

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

**RECARGA E FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM SUB-BACIAS COM
FLORESTA E CAMPO NATIVO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Cristiane Dambrós

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**RECARGA E FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM SUB-BACIAS COM
FLORESTA E CAMPO NATIVO**

por

Cristiane Dambrós

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

2011

D156r Dambrós, Cristiane
Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo / por Cristiane Dambrós. – 2011.
120 p. ; il. ; 30 cm

Orientador: José Luiz Silvério da Silva
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, RS, 2011

1. Água subterrânea 2. Monitoramento 3. Recarga 4. Flutuação do nível
5. Método WFT I. Silva, José Luiz Silvério da II. Título.

CDU 556.18

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

©2011

Todos os direitos autorais reservados a Cristiane Dambrós. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

**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

**RECARGA E FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM SUB-BACIAS COM
FLORESTA E CAMPO NATIVO**

elaborada por
Cristiane Dambrós

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

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

Afrânio Almir Righes, Ph.D (UNIFRA)
(Membro)

Santa Maria, 16 de novembro de 2011.

Dedicatória

A minha família,
em especial a minha avó
Maria de Lourdes (*in memoriam*)
e a todos que contribuíram na construção deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor da vida, responsável pela minha existência neste Universo. Obrigada meu Deus!

A Universidade Federal de Santa Maria, UFSM colocando sua estrutura sociocultural a serviço dos jovens brasileiros e por oportunizar minha formação de Geógrafa e ingressar no Programa de Pós-Graduação.

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

Ao Programa de Assistência Estudantil, em especial o Programa de Moradia Estudantil, que por seis anos usufrui da moradia gratuita, quatro anos durante a graduação na CEU II e dois anos na CEU III.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFSM, pelos ensinamentos sobre Gestão dos Recursos Hídricos.

Aos professores dos Cursos de Geografia que de alguma forma continuaram a contribuir em minha formação.

Ao professor Dr. José Luiz Silvério da Silva por oportunizar a inserção em suas pesquisas no Laboratório de Hidrogeologia - LABHIDROGEO. Igualmente pelo conhecimento transmitido nas incansáveis orientações, importantíssimas para minha investigação, por sua amizade e também pelos momentos de descontração “hora do chá”, nos fim de tarde. E, aos colegas do LABHIDROGEO por todos os momentos de convívio e amizade.

As professoras Dr^a. Vera Maria Favila Miorin, Dr^a. Gilda Maria Cabral Benaduce e aos colegas, pela amizade e ensinamentos recebidos durante minha vida acadêmica e permanência no LEPeR/UFSM.

Ao professor Dr. Mauro Kumpfer Werlang, pela disponibilidade em auxiliar nos ensaios das amostras de solo no Laboratório de Petrografia e Sedimentologia.

Ao laboratorista Rômulo Augusto Aragones Aita pela realização e orientação metodológica dos ensaios realizados no Laboratório de Petrografia e Sedimentologia/Departamento de Geociência e ao Laboratório de Física do Solo pelo ensaio de porosidade total.

A meus pais Jacob e Lorete, razão da minha existência, e meu irmão Cassiano, por todos os momentos que passamos juntos. Pelo aprendizado da

convivência, apoio e carinho recebidos nas decisões tomadas e juntos sonharem meus sonhos. Amo vocês!

Ai miei antenati, veri saggi, esempio di perseveranza, amore, conoscenza e tenerezza, in speciale a mia nonna, Maria de Lourdes, um angelo a guidare i miei passi, stanchi di nostalgia. Alla mia famiglia che ha sempre spostato gli ostacoli dalla mia camminata.

Aos amigos, Camila, Cássio, Daimler (in memória), Denize, Joel, seu Pedro (in memória), Sílvia, Simone, Thayse, Valtazar e Vanessa, amizades para a vida inteira. E aos colegas do mestrado, pelos momentos de alegria, preocupação e amizade construída.

Enfim, a todos como o João Francisco Horn, pelas incansáveis idas quinzenais ao município de Rosário do Sul, coletando informações junto aos poços de monitoramento. A estas pessoas como ele, cuja participação foi indispensável nos estudos e resultados da investigação, o meu profundo agradecimento.

MUITO OBRIGADA!

EPIGRAFE

*“[...]Isto sabemos:
a terra não pertence ao homem, o homem pertence a terra.
Isto sabemos:
Todas as coisas estão ligadas como o sangue que une uma família.
Há uma ligação em tudo.
O que ocorre com a Terra recairá sobre os filhos da Terra.
O homem não tramou o tecido da vida; ele é simplesmente um de seus fios.
Tudo o que fizer ao tecido fará a si mesmo. [...]”
Chefe da Tribo Seattle (1854)*

RESUMO

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

RECARGA E FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM SUB-BACIAS COM FLORESTA E CAMPO NATIVO

AUTORA: CRISTIANE DAMBRÓS

ORIENTADOR: JOSÉ LUIZ SILVÉRIO DA SILVA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 16 de novembro de 2011.

Sala 1121 – Prédio 13/CCNE, Campus UFSM, às 16 hs.

A presente pesquisa busca contribuir com as investigações voltadas ao conhecimento do comportamento das águas subterrâneas. Com finalidade de determinar a estimativa de recarga subterrânea e análise da flutuação do nível da água em relação a eventos de precipitação pluviométrica. Atendendo aos objetivos a investigação se apóia nos referenciais: teórico-conceituais, destacando-se temas como bacia hidrográfica, água subterrânea, flutuação de nível e sustentabilidade; metodológicos, aplicou-se o método quantitativo sob uma abordagem sistêmica, em duas sub-bacias hidrográficas, uma de campo nativo e a outra com florestamento de eucaliptos, localizadas em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, no município de Rosário do Sul, Rio Grande do Sul. Foram instalados cinco poços de monitoramento e avaliados os níveis da água subterrânea por aproximadamente dois anos hidrológicos. Perfurou-se um poço na sub-bacia hidrográfica de campo e, quatro poços na sub-bacia hidrográfica com floresta. Na estimativa de recarga para aquíferos livres, utilizou-se pelo método *Water Table Fluctuation* – WTF. Realizaram-se análises das características físicas de solo e da rocha, em estudos detalhados em laboratório, referentes a determinações de granulometria, condutividade hidráulica saturada e a porosidade total. Para a aplicação do método WTF, necessitou-se realizar a determinação dos parâmetros: rendimento específico – S_y e do somatório dos valores do nível da água extrapolados para cada curva de recessão - Δh . Os resultados apresentaram-se satisfatórios, quanto à flutuação do nível valores entre 1,36 a 4,52 metros e, à recarga subterrânea estimada do total de precipitação no período de 3,97% para a sub-bacia hidrográfica de campo e 3,20% para a sub-bacia hidrográfica florestada. Conclui-se que, estudos referentes à recarga de um aquífero são fundamentais para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos em nível local (poço de monitoramento) ou de bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Água subterrânea, monitoramento, recarga, flutuação do nível, método WTF, sub-bacia hidrográfica.

ABSTRACT

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

RECHARGE AND FLUCTUATION LEVEL OF GROUNDWATER IN SUB-BASINS WITH FOREST AND NATIVE FIELD

AUTHOR: CRISTIANE DAMBRÓS

ADVISOR: JOSÉ LUIZ SILVÉRIO DA SILVA

Date and Location of defense: Santa Maria, November 16st 2011.

Hoom 1121 – Building 13/CCNE, Campus UFSM.

This study aims to contribute to the investigations aimed at understanding the behavior of groundwater. With the aim of guiding the determination of groundwater recharge estimation and analysis of the fluctuation of water level in relation to meteoric precipitation events. Given the research goals relies on references: theoretical and conceptual, highlighting topics such as watershed, groundwater level fluctuation and sustainability; methodology was applied to the quantitative method in a systemic approach in two sub-basins, of a native field and the other with eucalyptus forest, which is located at the outcrop zone of the Guarani Aquifer System, at rural area of the Rosário do Sul/Rio Grande do Sul state/southern Brazil. We installed five monitoring wells and assessed the levels of groundwater for approximately two hydrological years. A well was drilled in the sub-basin of field and four wells in the sub-basin with forest. To estimate the recharge to one unconfined aquifer, used the method Water Table Fluctuation – WTF. Analyses of the physical characteristics of soil and rock samples were used in detailed studies of laboratory tests related to grain size, hydraulic conductivity and porosity. For the method WTF, needed to perform the determination of the parameters: Specific Yield - S_y and the sum of the extrapolated values for each recession curve - Δh . The results were satisfactory, and the range of the fluctuation level values between 1.36 and 4.52 meters and the estimated total groundwater recharge of precipitation in the period from 3.97% for sub-basin of the native field and 3.20% at forested sub-basin. It is concluded that studies on the recharge of an aquifer are critical for sustainable management of water resources at the local level (monitoring well) and watershed scales.

Key-words: Groundwater, monitoring, recharge, fluctuation level, method WTF, Sub-basin.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1: | Localização da sub-bacia de campo e florestada no município de Rosário do Sul/RS | 24 |
| Figura 2: | Imagem orbital da sub-bacia hidrográfica de campo, nela pode ser observada ravinas e vossorocas, responsáveis pelo processo ativo de esculturação do relevo. P1 – localização do poço P1 na sub-bacia hidrográfica de campo | 28 |
| Figura 3 | a) Paisagem da sub-bacia hidrográfica, com cicatriz de vossoracamento; b) detalhe do processo erosivo | 32 |
| Figura 4 | Uso do solo e localização do poço de monitoramento – P1 – e do <i>barologger</i> | 32 |
| Figura 5 | a) Paisagem da bacia hidrográfica; b) poço de monitoramento – P1..... | 33 |
| Figura 6 | Uso do solo e localização dos poços de monitoramento – P2, P3, P4 e P5 – e do <i>barologger</i> | 34 |
| Figura 7 | a) Poço de monitoramento – P2; b) poço de monitoramento – P2, imagem atual..... | 35 |
| Figura 8 | a) Poço de monitoramento – P3; b) poço de monitoramento – P3, imagem atual..... | 35 |
| Figura 9 | a) Poço de monitoramento – P4; b) poço de monitoramento – P4, imagem atual..... | 36 |
| Figura 10 | a) Poço de monitoramento – P5; b) poço de monitoramento – P5, imagem atual..... | 36 |
| Figura 11 | Indicação a direção de fluxo subterrâneo em relação aos poços de monitoramento na sub-bacia florestada..... | 37 |
| Figura 12 | Organização estrutural de uma bacia hidrogeológica delimitada pelas zonas de falha, sob desenho de uma bacia hidrográfica para melhor exemplificação, a seção CD demonstra a condição geológica e topográfica da bacia hidrográfica | 42 |
| Figura 13 | Corte vertical identificando duas bacias hidrogeológicas (sistemas subterrâneos) e seu comportamento de fluxo e recarga local e regional e, identificação de divisores hidrográficos indicando a presença de mais de uma bacia hidrográfica neste sistema, além das drenagens e do exutório regional | 43 |
| Figura 14 | Perfil vertical do subsolo, demonstrando as diferentes camadas existentes em subsuperfície e o comportamento da água subterrânea..... | 47 |
| Figura 15 | Simplificação do modo de ocorrência das águas subterrâneas nos diferentes tipos de aquíferos e em diferentes tipos de rochas..... | 48 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 16 | 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..... | 53 |
| Figura 17 | Esquema simplificado e conceitual relativo à porosidade total, rendimento específico e retenção específica de um material sedimentar..... | 54 |
| Figura 18 | Ilustração dos medidores automáticos, que estão instalados nos poços realizando as medições nos tempos programados... | 67 |
| Figura 19 | Figura ilustrativa da transmissão dos dados coletados automaticamente dos medidores automáticos para um aparelho de computador do tipo <i>notebook</i> | 68 |
| Figura 20 | Equipamento que possibilita a obtenção de dados imediatos do nível da água, condutividade elétrica e temperatura da água nas profundidades desejadas..... | 69 |
| Figura 21 | Equipamento que determina a porosidade, denominado como método da coluna de areia..... | 70 |
| Figura 22 | Ilustra as três amostras deformadas coletadas nas áreas de estudo e ao fundo o recipiente para destorroamento do material (solo e/ou rocha) com dois destorroadores e o dessecador..... | 71 |
| Figura 23 | Ilustra diferentes tamanhos de cilindros que podem ser utilizados para coleta de amostras não deformada de solo | 73 |
| Figura 24 | Amostras do material coletado em campo, onde foram conservadas suas características estruturais (amostras não deformadas), necessárias para os ensaios de condutividade hidráulica e de porosidade total..... | 73 |
| Figura 25 | Imagem do permeâmetro adaptado, com estruturas de madeira e garrafas de vidro como reservatórios de água, notar a presença das amostras indeformadas e de béquer como recipiente coletor da água percolada..... | 74 |
| Figura 26 | Comportamento da curva granulométrica a partir dos resultados obtidos no ensaio de granulometria realizado com as amostras coletadas nas áreas em estudo..... | 78 |
| Figura 27 | Perfil topográfico dos poços de monitoramento na sub-bacia hidrográfica florestada, Rosário do Sul/RS | 83 |
| Figura 28 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P1, sub-bacia hidrográfica de campo em relação a precipitação pluviométrica no período de 26/05/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS | 86 |
| Figura 29 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P4, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica do período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS | 87 |
| Figura 30 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P3, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS | 88 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 31 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P5, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS | 89 |
| Figura 32 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P2, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS | 90 |
| Figura 33 | Comportamento da regressão linear entre o nível da água subterrânea e a precipitação no período de monitoramento que compreende os dias de 187 a 191 no poço P1 e determinação de sua correlação (R^2)..... | 91 |
| Figura 34 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P1. h1 a h11: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, prolongamento da linha de tendência. Determinação do Δh do P1..... | 93 |
| Figura 35 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P2. h1 a h8: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, o prolongamento da linha de tendência. Determinação do Δh do P2..... | 94 |
| Figura 36 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P3. h1 a h8 – identificação das curvas de recessão e a partir delas prolongamento da linha de tendência. Determinação do Δh do P3..... | 95 |
| Figura 37 | Flutuação do nível da água subterrânea do poço P4. h1 a h18: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, o prolongamento da linha de tendência. Determinação do Δh do P4..... | 96 |
| Figura 38 | Assinatura da variação do nível da água subterrânea do poço P5. h1 a h8: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, o prolongamento da linha de tendência. Determinação do Δh do P5..... | 97 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Dados referentes ao tamanho de área, localização em Coordenadas Geográficas e UTM e quantidade de poços monitorados nas áreas de estudo | 24 |
| Tabela 2 | Escala granulométrica com seus respectivos diâmetros e determinação da classificação textural das amostras..... | 77 |
| Tabela 3 | Valores médios de condutividade hidráulica saturada para solo e rocha da sub-bacia hidrográfica de campo nativo e do solo da sub-bacia hidrográfica florestada | 79 |
| Tabela 4 | Dados obtidos no ensaio de porosidade realizando-se uma repetição | 80 |
| Tabela 5 | Sistematização das informações de porosidade total em porcentagem e determinação do rendimento específico e retenção específica | 81 |
| Tabela 6 | Sistematização das informações referente à estimativa de recarga para cada poço de monitoramento..... | 98 |
| Tabela 7 | Porcentagem da precipitação na recarga da água subterrânea e recarga média de cada sub-bacia hidrográfica em função da precipitação pluviométrica | 99 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | | |
|-----------|---|----|
| Equação 1 | Equação para determinar recarga pelo método WTF | 52 |
| Equação 2 | Equação para determinação do conteúdo gravimétrico de água na amostra | 70 |
| Equação 3 | Equação da condutividade hidráulica | 74 |

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

ABNT/NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APP - Área de Preservação Permanente

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

BHRSM - Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria

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

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

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

E - Leste

EUA - Estados Unidos da América

Fm. - Formação

GCC - Departamento de Geociências

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

K - Condutividade hidráulica

m - Metros

mm - Milímetros

N - Norte

NW - Noroeste

ONU - Organização das Nações Unidas

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos

PSAG - Projeto Sistema Aquífero Guarani

PVC - Policloreto de vinila

P1 - Poço de monitoramento 1

P2 - Poço de monitoramento 2

P3 - Poço de monitoramento 3

P4 - Poço de monitoramento 4

P5 - Poço de monitoramento 5

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

UDELAR - Universidad de la República Uruguay

UFAL - Universidade Federal de Alagoas

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria

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

LISTA DE APÊNDICES

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Apêndice 1 | Dados detalhados do ensaio de condutividade hidráulica | 121 |
| Apêndice 2 | Dados informantes sobre o peso das amostras de solo | 122 |
| Apêndice 3 | Dados detalhados do ensaio de porosidade total | 123 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 2 | CARACTERIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS COM FLORESTA E CAMPO NATIVO | 23 |
| 2.1 | Caracterização física | 25 |
| 2.2 | Descrição da vegetação do uso e ocupação do solo | 30 |
| 3 | APORTES TEÓRICO-CONCEITUAIS | 38 |
| 3.1 | Estado do conhecimento ou da arte | 38 |
| 3.2 | Conceituando bacia hidrográfica e bacia hidrogeológica ... | 41 |
| 3.3 | Conceituando águas subterrâneas | 44 |
| 3.3.1 | Tipos de aquíferos e distribuição de água no subsolo | 46 |
| 3.3.2 | Aquíferos porosos | 48 |
| 3.4 | Flutuação de nível e estimativa de recarga das águas subterrâneas | 50 |
| 3.5 | Sustentabilidade e gestão das águas subterrâneas | 56 |
| 4 | METODOLOGIA | 62 |
| 4.1 | Procedimentos técnicos | 65 |
| 4.1.1 | Métodos básicos | 67 |
| 4.1.1.1 | Instalação e Monitoramento por medidor automático da flutuação do nível do lençol freático | 67 |
| 4.1.1.2 | Determinação da porosidade total | 69 |
| 4.1.2 | Métodos auxiliares | 71 |
| 4.1.2.1 | Análise granulométrica | 71 |
| 4.1.2.2 | Ensaio de condutividade hidráulica | 72 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5 | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 76 |
| 5.1 | Granulometria | 76 |
| 5.2 | Condutividade hidráulica | 79 |
| 5.3 | Porosidade total | 80 |
| 5.4 | Análise da flutuação do nível da água subterrânea no período 2009/2011 | 81 |
| 5.5 | Aplicação do método <i>Water Table Fluctuation</i> – WTF | 92 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES | 101 |
| 7 | CONCLUSÕES | 104 |
| 8 | RECOMENDAÇÕES | 105 |
| | REFERÊNCIAS | 106 |
| | APÊNDICES | 117 |

1 INTRODUÇÃO

A complexidade das inter-relações de uma bacia hidrográfica como de outros sistemas do planeta Terra é responsável pela dinâmica organizacional e pela singularidade das espacialidades geográficas que possuem os processos, as estruturas e as funções determinantes das formas representativas do Sistema em um determinado tempo (SANTOS, 1985). Ao conceber a Terra como um sistema auto-organizador, identificam-se as interligações e a necessidade de comprometimento das ações humanas (CAPRA, 1996). 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.

