 849,04 m³/s ou 630 mm/ano conforme dados da Estação Passo Mariano Pinto - Rio Ibicuí (SEMA, 2008). Entre os principais usos consuntivos da água superficial na Bacia do Ibicuí, 99,25%, destinam-se ao uso para irrigação de arroz; 0,63% destinam-se para abastecimento público e industrial e, por último, 0,12% destinam-se a dessedentação animal. Portanto, no que tange a seus usuários consuntivos, o principal uso da água nesta bacia se destina à irrigação do arroz, ou seja, a orizicultura, o que intensifica a

insuficiência hídrica nos meses de verão (SEMA, 2008). Entre os principais usos não consuntivos destacam-se a diluição de esgoto doméstico realizado pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e pelas prefeituras municipais além da diluição de esgoto industrial e da drenagem urbana.

O município de Cacequi tem 54,49% de sua área dentro da Bacia do Rio Ibicuí englobando uma população de 1.251 habitantes (SEMA, 2008).

Estudos quantitativos realizados pelo Serviços Técnicos de Engenharia (STE) em 1998 descreveram a presença de altos déficits na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, durante o período de novembro a março, associados a altas taxas de evaporação e aos solos rasos e arenosos. O relatório destaca que este período coincide com o aumento das demandas de água para a irrigação de arroz. Segundo o referido estudo, o nível médio atual de consumo de água para arroz, por safra agrícola, é da ordem de 12.000 m³/ha (FEPAM, 2002).

A Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria localiza-se no sudoeste do Rio Grande do Sul, e tem uma população total de 186.116 habitantes, drenando uma área de 15.720,96 Km². A precipitação média anual está em torno de 1.444 mm e a vazão média mais próxima é de 205 m³/s ou 535 mm/ano (Estação Rosário do Sul, SEMA, 2002).

Para o uso consuntivo, a principal utilização da água superficial na Bacia do rio Santa Maria é a orizicultura irrigada com 99,995%. Somente 0,005% da água superficial da bacia são destinadas ao abastecimento público e industrial e a dessedentação de animais (BOURSCHEID, 1997). Destacam-se entre os usos não consuntivos: a diluição do esgoto doméstico e residenciais e a drenagem urbana.

O município de Cacequi tem aproximadamente 45,51% de sua área dentro dos limites da Bacia Hidrográfica do Santa Maria. Segundo a Secretaria estadual do Meio Ambiente (SEMA, 2002), de um total populacional de 15.311 habitantes do município registrados pelo IBGE em 2002, 14.060 habitantes estavam dentro da área da bacia.

Estudos desenvolvidos pela empresa Bourscheid Engenharia Ltda para a SEMA em 2002, e apresentados ao Governo do Estado, apontam para a ocorrência de déficits hídricos verificados, especialmente no verão, quando as demandas para a orizicultura se acentuam. E o relatório gerado apontou que municípios como Rosário do Sul e Dom Pedrito que tem suas áreas urbanas dentro da Bacia Hidrográfica do Santa Maria, nos períodos de estiagem há insuficiência de água

para atender usos prioritários, como o abastecimento público; além disso, existem evidências de conflitos entre usuários do setor da irrigação, ou seja, orizicultores e entre estes e o abastecimento público. Este conflito é inexistente no município de Cacequi porque seu abastecimento público provém da captação da água subterrânea, diferentemente dos municípios de Rosário do Sul e Dom Pedrito que captam a água superficial para suprir suas demandas hídricas referentes ao abastecimento público.

3.1.2 Geomorfologia

Em termos geomorfológicos (figura 25), conforme as definições estabelecidas pelo RADAMBRASIL (1986), Cacequi apresenta-se inserido na unidade de relevo Depressão Rio Ibicuí - Rio Negro. Nesta unidade de relevo estão incluídos os sedimentos fluviais que compõem os terraços e várzeas, situados, principalmente, ao longo dos rios Ibicuí Mirim, Santa Maria, Cacequi e Saicã, os sedimentos provém da Formação Rosário do Sul e de Depósitos Aluvionares (Era Cenozóica, Período Quaternário), as quais dão origem às colinas, regionalmente denominadas de coxilhas, constituindo formas de relevo com altitudes que variam entre 100 e 210 metros em relação ao nível do mar. Já os sedimentos fluviais, situados, principalmente ao longo dos rios Ibicuí Mirim, Santa Maria, Cacequi e Saicã encontram-se em níveis altimétricos que variam entre 80 e 100 metros (RADAMBRASIL, 1986).

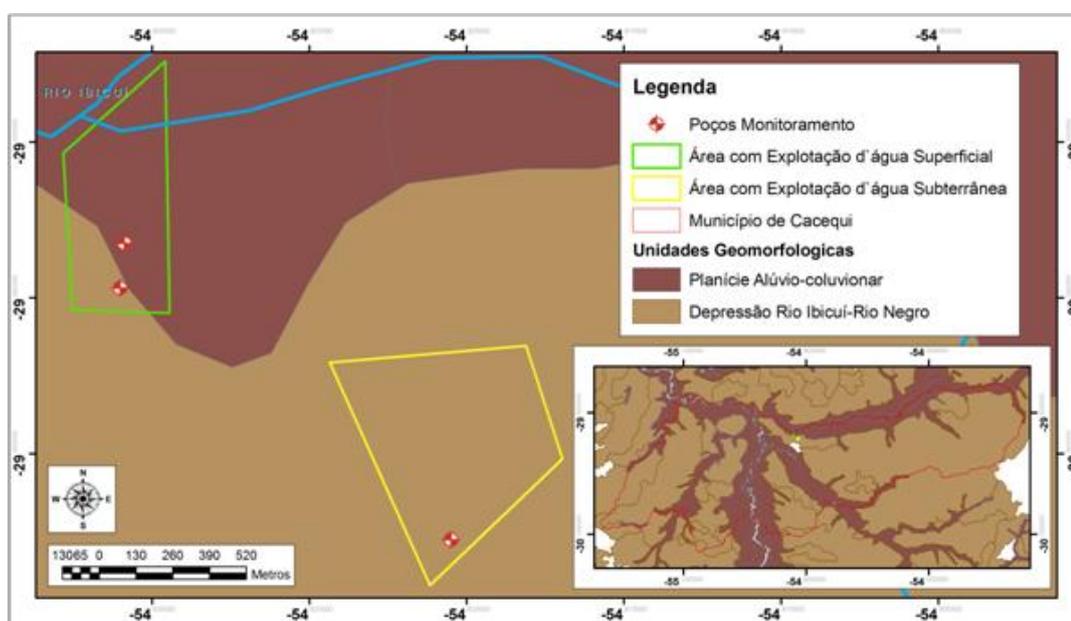


Figura 25: Imagem da Geomorfologia. Fonte: RADAMBRASIL (1986).

3.1.3 Geologia e Hidrogeologia

Dentro das duas áreas de pesquisa existem duas formações geológicas segundo RADAMBRASIL (BRASIL, 1986), figura 26:

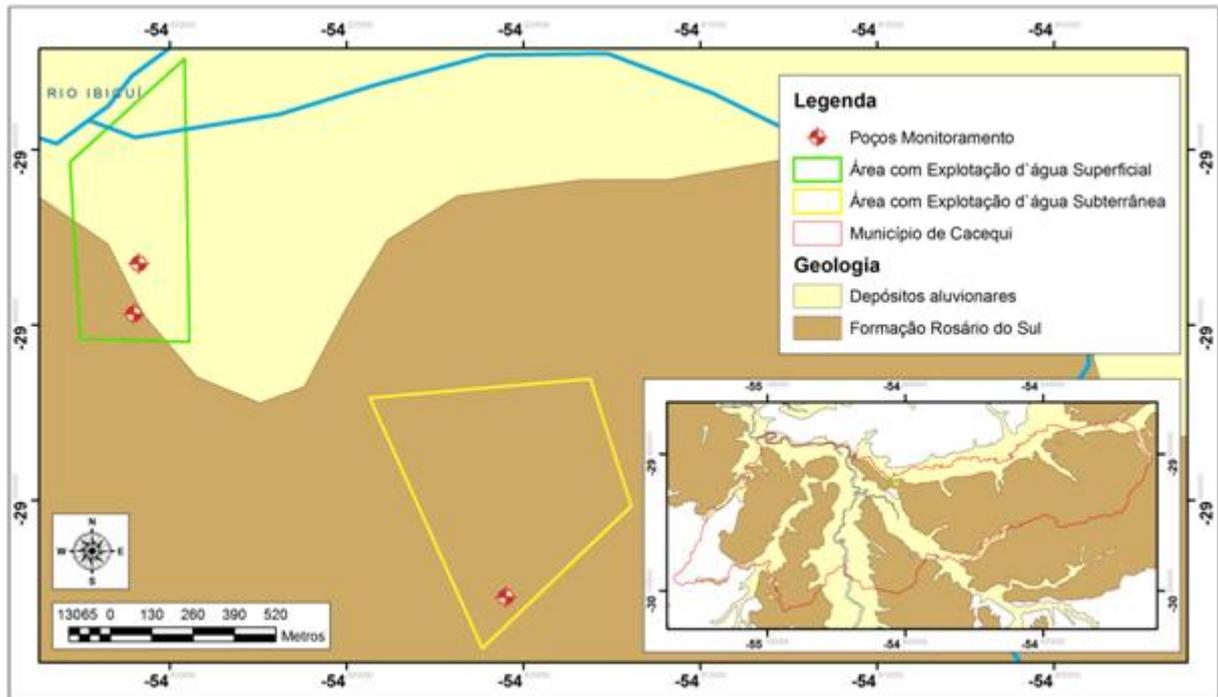


Figura 26: Imagem da Geologia referente ao RADAMBRASIL de 1986. Fonte: RADAMBRASIL (1986).

De acordo com Carraro et al. (1974) a Formação Rosário do Sul foi o nome proposto por Gamermann (1973) para designar o pacote de rochas sedimentares que ocorre entre a Formação Estrada Nova e a Formação Botucatu. Neste sentido engloba aquelas rochas denominadas de Rio do Rasto por White (1908), Santa Maria por Moraes Rego (1930), Grupos Teresina e Rio do Rasto por Carvalho (1932) e Santa Maria Superior, Santa Maria Inferior e Rio Pardo por Delaney; Goñi (1963). Compreende ainda parte das rochas que foram incluídas nas formações Estrada Nova e Botucatu por Burlen, Sena Sobrinho; Martins (1955), a parte superior do pacote denominado de Série Passa Dois por Morris (1955), e o que Bortoluzzi (1971) considerou como parte inferior do Botucatu. Bortoluzzi (1971) restringe a amplitude da Formação Rosário do Sul, colocando na mesma apenas os clásticos de origem fluvial da base da unidade mantendo a Formação Santa Maria como uma unidade autônoma.

A Formação Rosário do Sul compreende duas fácies: uma tipicamente fluvial e de planície de inundação e outra lacustre, que constitui a fácies Santa Maria (superior).

A fácies fluvial apresenta uma grande variação litológica com grandes corpos lenticulares de arenitos vermelhos de granulação média e fina a muito fina, com estratificação acanalada de variada amplitude que ora se encaixam em, ora são recobertos por arenitos muito finos e siltitos, que se apresentam ora maciços, ora com estratificação ondulada, paralela ou cruzada de pequeno ângulo. Os arenitos que compõem a fácies fluvial são principalmente quartzosos e têm variadas porcentagens de feldspatos e fragmentos de lamito tamanho areia, caracterizando-se ora como sub-arcósio, ora como protoquartzito. A classificação é de pobre a moderada; são siltitos com reduzida quantidade de argila e os grãos variam de subangulares a arredondados. É comum a ocorrência de galhas de argila.

Os materiais finos de planície de inundação podem ser classificados como siltitos arenosos, ocorrendo também, subordinadamente, siltitos argilosos. Essas litologias finas são mais duras que os arenitos e ocasionalmente calcíticas; ocorrem frequentemente concreções calcárias esféricas ou elipsoidais de 2 a 30 cm, formando níveis ou disseminadas no conjunto. Esta denominação foi utilizada no mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul de 1974. A Fm. Rosário do Sul é conhecida por fácies fluvial de arenitos vermelhos de granulação média a muito fina, com estratificações cruzadas e intercalações de siltitos avermelhados enquanto a fácies Santa Maria é constituída por siltitos e folhelhos com conchostráceos e flora Thinnfeldia e ainda com lamitos vermelhos com répteis fósseis, pertencente ao Grupo São Bento do Período Triássico constituindo os terrenos da Depressão Periférica.

Esta denominação Formação Rosário do Sul ainda é utilizada para caracterização dos perfis geológicos no sítio do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas/SIAGAS da CPRM.

Para a geologia foram incorporados dados e informações geradas a partir de mapeamentos e estudos geológicos regionais e aplicados, executados em diversas escalas, desde 1970, pelo Serviço Geológico do Brasil, e também referências bibliográficas de domínio público na área de geologia, desenvolvidos por instituições de ensino e pesquisa ou disponibilizados por colaboradores BRASIL/CPRM (2008).

O Grupo Rosário do Sul constituído pelas Formações Caturrita, Santa Maria e Sanga do Cabral.

Já, o Grupo Passa Dois é constituído pelas formações Pirambóia, Rio do Rasto, Subgrupo Estrada Nova, Formação Irati.

A Formação Pirambóia é constituída por arenito médio a fino apresenta uma geometria lenticular bem desenvolvida, ambiente continental, eólico com intercalações fluviais.

A partir da interpretação da nova denominação (figura, 27) proposta pela CPRM (2008), a área com exploração da água superficial encontra-se depósitos aluviais e nas duas áreas de estudo têm como formação geológica aflorante a Formação Pirambóia, pertencente ao Grupo Passa Dois, do Período Permiano na Era Paleozóica. Esta Formação é diferenciada por apresentar arenitos de granulometria grossa a fina, geometria lenticular bem desenvolvida, de ambiente continental, com variação lateral, amalgamada, constituída por combinação fácies eólica duna e interduna, fluviais e lacustres (SOARES et al. 2008).

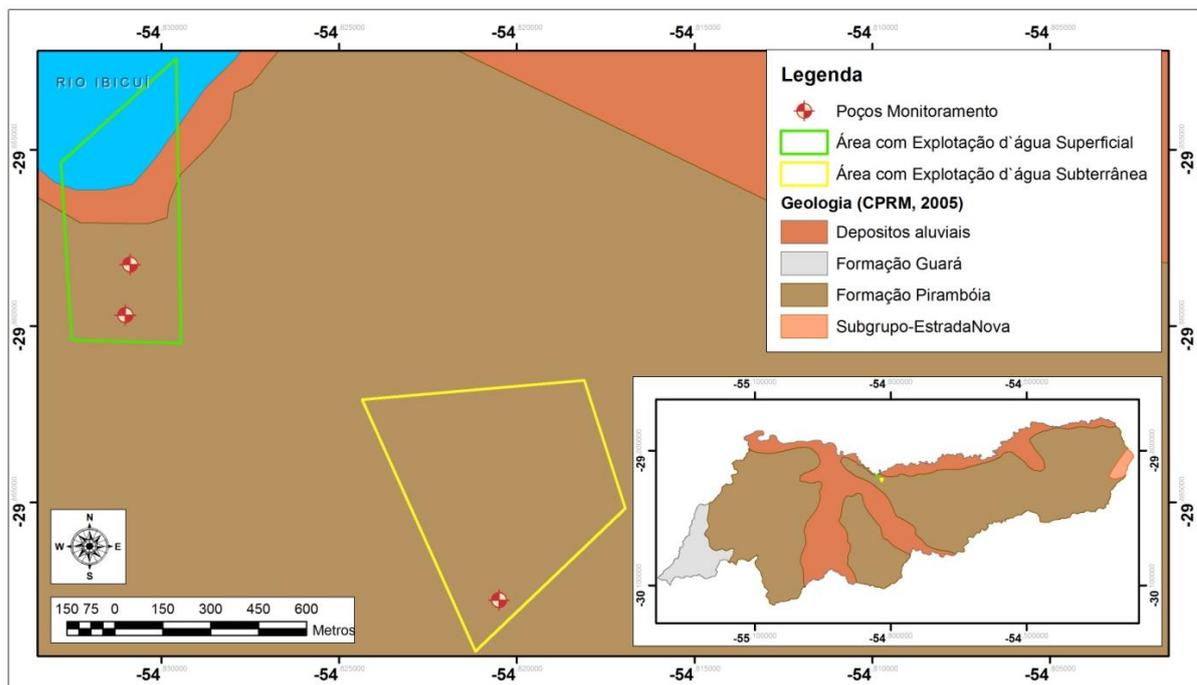


Figura 27: Imagem da Geologia referente a CPRM para 2008. Fonte: CPRM (2008).

A Formação Pirambóia tem espessura aproximada de 500 metros, segundo Soares et al. (2008), onde a rocha apresenta coloração creme a castanho claro, com predominância de arenitos médios (quartzo, feldspato, minerais opacos), os grãos são subarredondados e foscas, em algumas áreas favorecidas apresentam

cimentação e concreções carbonáticas. Para Dias (2006), após analisar suas características, afirma que as discordâncias erosivas da Formação Pirambóia, apresentam saliências notáveis no perfil de resistividade em estudos geofísicos.

Segundo Dias (2006) a Formação Pirambóia (figura 28) é um sistema eólico úmido, sendo caracterizada por intercalações de sedimentos de origem: fluvial, duna e interduna. Estes condicionam a formação de aquíferos livres e semi-confinados em área afloramento, como é o caso das áreas em estudo.

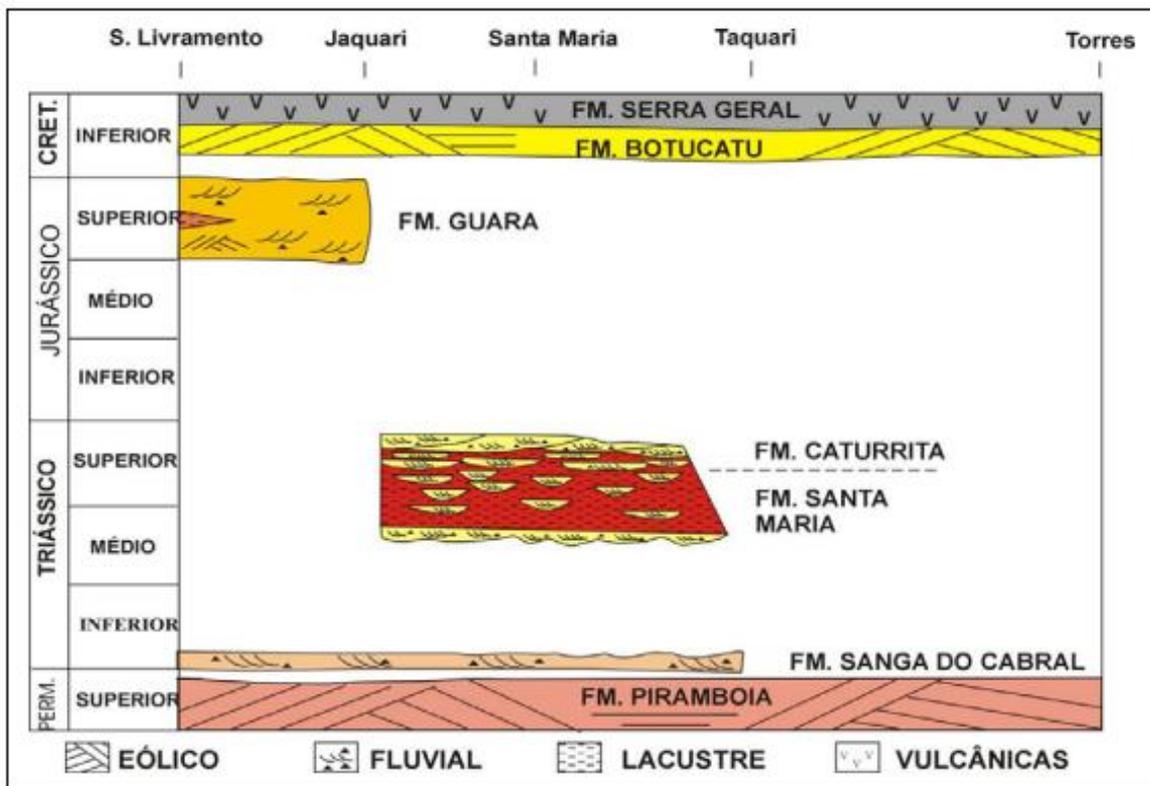


Figura 28: Coluna cronológica estratigráfica do estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Dias (2006).

Em termos hidrogeológicos, Machado (2005) apresenta como constituintes do Sistema Aquífero Guarani/SAG nove unidades hidroestratigráficas: Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas I e Passo das Tropas II, Sanga do Cabral e Pirambóia. Estes são separados por sistemas de falhas de direção Nordeste (Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu) e de direção Noroeste (Sistema de Falhas Jaguari/Mata-SFJM e Sistema de Falhas Terra de Areia Posadas-SFTA-P). Portanto formam corpos de ocorrência localizada, a Fm. Sanga do Cabral ocorre na fronteira oeste e região central do estado. Já a Fm. Pirambóia ocorre na fronteira oeste, na região central e ainda no leste do estado.

A Fm. Pirambóia de acordo com este autor pode apresentar-se aflorante com até 500m de espessura apresentando uma pequena a grande quantidade de água. A região em estudo situa-se no bloco entre os Sistema de Falhas Jaguari/Mata-SFJM e Sistema de Falhas Terra de Areia Posadas-SFTA-P e é constituída por depósitos da Formação Pirambóia BRASIL/CPRM (2008).

Machado e Freitas (2005) no mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul consideraram como o topo do SAG o primeiro evento de extrusão das lavas basálticas que compõem a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, desconsiderando-se as reincidências de deposição dos arenitos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu na forma de *intertrapps*. A base do SAG assenta-se sobre as rochas sedimentares da Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto, composta litologicamente por siltitos, argilitos e arenitos subordinados de coloração acinzentada ou avermelhada, que possuem um comportamento hidráulico de aquífero. Subdividiram em nove sistemas aquíferos:

- a) Sistema Aquífero Serra Geral/Botucatu na fronteira oeste do estado;
- b) Sistema Aquífero Botucatu/Guará na fronteira oeste do estado;
- c) Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia na fronteira oeste do estado;
- d) Aquíferos Permianos;
- e) Unidade Hidroestratigráfica Rio Bonito na fronteira oeste do estado;
- f) Sistema Aquífero Serra Geral/Botucatu na região central do estado;
- g) Unidade Hidroestratigráfica Botucatu na região central do estado;
- h) Sistema Aquífero Santa Maria na região central do estado.
- i) Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia. Este com ocorrência no Município de Cacequi BRASIL/CPRM (2008).