A interferência do ser humano no meio ambiente sempre altera, impossibilitando a vida dos seres vivos, em sua plenitude, nos ecossistemas. Deste modo, quando a realidade se apresenta em desarmonia, questiona-se a respeito da temática "gestão sustentável". A gestão, como gerenciamento, define-se como um processo de tomada de decisão que utiliza ao máximo o recurso para benefício coletivo.

Discussões referentes à gestão dos recursos hídricos têm sido constante em pesquisas de âmbito nacional e internacional, pois tal temática se insere no contexto das discussões sobre sustentabilidade e "abastecimento hídrico", quando este se refere às preocupações que envolvem as políticas públicas. Hoje, tais problemas carecem de alternativas que permitam reverter às condições precárias de atendimento às necessidades das populações desprovidas de recursos e concentradas em áreas de baixa disponibilidade hídrica.

As incorporações de ações governamentais, como de educação ambiental, promovem mudanças capazes de corrigir desequilíbrios advindos das intervenções humanas e, assim, preservando o legado a ser deixado às novas gerações. Dentre os recursos pertencentes às paisagens naturais, os recursos hídricos se destacam como uma das principais preocupações mundiais, pois há inúmeros problemas causados pela falta ou inviabilidade no uso deste recurso natural renovável determinante para a vida e bem-estar da humanidade.

No Brasil, tem-se atribuído crescente importância às investigações científicas orientadas para a avaliação das potencialidades e das vulnerabilidades de uso dos

sistemas hídricos, cujos enfoques priorizam a melhoria da qualidade ambiental, além da qualidade de vida das populações e biota que ocupam as áreas urbanas e rurais.

Este trabalho inscreve-se na investigação que visa diagnosticar e contribuir para a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, seu uso sustentável e planejamento de ações de gerenciamento. Destaca-se que, a necessidade de testar metodologias para estimativas de recarga da água subterrânea. Foram escolhidas duas sub-bacias com uso do solo diferente, necessário para comparação, uma sub-bacia com florestamento de eucaliptos e outra de campo nativo, ambas localizadas no município de Rosário do Sul/RS e em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani – SAG.

A gestão dos recursos hídricos se apresenta como uma das ferramentas eficazes para a reorganização espacial, principalmente, o gerenciamento do uso dos recursos hídricos subterrâneos, responsáveis por 97% da água doce líquida do Planeta Terra. Este trabalho vai ao encontro de discussões a cerca da temática, água subterrânea, contribuindo para o, desvendar de particularidades dos aquíferos e, para a melhoria na eficiência de se seu gerenciamento.

A compreensão do efeito que as florestas plantadas exercem sobre as águas é fundamental para auxiliar no esclarecimento de questões a muito debatidas por ONGs, pesquisadores, ambientalistas e comunidade em geral, em relação à influência da silvicultura principalmente do eucalipto, sobre a manutenção quali-quantitativa da água numa região com déficit hídrico e de bioma singular como a metade sul do RS (BAUMHARDT, 2010, p. 29).

Esta pesquisa buscou fornecer maiores subsídios técnicos em relação ao cultivo de eucaliptos, comparando-o com área de campo nativo em relação à recarga da água subterrânea. Este trabalho faz parte de um projeto que visa fornecer subsídios para a Integração dos Instrumentos de Outorga, Enquadramento e Cobrança para a Gestão das Águas Subterrâneas (ASUB/UFMG/UFAL/UFMS, 2010).

O estudo, em seus objetivos e em sua metodologia, procura investigar a flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias e estima a recarga subterrânea, pelo monitoramento do nível estático da zona saturada. Como objetivos específicos: 1) determinar a flutuação do nível freático; 2) verificar a

resposta deste em relação à precipitação pluviométrica e; 3) comparar entre as sub-bacias representativas, considerando as características físicas do solo e o seu uso e ocupação.

As hipóteses do trabalho foram:

- ✓ Existe flutuação anual do nível freático na área de estudo.
- ✓ Há resposta imediata do nível freático após precipitação pluviométrica.
- ✓ Existe variação de recarga subterrânea entre área de campo e área florestada.
- ✓ Há recarga das águas subterrâneas nas áreas de pesquisa.

Neste sentido, o trabalho foi estruturado em capítulos:

No primeiro capítulo realizam-se a descrição e a caracterização das áreas em estudo, responsáveis pelo resgate e conhecimento a respeito do referencial empírico.

O segundo capítulo aborda a revisão de literatura, dedicando-se ao gerenciamento hídrico e aos estudos das águas subterrâneas em especial suas variações de nível e recarga com ênfase no SAG.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia norteadora e os procedimentos metodológicos da investigação, permitindo desenvolver os objetivos e analisar os resultados respondendo às hipóteses.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da investigação e, a seguir, as considerações, conclusões e recomendações.

Observa-se a necessidade de maiores cuidados quanto ao uso de conceitos sobre Hidrogeologia e Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos, além de estudos a respeito de flutuação do nível e recarga do aquífero. Assim, torna-se necessário e importante a formação de técnicos com visão interdisciplinar, capazes de interpretar em sua totalidade o Ciclo Hidrológico e, a partir disto, desenvolver a gestão através do planejamento integrado sobre os recursos hídricos em qualquer Bacia Hidrográfica.

Portanto, a busca por respostas, ainda incompletas, sobre a funcionalidade das águas subterrâneas, 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 da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, RS.

2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS COM FLORESTA E CAMPO NATIVO

O capítulo tratará de esclarecer as características contidas nas áreas de estudo, bem como, sua descrição, considerando que o entendimento da organização espacial destas é fundamental para a interação teórico-metodológico e compreensão dos dados obtidos nos resultados da pesquisa.

O crescimento populacional tende a aumentar os conflitos, a diversificação e a intensificação do uso que se faz do recurso, água subterrânea. Por outro lado, o não planejamento e gerenciamento, juntamente com a ineficiência política tendem a agravar, cada vez mais, a situação, quer sobre a adequação na sociedade, quer na construção de conhecimento a respeito das questões que envolvem a gestão das águas subterrâneas.

A ocupação e o uso do solo de determinado espaço irá depender dos aspectos físicos e naturais que são peculiares de cada região, sendo estes: a vegetação, solos, clima, hidrologia, geomorfologia, geologia e relevo. É neste sentido que se fez necessário o estudo destes fatores geográficos, pois nos explicam determinados aspectos que podem ser identificados no objeto de estudo.

Estes aspectos condicionam o comportamento de determinada região. Por exemplo, a cobertura vegetal, quer seja de pequeno (gramíneas), médio (arbustos e pequenas árvores) e de grande porte (mata densa), assume papel importantíssimo entre os recursos naturais, pois ela ajuda na permeação e retenção de água no solo, bem como evita a ação da erosão. (RIO GRANDE DO SUL/SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO, 1994).

O objeto de estudo está representado em duas sub-bacias hidrográficas, inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, sub-bacia do Rio Uruguai (RS/SEMA, 2004). Estas sub-bacias estão localizadas no município de Rosário do Sul/RS, respectivamente, em uma área de campo nativo contendo 21 hectares e a outra com florestamento de eucaliptos, com área de 85 hectares (Figura 1).

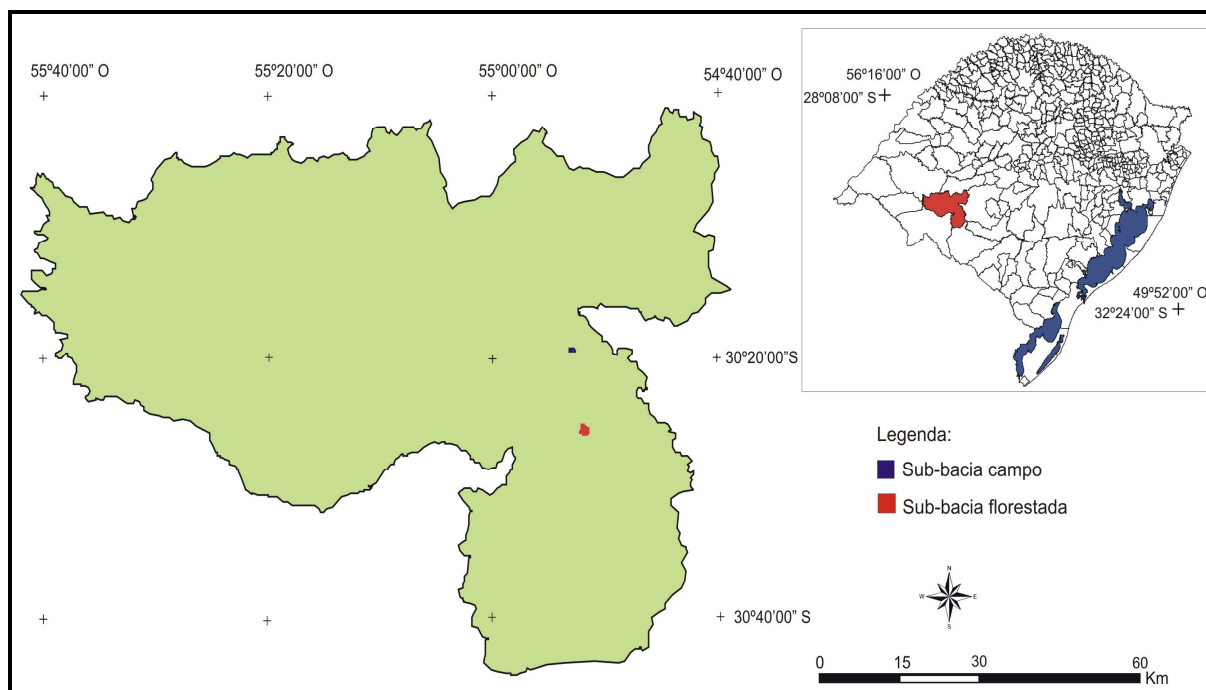


Figura 1: Localização das sub-bacias hidrográficas de campo e florestada no município de Rosário do Sul/RS.

Sistematizando a localização dos dados nas sub-bacias hidrográficas, ou seja, a identificação e a localização dos poços de monitoramento optaram-se por apresentar uma tabela ilustrativa (Tabela 1), onde, na sub-bacia de campo está sendo monitorado um poço. Enquanto que, na sub-bacia com atividade silvícola têm-se quatro poços de monitoramento instalados.

Tabela 1: Dados referentes ao tamanho de área, localização em Coordenadas Geográficas e UTM e quantidade de poços monitorados nas áreas de estudo.

| Sub-bacias | Área (ha) | Localização | | | | Nº. Poços monitorados |
|------------|-----------|-------------------------|-------------|-----------------|----------|-----------------------|
| | | Coordenadas Geográficas | | Coordenadas UTM | | |
| Campo | 21 | 30°19'26" S | 54°53'15" W | 6643271 N | 703001 W | 1 |
| Florestada | 85 | 30°25'25" S | 54°52'13" W | 6630302 N | 704580 W | 4 |

Fonte: Silvério da Silva et al. (2009).

Vale destacar que a sub-bacia com florestamento originalmente tinha vegetação de campo nativo, típico da região pampeana. Nela as principais atividades estão ligadas à criação de gado, utilizando a própria gramínea natural e as pastagens de inverno que, no verão, são substituídas pelas lavouras de soja. Estas localizadas nas áreas mais altas (coxilhas) em quanto que, nas planícies de inundação onde o nível do lençol freático aflora ou está próximo a superfície, estão as lavouras de arroz irrigado.

Destaca-se que estudos de Silveira et al. (2003) realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria - BHRSM, utilizaram como subdivisões para proposição de seu gerenciamento as Secções Hidrológicas de Referência – SHRs¹, perfazendo um total de 21 SHRs. Esta proposta também foi adotada por Descovi Filho (2009) em estudo de vulnerabilidade à contaminação do aquífero. Enfatiza-se que as áreas de estudo, estão contidas na SHR 15.

Reiterando a necessidade de se conhecer detalhadamente alguns aspectos que condicionam as particularidades do objeto de estudo, foram realizadas breves discussões a respeito das sub-bacias, quanto a aspectos: geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, pedológicos, climatológicos, de vegetação e uso e ocupação do solo.

Destaca-se que, pela proximidade entre as duas sub-bacias representativas, em alguns aspectos elas foram abordadas e discutidas conjuntamente, devido à disponibilidade do grau de detalhamento.

2.1 Caracterização física

As sub-bacias hidrográficas representativas estão localizadas na Depressão Periférica do Rio Grande do Sul, abrangem as unidades litológicas da Bacia Sedimentar do Paraná, originadas durante as Eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica. Esta última foi responsável pela formação dos depósitos aluviais ou sedimentos terciários (RADAMBRASIL, BRASIL, 1986) e (BRASIL/CRPM/2008).

¹ As SHRs devem ser definidas em função tanto de critérios que consideram a distribuição geográfica da demanda, quanto de fatores geomorfológicos e hidrológicos (SILVEIRA et al., 2003).

As rochas sedimentares, nesta área, são do tipo arenito, formadas pela fragmentação de rochas preexistentes, desagregadas pela erosão, transportadas e acumuladas em locais propícios à deposição, formando bacias sedimentares. Também se apresentam favoráveis à formação dos melhores aquíferos, devido à porosidade quase sempre homogênea. Também apresentam uma elevada relação de porosidade/permeabilidade o que favorece a velocidade de fluxo subsuperficial.

As rochas sedimentares, para Leniz e Amaral (1980), são rochas originadas pela destruição erosiva de qualquer tipo de rocha, sendo os fragmentos transportados e depositados em ambientes de sedimentação da superfície terrestre. Já Press et al. (2006) dizem que as rochas sedimentares serão originadas quando o ciclo das rochas estiver no estágio de superfície, assim a sua formação deve-se aos seguintes processos, respectivamente: intemperismo, erosão, transporte, deposição/sedimentação, soterramento e diagênese. Observa-se que os dois últimos processos, soterramento e diagênese, são os responsáveis pela litificação e formação da rocha sedimentar clástica ou terrígena.

A partir da interpretação da nomenclatura proposta pela CPRM (2008), as duas sub-bacias hidrográficas 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).

Soares et al. (2008) afirmam, ainda que a espessura aproximada da Fm. Pirambóia é de 500 metros, onde a rocha apresenta coloração creme a castanho claro, com predominância de arenitos médios (quartzo, feldspato, minerais opacos), os grãos são subarredondados e foscos, em algumas áreas favorecidas apresentam cimentação e concreções carbonáticas. Devido às características observadas da Fm. Pirambóia, Dias (2006) afirma que estas condicionam discordância erosiva, que apresentam saliências notáveis no perfil de resistividade em estudos geofísicos.

A Fm. Pirambóia 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. Além disso, apresenta menor capacidade de

armazenamento de água em relação a outras formações sedimentares, devido à presença de lentes argilosas (DIAS, 2006).

Segundo Dias (2006), a Fm. Pirambóia recobre a Fm. Rio do Rasto constituída por estratos areno-pelíticos lacustres e o contato superior é com a Fm. Botucatu, composta por depósitos sedimentares eólicos ou ainda com a Fm. Sanga do Cabral, composta por sedimentos fluviais.

Localmente podem ocorrer estruturas impermeáveis como os diques vulcânicos que ocorrem localmente (SIAGAS/CPRM, 2010, Poço 4300009307, localizado na Fazenda Tarumã 2).

Com a crescente demanda e poluição das águas superficiais, há crescente uso dos reservatórios de água subterrânea, devido às condições estruturais das rochas. Os arenitos apresentam maiores chances de haver armazenamento de água e serem capazes de serem explorados. O entendimento das águas se faz necessário, devido às condições de gerenciamento deste recurso. A principal preocupação está em saber não apenas se há ou não e até quando haverá disponibilidade de água, mas também, em que condição se encontra e como se deve devolvê-la ao ambiente.

Considerando as peculiaridades regionais, que garantem comportamentos diferenciados nas regiões hidrogeológicas, o condicionante de maior influência é a constituição geológica, que irá determinar as características quali-quantitativas do aquífero, bem como sua inter-relação com outros aquíferos e seu grau de influência no ciclo hidrológico regional. Já as condições geomorfológicas permitem compreender e determinar a capacidade de infiltração e identificar as áreas de recarga e descarga dos aquíferos.

A geomorfologia pode ser entendida como o conjunto de processos morfogenéticos que influenciam na forma da superfície terrestre. Este conjunto heterogêneo de feições forma o relevo, onde as morfoestruturas e morfoesculturas estão relacionadas às condições climáticas atuais e pretéritas que atuaram nesta estrutura (WERLANG, 2004).

Observando as características morfológicas e geológicas, pode-se enquadrar as áreas em estudo, no tipo Coxilhas, segundo a classificação Ab'saber (1970). Segundo Sartori (1979) as Coxilhas da Depressão Periférica, caracterizadas como unidades de relevo com menores cotas altimétricas, que podem variar de 60 metros a 200 metros acima do nível médio do mar. Estas coxilhas podem também ser

consideradas divisores de água de pequenas bacias hidrográficas, pois tem como característica morfológica a presença de colinas côncavas – convexas.

Coxilhas são formas de relevo bastante homogêneas retratadas de modo geral por colinas suaves, bem arredondadas (RADAMBRASIL, 1986). Ainda pode-se afirmar, segundo Suertegaray e Guasselli (2004), que a Depressão Periférica é composta, geomorfologicamente, por padrões diferenciados de colinas, uma com topos planos e outras com topos convexos.

Destaca-se que as duas sub-bacias hidrográficas em estudo apresentam características geomorfológicas idênticas, não apresentam planícies de inundação extensa, por serem bacias hidrográficas com curso de água pequeno (riachos), e ainda em processo de esculturação do relevo (ravinas e vossorocas) (Figura 2).



Figura 2: Imagem orbital da sub-bacia hidrográfica de campo, nela pode ser observada ravinas e vossorocas, responsáveis pelo processo ativo de esculturação do relevo.

P1 – localização do poço de monitoramento P1 na sub-bacia hidrográfica de campo.

Fonte: Imagem orbital obtida pelo Google Earth; <http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>.

Estudos geomorfológicos e climáticos contribuem para a compreensão da paisagem. As áreas de estudo apresentam topografia plana à ondulada, e estão dissecadas pelas redes de drenagem de primeira e segunda ordem.

Também é importante salientar que as características geomorfológicas, principalmente o relevo, geologia, rede de drenagem e solo, juntamente com o tipo de clima e de cobertura vegetal, são condicionantes no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, como por exemplo, capacidade de infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial, entre outros (LIMA, 1986).

Segundo a classificação dos tipos climáticos de Köppen, as duas áreas de estudo estão contidas no tipo Cfa, onde o C corresponde ao tipo *clima temperado úmido quente*, caracterizadas por verões quentes e invernos amenos. A temperatura média do mês mais frio é abaixo de 18°C e superior a -3°C. O tipo “C” é um dos cinco principais tipos climáticos encontrados no Planeta. O “f” representa uma subclassificação feita a partir do regime de precipitações pluviométricas, este significa *sempre úmido*, com o mês menos chuvoso com precipitação maior que 60 mm. Devido ao clima enquadrar-se no tipo C, têm-se, ainda, mais uma subclassificação que corresponde à temperatura característica da região. Neste caso ela está representada pelo tipo “a” que significa *verões quentes*, onde o mês mais quente tem média igual ou superior a 22°C e, precipitação pluviométrica anual média entre 1300 a 1600 mm.

Isto se comprova nas palavras de Sartori (1979), onde, 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. Há predominância de ventos no sentido E e SE, embora os ventos de direção N e NW sejam considerados os mais fortes. Os ventos de direção S e SW são típicos ventos frios, também conhecidos regionalmente como Minuano.

A origem do solo resulta da combinação do clima e da biosfera, além de fatores geológicos, geomorfológicos e o tempo. Joffe (1949, apud VIEIRA, 1975), considera que a geologia e a geomorfologia sejam os responsáveis pelo fornecimento de material e condições ambientais, e que o clima e a biosfera, são responsáveis pelas reações ativas e pela fonte de energia. A ação de cada fator determina a intensidade em um curto ou longo espaço de tempo.

Nas áreas de estudo, a partir de observações visuais, os solos se apresentam com características arenosas, e 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 textura e a porosidade contribuindo para o entendimento e explicação do processo de recarga

e a condutividade hidráulica, permitindo obter noções do comportamento de fluxo de transmissão da água.

A macroporosidade do solo, neste estudo, corresponde ao rendimento específico, dado necessário para realizar a estimativa de recarga. Segundo Azevedo e Dalmolin (2006) os poros do solo apresentam-se nas mais variadas formas, tamanhos e tortuosidades, sendo que é por eles que circulam a água e o ar, ou seja, a porosidade é o volume de espaços ocupados por fluidos existentes no solo.

2.2 Descrição da vegetação do uso e ocupação do solo

As características geomorfológicas e de uso e cobertura do solo são essenciais para a determinação de suas unidades de paisagem. O estado do Rio Grande do Sul compõe peculiaridades em seu relevo que identificaram, segundo Suertegaray e Guasselli (2004), cinco grandes unidades de paisagem, sendo elas: Planalto Basáltico, Cuesta do Haedo, Depressão Central, Escudo Sul-Rio-Grandense e a Planície Costeira.

Destas unidades, enfatiza-se a unidade Depressão Central ou Periférica, pois as áreas de estudo estão aí localizadas. Esta, por sua vez, é dividida em duas subunidades: a subunidade de Paisagem de Campos da Depressão Central e a subunidade de Paisagem Agrícola (SUERTEGARAY E GUASSELLI, 2004). Salienta-se que a primeira está presente nas duas sub-bacias estudadas, e a segunda está presente entre as áreas de estudo.

Destaca-se que a Paisagem de Campo, enquadra-se na vegetação típica do Bioma Pampa, considerado 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 (BRASIL/IBGE/2004).

A sub-bacia de campo ainda conserva as características da subunidade de Paisagem de Campos da Depressão Central. Já a sub-bacia florestada, tem apenas sua Área de Preservação Permanente e Reserva Legal mantida com a vegetação nativa, o que possibilitou reconhecer sua subunidade de paisagem.

Segundo Suertegaray e Guasselli (2004), essa subunidade da paisagem tem como principais características, cobertura vegetal de gramíneas associada à mata galeria ao longo dos cursos de água, condição favorável à ocupação pastoril. Esta condição se modifica quando os cursos de água ficam maiores e apresentam larga planície de inundação, devido à condição do relevo em que está inserido, apresentando diferente uso do solo, constituindo uma nova paisagem, a Paisagem Agrícola, com predominância do cultivo de arroz, a partir das primeiras décadas do século XX.

Ao analisar a organização do uso do solo presente na sub-bacia hidrográfica de campo, tem-se como característica principal o uso destinado às atividades de pecuária. Neste sentido, os pecuaristas utilizam-se da vegetação natural (gramíneas) para alimentação de seus rebanhos: bovinos, bufalinos, entre outras.

Este sistema de produção rural é típico da região, destacando-se, também, que em suas proximidades, nas áreas pertencentes ao leito maior do rio principal, têm-se o cultivo de arroz irrigado. E, nas áreas de coxilhas, o cultivo da soja e milho e, nos períodos mais frios o cultivo de leguminosas destacando-se a aveia, azevém e a tritcale. Estes sistemas produtivos rurais são de extrema importância em âmbito econômico e ambiental no município em que a área de estudo está inserida, o município de Rosário do Sul.

Na figura 4, tem-se a representação do uso do solo da sub-bacia hidrográfica de campo, ressalta, na paisagem, a ocorrência de cicatrizes de vossorocamento. Nas margens do curso de água, tem-se a presença de mata galeria (Figura 3a; Figura 4). A figura 3b, representa um processo erosivo ativo na sub-bacia hidrográfica de campo.

Salienta-se que a sub-bacia hidrográfica de campo abrange uma área de 21 hectares, sendo que o P1 está a 132 metros acima do nível médio do mar e a 20, 1 metros de distância do vertedouro. Na figura 3 a,b e 6 a,b, pode-se observar a paisagem de campo, bem como a condição do poço, P1.

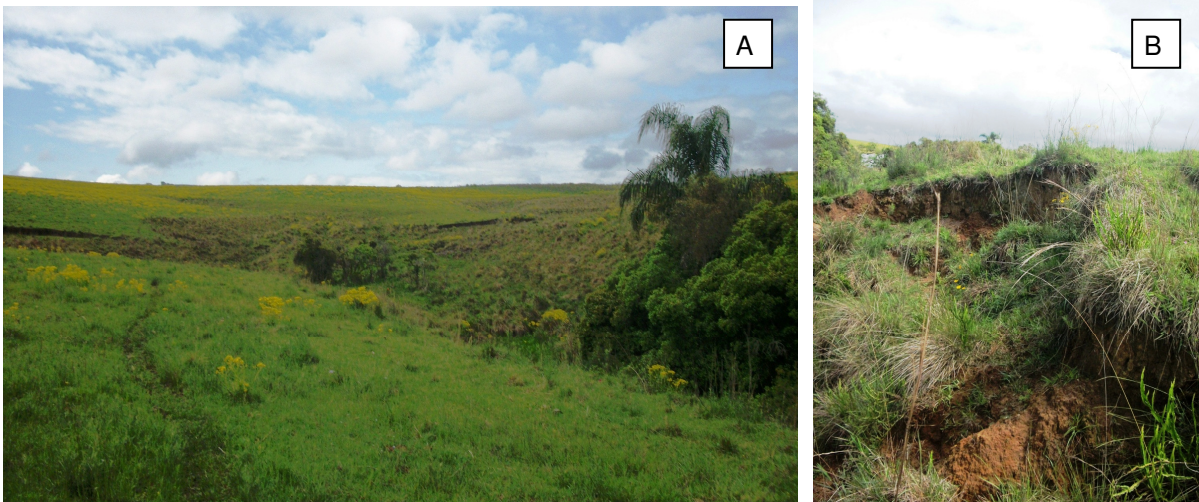


Figura 3: a) Paisagem da sub-bacia hidrográfica, com cicatriz de voçorocamento; b) detalhe do processo erosivo.

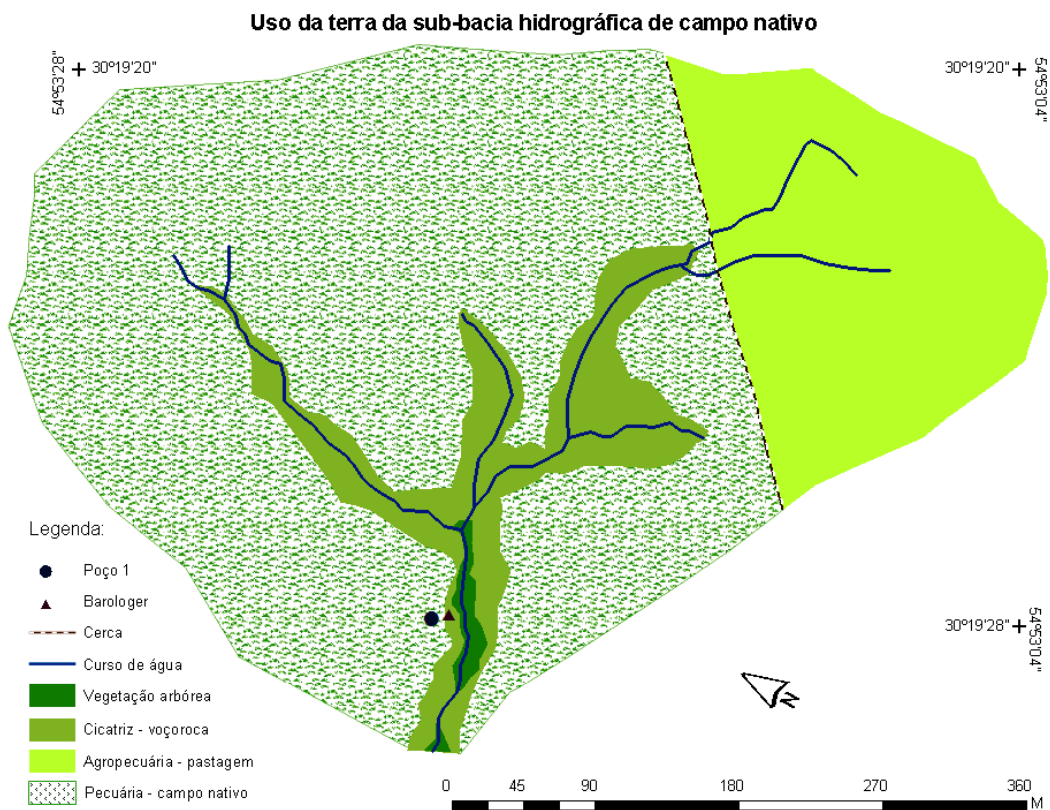


Figura 4: Uso do solo e localização do poço de monitoramento – P1 – e do *barologger*.

A partir das Figuras 3 a e b e das Figuras 5 a e b, comprova-se que a subunidade de paisagem proposta por Suertegaray e Guasselli (2004) condiz com a

paisagem encontrada na sub-bacia hidrográfica de campo. Destaca-se, ainda, a compatibilidade de informação quando afirmam que próximo aos cursos de água existe mata galeria e o campo é do tipo campo sujo.

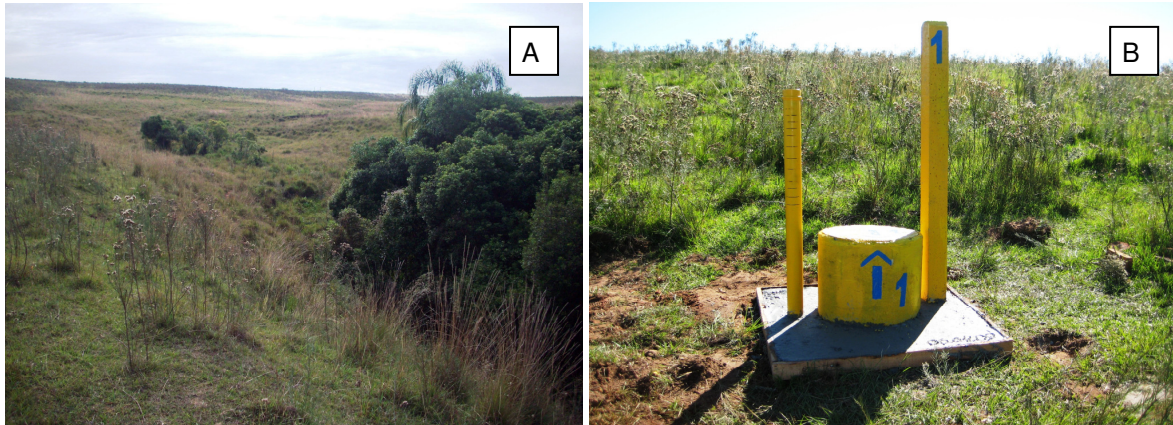


Figura 5: a) Paisagem da bacia hidrográfica; b) poço de monitoramento - P1.
Fonte: LABHIDROGEO (2009).

Referindo-se a sub-bacia hidrográfica florestada, esta se apresentava com as mesmas características que a de campo. Porém, com a inserção da silvicultura como novo sistema de produção rural, pela iniciativa privada estrangeira e nacional, incentivada através de políticas governamentais em âmbito municipal, estadual e federal. Atualmente, esta sub-bacia hidrográfica tem, em sua totalidade, o plantio de eucalipto, respeitado apenas a APP e a Reserva Legal da mesma (Figura 6) (DAMBRÓS et. al, 2011 b).

Na sub-bacia hidrográfica florestada, foram perfurados quatro poços de monitoramento do nível da água subterrânea. As Figuras 7, 8, 9 e 10 a e b, representam o comportamento da área no período de construção dos poços (2009) e do comportamento no mês de setembro de 2011.