Machado e Freitas (2005) consideraram o Sistema Aquífero Sanga do Cabral Pirambóia como aquíferos de média a baixa a possibilidade para águas subterrâneas em rochas e sedimentos de porosidade intergranular. Sua área aflorante se estende desde a fronteira do estado com o Uruguai, em uma faixa contínua até a região de Taquari. Compõem-se de camadas siltico-arenosas avermelhadas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos, avermelhados, com cimento calcífero. As capacidades específicas são muito variáveis, em geral entre 0,5 e 1,5 m³/h/m. A salinidade varia de 100 mg.L⁻¹ nas áreas aflorantes a mais de 300 mg.L⁻¹ nas confinadas.

3.1.4 Pedologia

Os solos do município de Cacequi, segundo o Levantamento de Reconhecimento dos Solos do RS (Brasil, 1973) são predominantes os Podzólico Vermelho – Amarelo (PV), ocupando 49% do município e correspondendo a relevos onduladas, seguido dos Planossolos que ocupam 34% do município, com relevo plano a suavemente ondulado e mal drenados, formando extensas várzeas que são utilizadas para a cultura do Arroz irrigado. Por último, ocupando 16% das áreas do município destacam-se os solos Podzólico Bruno – Acinzentado conformando relevos suavemente ondulados. E segundo o Mapa de Solos do Estado do Rio Grande do Sul do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia/UFRGS e EMATER (2002), elaborado na escala 1:1.000.000, nas áreas da pesquisa encontra-se um único tipo de solo, que é o Planossolo Hidromórfico Eutrófico (SGe1), como mostra a figura 29.

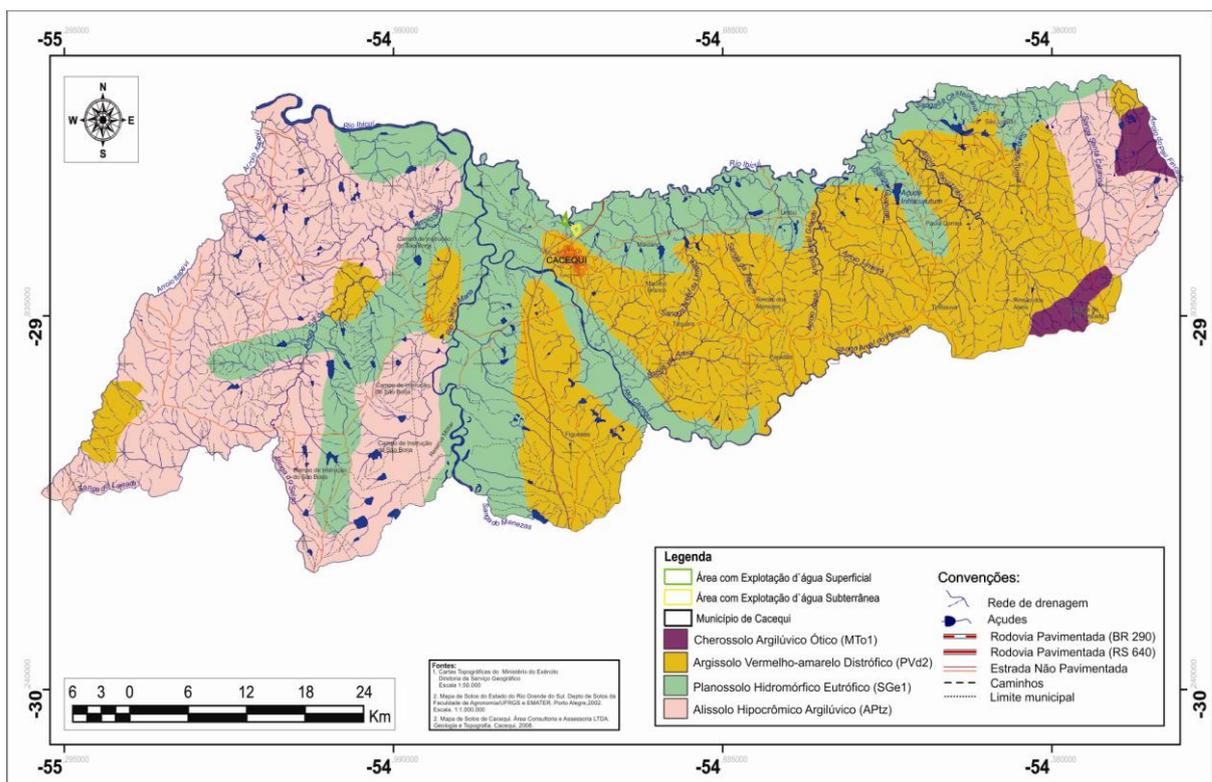


Figura 29: Mapa de Solos. Fonte: Mapa de Solos do Estado do Rio Grande do Sul do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia/UFRGS e EMATER (2002).

3.1.5 Climatologia

Em relação a classificação dos tipos climáticos do município, que também abrangem as duas áreas de estudo, segundo a classificação de Köppen, citado por Nimer (1977), é temperado quente (mesotérmico brando Cfa), o qual apresenta-se com características de invernos frios, com temperatura média do mês mais frio entre 13°C e 15°C e verões quentes, com temperatura média do mês mais quente superior a 24°C. As precipitações são regulares durante o ano todo, não apresentando estação seca, com índices pluviométricos anuais entre 1500 mm e 1600 mm. E para as áreas de estudo a precipitação (figura 30), no ano de 2011 atingiu aproximadamente 1.416,4 mm (Estação da ANA em Cacequi).

A precipitação pluviométrica é uma variável utilizada para observar sua relação com a variação do nível do lençol freático. Utilizou-se os dados de precipitação pluviométrica de uma das estações de monitoramento da Agência Nacional de Águas – ANA, obtidos junto ao Portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, admitindo informações da estação mais próxima, a Estação de Cacequi, código 295400103, coordenadas: - 29°52'42.96 de latitude e -54°49'31.08 de longitude. A obtenção dos dados foram diárias.

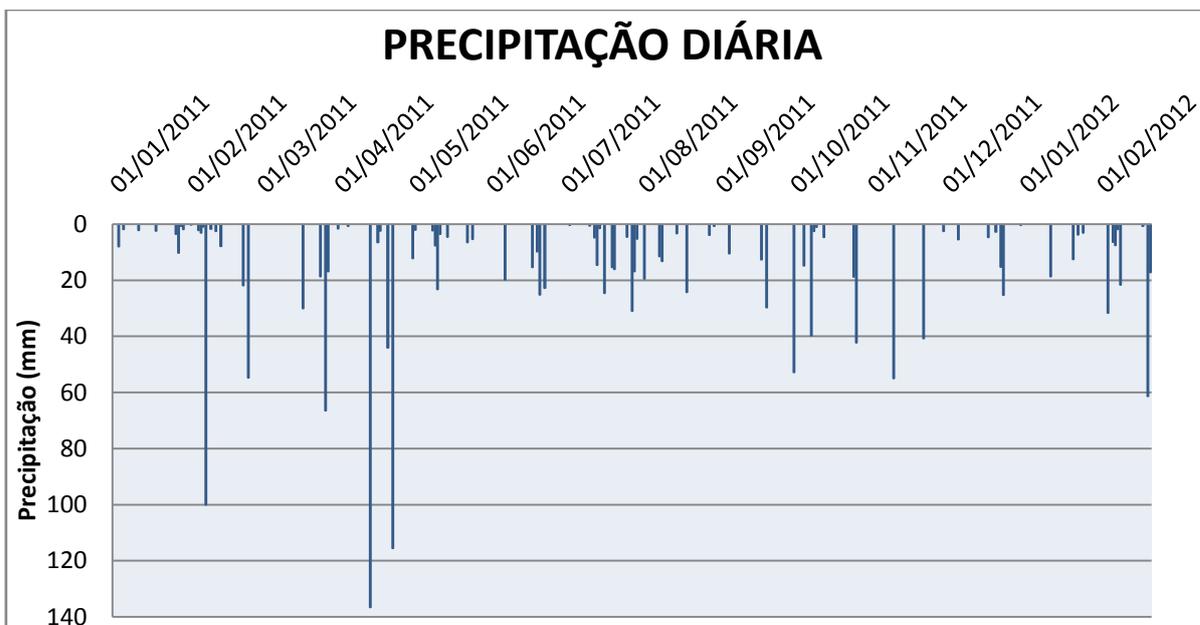


Figura 30: Gráfico da Precipitação. Fonte: Estação Pluviométrica ANA de Cacequi.

Assim Sartori (1979) descreveu que no inverno, as temperaturas podem atingir valores negativos, com ocorrência de geadas e, no verão, as temperaturas elevam-se permitindo o registro de amplitudes térmicas anuais significativas. A figura 31, mostra a variação da temperatura diária entre os meses de fevereiro e dezembro de 2011.

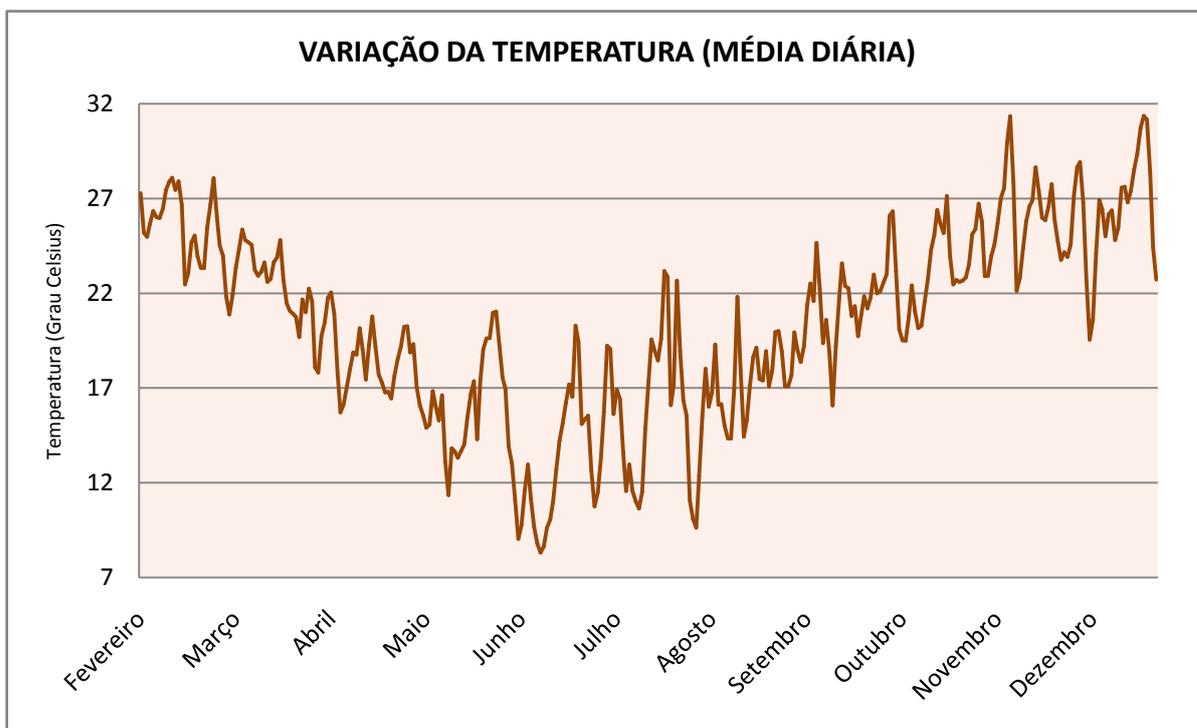


Figura 31: Gráfico da variação diária da temperatura ano de 2011. Fonte: Martelli, 2012.

Portanto para Vieira (1975), as condições climáticas são consideradas o fator de maior importância no processo de formação do solo. Desta forma este fator pode interferir de modo direto através da precipitação e da temperatura e, indiretamente, através da flora e da fauna, pois estas contribuem na forma de matéria orgânica no processo evolutivo do solo.

3.1.6 Vegetação

A vegetação natural do município compreende extensas áreas de Savana - Estépica (Campos), e Florestas Ciliares ou Florestas de Galeria ao longo dos cursos d'água, podendo ocorrer áreas com vegetação em diferentes estágios de sucessão (Veloso et al, 1991). Essas florestas Ciliares ou de Galeria representam os maiores remanescentes da vegetação florestal do município.

Segundo o mapeamento fitogeográfico (figura 32) proposto pelo IBGE (1986), no projeto RADAMBRASIL, encontram-se três grandes regiões fitoecológicas na BHRSM: a Savana, a Estepe e a Savana Estépica.

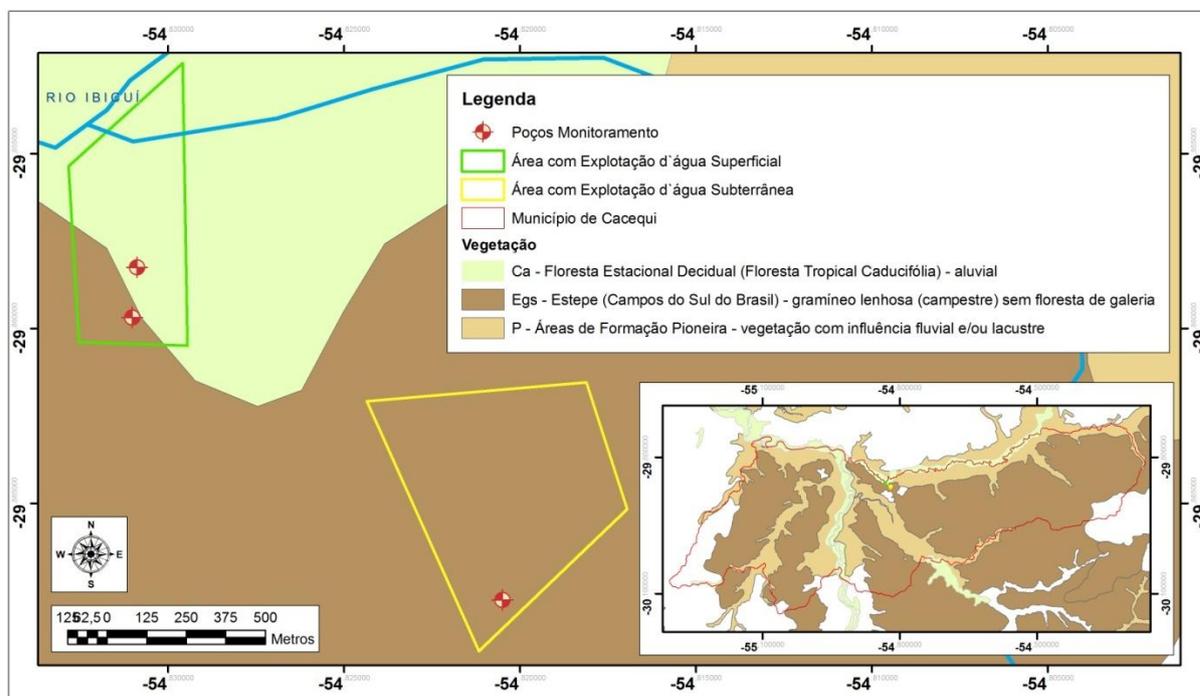


Figura 32: Imagem da Fitogeografia. Fonte: RADAMBRADIL (1986).

A Savana também conhecida como campo, encontra-se em menor quantidade nas porções nordeste da bacia, onde o relevo apresenta-se geralmente aplainado, e a vegetação aí presente é constituída de gramíneo-lenhos com variações, mas nunca desconstituída de árvores. A região de estepe ou campanha associa-se à depressão do rio Santa Maria. Já a região da Savana Estépica, também conhecida como campanha, ocupa terrenos de origem arenítica, junto ao divisor de águas a oeste da bacia em estudo, coincidindo com a borda oriental do Planalto da Campanha IBGE (1986).

Destaca-se que a vegetação da Campanha Gaúcha é considerada peculiar em relação às outras áreas de campo que existem no mundo, pois se apresenta em uma situação climática de tempos remotos, considerando a escala geológica. Esta área faz parte do Bioma Pampa (BRASIL/IBGE/2010).

3.2 Procedimentos técnicos

3.2.1 Instalação e Monitoramento dos Poços

Esta fase começou com a pesquisa IN LOCO, buscando as duas áreas mais propícias para a construção dos três poços propostos pelo estudo.

A primeira área de exploração da água subterrânea (figura 33) buscou relacionar o poço de monitoramento construído (CAC 03) com os poços tubulares já existentes pertencentes a CORSAN (P03; P06; P07; P10, P13 e P15) sendo que o P15 é aquele com maior profundidade com cerca de 220m. Também foram monitorados os níveis da água (N.E. e N.D.) dos poços ativos pertencentes a CORSAN durante o ano de 2011.

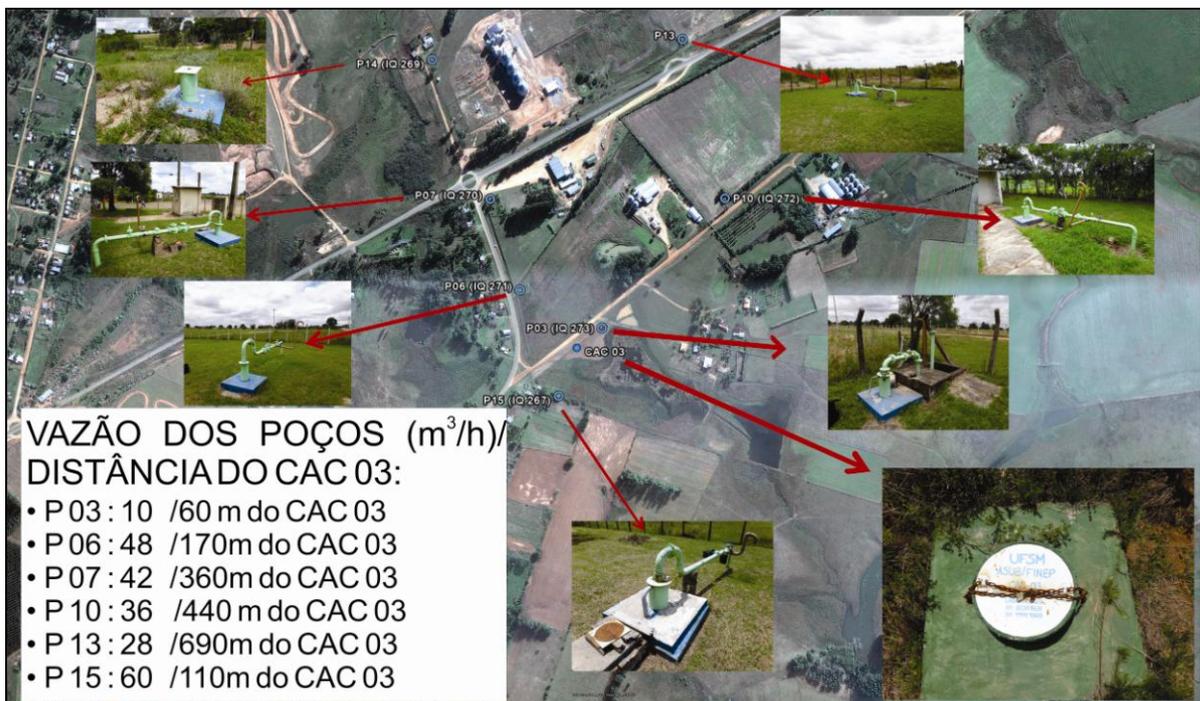


Figura 33: Área de exploração das águas subterrânea e seus poços.

E na segunda área (figura 34) buscou-se a relação com a exploração da água superficial (Rio Ibicuí) e os dois poços construídos (CAC 01 e CAC 02).

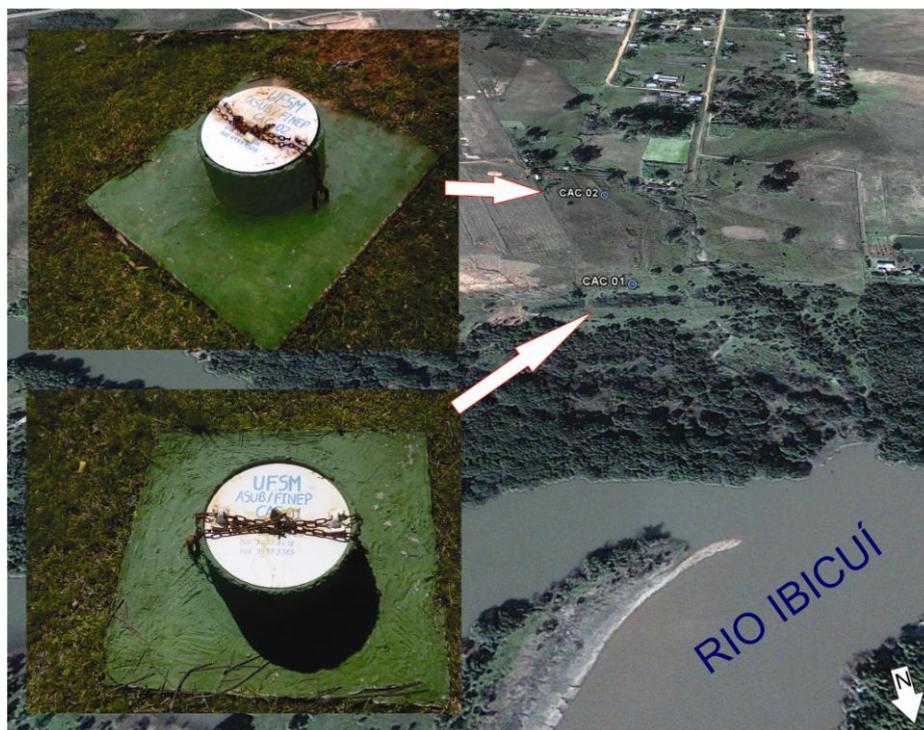


Figura 34: Área de exploração das águas superficiais e seus poços.

A segunda fase foi de construção dos poços de monitoramento (CAC 01, CAC 02 e CAC 03), que ocorreram em janeiro de 2011, e assim foram perfurados os poços de monitoramento, seguindo as Normas técnicas da ABNT, NBRs 12.212/2006, 12.244/2006 e 15.495-1/2007, utilizando-se tubos de plástico (PVC) de diâmetro 50 mm, ranhurados transversalmente, protegidos com laje sanitária em concreto que também continham hastes de ferro para que pudesse colocar correntes que visaram aumentar sua segurança, depois eles foram pintados com tinta de cor verde a base de epóxi, para dificultar a visualização e evitar roubos e vandalismos. Todos foram protegidos com tubo em concreto com diâmetro de 0,40m e tampas de ferro contendo sua identificação.

O poço de monitoramento CAC 01 é constituído por 8,3 barras de cano PVC de 6 metros de comprimento e 50 mm de diâmetro, com isto, sua profundidade é de 50 metros, as barras com pré-filtros foram feitos/colocadas intercaladas. O Poço CAC 02 também foi construído assim, mas com profundidade final de 40 metros, totalizando 6,6 barras de PVC. Já o poço CAC 03 tem 70 metros de profundidade e o mesmo padrão construtivo dos outros dois poços de monitoramento, mas como houve um entupimento, resolveu-se colocar um outro cano com diâmetro de 25 mm, ficando assim mais reforçado, portanto o padrão do poço ficou o seguinte: Cano

externo 50 mm e cano interno 32mm, ambos com 70 metros de profundidade e o pré-filtro intercalados nas barras.

Também foi feito um monitoramento em alguns dias ao longo de 2011, em um ponto específico a variação do nível da água do Rio Ibicuí (figura 35), esta medição foi feita sobre a ponte que passa acima do rio, devido ela ser uma base sólida e estar próxima (4 Km) em relação aos dois poços de exploração superficial (CAC 01 e CAC 02).



Figura 35: Ponto de monitoramento do nível no Rio Ibicuí.

3.2.2 Equipamento de Monitoramento dos Poços e Softwares Utilizados

Para efetuar a leitura dos níveis da água foi utilizado sensores de nível que é um transdutor de pressão e estes sensores automático *barologger* e *levellogger* da Solinst® (figura 36 a e b), que monitoram o nível e a temperatura da água. Estes sensores são de fácil programação, utilização e aquisição dos dados. Estes sensores foram colocados nos poços de monitoramento construídos (CAC 01, CAC02 e CAC 03), e tinham medição programada para obtenção da variação do nível de hora em hora.



Figura 36: Ilustração dos medidores automáticos, a) *barologger* e, b) *levellogger*, que estão instalados nos poços realizando as medições nos tempos programados.

Utilizou-se para estas medições o freatímetro dotado de cabo de 100m nos poços monitorados e da CORSAN que contavam com tubo guia (lateral) de diâmetro $\frac{1}{2}$ polegada. Também para verificação e comparação de possíveis erros dos medidores automáticos foram realizadas 18 campanhas de campo. Estas ocorreram entre os dias 06/09/2011 e 21 de fevereiro de 2012. Posteriormente nos poços tubulares da CORSAN foram substituídos os tubos laterais para diâmetros $\frac{3}{4}$ de polegadas podendo assim serem avaliados com Equipamento Solinst TLC dotado de sensores de Condutividade Elétrica, temperatura e nível da água. Este procedimento ocorreu nos poços de monitoramento e posteriormente nos poços tubulares (figuras 33 e 34).

Como mostra a figura 38, para verificação do posicionamento global foram utilizados os GPS: Garmim 76CSX, ProMark 200 e ProMark 500, e estes dois últimos conferirão maior precisão da localização dos poços.



Figura 38: Equipamentos de georreferenciamento utilizados em campo.

Utilizou-se, também, o software *ArcGIS* 9.3 e o aplicativo *ArcMap*, a imagem de satélite QuickBird do dia 20/06/2010 foi retirada do *software Google Earth* e o banco de dados utilizado foi o da Base Cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul (HASENACK, 2010). Foi utilizado o *Datum* horizontal SAD 69 e o vertical o Posto de Imbituba/SC.

Para a direção do fluxo da água subterrânea foi utilizado o *software SURFER* 8.0, onde se selecionou o método interpolador *krigagem* para sua espacialização após realizar-se comparação com outros interpoladores. Também foi elaborado o mapa da Superfície Potenciométrica (SP), que foi obtida pela relação entre cota altimétrica na “boca do poço” e o nível da água na data considerada (HEATH, 1983).

3.2.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos três poços foram compostas de duas etapas. 1º) Foi feita a coleta das amostras deformadas de cada um dos poços, e elas foram coletadas durante a perfuração dos poços de monitoramento (CAC 01, CAC 02 e CAC 03), portanto, são amostras de calha que foram coletadas de metro em metro nos 10 primeiros metros de profundidade de cada poço e posteriormente a cada dois metros foram feitas coletas das amostras de calha, então o poço CAC 01 teve trinta amostras, devido sua profundidade final ser de 50 metros, o poço CAC 02 teve vinte e cinco amostras (profundidade de 40 metros) e o poço CAC 03 teve quarenta amostras (Profundidade de 70 metros). Totalizando noventa e cinco amostras, que estavam armazenadas e identificadas com suas profundidades específicas e seus respectivos poços, em sacos plásticos.

Após as coletas de campo, as amostras foram levadas para o laboratório, onde elas foram separadas e selecionadas, feita a partir de uma prévia análise granulométrica, que visou portanto numa diminuição no número das amostras analisadas. Esta fase foi importante devido ao enorme número de amostras (noventa e cinco) de campo, e pelo fato da variação da estrutura dos poços ser a mesma em muitos metros, assim foi otimizado o número de amostras. Resultando num total de 43 amostras analisadas, divididas em 21 amostras (figura 39) para o poço CAC 03, 11 para o CAC 02 e também 11 para o CAC 01.



Figura 39: Amostras de calha do poço de monitoramento CAC 03.

Posterior análise e seleção das amostras, estas foram levadas para fazer a análise granulométrica nos laboratórios de Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM, onde foram realizados os 21 ensaios granulométricos do poço CAC 03, utilizando o Método da Pipeta. E no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do departamento de Solos, foram feitas as 22 análises (11 de cada um) dos poços CAC 01 e CAC 02, utilizando o equipamento LS 13 320 MW (figura 40) de difração a laser, é um analisador de tamanho de partícula (granulômetro).



Figura 40: LS 13 320 MW - analisador de tamanho de partícula (granulômetro) por difração a laser.

A análise textural efetuada pelo Método da Pipeta, que é um método de sedimentação, utilizando pipeta para retirar uma alíquota a profundidade e em tempo determinados. A figura 41 mostra a variação (após peneiramento) da porção areia para oito perfis do poço CAC 03.



Figura 41: Variação da granulometria de areia em oito perfis do poço CAC 01.

O equipamento LS 13 320 MW utiliza o Método de Espalhamento de Luz Laser, também chamado de Difração Fraunhofer, que utiliza, como princípio, a interação de um feixe de luz com partículas em um meio fluido. Quando um feixe de luz monocromático e colimado de gás He-Ne atinge uma quantidade de partículas, parte desta luz é submetida a um espalhamento, parte é absorvida e parte é transmitida. No espalhamento, a luz pode ser difratada, refratada e refletida. Neste método, um conjunto de lentes, detetores foto-elétricos e um microprocessador irão captar a intensidade da energia espalhada e transformá-la em distribuição volumétrica das partículas, assumindo-se, a princípio, que as partículas têm formato esférico.

Se o tamanho das partículas é significativamente maior que a longitude de onda da luz incidente, pode-se utilizar a difração Fraunhofer para a avaliação da distribuição do tamanho das partículas, entretanto, se o tamanho das partículas é da mesma ordem que a longitude de onda da luz incidente, a dispersão resultante pode ser analisada pela teoria de Mie, tendo-se que considerar o índice de refração e a absorção das partículas para a interpretação dos dados.

Este equipamento tornou-se eficaz devido: à grande flexibilidade de uso (em ar, suspensões, emulsões e aerossóis); grande amplitude de análise (0,05 a 3500 μm); rapidez; reprodutibilidade (integração de várias médias individuais) e é de fácil calibração (verificações são facilmente realizadas).

A partir das informações sobre a granulometria das amostras pode-se determinar a textura do solo, segundo a proporção relativa dos componentes: areia, silte e argila. A determinação da textura do solo das áreas em estudo obedeceu a classificação textural adotada pela Sociedade Brasileira de Ciências do Solo.

Por fim, com os resultados as análises granulométricas das amostras dos perfis de solo de cada poço foram distribuídas equitativamente nas 13 classes texturais descritas por Lemos; Santos (1984), 42. Para cada uma das treze classes texturais, 10 tipos de solos com suas respectivas frações granulométricas – argila (partículas com diâmetro menor do que 0,002 mm); silte (diâmetro de partículas entre 0,002 e 0,05 mm); areia fina (partículas entre 0,05 e 0,2 mm); e areia grossa (partículas entre 0,2 e 2 mm).

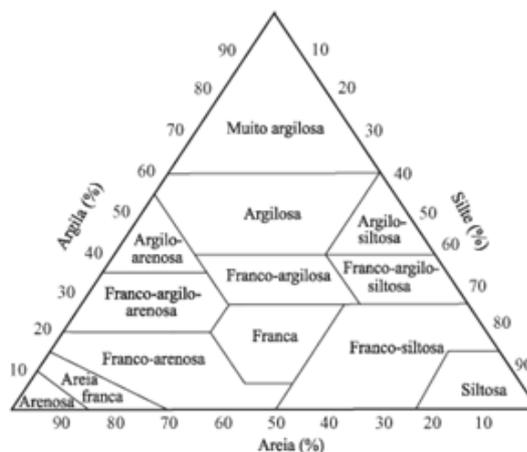


Figura 42: Triângulo de classificação textural de solo. Fonte: LEMOS; SANTOS (1984)

3.2.4 Determinação da Porosidade

Nas duas áreas de estudo, a partir de observações visuais IN LOCO, os solos se apresentam com características arenosas, porém com baixa composição orgânica e argilosa. Destaca-se a importância de conhecer alguns processos físicos do solo, que interferem na capacidade de recarga do aquífero, dentre eles, a sua textura e a porosidade que contribuíram para o entendimento e explicação do processo de recarga.

A determinação dos índices de porosidade nesta pesquisa se faz importante, pois indicam a máxima quantidade de água que o solo pode conter quando saturada, funcionando como um reservatório. A configuração e o tamanho dos poros do solo interferem no fluxo da água subterrânea, sendo que os macroporos são responsáveis pela movimentação da água no subsolo. Também interferem no tempo de resposta da precipitação pluviométrica em relação à flutuação do nível freático e por consequência a capacidade de recarga do aquífero.

Para Healy e Cook (2002) e Maziero (2005), os valores obtidos de rendimento específico podem ser considerados a partir da macroporosidade. O rendimento específico (S_y) é necessário para aplicação do método WTF.

A análise da porosidade foi desenvolvida primeiramente no campo e em seguida no laboratório. As atividades de campo se estruturaram em coletas de amostras de solo não deformadas.

As coletas de amostras de solo não deformadas requerem maior cuidado, e assim foram retiradas com auxílio de anéis metálicos e de bordos cortantes, o qual

é introduzido no solo, sob pressão, com auxílio de um “castelo”, sendo removido a seguir, cuidadosamente, para que o solo nele contido não sofra deformações.

Após a coleta das amostras, não deformadas, elas foram acondicionadas em filme plástico PVC e caixas de isopor com informações necessárias para posterior identificação.

A determinação do índices de porosidade como: porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, foram realizados no Laboratório de Física do Solo – CCR/UFSM. A metodologia (método da coluna de areia) seguida foi a de Reinert; Reichert (2006) descrita a seguir.

Primeiramente no Laboratório as amostras não-deformadas foram saturadas durante vinte e quatro horas, determinou-se a massa saturada e posteriormente levadas à coluna de areia, assim as amostras foram submetidas à sucção (tensão) de 6 kPa utilizando a mesa de tensão (figura 43), até atingir o equilíbrio entre a água retida da amostra e a tensão aplicada. Nesta tensão, o conteúdo de água retirada da amostra representa a macroporosidade do solo e o volume de água retido representa a microporosidade (OLIVEIRA, 1968).

A seguir, determinou-se a microporosidade que foi obtida pelo conteúdo de água retida na amostra submetida a mesa de tensão com 6 kPa multiplicado pela densidade do solo.

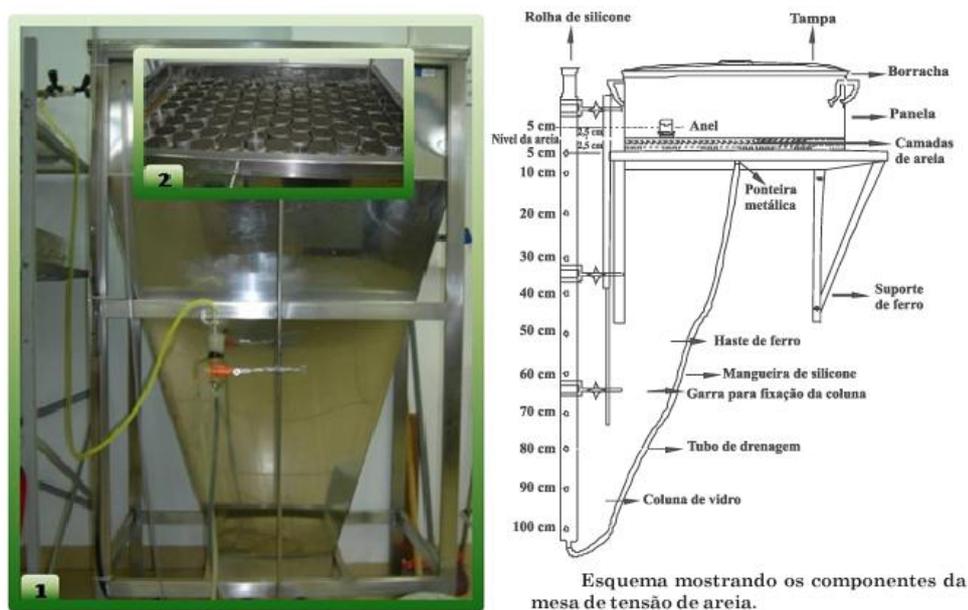


Figura 43: Mesa de Tensão, equipamento que determina a porosidade, denominado como método da coluna de areia.

1 – coluna de areia em recipiente na forma de cone retangular.

2 – Destaque da parte superior do cone onde ficam organizadas as amostras.

Fonte: <http://w3.ufsm.br/fisicadosolo/>.

A partir dos dados de porosidade das amostras foram determinados os valores de rendimento específico. Para cada amostra foi realizada uma repetição, onde a media simples da mesma determinaram o rendimento específico da sub-bacia de campo e da sub-bacia florestada. Adotando-se os procedimentos relatados por Millar (1988), Healy; Cook (2002), Gomes (2008) e Dambrós (2011). Considera-se o rendimento específico como um parâmetro equivalente a macroporosidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa. Inicialmente são exibidos os resultados dos ensaios dos perfis granulométricos e a porosidade total dos poços de monitoramento. Os dados da variação de flutuação dos níveis da água subterrânea e da estimativa de recarga efetiva são apresentados logo em seguida. E as informações resultantes referem-se a partir da aplicação das técnicas apresentadas na metodologia.

Portanto o monitoramento contínuo dos poços e os trabalhos de campo buscaram compreender as flutuações das águas subterrâneas das áreas estudadas. As características das áreas descritas no capítulo de materiais e métodos mostram que elas estão próximas uma da outra, facilitando uma análise geral e também reduzindo custos para os trabalhos periódicos em campo. Por se encontrar em área de aquífero livre a aplicação do método WTF buscou estimar a recarga efetiva para as áreas. Os eventos de precipitação serviram de comparação para a análise junto a variação da flutuação do nível do lençol freático.

4.1 Granulometria

Com relevante importância para a compreensão dos índices de recarga das águas subterrâneas, a granulometria, torna-se um dos itens estudados. Assim, fez-se ensaios granulométricos do material de calha dos perfis de cada um dos poços de monitoramento presentes dentro das áreas em estudo, isto é, o poço CAC 01 e CAC 02 localizados dentro da área de retirada de água superficial próximo ao Rio Ibicuí. Já o poço CAC 03 está presente na área de exploração da água subterrânea através de poços de abastecimento da CORSAN.

Assim os ensaios da granulometria serviu para determinar o percentual das frações areia, silte e argila que definem a textura da litologia e a partir destas informações foi possível realizar a classificação textural das amostras, seguindo a classificação proposta pela *United States Department of Agriculture* - USDA, adotada pela Sociedade Brasileira de Ciências do Solo - SBCS.

Após a realização da análise granulométrica das amostras de calha de cada poço de monitoramento no laboratório, foram plotados os resultados analíticos para um diagrama triangular, onde as diferenças classes texturais foram delimitadas, segundo as proporções de frações: areia total, silte e argila. O triângulo proposto pelo *Soil Survey Staff* do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte foi modificado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, a qual introduziu mais uma classe textural, a denominada argila pesada, bem como a modificação da palavra *barro* para franco. Assim, por exemplo, o solo pertencente à classe textural *barro* argiloso é agora denominado franco argiloso.

A classificação da classe textural para cada poço monitorado CAC 01, CAC 02 e CAC 03 está respectivamente apresentada nas figuras 44, 45 e 46. Para o poço CAC 01 a maioria das amostras foram enquadradas nas classes areia-franca, franco-arenosa e arenosa. A classificação textural das amostras para o poço CAC 02 obteve dois enquadramentos, que foram as classes areia-franca e arenosa. Já o poço CAC 03 nos seus 70 metros de profundidade, a textura que predomina em 80% do poço foi a classe arenosa, como está classe encontra-se a partir dos 8 metros de profundidade não se pode descartar as classificações acima que são de suma importância em relação a infiltração e recarga para a área.

Portanto a análise granulométrica dos poços de monitoramento CAC 01 e CAC 02 localizados na área de retiradas de água superficial mostram que na área há uma predominância da fração areia, o que condiz com a geologia local que define esta área como depósitos aluvionares Cenozóicos (Carraro et al. 1976), ou seja, depósitos de calha do Rio Ibicuí. A quantidade de areia, que tem seus poros maiores, pode refletir numa variação de fluxo mais intensa, mas uma capacidade de armazenamento menor.

Na área com exploração da água subterrânea onde estão localizados os poços de abastecimento público e onde encontra-se o poço de monitoramento CAC 03, que segundo a classificação textural em seu perfil existe muita porção areia, mas elas estão nas camadas mais baixas, e as camadas acima encontram-se porções de textura semi-confinante como as classes franco-argilosa e franco-argilo-arenosa, que tem maior capacidade de retenção da água do que as camadas subjacentes arenosas.

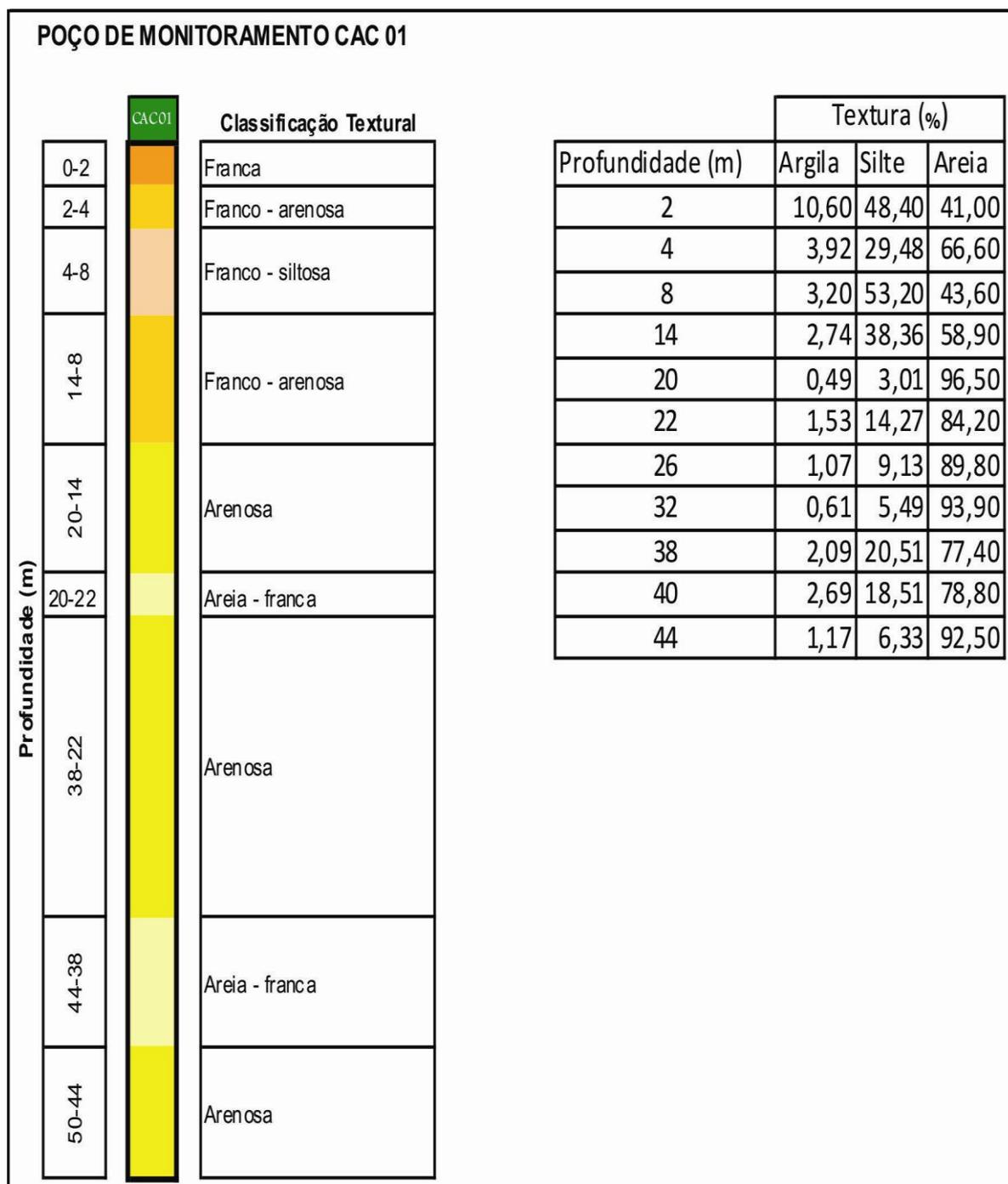


Figura 44: Perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 01.

O perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 01, mostra que na sua camada superior, entre 0 e 2 metros de profundidade, encontra-se a maior percentagem de argila no perfil do poço, mesmo assim esta quantidade é pequena. Até os 14 metros de profundidade o percentual da fração silte é significativa, destacando a profundidade de 4 a 8 metros em que esta fração representa 53,20%, e segundo o diagrama triangular do solo esta profundidade é classificada como franco-siltosa. Como este poço tem profundidade final de 50 metros a

predominância da classificação textural foi a classe arenosa que representa 34% do perfil granulométrico do poço.

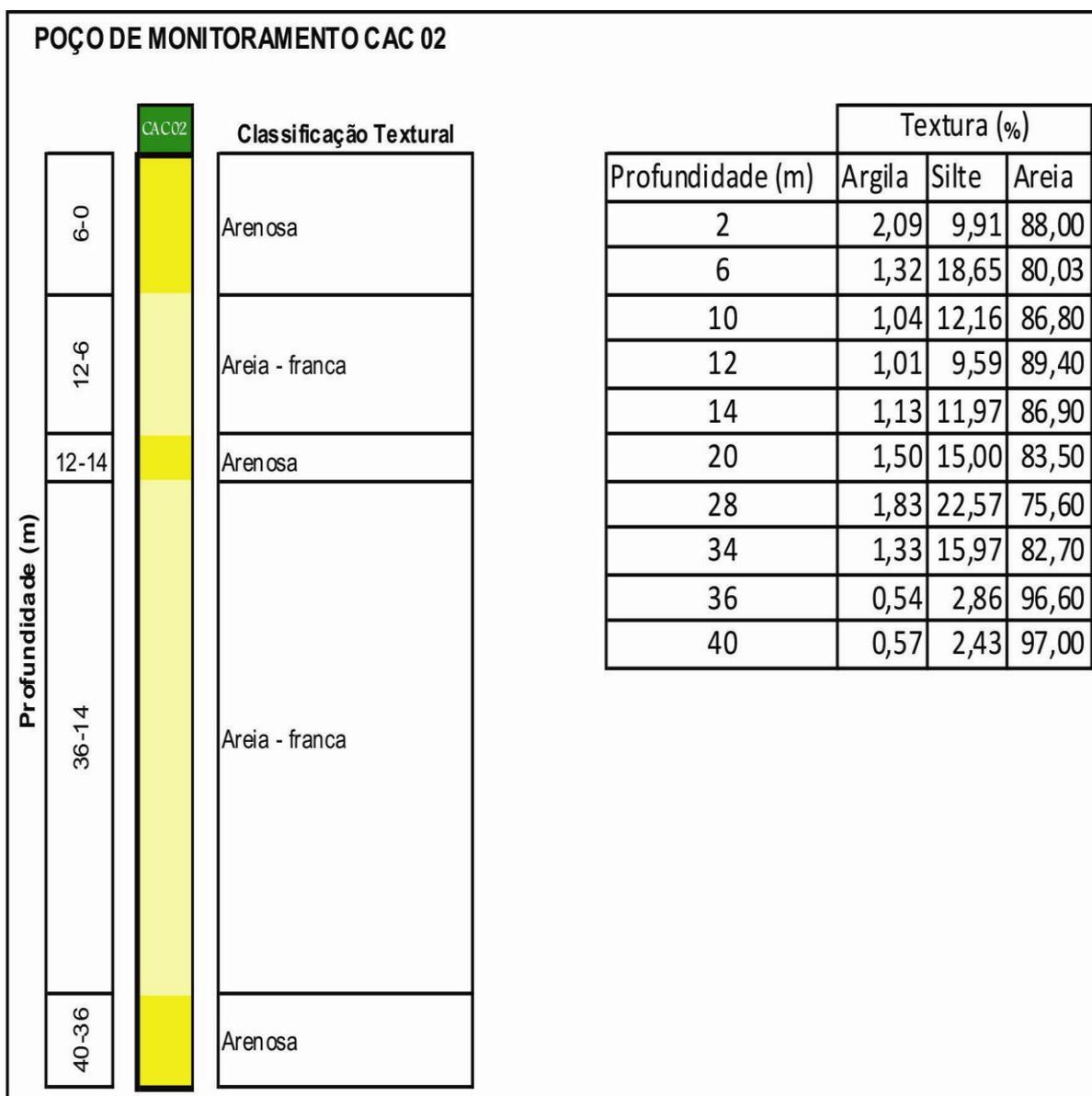


Figura 45: Perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 02.

O poço de monitoramento CAC 02 tem 40 metros de profundidade e a classe granulométrica predominante é areia-franca, representando 70% de seu perfil, e os outros 30% são da classe arenosa, que tem sua maior porção nos seis primeiros metros de profundidade do perfil do poço. Esta característica granulométrica deste poço reflete possivelmente, uma mais rápida percolação da água proveniente da precipitação, fazendo com que a resposta à variação do nível freático seja mais instantânea do que a do poço CAC 01. Esta comparação deve-se ao fato de eles

estarem próximos (160 metros) e fazerem parte da área de estudo de retirada de água superficial.

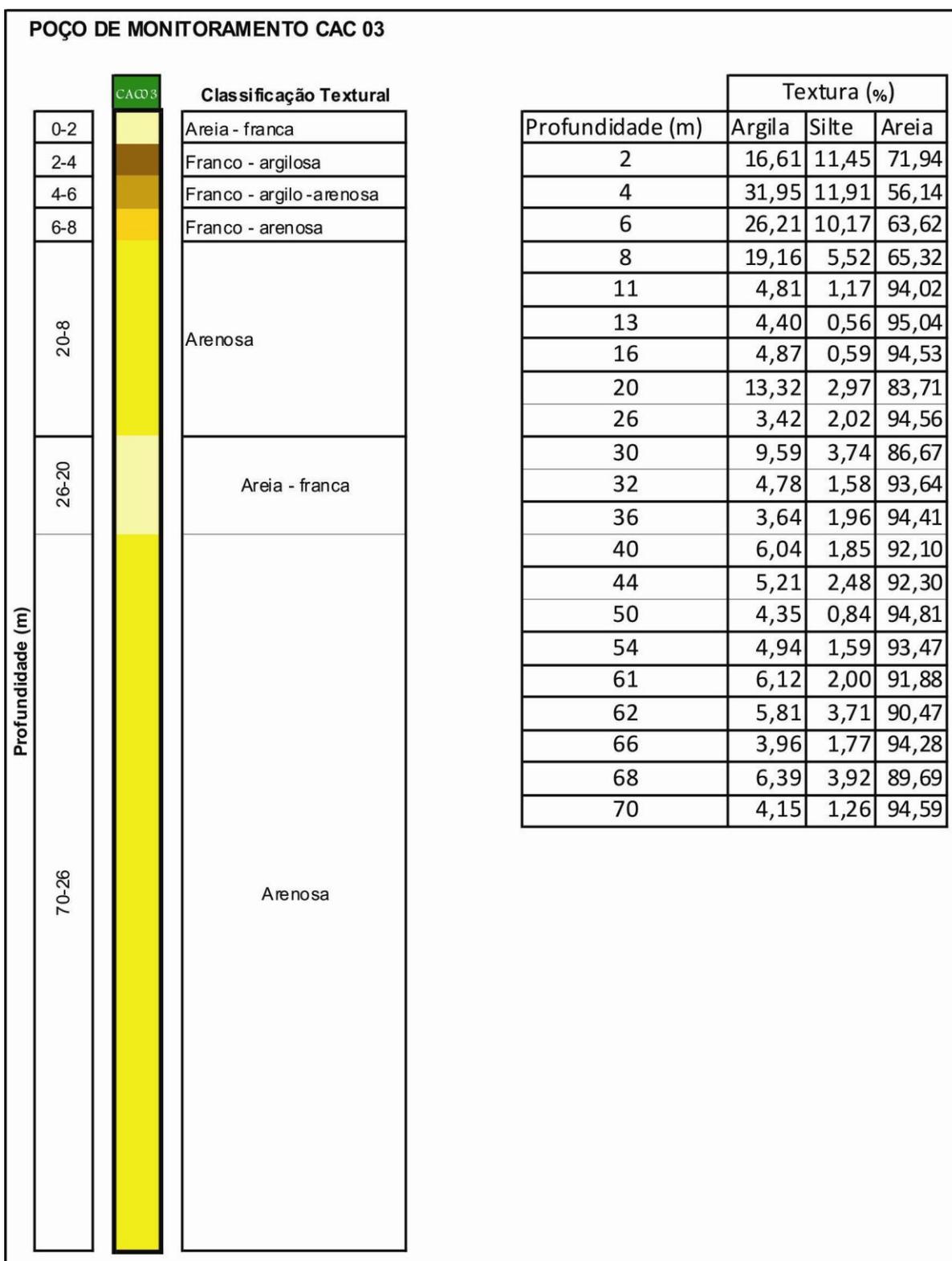


Figura 46: Perfil granulométrico do poço de monitoramento CAC 03.

Na área de exploração subterrânea da água para o abastecimento público está o poço de monitoramento CAC 03, que nos seus 70 metros de profundidade foram encontrados 5 tipos de classes granulométricas, que podem ser divididos em dois, isto é, as classes com fração areia predominante e as classes com fração argila significantes. As classes com fração areia predominantes se encontram quase que na totalidade do perfil do poço, mas estão em sua maioria sua parte subjacente e as classes com porção argila significantes representam 8,6% da profundidade total. Mas como se encontram entre 2 e 8 metros de profundidade podem ser de suma importância quali-quantitativa para as águas subterrâneas, isto quer dizer que na parte qualitativa está camada pode ter uma função filtro o que é melhor para as camadas inferiores onde está presente o aquífero, devido a camada argilosa ter mais microporos e poder reter mais os microorganismos em seus poros, funcionando como um filtro natural. E na parte quantitativa estas camadas servem como reservatório da água, o que pode representar uma maior produção na exploração da água subterrânea. E em épocas de seca as camadas que contém uma porção significativa de argila podem reter mais água subterrânea e que podem infiltrar até estas camadas oriundas de precipitações anuais. Este poço penetra a Formação Pirambóia (BRASIL/CPRM/2008) e/ou Formação Rosário do Sul (CARRARO et al. 1976).

4.2 Porosidade total

Com os valores apresentados na tabela 4, observa-se que os poços de monitoramento CAC 01 e CAC 02 tem resultados iguais devido as amostras de solos não deformados coletadas em campo serem semelhantes, visto que eles estão próximos na Planície Aluvial. Já o poço CAC 03, localizado na outra área de estudo, apresenta diferenças quanto à porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Os valores da densidade do solo estão presentes na tabela 4 e os dados da porosidade total estão representados nas tabelas 4 e 5.

Deve-se destacar que o fluxo de gases e o movimento de água no solo estão intimamente relacionados ao volume de macroporos. Em outras palavras, a oxigenação radicular e a capacidade de infiltração e redistribuição de água no perfil dependem da capacidade do solo em conduzir ar e água, o que está ligado à

macroporosidade. Sua contribuição efetiva nesses processos, nesses casos, depende, além da quantidade, da sua continuidade em profundidade e da abertura à superfície. Adotando os valores de macroporosidade obtidos para as cada amostra, como sendo equivalentes ao rendimento específico, estes dispostos na Tabela 5.

Tabela 4: Dados obtidos no ensaio de porosidade.

Amostras	Densidade do Solo (g/cm³)	Porosidade Total (cm³/cm³)	Macroporosidade (cm³/cm³)	Microporosidade (cm³/cm³)
CAC 01	1,5	0,4216	0,1575	0,2641
	1,5	0,424	0,1680	0,2560
CAC 02	1,5	0,4216	0,1575	0,2641
	1,5	0,424	0,1680	0,2560
CAC 03	1,59	0,3879	0,1556	0,2323
	1,61	0,3801	0,1510	0,2291

Tabela 5: Sistematização das informações de porosidade total em porcentagem e determinação do rendimento específico e retenção específica.

Amostras	Porosidade total (%)	Macroporosidade (%)	Rendimento específico Sy (%)	Retenção específica Sr (%)	Sy utilizado (%)
CAC 01	42,16	15,75	15,75	26,41	15,75
	42,4	16,80	16,80	25,60	
CAC 02	42,16	15,75	15,75	26,41	15,75
	42,4	16,80	16,80	25,60	
CAC 03	38,79	15,56	15,56	23,23	15,10
	38,01	15,10	15,10	22,91	

Os resultados obtidos para rendimento específico foram inferiores àqueles propostos por Heath (1983) para areia apresentando uma porosidade de 25% e um rendimento específico de cerca de 22%. Os valores mais baixos encontrados na

pesquisa devem ser devido as contribuições das frações (silte + argila) que ocorrem em distintos valores em diferentes profundidades Figuras 44, 45 e 46.

Salienta-se que a determinação do rendimento específico (S_y) é imprescindível, pois este é uma das variáveis necessárias para a aplicação do Método WTF as estimativas de recarga do aquífero livre (HEALY; COOK, 2002).

4.3 Análise da Variação da Flutuação do Nível Freático

A figura 47 representa o comportamento da variação da flutuação do nível da água subterrânea dos três poços de monitoramento relacionados com os eventos de precipitação, monitorados pela estação pluviométrica da ANA que encontra-se localizada há uma distância de 2,290 Km do poço CAC 01; de cerca de 2,130 Km do CAC 02 e ainda, de 1,2 Km ao poço CAC 03.

Em base nos registros dos *dataloggers* (medidores automáticos) e do *barologger*, foi possível obter-se dados do nível da água subterrânea em intervalos de 60 minutos durante 386 dias, nas duas áreas do estudo. Como os dados de precipitação são coletados de forma diária, resolveu-se adotar a mesma condição para a variação dos níveis freáticos, isto é, foram feitas as médias diárias das 24 horas coletadas, o que não alterou as características do comportamento do nível da água.

Assim analisando-se a relação entre a precipitação e o comportamento do nível freático, nota-se que para os três poços houve resposta instantânea para eventos de chuvas mais intensas. E que nos meses mais chuvosos nota-se que há uma elevação no nível freático, refletindo numa recarga de água subterrânea para ambas as áreas avaliadas.

Relacionando-se as características de variação da flutuação do nível da água e da precipitação com a granulometria e a porosidade do meio, nota-se que no poço CAC 02, onde há maior teor da fração areia (figura 45) ocorreu uma maior elevação relativa do nível da água, e isto pode ser atribuído a porosidade da fração areia e, a sua maior facilidade para infiltração da água que provém das precipitações. O conceito de infiltração foi introduzido no ciclo hidrológico por Horton (1933), que definiu a capacidade de infiltração potencial f_p como sendo a taxa máxima à qual um dado solo pode absorver a precipitação numa certa condição. O autor ainda

admitiu como hipótese que a capacidade de infiltração seria exponencialmente decrescente com o tempo, de um valor máximo inicial até uma taxa constante. A taxa real de infiltração **fi** é sempre menor do que **fp** (exceto quando a intensidade de chuva **i** é igual ou maior do que **fp**), e também diminui exponencialmente com o tempo, à medida que o solo se torna saturado e as suas partículas argilosas incham (MANOEL FILHO, 2008).

Já no poço CAC 03 pode-se constatar que o teor de argila em suas camadas superficiais relacionadas com a flutuação e a precipitação, mostram-se condizente com a capacidade de retenção da água proporcionada pela porosidade da fração argila. Heath (1983) salienta que a argila apresenta uma porosidade de 50%, porém um rendimento específico de apenas 2%, sua maior parcela esta representada na retenção específica de cerca de 48% (em porcentagem de volume). Portanto associada a microporosidade (tabela 4) esta variou de 0,2291 a 0,2323 em cm^3/cm^3 equivalente a 22,91% a 23,91% do volume total.

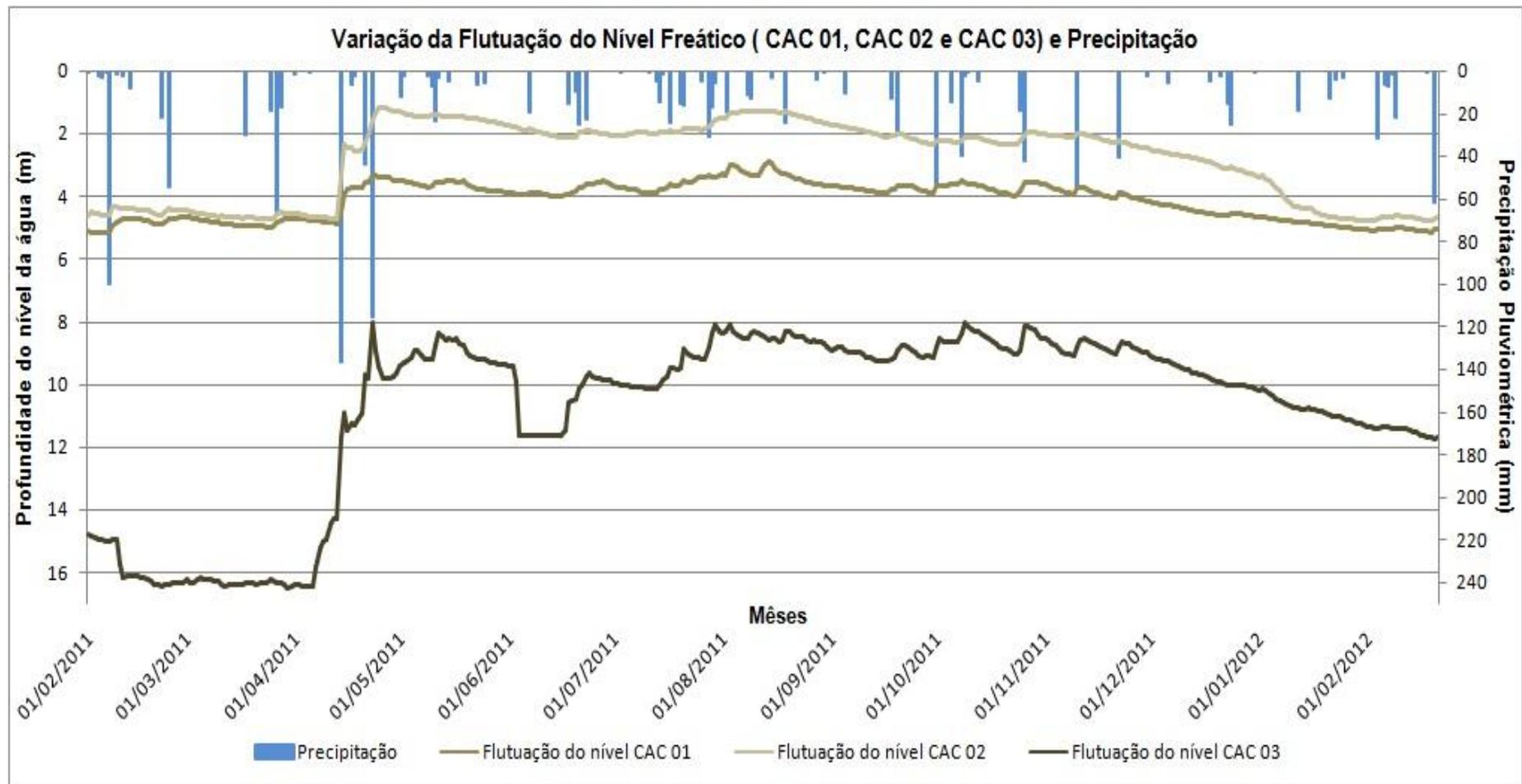


Figura 47: Variação da flutuação do nível da água subterrânea dos poços CAC 01, CAC 02 e CAC 03 relacionados com a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS.

A análise detalhada da variação do nível da água subterrânea para cada um dos poços de monitoramento encontra-se nas figuras 48, 49 e 50, representadas respectivamente os poços CAC 01, CAC 02 e CAC 03.

A flutuação do nível freático do poço CAC 01 (área onde há retirada da água superficial) está ilustrada na figura 47, mostra que os níveis de variação estão entre 5,16m (maior profundidade) e 2,88m (menor profundidade). Resultando no valor de 2,28m, que é a diferença entre o maior pico e a maior recessão. A variação do nível freático também correspondeu bem aos períodos chuvosos e de estiagem.

O poço de monitoramento CAC 02 (figura 49) que também encontra-se na área de retirada da água superficial, teve uma variação da flutuação do nível freático entre 1,17m (maior recessão) e 4,79m (maior pico), resultando no valor de 3,62m. A variação do nível freático, como no CAC 01, também coincidiu bem aos períodos chuvosos e de estiagem.

Comparando a flutuação do nível freático nos poços situados na Planície Aluvial CAC 01 e CAC 02, já que eles estão próximos e na mesma área de estudo, notou-se que o comportamento CAC 01 foi mais uniforme que o CAC 02, representados nos valores da diferença entre os picos e as recessões. Observou-se outra diferença notável deles e seus comportamentos de flutuação esteve nos períodos chuvosos e de estiagem, em que o poço CAC 02 em relação ao CAC 01, mostrou uma maior variação do nível, delimitando bem estes períodos. Comparando-se visualmente as Figuras 48 e 49 notas-se que ocorrem valores diferentes nas classes de solo/rocha em poços perfurados próximos, sendo que o CAC 01 apresenta percentualmente nas camadas superiores uma quantidade significativa de silte e argila quando comparado ao CAC 02 que predominam as areias.

A Figura 50 também mostra a variação da flutuação do nível da água subterrânea durante os 386 dias, entre 01/02/2011 e 21/02/2012. Com isto avaliou-se que o nível mais profundo foi de 16,51m, até o nível mais raso de 8,04m, resultando na diferença de 8,47m, que foi a maior diferença do valor entre os picos e recessões entre os poços monitorados. Isto pode ser devido ao poço CAC 03 sofrer influência das explorações de água subterrânea dos seis poços de abastecimento da CORSAN quando ativos. Num raio de 690m do poço CAC 03 estão dispostos estes seis poços que totalizam uma vazão de exploração de 224 m³/h. Já num raio de 170m do poço CAC 03 estão localizados os três poços mais

próximos (P15, P03 e Figura 34) que juntos totalizaram uma vazão de exploração da água subterrânea de 118 m³/h. Foram realizados testes de rebaixamento X tempo em relação ao Poço P15 da CORSAN e o CAC 03, porém os registros não foram confiáveis.