Uso da terra na sub-bacia florestada

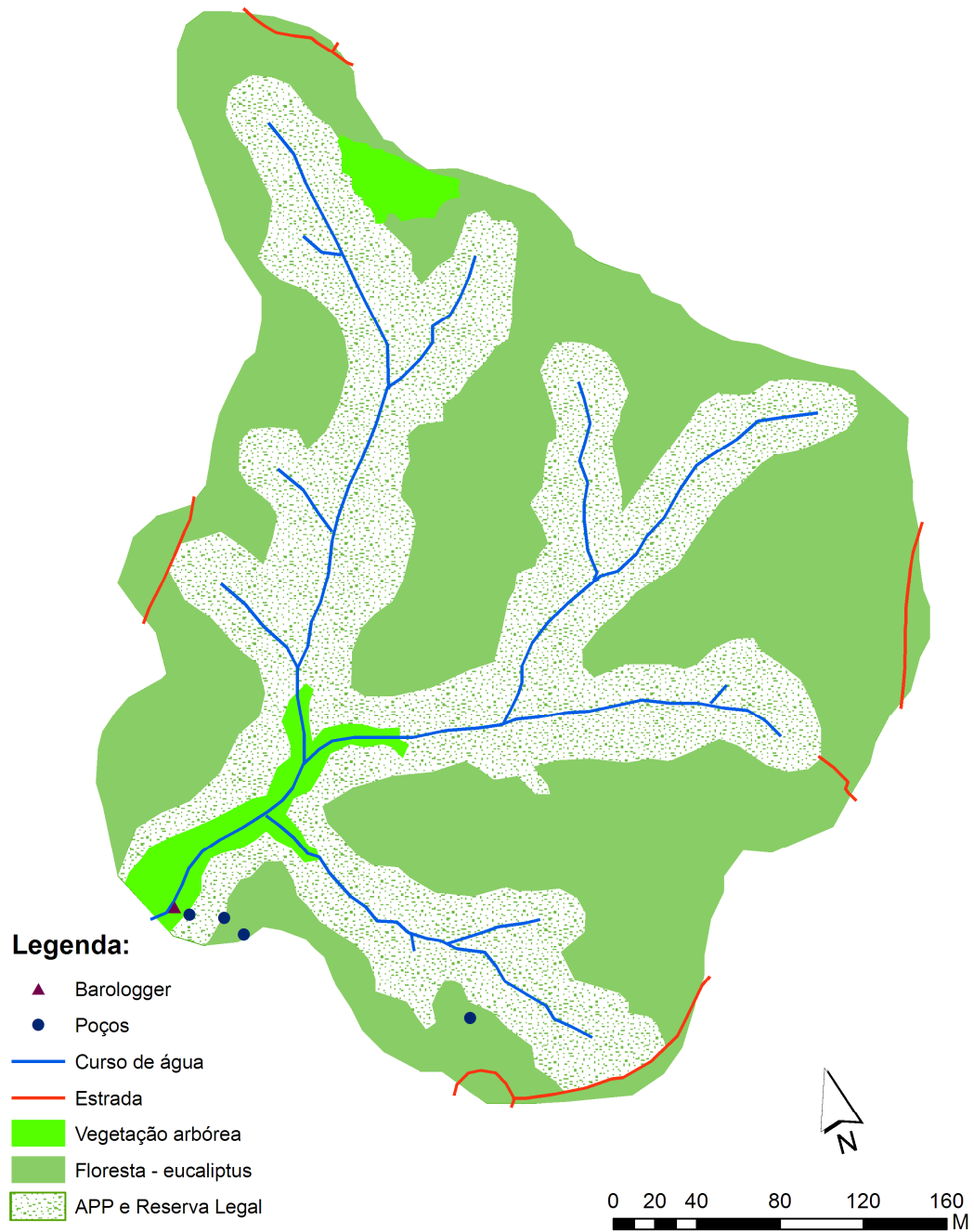


Figura 6: Uso do solo e localização dos poços de monitoramento – P2, P3, P4 e P5 – e do barologger.

O poço de monitoramento P2 está localizado no interior da área florestada, em condição mais elevada que os demais, estando em uma cota altimétrica de 155 metros e a 423,25 metros do vertedouro.

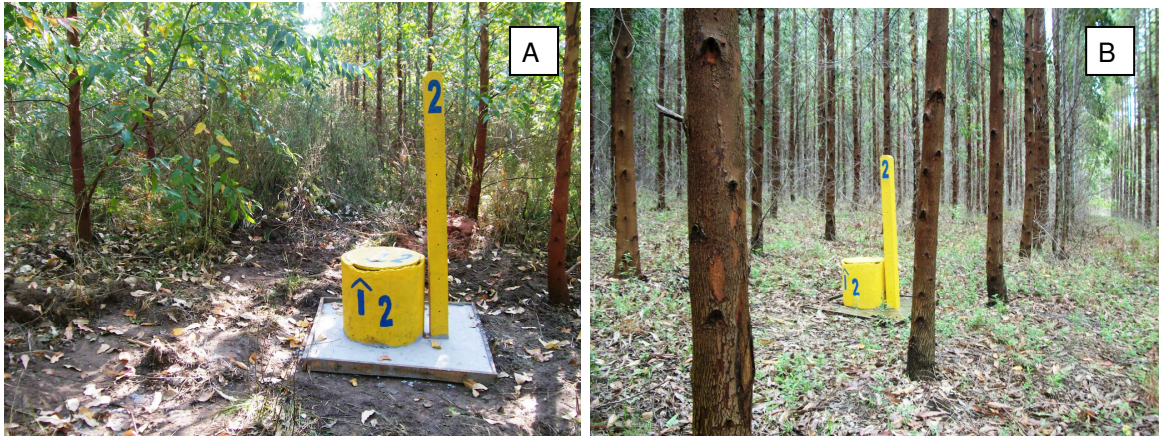


Figura 7: a) poço de monitoramento – P2; b) poço de monitoramento – P2, imagem atual.

Fonte: a) LABHIDROGEO (2009).

O poço de monitoramento P3 está localizado na interface da área florestada e da área de APP que manteve a condição natural, ou seja, campo sujo. A cota altimétrica neste poço está a 135 m e sua distância do vertedouro é de 128,55 m.

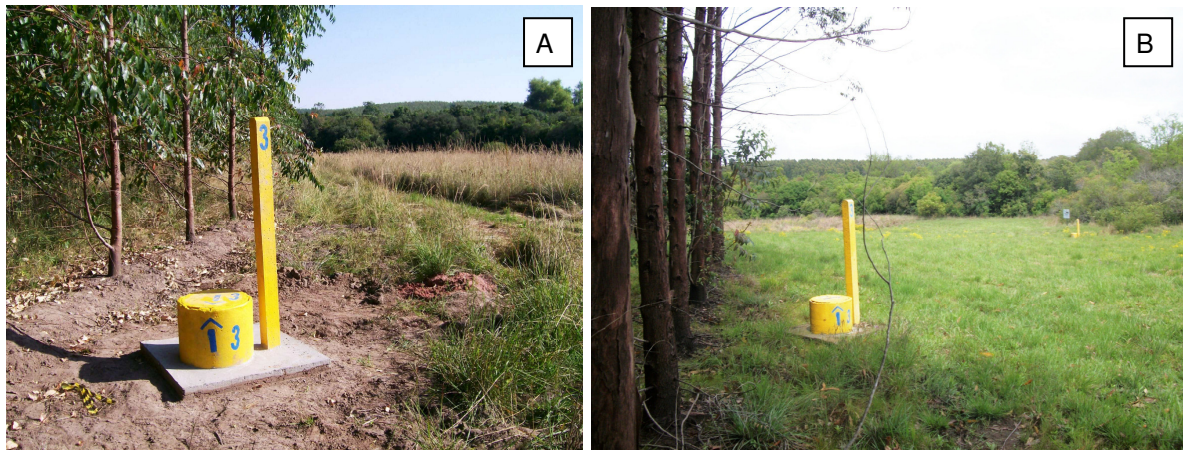


Figura 8: a) poço de monitoramento – P3; b) poço de monitoramento – P3, imagem atual.

Fonte: a) LABHIDROGEO (2009).

Na APP da sub-bacia hidrográfica florestada, que se apresenta vegetação de campo sujo, está situado o poço de monitoramento P4, localizado a 15,52 m do vertedouro e a uma cota altimétrica de 132 m.

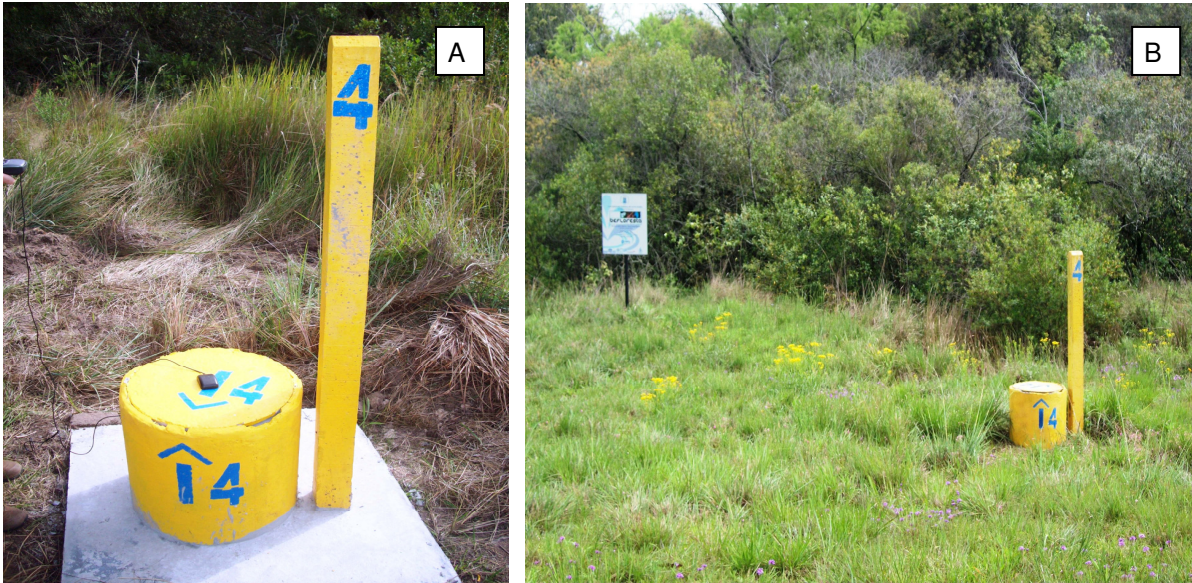


Figura 9: a) poço de monitoramento – P4; b) poço de monitoramento – P4, imagem atual.

Fonte: a) LABHIDROGEO (2009).

O poço de monitoramento P5 também está localizado no interior da área florestada, em cota altimétrica de 136 m e a 74,49 m do vertedouro.

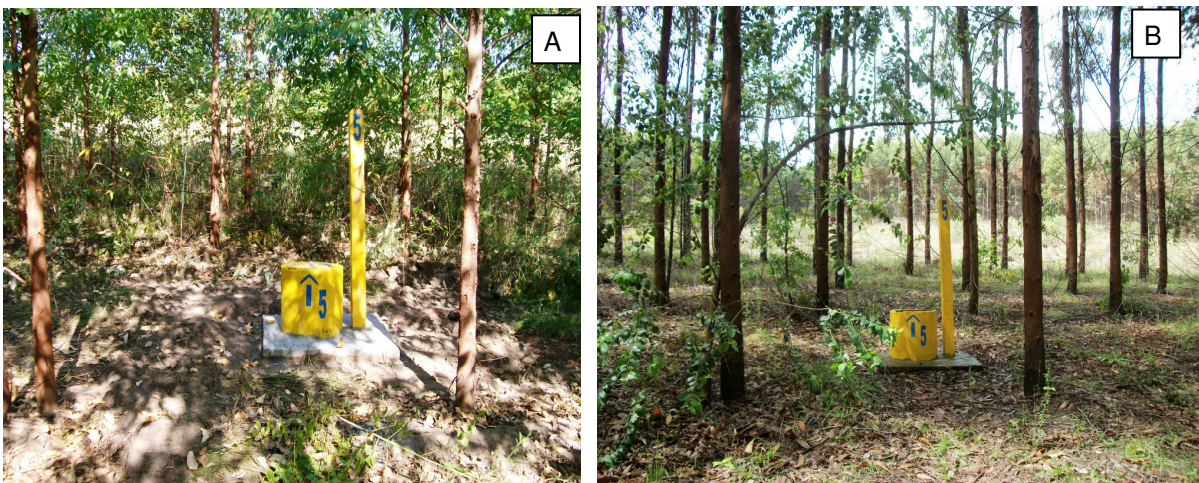


Figura 10: a) Paisagem da bacia hidrográfica; b) poço de monitoramento – P5.

Fonte: a) LABHIDROGEO (2009).

A sub-bacia hidrográfica florestada por apresentar mais que um poço de monitoramento, foi possível determinar a direção de fluxo subterrâneo a partir de informações sobre o nível piezométrico dos poços, este representado pela figura 11.

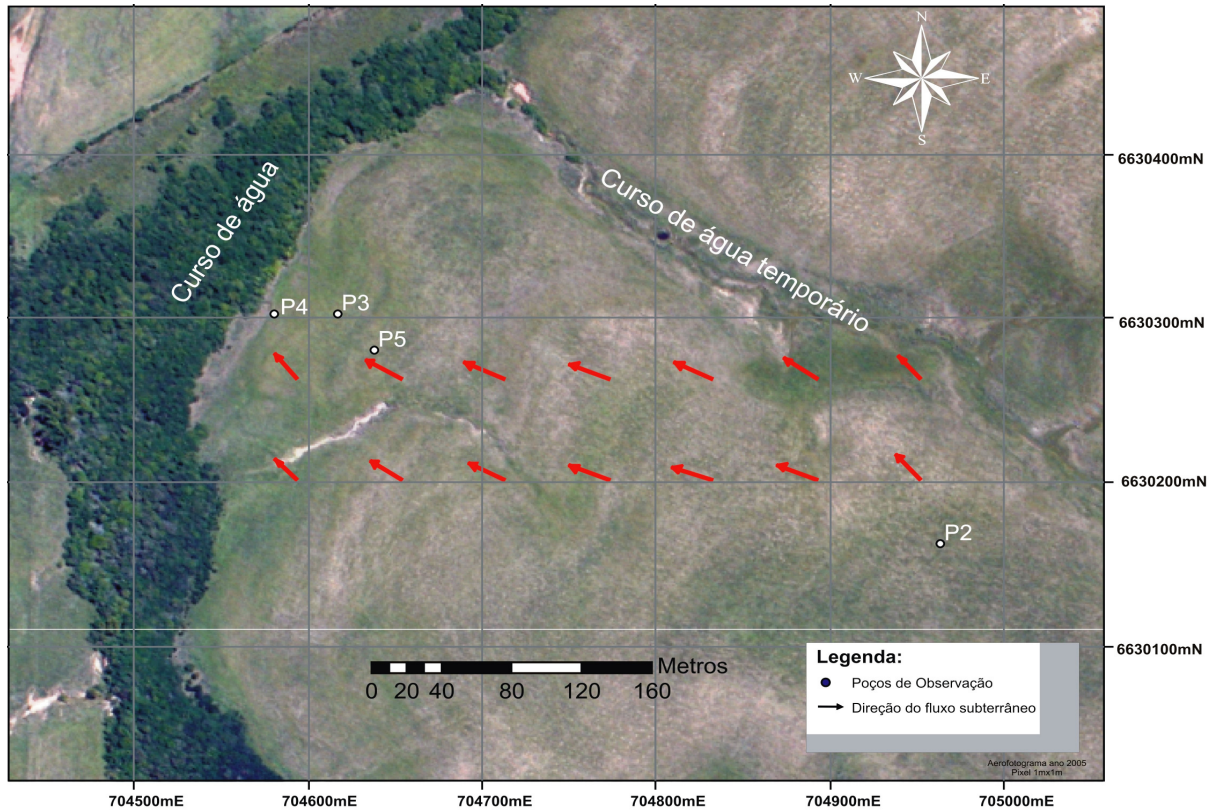


Figura 11: Indicando a direção de fluxo subterrâneo em relação aos poços de monitoramento na sub-bacia florestada. Notar que a imagem orbital foi obtida anterior ao florestamento de *eucaliptos*.

Fonte: Silvério da Silva et al., 2009.

3 APORTES TEÓRICO-CONCEITUAIS

Neste capítulo é discutido o estado da arte e o referencial teórico-conceitual pertinente à temática abordada no trabalho. Para tanto, as informações foram obtidas da literatura, pelo Portal de Periódicos da CAPES e no Banco Digital de Teses e Dissertações das principais universidades do País e ainda, outros documentos de cunho científicos e devidamente citados na bibliografia.

3.1 Estado do conhecimento ou da arte

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.

Define-se recarga como “a entrada de água disponível na zona saturada, juntamente com o fluxo da água ao longo do lençol freático no interior da zona saturada” (FREEZE e CHERRY, 1979). A recarga das águas subterrâneas é uma componente chave em qualquer modelo de fluxo de águas subterrâneas ou de transporte de contaminantes. A exata quantificação das taxas de recarga é indispensável para a gestão e proteção do recurso água subterrânea. Estes métodos produzem estimativas em escala temporo-espaciais e englobam uma ampla faixa de complexidade e custos. Informações sobre diferentes métodos estão contidas em referenciais como Simmers (1998, 1997), Sharma (1989), Lerner et. al. (1990) e Scanlon et al. (2002).

Existem vários métodos alternativos 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.

Healy e Cook (2002) 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.

Estudos sobre aspectos quantitativos da água subterrânea em área intensamente urbanizada, no município de São Carlos/SP, foram realizados por Maziero (2005). 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.

Para Maziero (2005), a estimativa de recarga subterrânea em áreas urbanas não possui sensibilidade necessária para a quantificação da recarga efetiva, devido à possibilidade de ocorrência de eventos de recarga indireta. Assim, devem-se considerar outras variáveis para eliminar as incertezas como: taxa de vazamento da rede de água e esgoto, além das taxas de vazamento das redes pluviais e contribuições menos sensíveis (irrigação de jardins e pátios, vazamento de fossas sépticas e esgotos domésticos).

Barreto (2006), propôs-se a realizar um balanço hídrico da bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, localizada no estado de São Paulo. 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.

Paiva (2006), desenvolveu estudos sobre estimativa de recarga em unidade dendrítica de uma sub-bacia do Rio Piranga, localizado no estado de Minas Gerais. O trabalho, segundo o autor, mesmo possuindo dados de apenas um poço, manteve-se confiável devido à localização do mesmo, a taxa de recarga obtida foi de 183,3 mm/ano. Mesmo assim, o dado manteve-se no esperado, quando comparado a resultados de outros pesquisadores.

A aplicação do método WTF no aquífero Rio Claro, localizado no estado de São Paulo, no período de 2002 a 2005, por Carnier Neto (2006) 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. Neste trabalho destaca-se a importância do aquífero como reserva reguladora da água superficial na área estudada.

Gouvêa (2009) determinou a influência da precipitação e das características do solo na variação do nível da água subterrânea. Diante dos resultados, concluiu 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.

Silvério da Silva et al. (2009), discute as primeiras informações obtidas no monitoramento automático dos poços de monitoramento, objeto de pesquisa desta dissertação. No presente artigo os principais resultados destacaram a existência de considerável variação do nível do lençol freático, como também indicaram a direção do fluxo subterrâneo o que contribui para o nível de base do curso de água. Igualmente foi destacada a continuidade do monitoramento em séries de longa duração para futuros estudos de variação do nível freático, estimativas de recarga subterrânea e de balanço hídrico.

Estudos realizados por pesquisadores argentinos e uruguaios, em áreas pertencentes ao SAG, 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. 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.

Considerando 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.

3.2 Conceituando bacia hidrográfica e bacia hidrogeológica

Seguindo as unidades de gerenciamento, propostas pela Lei Nº 9.433 da República Federativa do Brasil de 1997 tem-se como área de estudo, sub-bacias hidrográficas². Dependendo da escala uma sub-bacia hidrográfica pode ser considerada uma bacia hidrográfica e vice-versa. Para Santana (2003) sub-bacia e bacia hidrográfica são termos relativos.

Destaca-se, outrossim, a conceituação de bacia hidrogeológica, também considerada pela legislação das unidades de gerenciamento, pelo fato de analisar-se o comportamento das águas subterrâneas.

O termo bacia hidrográfica, é amplamente discutida no Brasil, a partir da década de 1970. Já é aceitável defini-la como um sistema ecológico, seguindo a hierarquia de organização espacial de forma natural dos rios e da topografia presente na unidade. A separação das unidades ocorre topograficamente e esta linha de divisão chama-se divisor de águas ou divisor topográfico.

Alguns estudiosos conferem ao conceito de bacia hidrográfica aspectos geomorfológicos, como por exemplo, Lima (1986) e Lima e Zakia (2000), que consideram uma bacia hidrográfica como um sistema geomorfológico aberto em um delicado equilíbrio transicional ou dinâmico, em contínua troca de energia, mesmo quando perturbado por ações antrópicas.

² Em concordância com Souza e Fernandes (2002) e Santana (2003), usa-se a terminologia sub-bacia hidrográfica, pois o termo microbacia, embora difundido em nível nacional, constitui-se uma denominação empírica, imprópria e subjetiva.

As composições de um conjunto de cursos de água organizadas pelas condições geomorfológicas definem uma bacia hidrográfica. Os elementos variáveis estão no tamanho da área e nos processos naturais atuantes (CHRISTOFOLETTI, 1980). Guerra (1978), Silva (1995) e Barrella et al. (2001), definem bacia hidrográfica, como uma área drenada por um rio principal e seus afluentes, delimitadas pelos divisores topográficos. Para o PNRH, uma bacia hidrográfica é a unidade territorial de planejamento.

A formação dos cursos de água se dá pelo escoamento superficial das águas pluviométricas e pelas águas subterrâneas aflorantes. A integração entre os cursos de água se dá pela perda de altitude, formando o rio principal. Este, por sua vez, receberá água de outros tributários até o exutório da bacia hidrográfica.

Sua delimitação é estabelecida com base em carta topográfica ou fotografia aérea. Atualmente é frequente o uso de imagens de satélite através de *softwares* especializados, gerando modelos digitais de elevação hidrograficamente consistente. Diferentemente da delimitação de uma bacia hidrográfica, está à delimitação de uma bacia hidrogeológica (Figura 12).

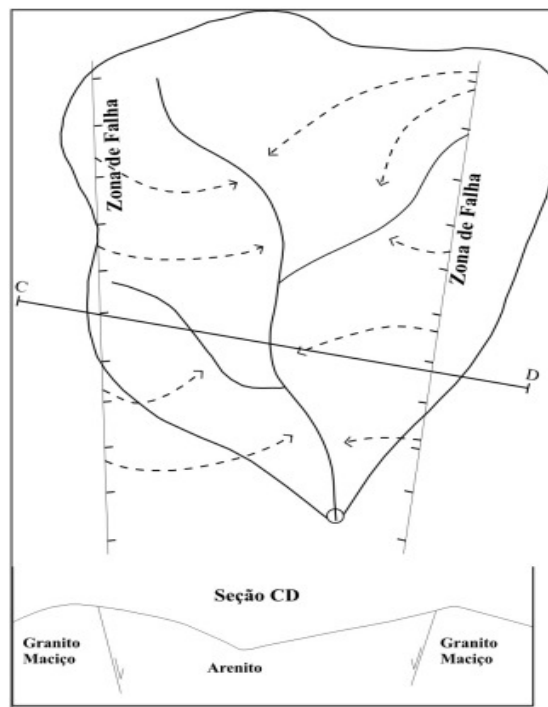


Figura 12: Organização estrutural de uma bacia hidrogeológica delimitada pelas zonas de falha, sob desenho de uma bacia hidrográfica para melhor exemplificação, a seção CD demonstra a condição geológica e topográfica da bacia hidrográfica. Fonte: ARRAES e CAMPOS (2007).

Estes dois tipos de bacias, na maioria das vezes, apresentam disparidade nas suas áreas de abrangência, como pode ser visualizado na Figura 12. Uma bacia hidrogeológica pode ser entendida como uma unidade geológica que contenha um ou mais aquíferos. Esta é uma tentativa de caracterizar aquíferos com os mesmos critérios da bacia hidrográfica (GRABHER et al. 2006).

As bacias hidrogeológicas necessitam de uma série estudos para o estabelecimento de suas reais dimensões. Há situações em que uma bacia hidrogeológica abrange mais que uma bacia hidrográfica (Figura 13). Ao analisar a figura, observa-se que entre uma e outra bacia hidrográfica ocorre uma diferença de padrões de fluxo e formas de infiltração e escoamento de base em relação ao escoamento superficial, devido a organização dos padrões e na densidade de drenagem, na forma e dissecação do relevo e comprimento de rampas (TIEDMAN et al., 1998).

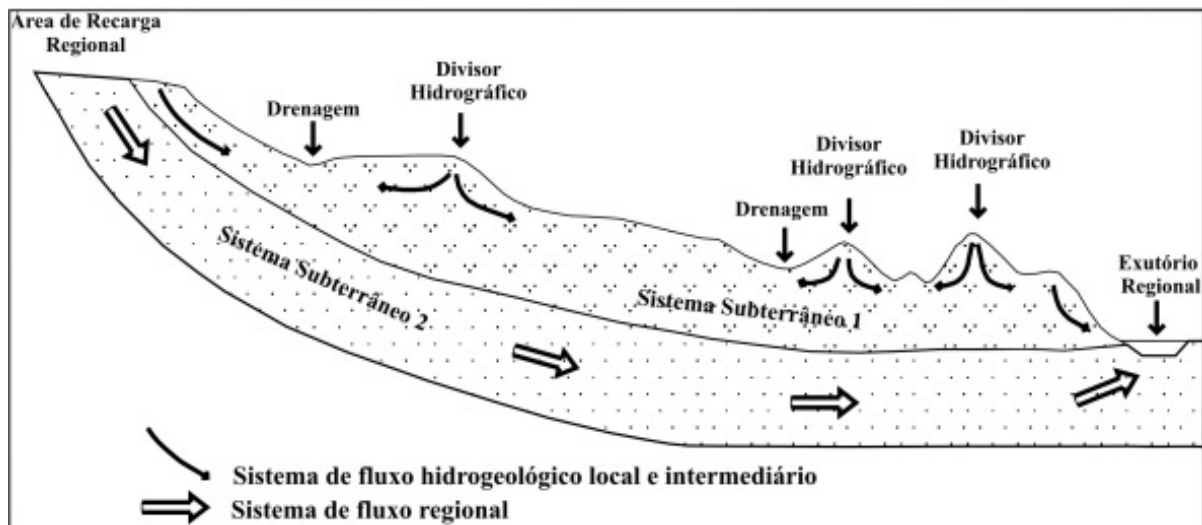


Figura 13: Corte vertical identificando duas bacias hidrogeológicas (sistemas subterrâneos) e seu comportamento de fluxo e recarga local e regional e, identificação de divisores hidrográficos indicando a presença de mais de uma bacia hidrográfica neste sistema, além das drenagens e do exutório regional.

Fonte: ARRAES e CAMPOS (2007).

Para Arraes e Campos (2007) uma bacia hidrogeológica pode ser entendida como o limite entre as zonas de recarga e descarga de determinado aquífero. A área de recarga seria o topo da zona saturada e o exutório a área onde as águas retornam a superfície do terreno. O exutório de uma bacia hidrogeológica,

geralmente, não pode ser definido como um ponto, mas como uma área ou uma linha de descarga, dificultando a delimitação da mesma.

Em síntese, uma bacia hidrográfica pode ser entendida como uma área delimitada por divisores topográficos, drenada por um rio principal e seus afluentes, este originando subdivisões denominadas de sub-bacias hidrográficas. Enquanto as bacias hidrogeológicas podem ser entendidas como uma área de domínio de um complexo geológico que delimita a direção de fluxo da água subterrânea, delimitada a partir da identificação das zonas de recarga e descarga. Neste sentido, pode-se reafirmar a complexidade de estudos referentes ao comportamento das águas de escoamento subterrâneas em relação às águas de escoamento superficial.

3.3 Conceituando águas subterrâneas

O entendimento conceitual de águas subterrâneas proporciona compreender a temática em estudo, sendo que neste trabalho entende-se água subterrânea³ como toda água presente no subsolo em zona saturada.

Na tentativa de definir as águas subterrâneas, Tundisi (2005) explica que é toda a água encontrada no subsolo da superfície terrestre, ocorrendo em duas zonas, uma saturada e outra não-saturada, sendo que por esta, a água infiltrada das precipitações promove a recarga dos aquíferos. Quando explorada, dispõe-se para o abastecimento humano, para a irrigação e indústria. Na utilização deste recurso para atividades humanas, observa-se que, em muitas regiões do mundo, ele assume um papel importantíssimo não apenas com relação ao abastecimento humano, mas também, no desenvolvimento econômico das regiões e áreas onde se encontram.

Já para Tood (1967), a água subterrânea é a água que ocupa todos os vazios de um estrato geológico, ou seja, é a ciência da ocorrência, distribuição e movimento da água abaixo da superfície da Terra. A geohidrologia tem a mesma conotação e a hidrogeologia apenas difere pela sua maior ênfase na geologia.

³ Compreende-se como água subterrânea toda água presente no subsolo em zona saturada (MANOEL FILHO, 2008). Assim, em muitos momentos que foram abordados no texto como nível da água subterrânea entende-se como sinônimo de nível freático.

Para Custódio e Llamas (1983), hidrogeologia ou hidrologia subterrânea é aquela parte da hidrologia que corresponde ao armazenamento, circulação e distribuição das águas terrestres na zona saturada das formações geológicas, levando em conta suas propriedades físicas e químicas, suas interações com o meio físico e biológico e suas reações à ação do homem.

A exploração da água subterrânea está condicionada a fatores quantitativos (condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento), qualitativos (composição rochosa, condições climáticas e renovação das águas) e econômicos (profundidade do aquífero e condições de bombeamento), (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

Além destes três fatores que devem ser levados em conta, há, também, a necessidade de entender-se sua importância no ciclo hidrológico. Para tanto, Albuquerque (2007) é bastante enfático em dizer que as águas subterrâneas estão interligadas às águas superficiais.

“É preciso ter a consciência de que água subterrânea é um segmento do ciclo hidrológico, intimamente relacionadas com as águas fluviais. A exploração de um segmento tem reflexos imediatos na exploração do outro. Sem o conhecimento desta relação quantitativa, a gestão de recursos hídricos ficará seriamente comprometida, resultando em problemas futuros” (ALBUQUERQUE, 2007, p. 37).

Portanto, pode-se justificar, assim, o entendimento de que os atores que constituem o planeta estão em sintonia, interligados através de um complexo e perfeito sistema de inter-relação e auto-organização.

Manoel Filho (2008, p. 53) define água subterrânea como, “aquela que ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas”.

Quando solos ou rochas apresentam transmissividade de água em sua zona saturada, de forma economicamente viável, constituem um aquífero. Também existem o aquícludo (pode armazenar, mas é incapaz de transmitir água) e o aquífero (apresenta transmissividade, mas não é economicamente viável) (FEITOSA et al., 2008).

Originalmente, a palavra aquífero deriva das palavras: *aqui* = água; *fero* = transfere; ou do grego, suporte de água (HEINEN et al., 2001). Assim, entende-se como aquífero toda a formação geológica que armazena água em seus poros (assemelhando-se a uma esponja) ou fraturas e que, por sua vez, podem abranger milhões de quilômetros quadrados até espessuras de poucos metros (REBOUÇAS et al., 2002).

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.

Portanto, entende-se como água subterrânea toda água contida na zona saturada do solo ou em rochas. Já um aquífero é a capacidade de armazenamento de água, tanto em solo como em rocha, onde é possível a exploração em condições economicamente viáveis.

3.3.1 Tipos de aquíferos e distribuição da água no subsolo

As condições físicas de um aquífero para outro podem ser muito diferentes. Os aquíferos livres ou não-confinados 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.

Água subterrânea também pode ocorrer sob condições de confinamento, encontrando-se isolada da atmosfera no ponto de descarga por formações geológicas impermeáveis. Geralmente sujeitas as pressões maiores que a pressão atmosférica.

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.

Na subsuperfície, existem todas as gradações entre água fluindo livremente e água firmemente fixada na estrutura cristalina dos minerais. A água abaixo da superfície do terreno ocorre geralmente em dois tipos de ambiente - uma zona de

água vadosa e uma zona saturada ou freática. Na transição das duas tem-se a franja capilar (Figura 14).

A zona vadosa, compreende a parte acima da zona saturada onde os espaços vazios não são preenchidos por água, porém com ar. Para Oliveira e Souza (2008) “é a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona a água ocorre na forma de películas aderidas aos grãos do solo.” Em termos de retenção de umidade na zona vadosa, os autores ainda descrevem que os solos “finos tendem a ter mais umidade do que os grosseiros, pois há mais superfícies de grãos onde a água pode ficar retida por adesão”.

A franja capilar pode ser entendida como uma região próxima ao nível freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada abaixo. Sua denominação provém da presença de forças capilares que promovem a ascensão da água, partindo do nível freático, através de diminutos canais ou poros (OLIVEIRA e SOUZA, 2008). Na zona saturada, é consenso de que todos os vazios, poros ou fraturas das rochas são totalmente preenchidos por água.

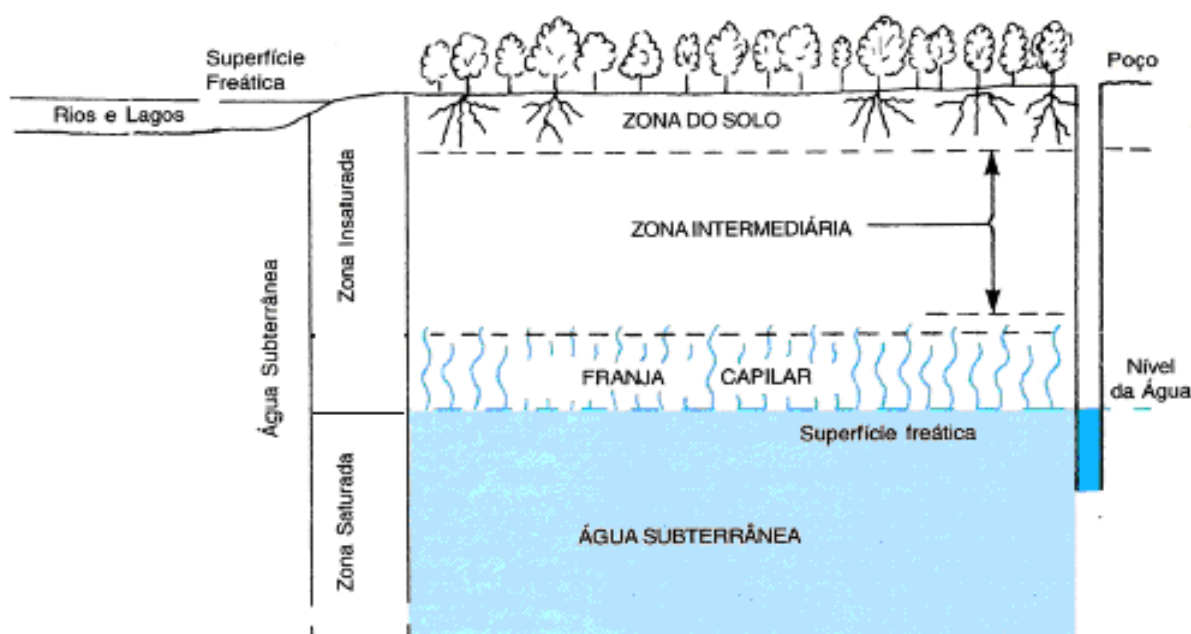


Figura 14: Perfil vertical do subsolo, demonstrando as diferentes camadas existentes em subsuperfície e o comportamento da água subterrânea.