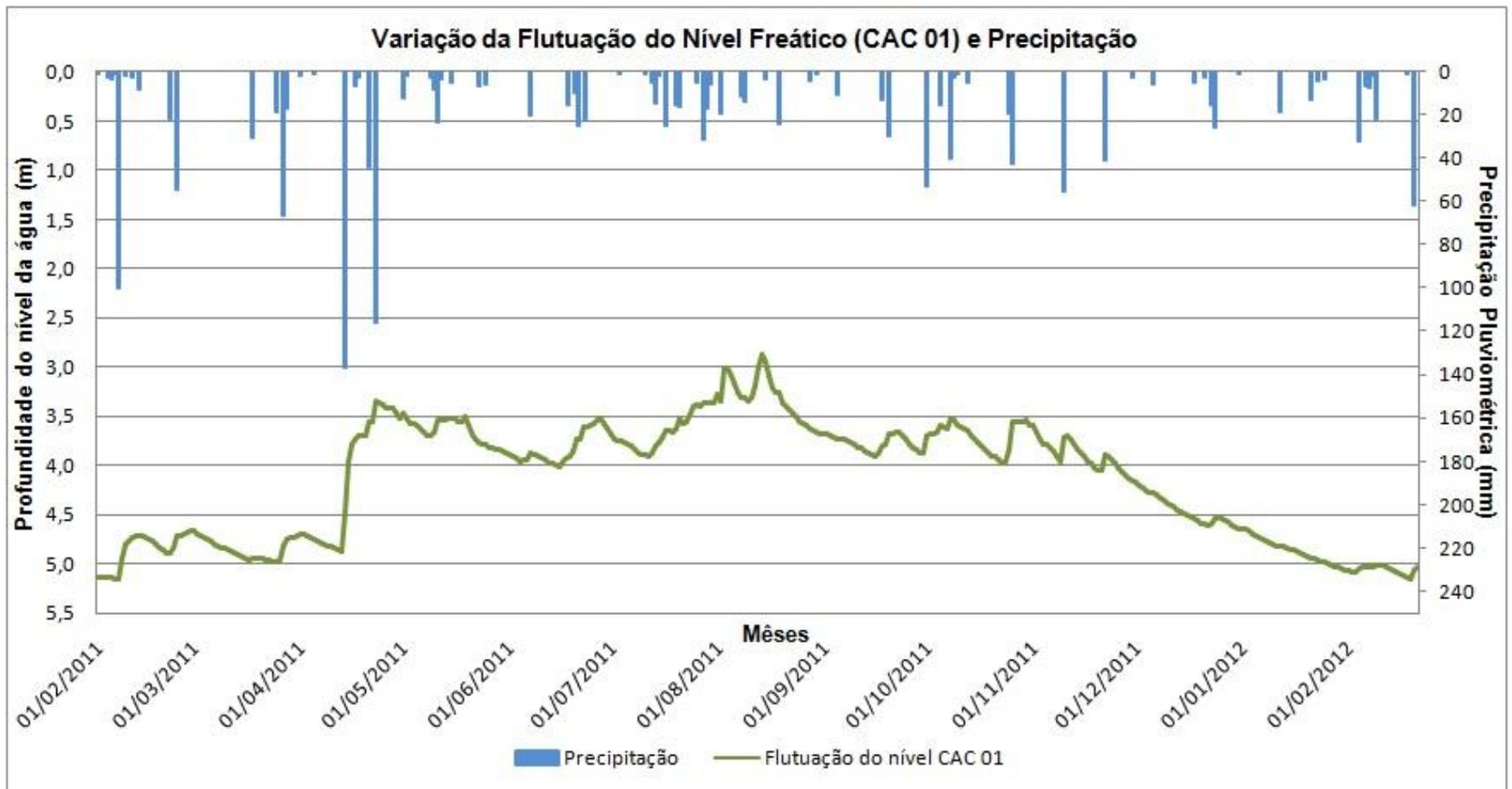


Figura 48: Variação da flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 01 (área de retirada de água superficial) em relação a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS.

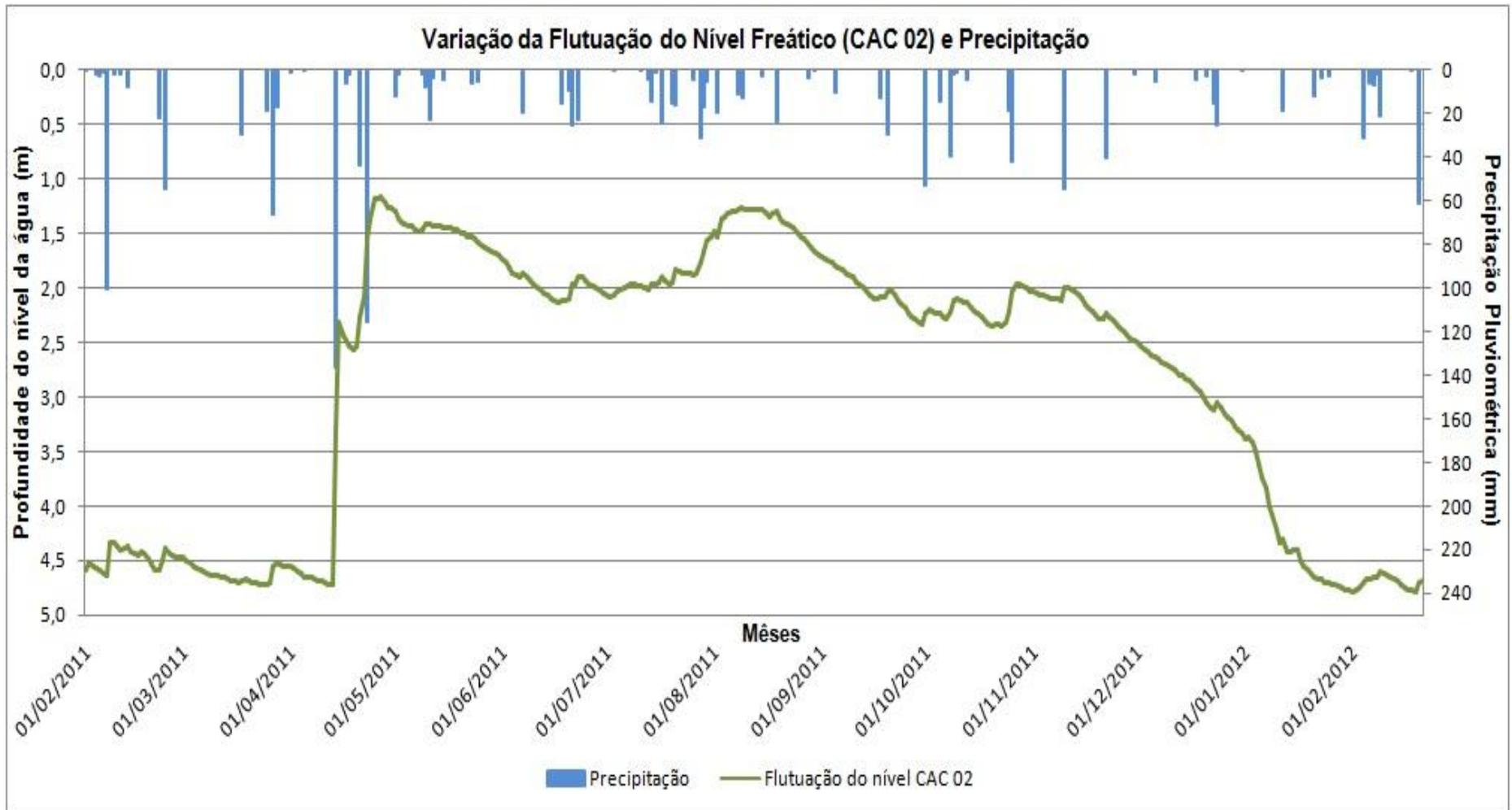


Figura 49: Variação da flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 02 (área de retirada de água superficial) em relação a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS.

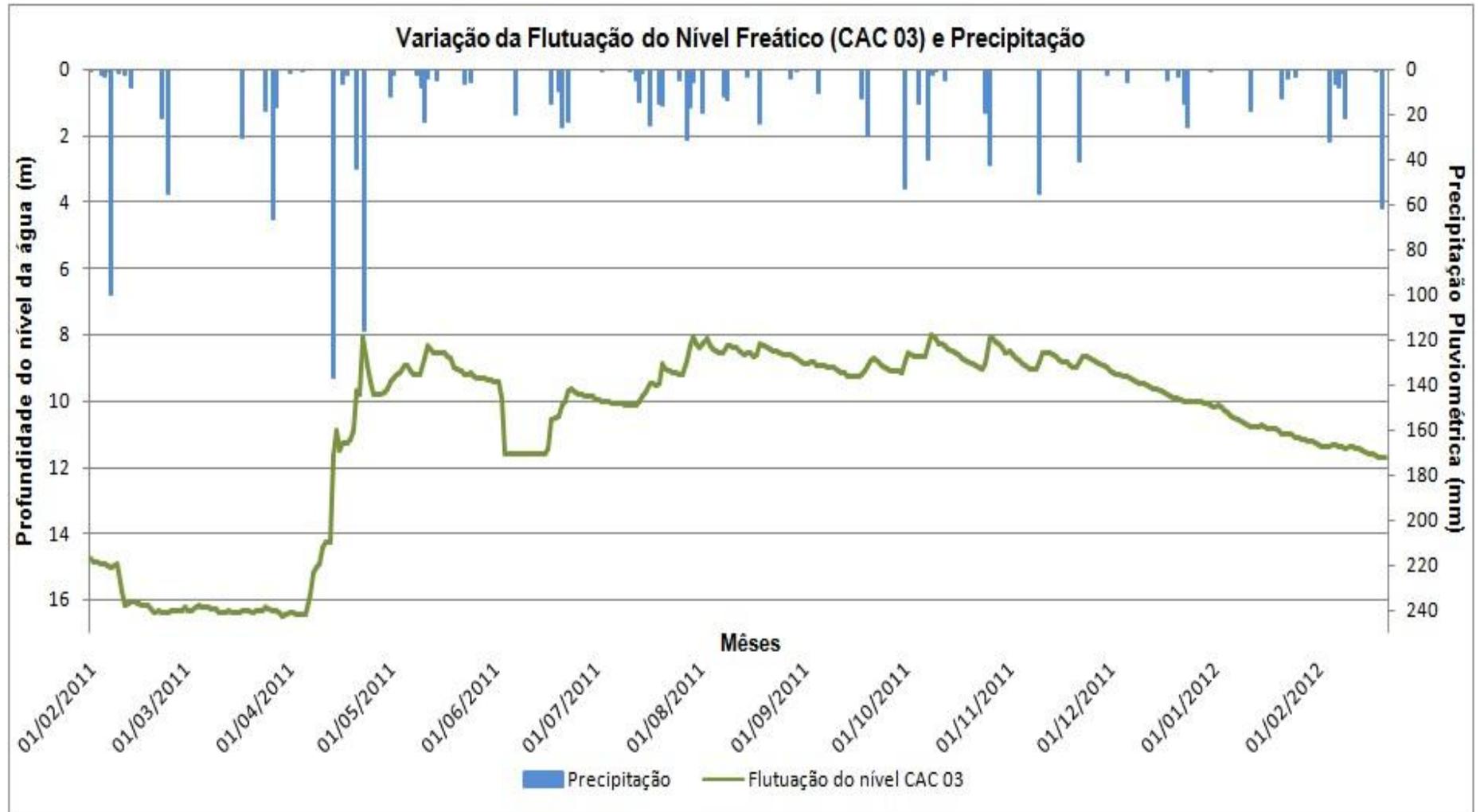


Figura 50: Variação da flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 03 (área de exploração de água subterrânea) em relação a precipitação pluviométrica no período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS.

Considerando-se as proposições do CNRH para o gerenciamento de bacias hidrográficas com a realização de uma interação rio e aquífero, conforme a Resolução nº 22/2002 em seu artigo 2º, estabelece que: Os Planos de Recursos Hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando à gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.

Portanto as figuras 51, 52 e 53 ilustram a relação da variação da flutuação do nível da água subterrânea com a variação do nível da água superficial, desenvolvida na área de estudo. Deste modo os poços analisados foram o CAC 01 e o CAC 02 localizados na Planície Aluvial.

A figura 51 mostra a Seção topográfica mostrando a situação dos poços de monitoramento e a variação do nível do Rio Ibicuí, analisados em duas datas distintas, uma em período de estiagem e outra no primeiro terço da estação chuvosa.

A variação dos níveis da água do Rio Ibicuí e dos poços da área estudada, está ilustrada na Figura 52, onde nota-se que o nível da água do rio reduz-se, condizendo com o relatório da STE (1998), que em resposta aos altos déficits de precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, durante o período de novembro a março, associados a altas taxas de evaporação e aos solos rasos e arenosos. E também, este período coincidir com o aumento das demandas de água para a irrigação de arroz. Portanto está pesquisa traz a importância do uso sustentável dos recursos hídricos e seu estudo relacionado interações que possam afetá-lo.

O Cartograma da Superfície Potenciométrica e da direção do Fluxo da Água Subterrânea, nas áreas de estudo (figura 53). Heath (1983) sugere que a diferença entre as cotas altimétricas na boca dos poços e os níveis estáticos tem-se a superfície potenciométrica. A partir dela obtém-se as tendências de direção do fluxo da água subterrânea. E analisando-se o cartograma e a seção topográfica da figura 51, pode-se afirmar que o Rio Ibicuí nesta área é efluente, isto é, recebe contribuição do aquífero Livre pertencente ao Sistema Aquífero Guarani e uma parcela dos Aluviões Cenozóicos.

Em relação a exploração das águas subterrâneas, notou-se a partir da análise do cartograma da figura 53, que existem várias direções de fluxo da água subterrânea neste local. Parecem ser formar dois altos potenciométricos próximos aos poços de monitoramento CAC02 e CAC 03. Como hipótese, sugere-se que

estes altos potenciométricos, podem ser devido ao seu modelo construtivo, o cano PVC plástico é ranhurado desde os primeiros metros, facilitando as entradas de água. Já os poços de abastecimento da CORSAN evitam estas entradas de águas rasas, utilizando tubos lisos nos primeiros 20m de penetração. Notou-se uma entrada de água em cerca de 15 m no Poço P03 (4300001073= IQ273). O poço CAC 03 está próximo a uma região alagadiça, que pode representar uma surgência. Por outro lado houve formação de baixos potenciométricos próximo dos poços P03 (430001073) e P14 (4300002061, desativado).

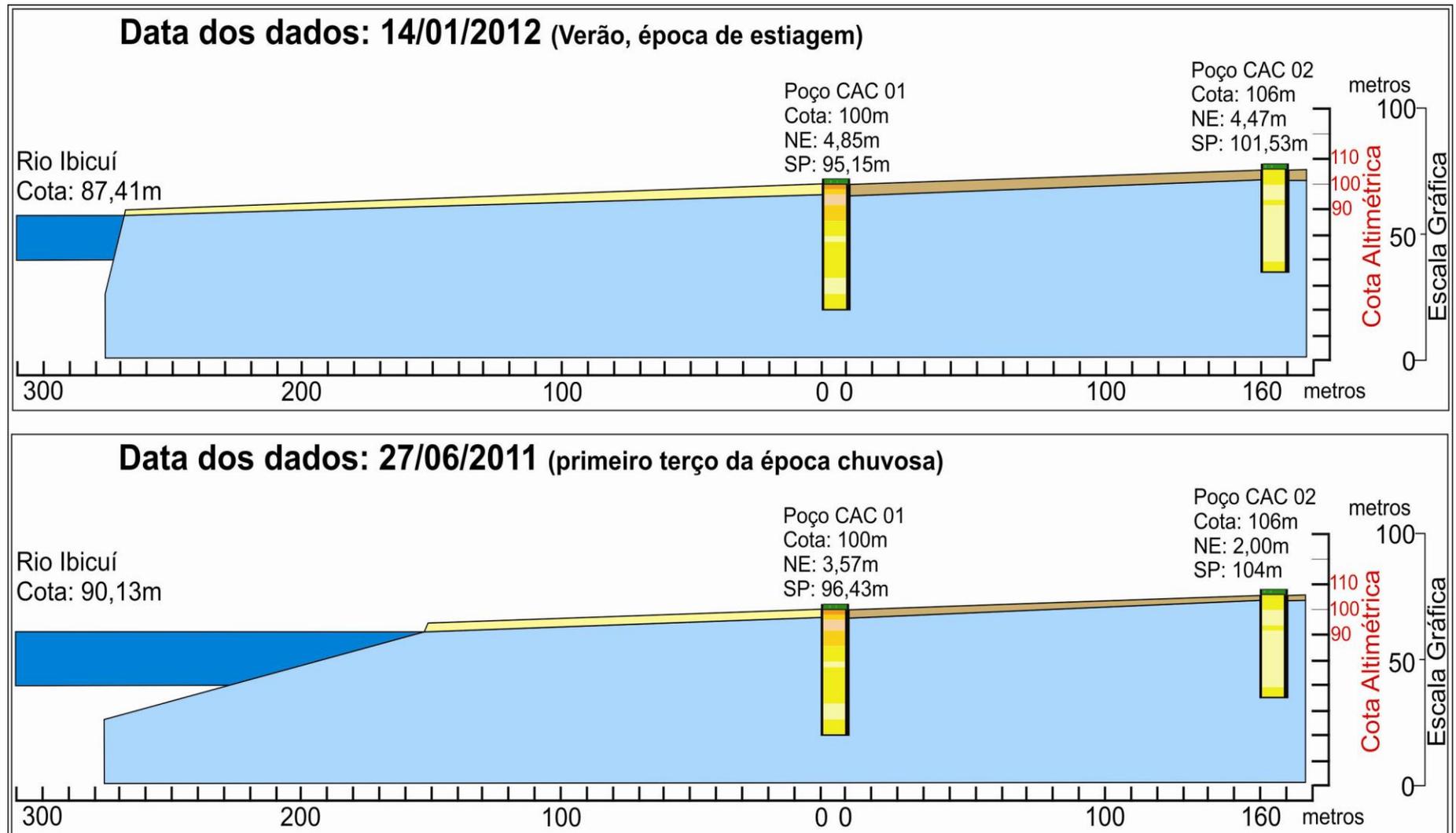


Figura 51: Seção topográfica mostrando a situação dos poços de monitoramento CAC 01 e CAC 02 na área de retirada da água subterrânea, em duas datas: 27/06/2011 a 14/01/2012, em Cacequi/RS.

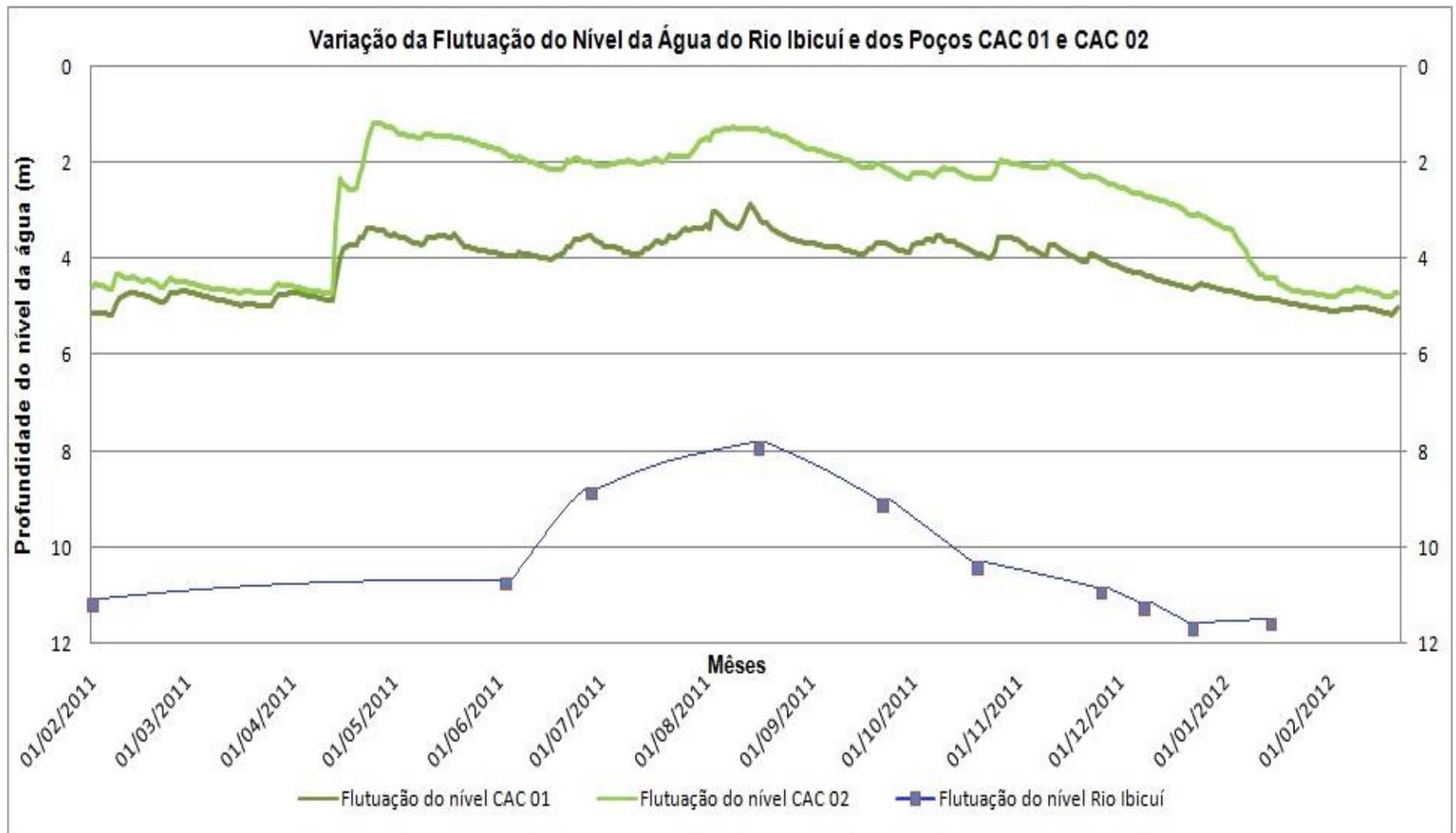


Figura 52: Variação da flutuação do nível da água do Rio Ibicuí e dos poços CAC 01 e CAC 02 (área de retirada de água superficial) durante o período de 01/02/2011 a 21/02/2012, em Cacequi/RS.