FONTE: HEATH, 1983.

3.3.2 Aquíferos porosos

Obedecendo ao tipo litológico, a hidrogeologia se subdivide em três categorias: Hidrogeologia Clássica, Hidrogeologia de Meios Fissurados e Hidrogeologia dos Meios Cársticos (Figura 15). Considerando as características, esta pesquisa fundamentou-se nas discussões da Hidrogeologia Clássica, que se dedica a investigar os aquíferos constituídos de arenitos ou similares (FEITOSA et al. 2008).

Convém destacar que é nesse tipo litológico que se encontram os maiores e melhores reservatórios de água subterrânea. Assim, tornaram-se os principais alvos de pesquisas, dispondo um grande arsenal de dados analíticos, quantitativos e qualitativos para novos estudos e ampliação do conhecimento junto à complexidade que envolve a dinâmica de ocorrência de um aquífero.

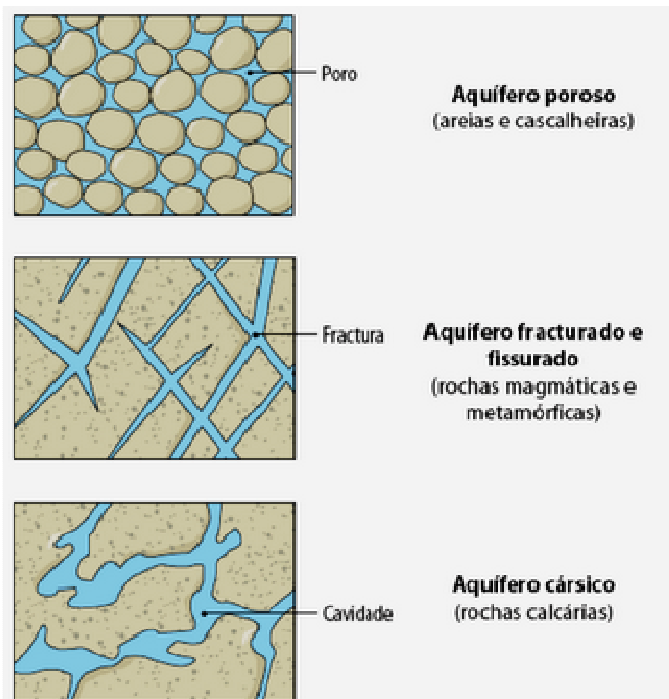


Figura 15: Simplificação do modo de ocorrência das águas subterrâneas nos diferentes tipos de aquíferos e em diferentes tipos de rochas.

Fonte: <http://mundoadescoberta.blogspot.com/2010/06/diario-de-aula-97-caracteristicas-dos.html>

As rochas sedimentares areníticas são rochas porosas formadoras de aquíferos integranulares. As relações entre a porosidade e a permeabilidade são variáveis tanto na lateral, quanto na vertical, por isso, muitos poços apresentam diferentes coeficientes de armazenamento (MACHADO e FREITAS, 2005). Portanto, estas rochas reservatórios apresentam ainda, diferentes texturas, em função de seus paleoambientes deposicionais, formando diferentes estruturas sedimentares primárias que interferem na vulnerabilidade do aquífero à contaminação (FOSTER et al, 1993 e 2006).

Os aquíferos porosos ocorrem em regolitos e em rochas sedimentares clásticas consolidadas, sedimentos inconsolidados e/ou solos arenosos. De um modo geral, os arenitos são ótimos aquíferos e sua homogeneidade permite que a água flua para qualquer direção, em função dos diferenciais de pressão hidrostática. Apresentam-se, então, com uniformidade anisotrópica. A porosidade deste material é uma de suas características oriundas de sua formação. Sua organização granular permite que a rocha funcione como uma esponja, onde os espaços vazios são ocupados por água (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

Convém salientar que há aquíferos porosos como maior ou menor homogeneidade granulométrica. A Bacia Sedimentar do Paraná 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 (PSAG, 2006). A Fm. Botucatu apresenta granulometria selecionada por tamanho ou mais homogênea, devido a sua origem eólica. Já a Fm. Pirambóia apresenta granulometria com maior grau de heterogeneidade devido sua origem eólico-fluvial que contem frações de silte e argila (CPRM, 2008).

Para Silvério da Silva et al. (2004), aquífero poroso-granular é formado por rochas sedimentares clásticas ou terrígenas (arenito, siltito e argilito), como por exemplo, a Formação Botucatu, composta por arenitos finos a médios. A Formação Rosário do Sul, entretanto, é constituída por arenitos com presença de argilas, tornando consideráveis as diferenças entre as condições físicas e químicas dos aquíferos, que atualmente é denominada Fm. Sanga do Cabral.

3.4 Flutuação de nível e estimativa de recarga das águas subterrâneas

O nível da água subterrânea condiz com a linha que determina o lençol freático, ou seja, é o momento em que o solo ou a rocha atinge a máxima saturação de seus poros. Como é de conhecimento, a água, de modo geral, se comporta de forma cíclica e dinâmica. A água subterrânea, como parte deste processo, também se apresenta com estas características. Assim, o nível das águas subterrâneas não é estático. Ele se mantém em constante movimento, mesmo que seja mínimo. Este movimento é denominado de flutuação do nível freático. Assim, este contexto de modo sistêmico corrobora para a compreensão e entendimento da funcionalidade local, no poço, em relação ao sistema, sub-bacia hidrográfica (FEITOSA et al, 2008).

Em relação ao nível da água subterrânea, este pode variar de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de várias variáveis hidrogeológicas (por exemplo, topografia, espessura da zona não saturada e composição da matriz de materiais saturados e insaturados). Em aquíferos livres, a pressão da água na superfície da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

As avaliações do nível do lençol freático são realizadas com aparelhos manuais, elétricos ou ultra-sônicos. O surgimento de medidores automáticos possibilita uma melhor coleta e análise dos dados. Os atuais são chamados medidores automáticos de nível de água ou transdutor de pressão. Seu princípio está na variação de pressão da coluna de água exercida em um sensor. O rebaixamento pode ser medido através de dados de pressão atmosférica e da pressão da coluna de água, onde os dados de pressão atmosférica são obtidos por aparelho barométrico.

Ainda considerando algumas informações importantes, quando se tem pequenas variações da coluna de água, a variação da pressão atmosférica é significativa. Mas, se aquelas variações forem significativas, podem-se considerar apenas os registros feitos pelo aparelho que mede a variação da coluna de água, pois a pressão sobre o sensor é, na realidade, a soma da pressão atmosférica e da coluna de água. Quanto aos registradores *levellogger*, podem ser programados para medições de 0,5 segundos a 99 horas e, comercialmente, encontram-se medidores

para 5, 10, 20, 30 e 100 metros de variação do nível da água. Para sua utilização, é necessário um *notebook* e um programa específico para calibração, regulação e captação dos dados acumulados.

Ronen et. al. (2000 e 2005), estudando o aquífero freático Costeiro de Israel, constituído por rochas sedimentares clásticas, chamam a atenção para uma região de interface entre a zona não saturada (vadosa) e a zona saturada denominada *Saturated and Unsaturated Interface Region/SUIR*. Relataram uma flutuação de cerca de três metros para a SUIR e estimaram que o tempo de residência de sua recarga poderia ser superior a cinco anos.

Destaca-se que a recarga da água subterrânea pode ser entendida pelo processo de infiltração de água no solo de forma natural, como por exemplo, precipitação e rio influente, e de forma artificial, como por exemplo, injeção de água nos aquíferos através de ações humanas (RUSHTON et al., 1988; LERNER et al., 1990; VELÁSQUEZ et al., 1996).

Scanlon, Healy e Cook (2002) realizaram uma revisão das técnicas de avaliação da flutuação do nível da água em meios porosos subterrâneos da Austrália e propuseram uma série de importantes cuidados na seleção do método de estudo.

Os métodos mais utilizados para estimativa de recarga de água subterrânea são: 1) Método do Balanço de Massa de Cloreto; 2) Método da Precipitação Cumulativa; 3) Método da Modelação Subterrânea; 4) Método EARTH (*Extended Model for Aquifer Recharge and Moisture Transport Through Unsaturated Hardrock*); 5) Método do Balanço Hídrico; 6) Método Darcyniano e; 7) Método de Flutuação do Volume Saturado ou Flutuação do Nível D'água (*Water Table Fluctuation – WTF*) (XU e BEEKMAN, 2003; WAHNFRIED e HIRATA, 2005; PAIVA, 2006).

Segundo Wahnfried e Hirata (2005), o método do balanço hídrico é pouco sensível para estimativas mensais e em casos de precipitações pluviométricas pouco intensas distribuídas em um ano, sendo adequado para períodos maiores de um ano. A estimativa darcyniana é sensível às variações e dos três métodos é o único que identifica os fluxos subterrâneos, o fator limitante está na imprecisão quando há diminuição da distância entre os poços.

O método WTF pode ser usado de dois modos: 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 E HIRATA, 2005).

Observa-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. Este método foi desenvolvido para determinar a recarga das águas subterrâneas a partir dos dados de monitoração do nível de água. (MOON et al., 2004).

O método 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 e Cook, 2002).

O método WTF é baseado na premissa de que os aumentos dos níveis das águas subterrâneas em aquíferos livres são devido à água de recarga do lençol freático (HEALY e COOK, 2002, p. 92).

$$R = S_y dh/dt = S_y \Delta h/\Delta t, \quad (1)$$

sendo:

S_y - rendimento específico;

Δh – flutuação nível freático;

Δt – tempo (período monitorado).

Para a determinação do Δh , deve-se somar as diferenças dos pico de ascensão e dos pontos mais baixos da curva extrapolada antecedente à recessão, na hora do pico (HEALY e COOK, 2002).

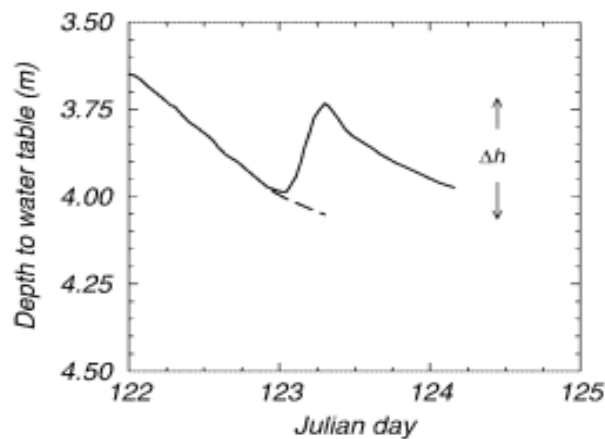


Figura 16: Um aumento do nível de água hipotético, em resposta à precipitação. Δh é igual à diferença entre o pico da elevação e o ponto baixo da curva de recessão extrapolada antecedente (linha tracejada) na hora do pico.

Fonte: HEALY E COOK (2002, p. 92).

Considera-se subjetiva a extrapolação da curva de recessão (Figura 16), pois não há padronização da equação gráfica, apenas tenta-se melhor acomodar a curva entre o processo de defasagem e o início da variação do nível.

Para o método, o rendimento específico (Figura 17) de um aquífero livre é virtualmente igual ao coeficiente de armazenamento, sendo da ordem da macroporosidade do meio. Destaca-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).

O rendimento específico, para Millar (1988), é um parâmetro equivalente à macroporosidade do material, que pode ser determinado pela diferença entre os conteúdos de água no solo na saturação e na capacidade de campo.

Referente à porosidade do solo há diferentes diâmetros. Quando o diâmetro do poro for maior que 0,08 milímetros, diz-se que é um macroporo. Se o poro for menor ou igual a 0,08 milímetros, o poro é denominado microporo. Os macroporos são, geralmente, os poros entre os agregados, enquanto os microporos são poros que estão dentro dos agregados (BRADY e WEILL, 2002).

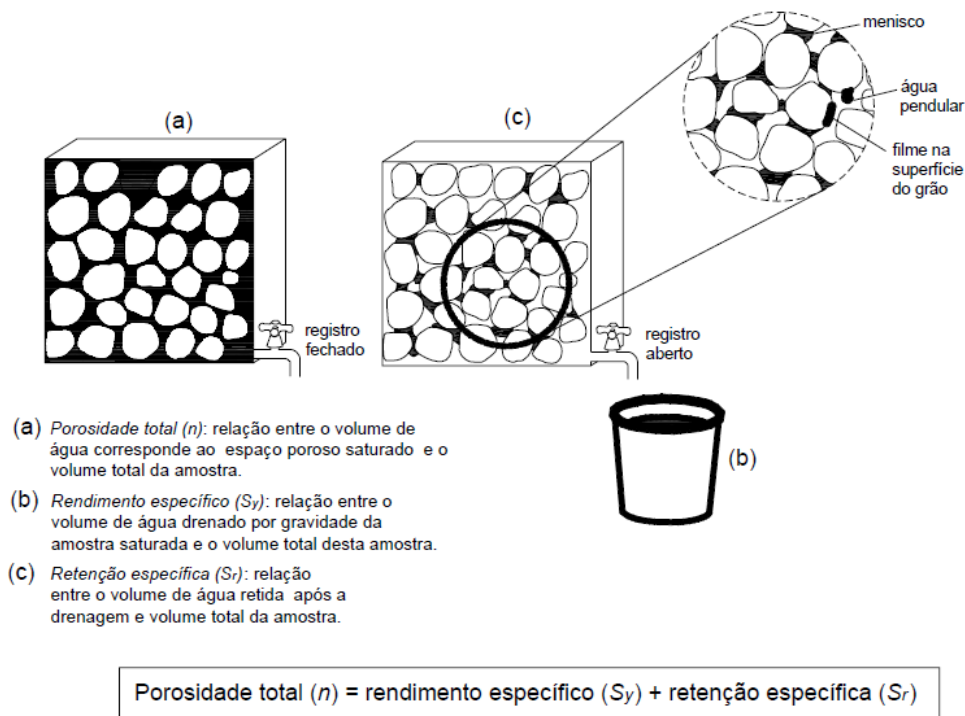


Figura 17: Esquema simplificado e conceitual relativo à porosidade total, rendimento específico e retenção específica de um material sedimentar.

Fonte: Gomes, 2008 modificado de Younger, 2007.

A determinação dos índices de porosidade nesta pesquisa se faz importante, pois indicam a máxima quantidade de água que uma rocha pode conter quando saturada, funcionando como um reservatório. A configuração e o tamanho dos poros do solo interferem na condutividade hidráulica, sendo que os macroporos são responsáveis pela movimentação da água no subsolo (BRADY, 1983). Também interferem no tempo de resposta da precipitação pluviométrica em relação à flutuação do nível freático e por seqüência a capacidade de recarga do aquífero.

Segundo Healy e Cook (2002) a aplicação da equação para cada elevação individual do nível d'água determinará a estimativa de recarga total. Os autores acrescentam que a elevação do nível d'água representa os efeitos combinados de recarga para um evento de precipitação e da precedente condição de descarga, possibilitando, assim, que a recarga possa ser superestimada pelo método WTF.

Considerando que o método WTF entende que a recarga subterrânea se dá pela precipitação pluviométrica, destaca-se que a precipitação pluviométrica ou chuva é o processo pelo qual a água condensada na atmosfera atinge gravitacionalmente a superfície terrestre. A formação da precipitação meteórica

ocorre com a condensação do vapor atmosférico, sendo que o estado de saturação na atmosfera ocorre de duas maneiras: pelo aumento da pressão ou pelo resfriamento do ar úmido até a temperatura de ponto de orvalho. Além de água a precipitação pluviométrica pode conter partículas de poeira, sal marinho, óxido de enxofre e fósforo provenientes das chaminés industriais (Ayoade, 1986).

As características da precipitação que ocorre ao longo do ano é um fator determinante no volume de recarga da água subterrânea, em qualquer tipo de terreno. Quanto ao tipo de precipitação pluviométrica, as mais intensas saturam rapidamente o solo, já as finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrarem. A infiltração da água da precipitação pluviométrica está submetida a duas forças fundamentais: a gravidade e a força de capilaridade. A força de capilaridade é mais forte que a gravitacional. Assim, primeiro a água se distribui uniformemente pela superfície, suprimindo a necessidade da força capilar, para enfim alcançar a zona saturada e abastecer aquíferos (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

O regime hidrológico de uma região é determinado por suas características físicas, geológicas, topográficas e por suas condições climáticas. A precipitação, por ser o principal *input*, é o mais importante fator climático do balanço hidrológico de uma região, bem como sua distribuição e modos de ocorrência (VILLELA e MATTOS, 1975).

Durante vários anos, o nível das águas subterrâneas pode sustentar o nível dos rios, porém, nos períodos de muita precipitação pluviométrica, os rios podem fornecer grandes volumes de água para recarregar os aquíferos, cujas águas, durante períodos de seca, irão sustentar os rios. (DRISCOLL, 1986).

O monitoramento quantitativo se faz importante devido ao acompanhamento da evolução/recuperação dos rebaixamentos de nível de água. Segundo Scanlon, Healy e Cook (2002), existem vários fatores a serem considerados para determinação de um método de quantificação de recarga. As escalas espaço/tempo nas estimativas de recarga são importantes porque requerem estimativas de recarga em diferentes escalas de tempo e espaço, enquanto alguns estudos focalizam as estimativas de recarga do recurso água. Os autores acrescentam que o primeiro estágio de um estudo em uma área que não foi previamente estudada, deve avaliar condições de clima, hidrologia, geomorfologia e geologia. Dados estes necessários para a construção do modelo conceitual de recarga de um determinado sistema.

3.5 Sustentabilidade e gestão das águas subterrâneas

O termo sustentabilidade, é originário do Latim *sus-tenere*, que significa sustentar ou manter. Para a 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).

A presença de águas subterrâneas, embora comum, não se encontra uniformemente distribuída e em igual profundidade da superfície terrestre. De igual modo varia a composição química, que pode ser mais ou menos mineralizada. Esta variação de lugar, profundidade e composição, indica que deve haver controle inteligente de uso pensado em termos de sustentabilidade destes recursos, como bem lembra Rebouças (2004).

Dando continuidade ao seu pensamento, Rebouças (2004) descreve o que entende por sustentabilidade: como uma condição de longo-tempo de uso racional dos recursos naturais, em geral, e da água, em especial. Da mesma forma, o autor ainda determina sua opinião a respeito das diferentes formas de presença da água subterrânea, colocando que: é um recurso renovável por meio do ciclo hidrológico, apresenta uma grande variabilidade, tanto no espaço como no tempo.

Conway (1997) diz que a sustentabilidade só ocorre se a taxa de extração da água ficar abaixo da taxa de recarga de onde a água foi retirada. Em outra oportunidade em sua obra cita a frase de Ajit Banarjee: “A tecnologia só é boa se for sustentável e só é sustentável se incluir pessoas, porque as pessoas são partes do meio ambiente.” A gestão participativa foi bem sucedida porque se baseou na crença de que as pessoas são importantes e devem ser envolvidas nas soluções dos problemas.

A sustentabilidade é apenas um dos indicadores de um ecossistema, sendo eles: “produtividade (rendimento), estabilidade (constância de produtividade em face de flutuação), sustentabilidade (capacidade de o sistema manter a produtividade) e equitatividade (igualdade de distribuição aos beneficiários)” (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.

Defende-se que, a sustentabilidade é uma das medidas 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.

Pesquisadores, como Veiga (2006), propõem três objetivos que um sistema sustentável deve atender, sendo eles: (1) preservação do potencial da natureza para a produção de recursos renováveis; (2) limitações do uso de recursos não renováveis; (3) respeito e realce para a capacidade de autodepuração dos ecossistemas naturais.

Para Tuinhof et al. (2002), a sustentabilidade é a preservação do potencial atendendo a sua própria oferta e não a demanda que se tem destes recursos. Para estes autores, este controle é entendido como um círculo virtuoso e ele só ocorre se houver a participação dos usuários, nas decisões tomadas quanto à gestão da demanda e da oferta do recurso.

Os pesquisadores consideram que se deve manter um equilíbrio razoável entre custo e benefício, caso contrário entra em questão a suscetibilidade de degradação do sistema hidrogeológico. Assim, como há interesses dos usuários da água, devem-se incluir os ecossistemas e a quem depende do fluxo base do reservatório. Nas palavras de Tuinhof et al. (2002):

La condición de una extracción excesiva y no sustentable, que ocurre con demasiada frecuencia. En este caso, la tasa total de extracción (y, por lo general, el número de pozos de producción) con el tiempo caerá marcadamente como resultado de la degradación casi irreversible del sistema de acuíferos en sí (TUINHOF et al., 2002).

Portanto, para os pesquisadores, deve-se priorizar o gerenciamento do uso da água, pois consideram o sistema de águas subterrâneas não apenas como um reservatório mineral, mas como parte do ecossistema.

Kalf e Woolley (2005) questionam a sustentabilidade em regiões áridas, por exemplo, na bacia do rio Murray no sul da Austrália e a região do Texas nos EUA.

No caso da Austrália, a recarga anual é inferior a 1 mm/ano e nos EUA a recarga varia de 2,5 a 5% do volume bombeado. Assim, para os recursos destas regiões, citadas pelos autores, como em outras regiões de baixíssima pluviometria e frente à recarga das reservas de águas subterrâneas o uso sustentável do recurso não é viável. Deste modo, nestas regiões, torna-se inviável a aplicação de uma gestão de acordo com o círculo virtuoso, proposto por Tuinhof et al. (2002). Neste caso, se poderá recorrer a uma gestão de acordo com Conway (2003), que remete um uso equilibrado e voltado para o coletivo.

Há pesquisadores que apresentam outro entendimento sobre a dimensão ecológica de uso sustentável e gestão das águas subterrâneas. É o caso de Kazmann, (1988, apud, KALF e WOOLLEY, 2005) que entende os depósitos de águas subterrâneas como sendo recursos não renováveis, nas condições de regiões de baixíssima pluviometria, citando como exemplo similar os reservatórios de petróleo e gás. Nesta linha de entendimento deve-se priorizar o conhecimento do período que ainda poderá ser explorado o recurso, para ser tomada providência pelos indivíduos que serão afetados no futuro, alertando, igualmente, que as águas subterrâneas devem ser utilizadas de forma eficiente e não de forma irresponsável.

Os autores, Kalf e Woolley (2005), preferem priorizar estudos referentes ao tempo de duração de um reservatório subterrâneo, ao invés de pensar em como usar de forma sustentável as águas subterrâneas. Obviamente, esta preferência recai em situações vividas pelos pesquisadores, pois se tratam de regiões áridas e/ou semi-áridas.

O desenvolvimento dos recursos hídricos não pode ser desassociado da conservação ambiental e de sua matriz ecológica, pois nela se encontra, além do homem, a manutenção da vida animal e vegetal da superfície do planeta Terra. Uma vez que todas as formas de vida dependem da existência, equilíbrio e inter-relações do meio.

Assim, inquietações alimentam posicionamentos, quanto a reflexões sobre os recursos hídricos subterrâneos. Considerando sua gestão sustentável, não é e não poderá ser racional no uso de seus elementos devido à heterogeneidade dos fluxos de matéria e energia em subsuperfície englobando a litosfera, hidrosfera, atmosfera, biosfera e na pedosfera.

Diante desta impossibilidade em se alcançar a racionalidade total em todos e para todos os recursos, surge outra questão, que se refere à reversibilidade e ao

controle no uso excessivo dos recursos hídricos. Podendo este ser alcançado com o cumprimento das leis, de ações de educação ambiental, semeando a ideia de que os recursos, mesmo que renováveis anualmente, são finitos.

Quanto à sustentabilidade das águas subterrâneas, ela só será possível em regiões onde a recarga é significativa. Em se tratando de regiões áridas e semi-áridas, deve-se priorizar a gestão quanto ao uso deste recurso, pois tratá-la no âmbito da sustentabilidade não será viável. Considera-se que a recarga das águas subterrâneas é um fator condicionante para determinar valores de uso da água seguindo os preceitos da sustentabilidade.

Retomando o pensamento de Rebouças, entende-se que para ser sustentável é necessário desenvolver o gerenciamento destes recursos. Deste modo apoiando-se em Tucci (1993):

A gestão é uma atividade analítica e criativa voltada para a formulação de princípios e diretrizes, ao preparo de documentos orientadores e normativos, à estruturação de sistemas gerenciais e à tomada de decisões que tem por objetivo final promover o inventário, uso, controle e proteção dos recursos hídricos (TUCCI, 1993).

Para que realmente ocorra a gestão dos recursos naturais é fundamental conhecer o que se quer gerenciar. Na Lei Nº. 9.984 de 2000, está contido uma frase que diz: “não se gerencia o que não se conhece”. Este é mais um argumento da necessidade de estudos que visam conhecer a dinâmica das águas subterrâneas, para posteriormente definir seu plano de gestão.

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos obedece a uma série de normas, contidas na Lei Nº. 9.433, da República Federativa do Brasil, de 1997. Nela se considera a bacia hidrográfica como unidade de gestão. Também reconhece que a captação de águas subterrâneas, por ser obra hidrogeológica, 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.

Os itens mínimos para o planejamento de uma bacia estão contemplados na Resolução N.º 17 de 29 de maio de 2001. A Resolução N.º 22, de 24 de maio de 2002, determina que o Plano de Recursos Hídricos deva considerar os múltiplos usos das águas subterrâneas; as peculiaridades; os aspectos quali-quantitativos 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.

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

Assim, ações potencialmente impactantes, bem como as ações de proteção e mitigação das águas subterrâneas, devem ser diagnosticadas e previstas nos Planos de Recursos Hídricos, 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.

A gestão sistêmica se firma na Resolução N.º 98 de 26 de março de 2009, através de princípios, fundamentos e diretrizes para criar, implementar e manter os programas de educação ambiental, de desenvolvimento de capacidades, de mobilização social e de comunicação de informações em GIRH, recomendadas a todos os entes do SINGREH.

No Brasil, o cumprimento das leis e resoluções referidas, se fiscalizadas e obedecidas, em médio e longo prazo, poderá ter não só um retorno maior em termos econômicos, como segurança de disponibilidade dos recursos naturais. No momento o grande desafio nacional reside na aplicação da legislação vigente, pois se deve ter em mente que o espaço geográfico brasileiro é um dos maiores portadores, senão o maior, de recursos hídricos subterrâneos representados por diversos domínios hidrogeológicos.

Entende-se que o estudo e o gerenciamento das águas subterrâneas, são muito mais trabalhosos e compreendem um período de tempo muito maior para suas investigações. Isto é claro quando nos reportamos às palavras de Feitosa et

al. (2008, p.180), onde ele relata que “devido à grande variação no comportamento dos aquíferos, os estudos são muito mais lentos, trabalhosos e caros, de que quando reportamos aos estudos de águas superficiais.” Esta heterogeneidade dos aquíferos se dá pela variação das formações rochosas e, principalmente, por não ter-se uma visualização direta de sua área de abrangência. Feitosa resume esta dificuldade ao “alto grau de complexidade de um Sistema de Reservatório Subterrâneo”.

Sua exploração sem correto gerenciamento torna-as vulneráveis a situações como: super-exploração, poluição de esgotos *in natura*, agroquímicos, chorumes. A necessidade de disponibilidade de água para abastecimento humano, produção de alimentos e industrial, deve ser pensada seriamente, uma vez que os municípios estão incentivando o crescimento e o desenvolvimento socioeconômico, provocando aumento de programas de fiscalização e cuidados quanto à preservação, manutenção ou conservação dos recursos hídricos. Assim, estas questões tornam-se desafiadoras quanto a estudos que visam mudanças e preservação deste recurso natural em diferentes escalas.

Estudos em escala regional estão sendo realizados no projeto ASUB/UFMG/UFAL/UFSM que têm como objetivo a integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas, tendo como objeto empírico a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. ASUB/UFMG/UFAL/UFSM (2010).

Em continuidade, as reflexões desenvolvidas não apenas firmaram os entendimentos e esclareceram as definições que possibilitaram a determinação metodológica e a abordagem do trabalho.

4 METODOLOGIA

Em continuidade às reflexões desenvolvidas, será apresentada a metodologia norteadora da pesquisa, juntamente com os procedimentos técnicos utilizados para alcançar os resultados propostos pelos objetivos. Deve-se considerar que a metodologia firma entendimentos, esclarece definições, possibilita análises do referencial empírico e identificação de suas peculiaridades.

A partir da determinação da categoria de análise, partiu-se para a determinação da especificidade que o estudo abordaria. No que se refere à hidrogeologia, pode ser dividida em dois grupos: Hidrogeologia Quantitativa e Hidrogeologia Qualitativa (FEITOSA et al. 2008). Entende-se que as especificidades destacadas pelos autores podem ser compreendidas como metodologias de pesquisa adotadas nos estudos hidrogeológicos.

Deste modo, a metodologia norteadora do trabalho é a Metodologia Quantitativa, que, na geologia, é entendida como Hidrogeologia Quantitativa. Isto se justifica pelo objetivo principal, que é determinar uma estimativa da recarga anual da água subterrânea a partir dos dados obtidos dos poços de monitoramento. Por fim, definiram-se os métodos básicos que afetariam diretamente a pesquisa, os métodos auxiliares e as abordagens periféricas que contribuiriam para alcançar os resultados da investigação.

Na hidrogeologia quantitativa, as principais aplicações, quanto à caracterização, estão relacionadas aos inventários e nivelamento dos pontos d'água, implementação e operação das redes de monitoramento, potenciometria, balanço hídrico, construção de poços de pesquisa e realização de testes de bombeamento e avaliação de parâmetros hidrodinâmicos (FEITOSA et al. 2008).

A aplicação da metodologia quantitativa, em estudos de bacia hidrográfica, contribui para o planejamento e gestão da mesma. Para tanto é preciso expressar, quantitativamente, todas as características de forma, de processos e de suas inter-relações. Porém, nenhum desses índices, quando analisados isoladamente, deve ser entendido como simplificador da complexidade e da dinâmica de uma bacia hidrográfica, a qual tem magnitude temporal (ARRAES e CAMPOS, 2007).

Considerando o pensamento de Nentwing Silva (1978), a correta utilização dos métodos quantitativos, no processo científico, evitará a depreciação quanto à superestimação de um fenômeno. Isto exigirá o desenvolvimento de uma lógica bem mais crítica, direcionada ao pensamento rigoroso e preciso, evitando as generalizações baseadas em evidências insuficientemente analisadas.

A utilização da quantificação contribui para ordenar informações e torná-las manipuláveis e compreensíveis, sendo um exemplo, a aplicação de técnicas estatísticas. Destaca-se a utilização de métodos quantitativos na linguagem científica, interdisciplinar e universal quanto à precisão de um dado, além de oferecer eficientes modelos analíticos, preditivos e de planejamento (NENTWING SILVA, 1978).

Utilizou-se, também a abordagem sistêmica, pois esta contribuiu para o entendimento organizacional do objeto de estudo. Destaca-se que os primeiros estudos de bacias hidrográficas, sob esta concepção metodológica, ocorreram em meados de 1940, por Robert E. Horton. Seguido por publicações de pesquisadores como Freitas em 1952, Strahler em 1952 e 1957, Schumm em 1956, Tolentino et al. em 1968 e Christofolletti em 1969, 1970, 1977, 1978 e 1980, entre outros, que propuseram novos parâmetros de análise, introduzindo a abordagem sistêmica como meio integrador dos parâmetros, possibilitando interações entre os processos e entendendo o comportamento das bacias hidrográficas (TONELLO et al., 2006).

Para a compreensão das relações entre as variáveis analisadas, tornou-se necessário a recorrência a análise sistêmica como abordagem adotada para a compreensão dos objetos de estudo. Sua aplicação, juntamente com a quantificação, favoreceu o entendimento do funcionamento do sistema e o grau de complexidade da relação entre as variáveis. Assim, foi possível medir o comportamento de uma variável, como também, entender seu comportamento diante das outras variáveis, integrantes de um sistema.

Segundo Mazouyer (1992-1993), para a realização de estudos sistêmicos é necessário, analisar e explicar o objeto em estudo pela sua dinâmica de evolução no tempo e das relações que mantêm com outros sistemas nos seus diferentes estágios de evolução. E, para entender esta evolução, é necessário classificá-la em diferentes etapas de investigação, como combinação de subsistemas hierarquizados e interdependentes. Esta combinação de funções assegura a circulação interna de todos os fluxos (de matéria, de energia, de valor).

Para a melhor compreensão da ocorrência de fluxos em sistemas se fazem alguns destaques. Os fluxos internos em sistema são importantes, pois identificam os fenômenos que ocorrem neste sistema: os fluxos de entrada (*input*) e saída (*output*) de um sistema. A entrada é constituída por aquilo que o sistema recebe, neste trabalho são a precipitação pluviométrica, e a saída as transformações que as entradas sofreram no interior do sistema.

De forma mais dinâmica, Christofolletti (1978, p.1) apresenta a estruturação da teoria dos sistemas como modo de “melhor focalizar as pesquisas e delinear com maior exatidão o setor de estudo da ciência, além de propiciar oportunidade para reconsiderações críticas de muito dos seus conceitos”.

Ainda segundo Christofolletti (1978), a teoria geral dos sistemas foi inicialmente desenvolvida por Bertalanffy, a partir de 1932, para estudos analíticos da Biologia e da Física. A utilização da análise sistêmica para estudos de bacias hidrográficas partiu de pesquisas geomorfológicas em 1964, por Leopold, Wolman e Miller, e, em 1969, por Chorley, quanto à análise integrada dos elementos morfométricos e topológicos das redes fluviais. Destaca-se que esta forma de análise mantém-se até a atualidade, contribuindo para a compreensão de elementos de forma integrada.