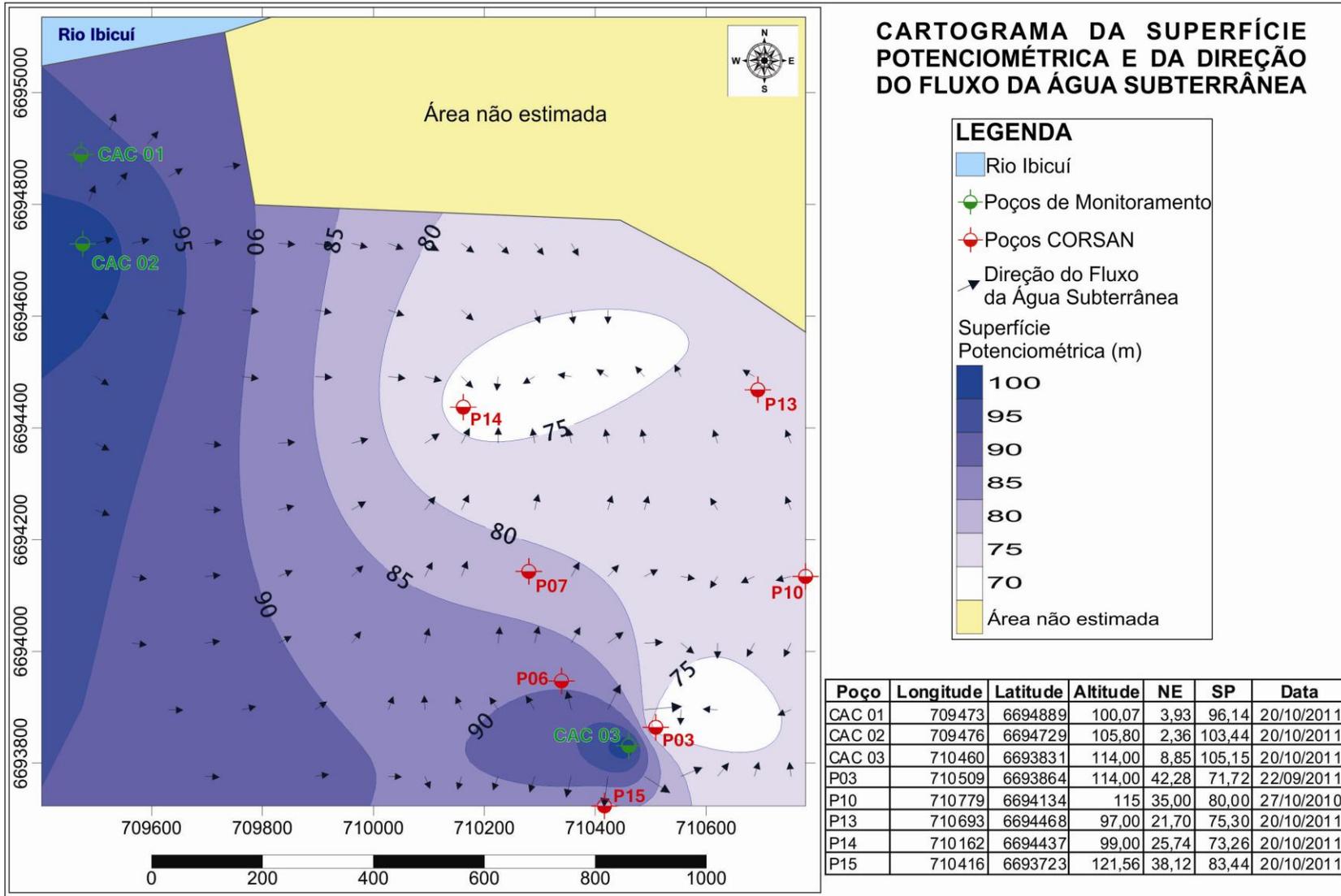


Figura 53: Cartograma da Superfície Potenciométrica e da direção do Fluxo da Água Subterrânea, nas áreas de estudo.

O comportamento do nível estático do poço P03 (figura 54) variou durante o tempo, e o aumento de seu nível coincide com a estação chuvosa, mas tem que ser levado em conta que o poço estava desativado durante os últimos meses, o que pode contribuir também com a elevação do nível, visto que o poço não estava bombeando. Esta análise deve-se também as características deste poço, que foi perfurado em 01/10/1968, com profundidade final de 89 metros, e o nível estático na época foi de 20,62, o que mostra uma variação de 21,66 metros de seu nível estático, depois de aproximadamente 43 anos de uso (nível estático utilizado = 42,28m, referente a data 22/10/2011).

Na figura 55, que aborda o comportamento do poço (P15) de abastecimento da CORSAN, mostra justamente o mesmo problema, que o poço P03, ou seja, o poço tem seu nível estático rebaixado comparando somente as datas do gráfico, até mesmo em medições em épocas chuvosas. O que pode ser dito também para salientar o problema que possa ocorrer conforme o rebaixamento do nível estático, até o mês de outubro de 2010, este poço estava desativado e só recomeçou a funcionar a partir do fim deste mês.

Mas como o poço P15 é relativamente novo, foi perfurado em 30/06/2000, com profundidade 222 metros, e o nível estático referente a esta data era de 33,65m, o que demonstra que para este poço não houve mudança no comportamento de seu nível da água, quando leva-se em conta o período em que este estava desativado. E outro fator importante é a vazão deste poço, que é o mais produtivo, $60\text{m}^3/\text{h}$, mesmo ele sendo o mais profundo, o que pode ajudar na sua produção, é necessário um monitoramento, para que haja um controle e previna uma possível sobreexploração não só desta como das outras captações que estão ao seu redor.

Analisando-se o comportamento dos dois poços de abastecimento da CORSAN mais próximos P03 e P15, que estão respectivamente a 60m e 110 metros do poço de monitoramento CAC 03, presentes na área de estudo onde há retirada da água subterrânea. Já no (P14, 430002061, desativado) instalou-se medidor de nível em fevereiro de 2012. Os resultados parciais ilustrados podem representar um rebaixamento do nível local. Hipótese a ser melhor estudada no futuro.

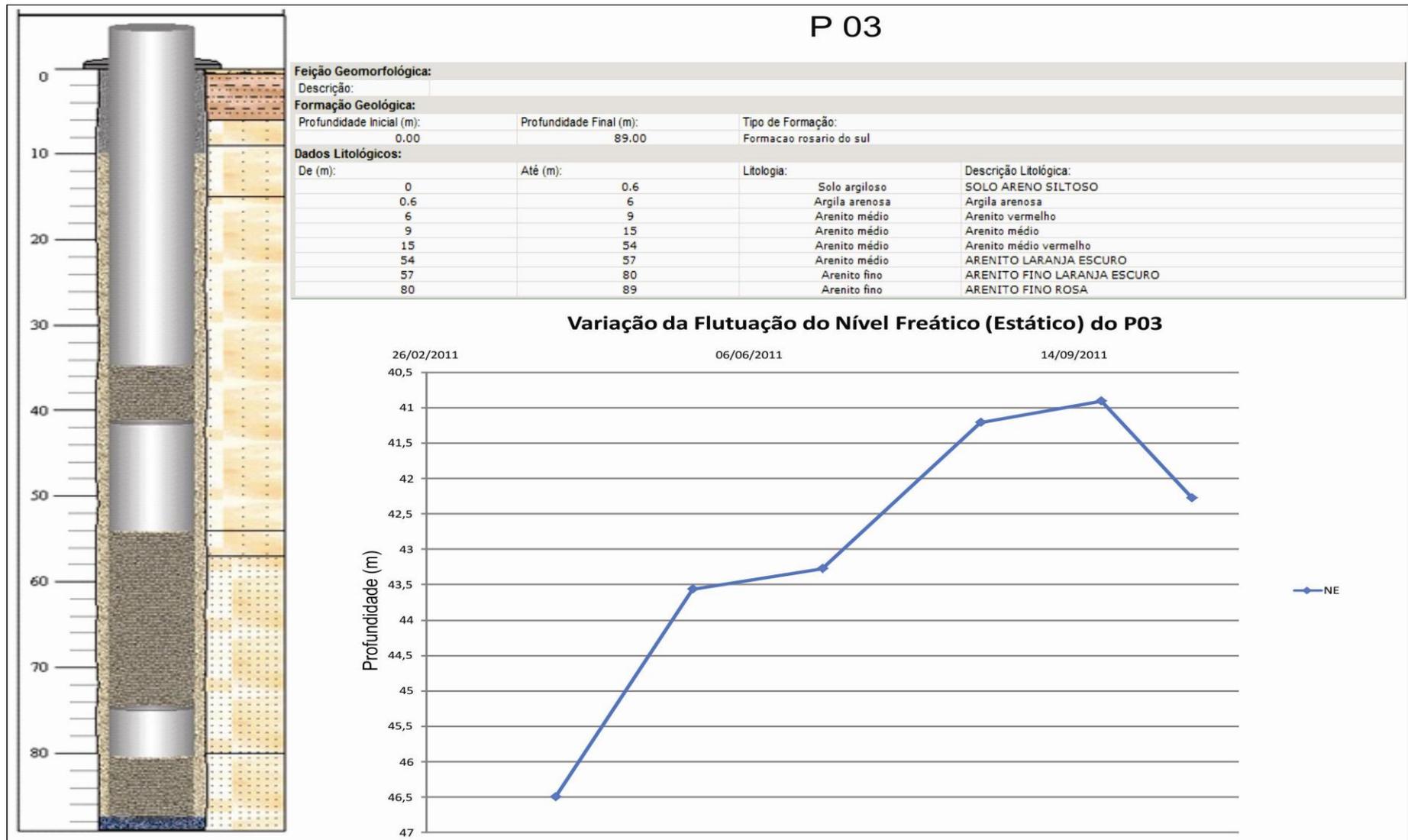


Figura 54: Comportamento do poço de abastecimento P03 da CORSAN, (4300001073= IQ 273 SIAGAS/CPRM).

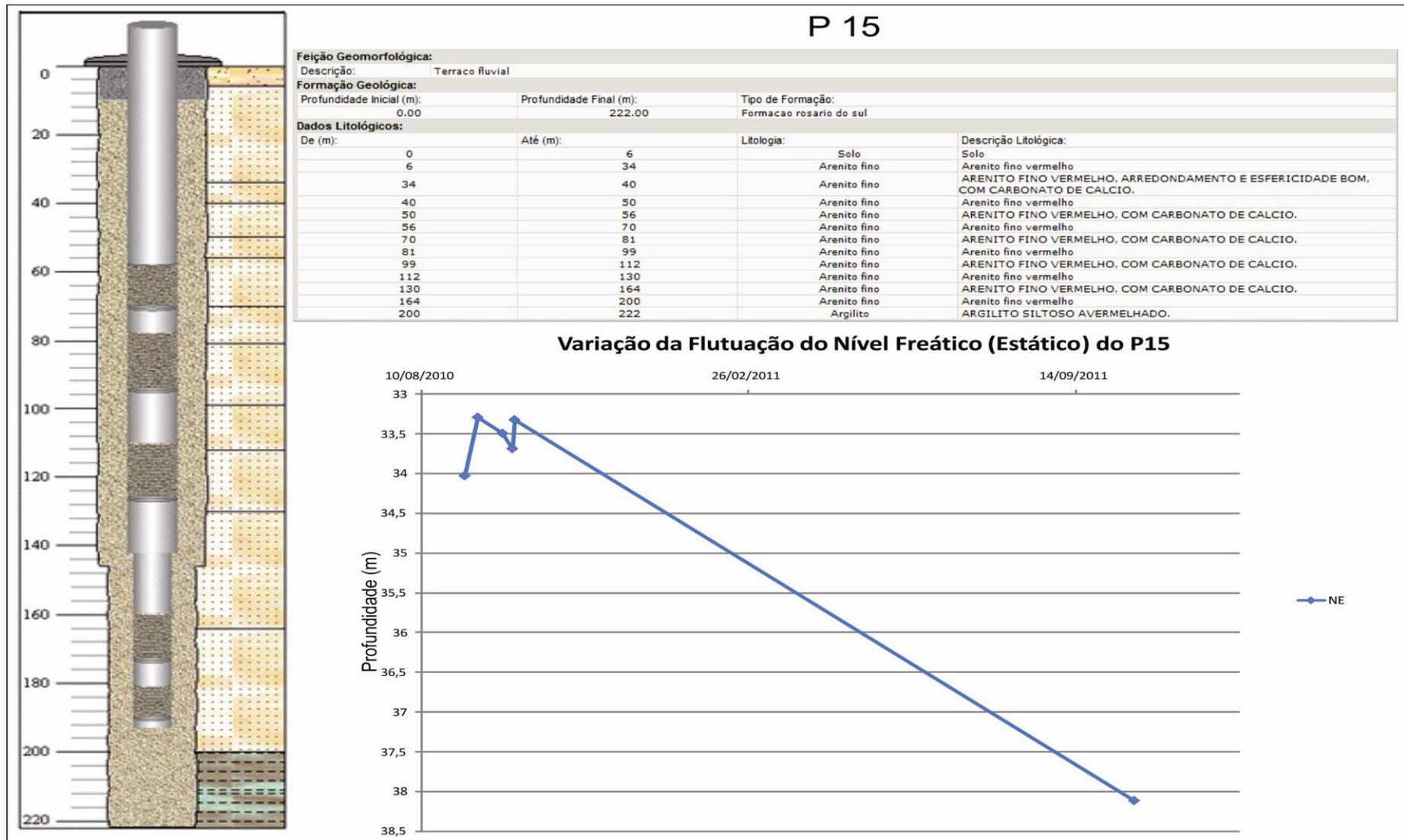


Figura 55: Comportamento do poço de abastecimento P15 da CORSAN, (4300008118= IQ 267 SIAGAS/CPRM).

4.4 Estimativa da Recarga Subterrânea pelo Método WTF

As dificuldades encontradas na estimativa de recarga da água subterrânea exigem uma conceituação teórico-prática bem definida e o uso de técnicas para verificação dos resultados. Na realidade, a estimativa de recarga deve ser compreendida como um processo interativo, e nunca como um cálculo definitivo. Uma estimativa de recarga mais precisa deveria compreender dados referentes a um longo período de observação, independente do método ou dos métodos adotados (MAZIERO, 2005).

A recarga efetiva do aquífero livre para as áreas de estudo, foi estimada para o período hidrológico de 386 dias para o CAC 01 e CAC 02 e de 243 dias para o CAC 03, período que foi utilizado para o método WTF.

As figuras 56, 57 e 58 apresentam aplicação do método WTF, na estimativa da recarga subterrânea. Considerando-se a Equação 2, é necessário para determinar a recarga subterrânea dados sobre o rendimento específico de cada poço, determinado a partir dos dados do ensaio de porosidade total. O (Δt) representa o período de tempo em que se realizou o monitoramento. E, o (Δh) é a diferença entre os picos de elevação do nível e o ponto baixo da curva de recessão extrapolada antecedente na hora do pico.

Na busca para realização de estimativas de recarga confiáveis, realizou-se a supressão de período inicial de flutuação de nível, houve um problema de obstrução do poço CAC 03, que depois foi concertado e assim houve análise dos seus 243 dias.

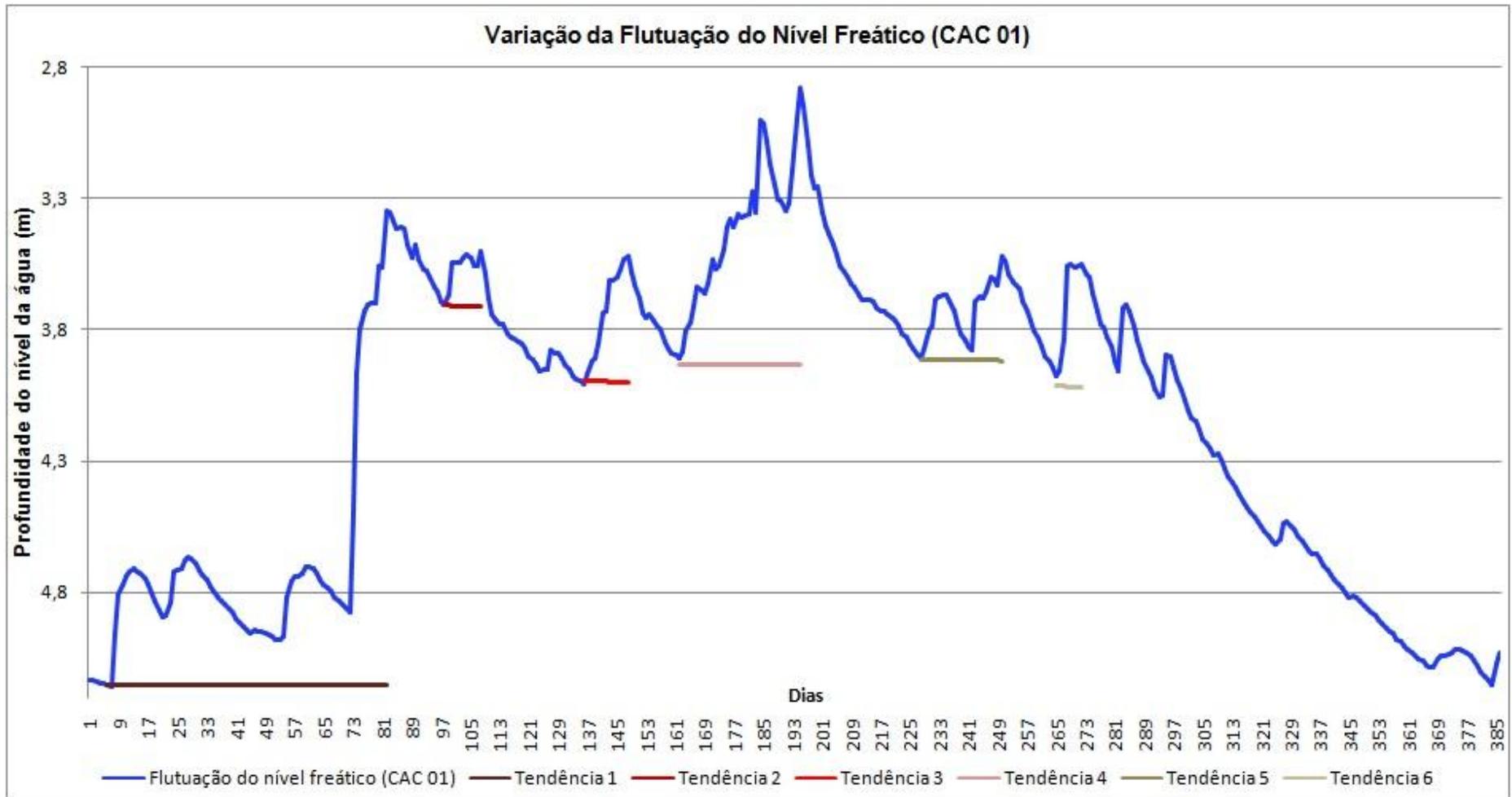


Figura 56: Flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 01 e as linhas de tendência.

Para calcular a recarga do Poço CAC 01, utilizou-se o rendimento específico (S_y) de 15,75 e período 386 dias, na Equação (2):

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

(Δh) é o somatório de todas dh no período estudado.

Onde:

$$\Delta h = 1,80 \text{ m} + 0,21 \text{ m} + 0,48 \text{ m} + 1,05 \text{ m} + 0,40 \text{ m} + 0,46 \text{ m} = 4,4 \text{ m}$$

$$R = 15,75 \times (4,4 \div 386) =$$

$$R = 0,18 \text{ m/no período (386 dias)} = 180\text{mm/período}$$

A figura 56 ilustra o comportamento do poço CAC 01 da área de estudo de retirada da água superficial, que a cada recessão significativa, estabeleceu-se uma linha de tendência exponencial para posterior extrapolação da curva de recessão. Sendo, assim, foi possível determinar a diferença de altura com o pico de flutuação do nível da água subterrânea. Identificaram-se neste caso em seis (6) recessões significativas, que na somatória destas diferenças de altura (Δh), determinou-se o (Δt) do período.

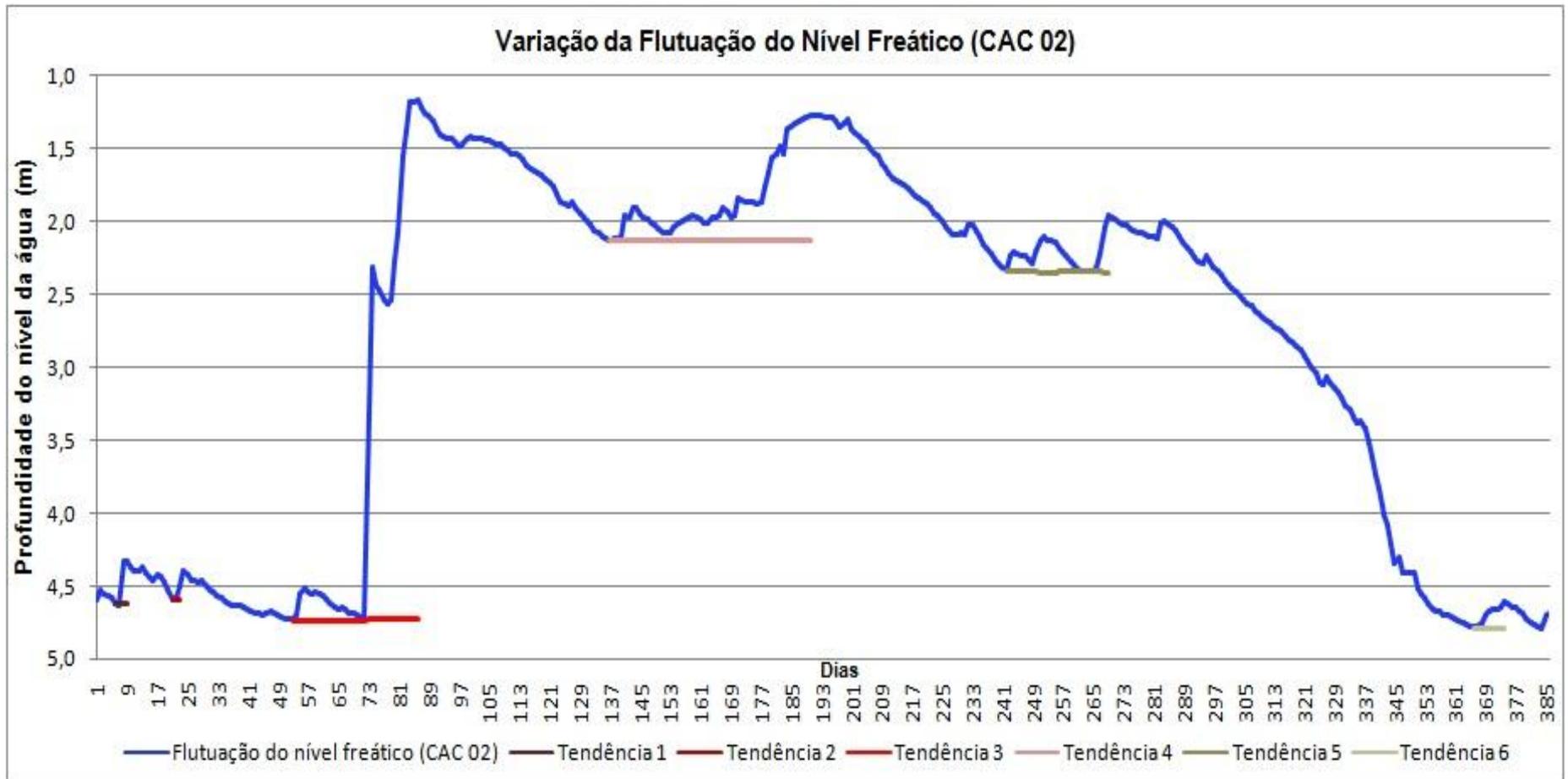


Figura 57: Flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 02 e as linhas de tendência.

O cálculo para recarga do Poço CAC 02, utilizou-se também o rendimento específico (S_y) de 15,75 e período 386 dias, na Equação (2):

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

(Δh) é o somatório de todas (dh) no período estudado.

Onde:

$$\Delta h = 0,29 \text{ m} + 0,09 \text{ m} + 3,55 \text{ m} + 0,87 \text{ m} + 0,38 \text{ m} + 0,19 \text{ m} = 5,37 \text{ m}$$

$$R = 15,75 \times (5,37 \div 386) =$$

$$R = 0,218 \text{ m/no período (386 dias)} = 218\text{mm/período}$$

Assim a Figura 57 ilustra o comportamento do poço de monitoramento CAC 02, onde há retirada da água superficial, e que também a cada recessão significativa, estabeleceu-se uma linha de tendência exponencial para posterior extrapolação da curva de recessão. Sendo, assim, possível determinar a diferença de altura com o pico de flutuação do nível da água subterrânea. Também identificaram-se neste caso em seis (6) recessões significativas, que por final a somatória destas diferenças de altura (h), determinou-se o (Δh) do período.

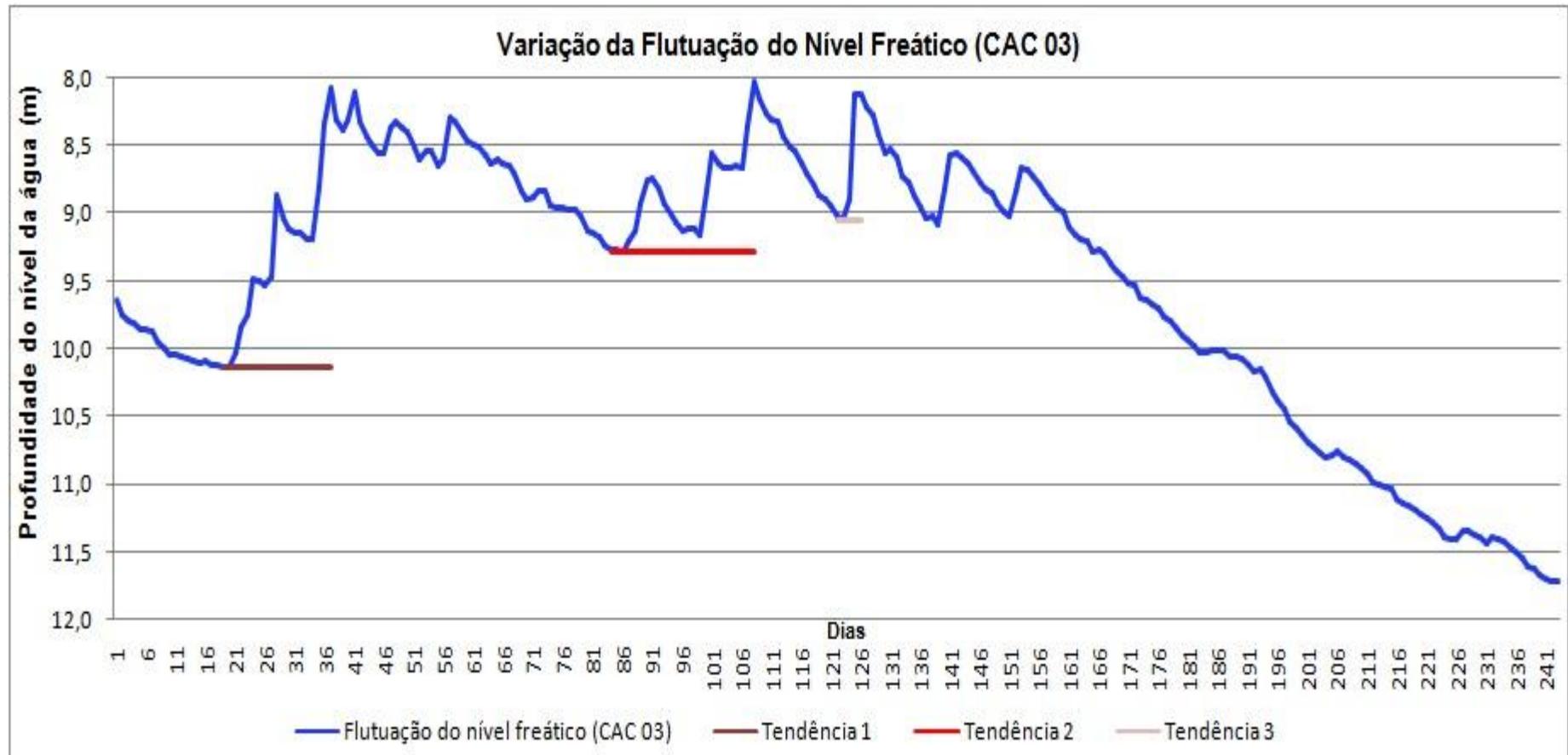


Figura 58: Flutuação do nível da água subterrânea do poço CAC 03 e as linhas de tendência.

O último cálculo de recarga foi na área de retirada da água subterrânea, e utilizou o poço CAC 03, onde o rendimento específico (S_y) foi de 15,1 e período 243 dias, na Equação (2):

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

(Δh) é o somatório de todas (dh) no período estudado.

Onde:

$$\Delta h = 2,05 \text{ m} + 1,25 \text{ m} = 3,3 \text{ m}$$

$$R = 15,1 \times (3,3 \div 243)$$

$$R = 0,20 \text{ m/no período (386 dias)} = 200\text{mm/período}$$

Portanto a figura 58 ilustra o comportamento do poço de monitoramento CAC 03, que pertence a área de estudo onde há retirada da água subterrânea.

A Tabela 6 mostra a visualização dos valores obtidos na determinação da recarga subterrânea através do método WTF (Equação 2), para o período de monitoramento distintos para cada área.

Tabela 6: Sistematização das informações referente à estimativa de recarga para cada poço de monitoramento.

Área de estudo	Poços	(Δh) (m)	(Δt) (período)	(S_y)	WTF - recarga (m/período)	WTF - recarga (mm/período)
Subterrâneo	CAC 03	3,3	243	15,10	0,20	200
Superficial	CAC 01	4,4	386	15,75	0,18	180
	CAC 02	5,37	386	15,75	0,218	218

Obs. (Δh) = somatório das diferenças altimétricas das curvas extrapoladas.
(S_y) = rendimento específico.

Estimou-se a relação direta entre a precipitação pluviométrica e a recarga subterrânea em aquífero livre durante o período monitorado. Posteriormente estimou-se qual a recarga média do período monitorado para cada área estudada (Tabela 7).

Tabela 7: Porcentagem da precipitação na recarga da água subterrânea e recarga média em função da precipitação pluviométrica.

Área de estudo	Poços	WTF - recarga (mm/período)	Precipitação total no período (mm)	(%) de precipitação de recarga	(%) recarga média em cada área no período
Subterrânea	CAC 03	200	778,1	25,7	25,7
Superficial	CAC 01	180	1572	11,45	
	CAC 02	218	1572	13,92	12,68

Usando como referência os dados médios de precipitação no Estado do Rio Grande do Sul, apresentadas por Sotério et al. (2005), para a região em estudo, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (U-70) e na do Rio Ibicui (U-50), considerando o período de 1976 a 2002, obtiveram um valor médio anual de 1590,8 mm de chuva. Comparando-se este resultado os valores médios de precipitação no período, observou-se que estes foram superiores aos valores médios no período de 2011 (1.416,4 mm).

Os resultados mostram que a estimativa da recarga efetiva para as duas áreas foram distintas.

Com valor da recarga referente ao poço CAC 03 presente na área de exploração da água subterrânea, pode-se justificar-se que devido a uma considerável recarga nesta área, os poços de abastecimento da CORSAN ainda apresentam uma boa produção.

E para a área de retirada da água superficial, existe também uma recarga significativa, e os valores de recarga vão de encontro a análise de que a água subterrânea provavelmente abastece o Rio Ibicuí, tornando-o um rio de característica efluente no trecho avaliado.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O monitoramento contínuo, durante um longo período de tempo, mostrou-se um requisito básico para investigação dos processos quantitativos da água subterrânea, a fim de identificar o grau de influência das inúmeras variáveis envolvidas.

A partir de uma abordagem sistêmica, para entender os elementos e suas relações responsáveis pela estimativa de recarga subterrânea em aquífero livre, poroso, intergranular, pertencente a área de domínio da Formação Pirambóia, em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.

Os equipamentos de monitoramento eletrônico automático (dataloggers), revelaram fácil manuseio e dados precisos.

A revisão de literatura contribuiu para um melhor entendimento de diversos fatores envolvidos na caracterização de aquíferos. A revisão possibilitou o entendimento de fenômenos e técnicas inerentes à quantificação da água subterrânea, assim como permitiu avaliar os métodos e técnicas a serem empregadas nas circunstâncias de realização deste estudo.

Neste estudo a utilização do método WTF (*Water Table Fluctuation*) para determinação da estimativa de recarga efetiva apresentou resultados positivos e satisfatórios que mostraram as reais informações da flutuação dos níveis das águas subterrâneas ocorrentes nos locais de pesquisa.

Deste modo, considera-se que a recarga direta resulta principalmente das interações dos fatores hidrogeológicos, topográficos, climáticos e a morfologia do terreno; como características físicas da interface solo/rocha e das precipitações.

Assim o termo sustentabilidade dos recursos hídricos, mais especificamente o uso sustentável da água subterrânea, mostra que este só será sustentável se houver recarga subterrânea suficiente que garanta de forma controlada o rebaixamento excessivo do nível da água em áreas com retiradas da água, utilizando-se as reservas reguladoras, as quais são renováveis anualmente. Assim, os aquíferos funcionariam como parte componente do ciclo hidrológico mantendo o fluxo de base e a perenização de cursos de água, e ainda, mantendo a vazão ecológica necessária a sobrevivência da biosfera.

Com um maior número de dados obtidos o estudo mostrou que relativos à série histórica de níveis de água subterrânea com a precipitação e a estimativa de recarga, possibilitarão compreender cada vez melhor as inter-relações rio-aquífero, e sua importância funcional na manutenção do fluxo de base dos cursos de água, bem como nas dinâmicas organizacionais complexas e singulares que interagem no Ciclo Hidrológico.

A análise da flutuação do nível da água subterrânea mostrou que sua variação correspondeu instantaneamente as precipitações e que os fatores do meio (solo/rocha) como granulometria e porosidade que também respondem as variações encontradas.

A recarga efetiva estimada na área com exploração superficial representou entre 11,5% e 13,9% da precipitação (1.572 mm) ocorrida durante o período hidrológico de 386 dias, a faixa de flutuação do nível obtida nesta área variou entre 1,17m a 5,15 metros, enquanto que a recarga efetiva estimada na área com exploração subterrânea representou cerca de 25% da precipitação (778,1 mm) ocorrida durante em um período hidrológico de 243 dias, e a faixa de flutuação do nível ocorreu entre 8,4m a 16,46 metros.

Os resultados apresentados fornecem subsídios para avaliação do sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, pois se mostram efetivas e também podem ilustrar o desenvolvimento de novas pesquisas referentes a exploração das águas subterrâneas em Zona de Afloramentos de Aquífero livre do SAG.

Os resultados obtidos permitem fazer algumas recomendações para os trabalhos subseqüentes e para um melhor gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneo, são elas:

- 1) Ampliação dos poços de monitoramento, o mais recomendado seria a perfuração de poços em locais estratégicos, para que não haja nenhuma interferência que possa comprometer a qualidade dos dados.
- 2) A determinação do coeficiente de rendimento específico ao longo da profundidade dos poços monitorados, através da coleta de amostras não-deformadas do solo nas profundidades que compreendem as faixas de variação do nível do aquífero freático, para que os resultados da recarga pontual sejam mais exatos.
- 3) A aplicação de outras técnicas de estimativa de recarga, concomitantemente ao WTF, para que os resultados possam ser comparados.

- 4) O monitoramento sistemático das águas subterrâneas por um período mais longo, a fim de dar subsídios na tomada de decisões quanto à utilização da deste recurso.
- 5) Aprimorar análises sistêmicas referente às inter-relações entre as variáveis climatológicas com as variáveis do meio.
- 6) Fazer uma análise detalhada do raio de influência entre os poços na área de retirada da água subterrânea.
- 7) E por fim a instalação de sensores no rio para que haja uma maior precisão em relação a sua variação de nível da água, e também fazer o perfil da calha do rio para que se estime a vazão e assim compare com a variação do nível, o que conseqüentemente poderá se estimar a variação da vazão obtendo-se uma série histórica deste dado.

6 REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **Províncias Geológicas e Domínios Morfológicos no Brasil**. São Paulo: IGE-USP, 1970.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos/SNIRH**. Acesso: 05 de julho de 2011. Disponível em: <http://200.140.135.132/PortalSuporte/frmVisulizaEstacao.html?kml=http://200.140.135.132/PortalSuporte/temp/A857227700.kml>
- ALBUQUERQUE, J. P. T. Água subterrânea no planeta água. **Estudos geológicos**. V 17 (1). p. 23 – 39, 2007.
- ARRAES, T. M.; CAMPOS, J.E.G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, p. 81-89, 2007.
- ARAÚJO, L.M.; POTTER, P.; FRANÇA, A. B. Hidrogeologia do sistema aquífero do Mercosul na Bacia do Paraná e Chaco-Paraná, América do Sul, e comparação com o sistema aquífero Navajo-Nugget, USA. **Hydrogeology**, 1999.
- ASUB/UFCG/UFAL/UFSM. **Integração dos Instrumentos de Outorga, Enquadramento e Cobrança para a Gestão das Águas Subterrâneas**. Relatório Parcial de Execução II: Campina Grande/PB, outubro 2010. 191 p.
- AUSTRALIA (País). (2006). **Department of Primary Industries**. Disponível em: <<http://www.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/glenregn.nsf/696c4532f2cc03304a256718003e5c09/57bcc21ea3987fb64a256aa1000a04c1?OpenDocument>>. Acesso em: 30/06/2011.
- AVILA, C. B. **Estudo da capacidade de infiltração em um solo da unidade de mapeamento Santa Maria, submetido a três diferentes usos e cobertura do solo**. Trabalho de Graduação (Engenharia Florestal), UFSM, 2011. p. 58.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. São Paulo: Difel, 1986.
- AZEVEDO, A. C. de; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Ed. Pallotti, 2006.
- AZEVEDO, A. A., ALBUQUERQUE FILHO, J. L. in: SANTOS, O., BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.p. 126-127.
- BALEK, J. **Groundwater recharge concepts**. In: SIMMERS, I. (ed.) Estimation of Natural Groundwater recharge, "Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Estimation of Natural Recharge of Groundwater", Antalya (Side), Turkey, 8-15 march, 1987, 528p.
- BANERJEE, P.; PRASAD, R. K.; SINGH, V. S. **Forecasting of groundwater**

level in hard rock region using artificial neural network. Environ. Geol. v.58, p.1239-1246. (2009).

BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação.** 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa.** 2006. 271 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

BARRETO, C. E. A. G.; WENDLAND, E.; MARCUZZO, F. F. N. Estimativa da evapotranspiração a partir de variação de nível estático de aquífero. **Revista de Engenharia Agrícola.** Jaboticabal. Vol. 29 nº1, jan/mar, 2009.

BAUMHARDT, E. **Balanço hídrico de microbacia com eucalipto e pastagem nativa na Região da Campanha do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria. 2010. 138 p.

BELLEN, H. M.V. **Indicadores de sustentabilidade:** uma análise comparativa. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005.

BOURSCHEID, E. Programa de recuperação e desenvolvimento da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. Relatório Técnico. Contrato nº TC 02/95. Mai. 1997.

BOUWER H.; MADDOCK, T III (1997). **Making sense of the interaction between groundwater and streamflow: lessons for watermasters and adjudicators.** Rivers, n.6, Vol. 1, p. 19-31.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades do solo.** 6 ed. Rio de Janeiro: FREITAS, 1983. 647 p.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos.** 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1989. 898 p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils.** 13 ed. New Jersey: Prentice Hall/Upper Saddle River, 2002. 960p.

BRASIL/ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/>. Acesso em: 16 de abril de 2010.

BRASIL/CPRM, 2008. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br>>. Acesso: 10 maio 2010.

BRASIL/CPRM/SIAGAS, 2010. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br>>. Acesso: 10 maio 2010.

BRASIL/IBGE, 1993. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 maio 2010.

BRASIL/IBGE, 2004. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=169>. Acesso em: 12 maio 2010.

BRASIL. Lei Nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. Lei Nº 9.984 17 de julho de 2000. Disponível em: <http://www.lei.adv.br>. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. ABNT/NBR 12.212. Projeto para captação de água subterrânea. 2006.

BRASIL. ABNT/NBR 12.244. Construção de poço para captação de água subterrânea. 2006.

BRASIL. Lei Federal Nº 9984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

BRASIL. Lei Federal nº9433, de 8 de janeiro 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Resolução nº357/CONAMA, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Resolução Nº 15 de 11 de janeiro de 2001. Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br/Solo/agua_sub. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. Resolução Nº 17 de 29 de maio de 2001. Disponível em: <http://www.cnrh-srh.gov.br/delibera/resolucoes/R017.htm>. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. Resolução Nº. 22, de 24 de maio de 2002. Disponível em: <http://www.inga.ba.gov.br>. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. Resolução Nº. 92 de 05 de novembro de 2008. Disponível em: <http://www.jurisite.com.br/resolucoes>. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. Resolução Nº. 98 de 26 de março de 2009. Disponível em: <http://www.jurisite.com.br/resolucoes>. Acesso em: 12 de janeiro de 2010.

BRASIL. Levantamentos de Recursos Naturais. RADAMBRASIL. Vol. 33. 1986.

CABRAL, J. da S. P. Movimento das águas subterrâneas. In.: FEITOSA, F.A.C. et al. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Organização e coordenação científica: – 3. ed. ver. e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M., PONTES FILHO, I. D. S. P. **Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 11, No. 3, p. 147-157. (2006).

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no sistema Aquífero Guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY**. 2006.110 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CAPRA, F. **A TEIA DA VIDA: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. Tradução Newton Roberval Eichenberg. Ed. Cultrix. 1996.

CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; HELDWEIN, A. B. **Uso e benefícios da coleta automática de dados meteorológicos na agricultura**. Santa Maria: ed. da UFSM, 2007. 170p.

CARNIER NETO, D. **Monitoramento de nível d'água em poços no Aquífero Rio Claro**. 2006, 88 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – UNESP – Rio Claro, Rio Claro/SP. 2006.

CEY, E.E.; RUDOLPH, D.L.; PARKIN, G.W.; AVARENA, R. (1998). **Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in Southern Ontario, Canada**. Journal of Hydrology, 210:21-37.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Flórida. USA. 2007. 117 p.

CPRM. **Mapa Geológico do estado do Rio Grande do Sul**. Superintendência de Porto Alegre, RS, Serviço Geológico do Brasil. 2008. 1 mapa, color., Escala 1:1.750.000.

CHRISTOFOLETTI, A. **As características da nova geografia**. Geografia. vol. 1, n. 1, abr. de 1976.

CHRISTOFOLETTI, A. Densidade de Rios e de Segmentos. **Notícias Geomorfológicas**, Campinas, 18 (35): 124-128, junho de 1978.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia: a análise de Bacias Hidrográficas**. 2 ed. São Paulo : Editora Edgard Blucher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. SÃO PAULO: Hucitec.1988.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CMMAD (Comissão Mundial sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente). **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Editora da FGV, 1987.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD/ONU). **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 2 ed. 1991. 430 p.

CONWAY, G. **Produção de alimentos no século XXI: biotecnologia e meio ambiente**. São Paulo: Estação Liberdade, 1997.

CORDEIRO, C. A.; SOARES, L. C. A erosão nos solos arenosos da região sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro: Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente – SUPREN da Diretoria Técnica do IBGE. Vol. 4. Nº. 39. 1975. 32-50 p.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2.ed. Barcelona:Omega, 1983.

DALAL-CLAYTON B, BASS S. (2002). **Sustainable Development Strategies: A Resource Book**. 388pp. National Strategies For Sustainable Development (NSSD). Disponível em: <http://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=bbWCHRN4h_sC&oi=fnd&pg=PR5&dq=DalalClayton+Bass+2002+Sustainable+Development+Strategies&ots=p0iOVvwwGr&sig=JeqA-9f2POVTeWilUBeaKYUhn8>. Acesso em: 09/12/2010.

DAMBRÓS, C. **Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo**. 2011.119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

DAMBRÓS, C.; FARIAS, P. V. da C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Estimativas de recarga através da flutuação do nível de água subterrânea em bacias representativas no Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. **Anais... Conferência “A gestão do Sistema Aquífero Guarani: um exemplo de cooperação**. São Paulo/SP, 2011. [1]

DAMBRÓS, C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Comportamento do nível da água subterrânea em sub-bacia representativa em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Anais... XIV World Water Congress**. Recife/PE. 2011. [2]

DANIEL, D. E. **State-of-the-Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils, Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, ASTM, Philadelphia. 1994.

DE BIASI, M. **A carta clinográfica: Os Métodos de Representação e sua Confecção**. Revista de Geografia, USP, v.6. São Paulo; 1992, p. 45-60.

DESCOVI FILHO, L. L. V.; SILVERIO DA SILVA, J.L., FORGIARINI, F.R.; SILVEIRA, G. L. Subsídios ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVI ENCONTRO DE PERFURADORES DE POÇOS, FEIRA NACIONAL DA ÁGUA, 2008. **Anais....** 2008. p.18.

DESCOVI FILHO, L.L.V. **Subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. 2009.140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DEVITO, K.J., DILLON, P.J. (1993). **The influence of hydrologic condition and peat oxia on the phosphorus and nitrogen dynamics of a conifer swamp.** Water Resources. Research, 29, pp.2675-2685.

DEVITO, K.J., HILL, A.R., ROULET, N. (1996). **Groundwater–surface water interactions in headwater forested wetlands of the Canadian Shield.** Journal of Hydrology, 181, pp.127-147.

DIAS, K. D. N. **Análise estratigráfica da Formação Pirambóia, Permiano Superior da Bacia do Paraná, leste do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: UFRGS. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS. 2006. 75 fl.

DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology.** 2ª. Edição. Nova Jersey: Prantice Hall, p.646. (2002).

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and chemical hydrogeology.** Wiley, New York.1998.

DRISCOLL, F.G. (1986) **Groundwater ans Wells.** Johnson Screens, St Paul, MN. 1995 (Sixth Printing).

DAVIS, S. N.; DEWIEST, R. J. M. **Hydrogeology.** New York: JOHN WILEY & SONS. 463p.1966.

ESPANHA (País) (2002). Fundación Centro In ternacional de Hidrologia Subterrânea. **Declaración de Valência.** Disponível em: <<http://www.fcih.org/pub/info/novedade/valencia/vdeclaracion.pdf>. Acesso em: 12/12/11.

ESPINOSA, H.R.M. **Desenvolvimento e meio ambiente sob nova ótica.** Ambiente, Vol. 7, n. 1, p. 40-44, 1993.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Organização e coordenação científica: – 3. ed. ver. e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FETTER, C.W. Applied Hydrogeology. Fourth Edition. Prentice Hall. 2001. 598p.

FARIA, R. T.; COSTA, A. C. S. **Tensiômetro: construção, instalação e utilização;** um aparelho simples para se determinar quando irrigar. Londrina, IAPAR, 1987, 24 p. (IAPAR, Circular, 56).

FORMAGGIO, L.F. 2007. **Estudo da Variabilidade da Piezométrica dos Aquíferos Freáticos na Bacia do Alto Rio Jardim - Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 112p.

FORMAGGIO, L.F. ; CAMPOS, J.E.G. ; AMARAL, B.D. . Estudo da Variabilidade da Potenciometria em Aquíferos Freáticos Através da Regressão Múltipla Espacial. Revista Brasileira de Geociências, v. x, p. z-x, 2009.

FOSTER, S; HIRATA R.A.C; GÓMEZ D., D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agencias ambientais.** Mundi Prensa. 2006. (Banco Mundial, Washington, EUA), p.105.

FOSTER, S; HIRATA R.A.C; VIDAL, A., SCHMIST, G.; GARDUÑO, H. **The Guarani Aquifer Initiative: Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context.** GW MATE: Banco Mundial, Washington, EUA, 2009. Disponível em: www.worldbank.org/gwmate - web sites de recursos hídricos do Banco Mundial e do Global Water Partnership.

FRANTZ, L.C. **Avaliação do índice de vulnerabilidade do Aquífero Guarani no perímetro urbano da cidade de Sant'Ana do Livramento – RS.** 2004.125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. **Groundwater:** Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1979. 604p.

FURLANETTO, Egídio Luiz. et al. **Sustentabilidade em arranjos produtivos locais: uma proposta metodológica de análise.** In: Cândido, Gesinaldo Ataíde et al. Desenvolvimento sustentável e sistemas de indicadores de sustentabilidade: formas de aplicações em contextos geográficos diversos e contingências específicas. Campina Grande: Ed. UFCG, 2010.

GAVANDE, S. A. **Física del suelos: principios y aplicaciones.** México: Editorial Limusa. 1976. 351 p.

GLEICK, P. H. **Recursos de água. Na Enciclopédia do Clima e Tempo.** 1996. ed. Por Superlogo H. Schneider, Oxford University Press, Nova Iorque, vol. 2, pág. 817-823

GOMES, A. S.; MAGALHÃES, E. A. **Arroz irrigado no sul do Brasil.** 21. ed. Brasília, DF. Embrapa Informações Tecnológica, 899p, 2004. GOMES, A. S.; MAGALHÃES, E. A. **Arroz irrigado no sul do Brasil.** 21. ed. Brasília, DF. Embrapa Informações Tecnológica, 899p, 2004.

GOUVÊA, T. H. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani.** 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

GRABHER, C.; BROCHI, D. F.; TABAI, F. C. V.; LAHÓZ, F. C. C.; GOTARDI, K. R.; BATISTA, M.; RAZERA, S. **Termos técnicos em gestão dos recursos hídricos.** Americana/SP: Consórcio Intermunicipal das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 2006.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico.** Rio de Janeiro: IBGE. 6ª ed. 1978. p. 448.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul** - escala 1:50.000. Porto Alegre, UFRGS-IB-Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).

HEALY, R.W., COOK, P.G., Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**. 10, 2002. 91–109 p.

HEATH, R. C. **Hidrologia básica de água subterrânea**. Geological survey water-supply paper. 1983.

HEINE, C. A. **Análise de Sustentabilidade do Sistema Aquífero Guarani na Região Urbano-Industrial de Ivoti no Rio Grande do Sul**. 2008, 223 f. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, Brasil. 2008.

HEINE, C. A.; BRINCKMANN, W. E.; BRINCKMANN, C. A.; Aquífero Guarani. **Boletim Informativo**. Santa Cruz do Sul: Núcleo de pesquisa e extensão em gerenciamento de recursos hídricos da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC/RS. v. 4, n. 2, fev. 2001.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press. 1980. 413p.

HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 2ª. Reimpressão, 2003. 568 p.

IRITANI, M. A., EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. Instituto geológico. São Paulo. 2008. 104 p.

JOHNSON, A. I. (1967). **Specific yield – compilation of specific yields for various materials**. US Geological Survey Water Supply. Paper 1662-D, 74p.

LAMBS, L. (2004). **Interactions between groundwater and surface water at river banks and the confluence of rivers**. Journal of Hydrology, 288, pp.312-326.

LARKIN, R. G.; SHARP Jr., J. M. (1992). **On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers** . Geological Society of America Bulletin, vol. 104, p. 1608-1620. Disponível em: <<http://www.gsjournals.org/archive/0016-7606/104/12/pdf/i0016-7606-104-12-1608.pdf>>. Acesso em: 30/06/2011.

LEINZ, V. e AMARAL, S. E. do. **Geologia geral**. São Paulo: Editora Nacional. 8ª ed. Vol. 1. 1980. p. 397.

LEMONS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.

LERNER, D. N., ISSAR, A. S. AND SIMMERS, I. **Groundwater Recharge: A Guide**

to Understanding & Estimating Natural Recharge. International Association of Hydrogeologists, Hannover. 1990.

LIMA, W.P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba; ESALQ/USP, 1986, 242 p.

LIMA, W.P.; ZAKIA M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.

LLAMAS, R. **Água e ética – Uso da água subterrânea**. Série: Água e Ética, ensaio 7. França: Unesco, 39 p. (2004).

KALF, F. R. P. and WOOLLEY, D. R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. **Hydrogeology Journal**, Austrália. Publicado em Berlin. Vol.13, Nº 1, março, 2005, p. 295 – 312. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content>. Acesso, dia 21 de dezembro de 2009.

KARMANN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 2ª. Reimpressão, 2003. 568 p.

KATZ, B. G., DEHAN, R. S., HIRTEN, J. J., CATCHES, J. S. (1997). **Interactions between ground water and surface water in the Suwannee river basin, Florida**. Journal of the American Water Resources Association, 33, pp.1237-1254.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

MACHADO, J. L. F. e FREITAS, M. A. (2005). “Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final”. Porto Alegre: CPRM, 65p.: il.; mapa.

MACIEL FILHO, C. L.; BORDIGNON, A. R.; NEVES, L. **Caracterização geotécnica de solos sul-rio-grandenses das regiões centro e oeste**. Santa Maria, RS: UFSM, 1989.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Organização e coordenação científica: – 3. ed. ver. e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 53-64 p.

MANTOVANI, E. C. **Compactação do solo**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 13, n. 17, p. 52-55, 1987.

MARANHÃO, N. **Sistema de Indicadores para Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas**. Tese (Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos**. 2005, 85 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2005.

MAZOYER, M. **Pour des Projets Agricoles Legitimes et Efficace: Théorie et Méthode d'Analyse des Systèmes Agraires.** In: Land Reform, Land Settlement and Cooperatives. Paris: FAO, 1992-1993.

MCDONALD M.G.; HARBAUGH A.W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model:** U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 1988. 586 p.

MDT/UFSM. **Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses:** MDT/Universidade Federal de Santa Maria, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Biblioteca Central, Editora da UFSM. – 7 ed. rev. e atual. – Santa Maria: Editora UFSM, 2010. 72 p.

MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Solos e ambiente. In: MACHADO, R. (org.) **As Ciências da Terra e sua importância para a Humanidade:** a contribuição brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra – AIPT. 1 ed. São Paulo: Editora Sociedade Brasileira de Geologia. Curitiba/PR, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Águas Subterrâneas, um recurso a ser conhecido e protegido.** Brasília/DF. 2007. 40 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE URBANO. **Conjunto de normas legais: recursos hídricos.** 6ª Ed. Brasília. DF. 2008. 469 p.

MONTAÑO, J.; CARRIÓN, R. Optimización de la explotación del sistema Acuífero Jurásico Triásico, Tacuarembó - Buena Vista. **Anais...** VI Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas. Porto Alegre. 1990. p. 180-189.

MOON, S.; WOO, N. C.; LEE, K. S. Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. **Journal of Hydrology.** Volume 292. 2004, 198-209 p.

NENTWING SILVA, B. Métodos quantitativos aplicados em geografia: uma introdução. **AGETEO.** Rio Claro, SP. Vol. 3, Nº 6. 1978. p. 33-73.

NIMER, E. Clima. In: IBGE. **Geografia do Brasil, Região Sul.** Rio de Janeiro: IBGE 1977. p.35-79.

NUNES, P. **Conceito de gestão.** Disponível em: <http://www.knoow.net/ciencia/conempr/gestao/gestao.htm>. Acesso em: abril de 2011.

OLIVEIRA, E.; SOUZA, J. C. S. Águas Subterrâneas: conservação e gerenciamento. In: MACHADO, R. (org.) **As Ciências da Terra e sua importância para a Humanidade:** a contribuição brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra – AIPT. 1 ed. São Paulo: Editora Sociedade Brasileira de Geologia. Curitiba/PR, 2008.

OLIVEIRA, L. B. **Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, v.3, p. 197-200, jan/fev 1968.

PACHECO, F. **Estudio Hidrogeológico Del Sistema Acuífero Guaraní en la zona Rivera-Sant'Ana do Livramento.** Trabajo personal. Fondo de universidades/PSAG, 2004. p. 1-95.

PÁDUA, E. M. M. de. **Metodologia da pesquisa:** abordagem teórico-prática. Campinas; São Paulo. 2004.

PAIVA, G. P de. **Estimativa de recarga em uma unidade detrítica de uma micro-bacia do Rio Piranga (MG).** 2006, 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2006.

PAVÃO, A.D.M. **Avaliação do índice de vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria – RS.** 2004.124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PAZ, V.P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. **Recursos Hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – v.4, n.3. set- dez, 2000.

PÉREZ, A., ROCHA, L. “Aportes al conocimiento del Acuífero Guaraní. Area Ciudad de Rivera-Uruguay.” **Groundwater and Human Development** (OSE, Obras Sanitarias del Estado, Uruguay), 2002. pp. 598-605.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra.** 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. p. 656.

PSAG. <<http://www.sg3guarani.org/Fundo das Universidades>. Texto completo (151p.,2v.) e Resumo executivo Português, Espanhol e Inglês. 2006.

RADAMBRASIL. **Folha SH. 22 Porto Alegre e parte das Folhas SH. 21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

RADAMBRASIL, P. **Levantamento dos Recursos Naturais.** Rio de Janeiro: IBGE, 1986. p. 316-404.

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; NOVA, N. A. V.; REICHARTD, V.; AES, P. C. M.; CLEARY, R. **Engenharia Hidrológica.** Rio de Janeiro: Coleção ABRH de Recursos Hídricos 1989. 409p.

RAUCH, W., SEGELKE, K., BROWN, R., KREBS, P. (2005). **Integrated Approaches in Urban Storm Drainage:** Where Do We Stand? Environmental Management. Vol. 35, No. 4, pp. 396–409.

SARTORI, M. G. **O Clima de Santa Maria: do regional ao urbano**. Dissertação de Mestrado, Dep. de Geografia da Fac. de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1979.

SHARMA, M. L. **Groundwater recharge**. Balkema, Rotterdam, 1989.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, vol. 10, number 1 (february), 2002.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no Estado do Rio Grande do Sul**. 2002. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/pdf/modulo1.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2011.

_____. Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. 2008. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/sema/jsp/rhcomibi.jsp>>. Acesso em: 10 set. 2011.

SILVA BUSSO, A.A. Geologic and Hydrogeologic aspects of the thermal aquifer system in Argentinean eastern Chacoparanense Basin. 1st Joint **World Congress on Grounwater**. 1999. pp. 22.

SILVA, A. M. **Princípios Básicos de Hidrologia**. Departamento de Engenharia. UFLA. Lavras - MG. 1995.

SILVA, F. C. 2007. **Análise integrada de usos de água superficial e subterrânea em macro-escala numa bacia hidrográfica: O caso do Alto Rio Parnaíba**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 188p.

SILVA, F. S. **Diagnóstico situacional dos resíduos sólidos urbanos no município de Cuité-PB**, através da aplicação do sistema de indicador de sustentabilidade Pressão-Estado-Impacto-Resposta (P-E-I-R). Dissertação. UFCG. Campina Grande, 2010.

SILVA, J. H.; AZZI, R. G. **Geografia**. São Paulo: Nova Cultura. 1993.

SILVEIRA, G. L.; CRUZ, J. C.; SILVÉRIO da SILVA, J. L.; CRUZ, R. C. SILVA, C. E. (2003). "Desenvolvimento de Ações para a implantação da outorga na Bacia do Rio Santa Maria". UFSM/DRH/SEMA/RS. Convênio n 02/2002. Relatório Técnico 1.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; SANTOS, E. F. dos.; FRANTZ, L. C.; MALHEIROS, R. P., 2004. Arcabouço Geológico-Geomorfológico da Bacia hidrográfica do Rio Quaraí – Rio Grande do Sul/Brasil. In: **Anais...** V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia: Geomorfologia e Riscos Ambientais. UFSM, Santa Maria/RS, 2 a 7 ago. 2004. 15p.

SILVERIO DA SILVA, J.L.; BESSOUAT, C.; CAMPONOGARA, I.; FRANTZ, L. C.; GUIMARAENS, M.; GAMAZO, P.; FAILACHE; MORAES FLORES, E. L.; FLORES, E. M. M.; DRESSLER, V. L. **Caracterização de áreas de recarga e descarga do**

SAG em Rivera-Livramento (R-L) e Quaraí-Artigas (Q-A). Estudo da vulnerabilidade na área de influência de Quaraí-Artigas. Projeto Aquífero Guarani. Avanços no conhecimento para sua gestão sustentável. Montevideu, Uruguai. 2007. p. 61-75.

SILVERIO DA SILVA, J.L.; DESCOVI FILHO, L. V.; BAUMHARDT, E.; CRUZ, J.C.; SOUZA, A; S; MAZIERO, E. Avaliação preliminar da flutuação do nível freático em microbacias representativas. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande - MS, 2009, p. 15.

SIMMERS, I. **Estimation of natural groundwater recharge.** NATO ASI Ser C 222. Reidel, Dordrecht, 1988.

SIMMERS, I. **Recharge of phreatic aquifers in (semi-)aridareas.** IAH Int Contrib Hydrogeol 19, AA Balkema, Rotterdam, 1997.

SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of estimation 'problems' and recent developments. In: ROBINS, N. S. **Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability.** Geol Soc Lond Spec Publ, 1998. 130:107–115.

SOARES, J.M.D; PINHEIRO, R.J.B; TAVARES, I.S. **Notas de aula: mecânica dos solos.** UFSM, Departamento de Transporte. 2006. Disponível em: [. Acesso em: 23/05/2011.](#)

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; HOLZ, M. Heterogeneidades hidroestratigráficas no Sistema Aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Geociências**, 38(4): 598-617, dez. de 2008. Disponível em: http://www.sbgeo.org.br/pub_sbg/rbg/vol38_down/3804/9972.pdf. Acesso em: 25 de julho de 2011.

SOPHOCLEOUS, M.A. **Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge:** practical aspects. Journal of Hydrology, 124, 229-241. (1991).

SOUZA, E. R.; FERNANDES, M.R. **Sub-bacias hidrográficas:** unidades básicas para o planejamento e gestão sustentáveis das atividades rurais. Minas Gerais: DETEC/EMATER-MG. 2002.

SOTÉRIO, P. W.; PEDROLLO, M. C.; ANDRIOTTI, J. L. S. Mapa de Isoietas do Rio Grande do Sul. **Anais...** XVI Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa / PB, p. 1-14, 2005.

STE - Serviços Técnicos de Engenharia S. A. Avaliação quali-quantitativa das disponibilidades e demandas de água na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria. Relatório do Cenário Atual - Vol. 1. Serviços Técnicos de Engenharia S. A. 1998. 335 p.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Emater/RS – UFRGS, 2002.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A. Paisagens (Imagens e

Representações) do Rio Grande do Sul. In: VERDUM, R.; BASSO, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. **Rio Grande do Sul – paisagens e territórios em transformação**. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004, 27-38 p.

SUERTEGARAY, D. M. A. ;
Arenização no Sudoeste do RS: investigação sobre a relação entre areais, drenagem e orientação de relevo. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia e Regional Conference on Geomorphologie, 2006, Goiânia. Anais/ Actes - VISimpósio Nacional de Geomorfologia e Regional Conference on Geomorphologie. Goiânia : IAG/UGB, 2006. v. 2.

TEIXEIRA, W., et al. **Decifrando a Terra**, São Paulo. SP, 2000. 549 p.

TODD, D.K. - **Hidrologia de Águas Subterrâneas**. Rio de Janeiro: USAID, 1967. 319 p.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L. de; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Sociedade de Investigações Florestais – SIF**. Viçosa, MG, v.30. nº 5, p. 849-857, 2006.

TIEDMAN, R.C.; GOODE, D.J.; HSIEH, P.A. Characterizing a ground water basin in New England Mountain and valley terrain. **Ground Water**, 36(4):611-621. 1998.

TUBELIS, A; NASCIMENTO, F. J. L; **Meteorologia Descritiva: fundamento e aplicações brasileiras**. 1º ed. São Paulo, ed. Nobel. 374p. 1937.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. EDUSP, Editora da UFRGS. 1993.

TUINHOF, A., DUMARS, C., FOSTER, S., KEMPER, K., GARDUÑO, H. e NANNI, M. **Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica**. GW MATE Publication. Programa do Banco Mundial, Washington, EUA: 2002. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources>. Acesso, dia 14 de dezembro de 2009.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos, SP. RiMa, IIE, 2ª ed. 2005.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Garamond. 2ª ed. 2006.

VELÁSQUEZ, L. N.; COSTA, W. D.; FANTINEL, L. M.; UHLEIN, A.; FERREIRA, E. F.; CASTILHO, L. S. Controle estrutural do fluoreto no Aquífero Cárstico do Município de São Francisco, MG. **Anais...** Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá/MT. 2006, CD-ROM, 26 p.

VELÁSQUEZ, L. N.; COSTA, W. D.; FANTINEL, L. M.; UHLEIN, A.; FERREIRA, E. F.; CASTILHO, L. S. Controle estrutural do fluoreto no Aquífero Cárstico do Município de São Francisco, MG. In: CONGR. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, *Anais*. Cuiabá: ABAS, 2006, CD-ROM, 26p.

VERDUM, R.; BASSO, L.A.; SUERTEGARAY, D.M.A. **Rio Grande do Sul – paisagens e territórios em transformação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

VIEIRA, L.S. **Manual da ciência do Solo**. Ed. Agronômica Ceres, São Paulo, 1975.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.245p.

VRIES, J. J.; SIMMERS, I. (2002). **Groundwater recharge: an overview of processes and challenges**. Hydrogeology Journal, v.10, p.5-17.

WADDINGTON, J.M.; ROULET, N.T.; HILL, A.R. (1993). **Runoff mechanisms in a forested groundwater discharge wetland**. Journal of Hydrology, 147, pp.37-60.

WAHNFRIED, I; HIRATA, R. Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.10. N.2, abr/Jun 2005, p15-25.

WANDESCHEER, E.A. R.; BERRO, S.V.; SILVÉRIO DA SILVA, J.L. Avaliação da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, RS. In. V SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA. I ENCONTRO SUL-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA, 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria – RS, UFSM. 2004. p.13.

WENDLAND, E.; BARRETO, M C.; GOMES, L.H.; PAIVA, J.B.D. **Balço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do Monitoramento Hidrogeológico em Bacia Representativa**. Aquífero Guarani, Avanços no conhecimento para sua gestão sustentável. Primera edición, Montevideo, 2007. p.139-155.

WERLANG, M. K. **Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul**. 2004. 207f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

WHITELEY, H.R.; IRWIN, R.W. (1986). **The hydrologic response of wetlands in southern Ontario**. Canadian Water Resources J., 11, pp.100-110.

WINTER, T. C. **Relation of streams, lakes and wetlands to groundwater flow systems**. Hydrogeology Journal, vol. 7, p. 28-45. (1999).

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. (1998). Groundwater and surface water: a single resource. U. S. Geological Survey Circular 1139. Disponível em: < <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/#pdf>>. Acesso em: 30/06/2011.

XU, Y.; BEEKMAN, H.E. Groundwater recharge estimation in Southern Africa. **UNESCO IHP**, Series nº. 64, UNESCO: Paris. ISBN 92-9220-000-3, 2003.

YOUNGER, P. L. **Groundwater in the Environment: an introduction**. Blackwell Publishing. 312p. (2007).