Estes elementos são entendidos por Capra (1996), como partes. Estas partes exercem funções responsáveis por suas interconexões e seriam como teias interligadas de modo inseparável, ou seja, o sistema é auto-organizador (CAPRA, 1996). Entende-se, também, que estes elementos ou partes mesmas conectadas têm comportamentos específicos o que resultaria no conhecimento particularizado da funcionalidade de cada variável e do sistema em análise (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Assim, ao analisar elementos de um sistema, procura-se entender de que modo se dá a relação de um elemento com os demais e com o sistema como um todo, que, em síntese, é a compreensão funcional mantenedora do sistema. Este pensamento está vinculado à metodologia quantitativa, onde se trabalha o espaço como sistema simplificado e organizado, ou seja, um modelo, que pode ser representado por meio de padrões matemáticos, estatísticos e geométricos possibilitando a modelagem preditiva (CHRISTOFOLETTI, 1976; MORAES, 1987).

Nesse trabalho aplicou-se a metodologia quantitativa para determinar os resultados, optou-se pela abordagem sistêmica, na compreensão das relações

entre os elementos estudados e por identificar o grau de complexidade das relações em que estes se encontram. Assim, os dados obtidos pelo monitoramento dos poços e da aplicação de métodos básicos e auxiliares, foram necessários para aplicação do WTF, correta compreensão e interpretação dos resultados.

O emprego desses procedimentos permitiu melhor determinação e atualização do banco de dados que armazena as informações processadas. Estas informações são apresentadas em forma de tabelas, gráficos e mapas, auxiliando nas tomadas de decisões quanto à gestão dos recursos hídricos subterrâneos em áreas de uso e ocupação diferenciados.

4.1 Procedimentos técnicos

Para se obter resultados na pesquisa é necessário a aplicação de técnicas e, para tanto, identificar algumas características do objeto empírico como o tratamento dos dados e a interpretação correta dos resultados obtidos, tornam-se indispensáveis. Estas se referem à coleta de informações, organização e classificação de variáveis como: geologia, solos e hidrogeologia, juntamente com os dados coletados pelos transdutores de pressão.

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 Rosário do Sul, código 3054007. A obtenção dos dados foi realizada em intervalos de 60 minutos. Para chegar ao acúmulo de precipitação pluviométrica diária realizou-se a soma dos resultados obtidos a cada 60 minutos.

A pesquisa foi desenvolvida a campo e em laboratório. As atividades de campo se estruturaram em coletas de amostras de solo e/ou rocha, deformadas e não deformadas. Quinzenalmente foram determinadas a profundidade do nível da água, com o Freatímetro Jaciri sonoro, e verificação do posicionamento global por GPS.

Nas coletas de amostras de solo com estrutura deformadas, fez-se inicialmente, uma limpeza no local da coleta, retirando-se a vegetação superficial, raízes e qualquer outra matéria estranha presente no solo, para posteriormente iniciar o processo de coleta do solo. As amostras na subsuperfície, utilizaram-se ferramentas simples como, pá, enxada e picareta. Para maiores profundidades utilizou-se trado cavadeira e trado helicoidal.

A coleta de amostras não deformadas requer maior cuidado, foram retiradas em anéis metálicos com altura de 2 cm e área de 18,08 cm². O processo constitui em introduzir o anel no solo para a retirada da amostra. O excesso de solo foi retirado cuidadosamente para não perder estrutura da amostra.

Após a coleta das amostras, deformadas e não deformadas, foram acondicionadas em sacos de plástico e etiquetadas com informações necessárias para posterior identificação.

As atividades em laboratório ocorreram no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM, onde foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica e de granulometria e no Laboratório de Física do Solo, ensaio de porosidade total.

Utilizou-se, também, o software *ArcGIS* 9.3 e os aplicativos *ArcScene* e *ArcMap*, imagens de satélite retiradas do *software Google Earth* e de cartas topográficas do Exército Brasileiro na escala de 1:50.000, impressas pela primeira vez em 1979. As fotografias aéreas foram obtidas em 1975. Foi utilizado o *Datum* horizontal Córrego Alegre e o vertical o Posto de Ibituba/SC.

A espacialização em cartograma da Superfície Potenciométrica – SP, utilizou-se o Programa SURFER 8.0. Adotou-se o interpolador krigagem. A SP foi obtida pela relação entre cota altimétrica na “boca do poço” e o nível da água.

Para a realização do teste do método WTF, que estima a recarga da água subterrânea, foi necessária a realização prévia de outros métodos, estes, por sua vez, subdividido em métodos básicos (instalação e monitoramento da flutuação do nível da água subterrânea e porosidade total) e auxiliares (análise granulométrica e condutividade hidráulica). Onde, os métodos auxiliares são aqueles responsáveis pelo entendimento sistêmico e os métodos básicos responsáveis pelas variáveis necessárias na determinação da recarga pelo WTF.

4.1.1 Métodos básicos

4.1.1.1 Instalação e Monitoramento por medidor automático da flutuação do nível da água subterrânea

No primeiro semestre de 2009, foram perfurados os poços de monitoramento, seguindo as Normas técnicas da ABNT, NBRs 12.212/2006 e 12.244/2006, utilizando-se tubos de plástico de diâmetro 40 mm, protegidos com laje sanitária em concreto, numerados e pintados com tinta de cor amarela a base de epóxi, para facilitar a visualização e evitar acidentes. Todos foram protegidos com tubo em concreto com diâmetro de 0,40m e ranhurados transversalmente, tampados. Lateralmente instalou-se um cano plástico PVC ranhurado para facilitar as trocas de pressão interna e o ar atmosférico.

O monitoramento do nível freático foi feito por transdutor de pressão (medidor automático *barologger* e *levelogger* da Solinst®) (Figura 18 a e b), que monitoram a Condutividade Elétrica, o nível e a temperatura da água. Estes sensores são de fácil programação, utilização e aquisição dos dados.



Figura 18: Ilustração dos medidores automáticos, a) *barologger* e, b) *levelogger*, que estão instalados nos poços realizando as medições nos tempos programados.
Fonte: <http://www.agsolve.com.br>

Os transdutores de pressão registram dados do nível de água em intervalos de tempo pré-determinado, os quais são transferidos por cabo óptico e *software*

específico a um *notebook* (Figura 19). O nível do lençol freático é determinado pela subtração dos dados de pressão do *levellogger* e do *barologger* e, o produto deve ser subtraído pelo comprimento do cabo que fica preso o *levellogger*.



Figura 19: Figura ilustrativa da transmissão dos dados coletados automaticamente dos medidores automáticos para computador do tipo *notebook*.

Fonte: Fonte:<http://www.agsolve.com.br>

O período em análise nesta pesquisa foi de setecentos e sessenta e seis (766) dias na sub-bacia de campo, iniciando no dia 26/05/2009 até o 30/06/2011 e na sub-bacia florestada foram setecentos e vinte e um (721) dias, iniciando em 10/07/2009 até 30/06/2011. Neste período, realizaram-se campanhas de campo quinzenalmente, para coleta das informações armazenadas e verificação das condições dos medidores automáticos.

Para verificação e comparação de possíveis erros dos medidores automáticos foram realizadas duas campanhas de campo, para verificação do nível da água obtido com Freatímetro Jaciri sonoro (Figura 20). Estas ocorreram no dia 23 de setembro de 2010 (inverno) e no dia 13 de janeiro de 2011 (verão).



Figura 20: Equipamento que possibilita a obtenção de dados imediatos do nível da água, condutividade elétrica e temperatura da água nas profundidades desejadas.
Fonte: <http://www.agsolve.com.br>

4.1.1.2 Determinação da porosidade total

Em decorrência de alguns autores, como Healy e Cook (2002) e Maziero (2005), retratam que pode ser considerado rendimento específico os valores obtidos de macroporosidade. O rendimento específico é necessário para aplicação do método WTF.

A determinação da porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, foram realizados no Laboratório de Física do Solo – CCR/UFSM, seguindo metodologia descrita por Reinert e Reichert (2006), a coluna de areia (Figura 21).

As amostras de solo com estrutura não deformada, foram saturadas durante vinte e quatro horas, determinou-se a massa saturada e posteriormente levadas à coluna de areia, aplicando uma tensão de 6 kPa 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.

$$U_g = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2)$$

sendo:

M_u – a massa do solo úmido;

M_s – a massa do solo seco a 105°C e;

U_g – o conteúdo gravimétrico de água na amostra.



Figura 21: 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 média 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 e Cook (2002) e Gomes (2008). Considera-se o rendimento específico como um parâmetro equivalente a macroporosidade.

4.1.2 Métodos auxiliares

4.1.2.1 *Análise granulométrica*

A determinação da granulometria segue a rotina padrão do Laboratório de Petrografia e Sedimentologia. O solo foi colocado em bandejas abertas para secagem ao ar livre (Figura 22). Após a secagem do material, o mesmo foi dividido em quatro porções iguais, por meio de equipamento manual que realiza a divisão do material, em quantidades manuseáveis, sem interferência do pesquisador (conhecido como quarteador ou repartidor de amostras). Destas quatro amostras, duas delas foram usadas na determinação do ensaio de granulometria, as outras duas são armazenadas para possíveis repetições do ensaio.



Figura 22: Ilustra as três amostras deformadas coletadas nas áreas de estudo e ao fundo o recipiente para destorroamento do material (solo e/ou rocha) com dois destorroadores e o dessecador.

Separadas as porções, o solo foi é destorroado e realizado o ensaio de granulometria. A determinação das frações areia foi por peneiramento, às peneiras apresentam-se em gradação de tamanho das suas malhas e com um sistema de encaixe, no formato de uma coluna, onde, ao movimentá-las, os grãos são retidos

conforme seu tamanho. Normalmente é utilizado uma série de malhas de variação de 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm.

Com o tamanho das partículas separadas determinou-se a massa seca ao ar em balança de precisão. Ao final do ensaio de granulometria, os valores foram convertidos em porcentagem e enquadrados no triangulo de classificação da textura dos solos, com a definição da curva granulométrica.

O material passante nas peneiras, silte e argila, foram avaliadas por sedimentação. Seguindo o método da pipeta, o solo foi colocado em provetas com água juntamente com um dispersante (4,79% do peso total) para realizar a dispersão das partículas de argila. No início do ensaio a solução do solo + dispersante é agitada na proveta, o método segue a velocidade de sedimentação, necessitando que a pipetagem ocorra em tempos e profundidades diferentes, segundo a Lei de Stokes.

As alíquotas coletadas foram colocadas em cápsulas, onde secados em estufa a 105°C até massa constante. Retiradas da estufa foram para o dessecador e determinada a massa em balança de precisão. Este ensaio é determinado por percentuais, onde, nestas condições, um solo pode ter de 0 a 100% de frações de areia, silte e argila.

Destaca-se que pesquisadores como Vieira (1975); Azevedo e Dalmolin (2006) desconsideram a presença de matéria orgânica e outras partículas maiores do que 2 mm.

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

4.1.2.2 Ensaio de condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica saturada é uma técnica que tem por objetivo identificar o movimento da água no solo e sua importância em um sistema de drenagem. Sua determinação pode ser pelo método de campo ou de laboratório.

Neste trabalho optou-se pelo método de laboratório – permeâmetro de carga constante (DANIEL, 1994), que assim deteve-se na sua explicação.

Na obtenção das amostras, seguiram-se as normas da ABNT/NBR 9813/87 - Determinação da densidade do solo com o emprego do cilindro de *UHLAND*. No método de laboratório foram utilizadas amostras de solo não deformadas, garantindo a estrutura natural do solo (Figura 24). Os procedimentos iniciaram com a obtenção das amostras com um cilindro cortante, com massa e dimensões conhecidas, sendo cravado no solo (Figura 23 a e b). Posteriormente, as amostras foram envolvidas em sacos plásticos e depositadas em recipiente para encaminhamento ao laboratório.



Figura 23 a e b: Ilustra diferentes tamanhos de cilindros que podem ser utilizados para coleta de amostras indeformadas de solo.

Fonte: http://www.ufsm.br/engcivil/Material_Didatico/TRP1003_mecanica_dos_solos/unidade_2.pdf



Figura 24: Amostras do material coletado em campo, onde foram conservadas suas características estruturais (amostras não deformadas), necessárias para os ensaios de condutividade hidráulica e de porosidade total.

O coeficiente de condutividade hidráulica foi calculado pela equação 3:

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A} = \frac{V \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (3)$$

sendo:

k = permeabilidade [cm/s]; V = volume [cm³]; L = comprimento [cm];

h = diferença de nível [cm]; A = área da amostra [cm²]; t = tempo [s]

Em laboratório as amostras necessitaram de cuidadoso processo de retirada do excesso de material, para a preservação da amostra dentro do anel, envolveu-se em um dos lados um tecido fixado com um elástico. Posteriormente, transferiram-se as amostras a um recipiente com água, em um período de 24 (vinte e quatro) horas, para saturação das mesmas.

Nesta análise, a amostra é submetida a uma carga hidráulica constante durante o ensaio (permeâmetro de nível constante) pelo fato do laboratório não dispor de um permeâmetro, realizou-se algumas adaptações (Figura 25). A água percolada foi coletada em béqueres e medida em proveta graduada de 100 ml.



Figura 25: Imagem do permeâmetro adaptado, com estruturas de madeira e garrafas de vidro como reservatórios de água, notar a presença das amostras indeformadas e de béquer como recipiente coletor da água percolada.

A cada intervalo de 30 minutos, determinou-se a quantidade de água percolada no material. O tempo do ensaio teve duração de 5 horas e 30 minutos. Os valores obtidos nos intervalos de tempo e a média percolada de cada amostra podem ser verificados no Apêndice 1.

O coeficiente de permeabilidade é determinado pelo volume de água que percola a amostra por unidade de tempo. A quantidade de água é determinada com proveta graduada, determinando-se a vazão (Q). Este permeâmetro é muito utilizado para solos de granulação grossa (solos arenosos).

De posse destas informações houve o prosseguimento dos estudos direcionados à análise e discussão dos resultados obtidos neste trabalho.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisadas as informações resultantes obtidas a partir da aplicação das técnicas apresentadas na metodologia, bem como discussão destes dados quanto aos temas abordados nos capítulos anteriores.

O monitoramento dos poços e trabalhos de campo permitiu aproximação da realidade das águas subterrâneas das áreas em estudo. Caracterizada por serem duas áreas com uso do solo distintos, os principais resultados estão relacionados os dados de recarga através da aplicação do método WTF, além de análises físicas de solo (granulometria e porosidade) e análise da flutuação do nível do lençol freático comparado aos eventos de precipitação.

Quanto às discussões sobre esta temática no âmbito científico se reconhece que a aplicação do método WTF no Brasil se intensificou a partir da década de 2000. Sendo estes norteadores da aplicação deste método nas sub-bacias hidrográficas representativas. Destaca-se que estudos sobre a recarga das águas subterrâneas são importantíssimas para os processos de gestão e uso deste recurso, seguindo os preceitos da sustentabilidade.

Porém para determinação da recarga e realização das análises de modo sistemático é necessário à aplicação de algumas técnicas laboratoriais que possibilitam melhor compreensão da pesquisa. Deste modo, optou-se em realizar a primeira análise e apresentação dos resultados de forma individualizados e posteriormente discussão com todos os componentes formadores dos resultados desta pesquisa.

5.1 Granulometria

A granulometria do solo tem importância relevante para a compreensão dos índices de recarga das águas subterrâneas. Para tanto, fez-se o ensaio granulométrico de amostras superficiais de solo das duas áreas em estudo, sendo que na sub-bacia de campo, foi coletado amostras do substrato rochoso aflorante.

As amostras deformadas foram coletadas na superfície, retirando os excessos de matéria orgânica.

O ensaio determinou que o percentual das frações areia, silte e argila que definem a textura do solo e, no caso da sub-bacia de campo, também da rocha, presente próximo aos poços de monitoramento, os dados estão contidos na Tabela 2. 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.

Destaca-se que a amostra de solo da sub-bacia florestada e a amostra de rocha da sub-bacia de campo apresentam valores na fração areia bastante próximos, resultando na mesma classificação textural, arenoso-franco. Já a amostra de solo da sub-bacia de campo apresenta concentração mais elevada de fração fina (argila e silte) em relação às demais, resultando na classificação textural franco-arenosa. Estes materiais originam-se da rocha matriz que constitui os arenitos da Formação Pirambóia CPRM (2008).

Tabela 2: Escala granulométrica com seus respectivos diâmetros e determinação da classificação textural das amostras.

| Fração | Diâmetro (mm) | (% amostras) | | |
|-------------------------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| | | Solo (campo) | Rocha (campo) | Solo (floresta) |
| Areia grossa | 0,6 a 2,0 | 1,467 | 0,006 | 0,117 |
| Areia média | 0,2 a 0,6 | 17,763 | 7,866 | 14,022 |
| Areia fina | 0,06 a 0,2 | 61,028 | 79,710 | 72,893 |
| Silte | 0,002 a 0,06 | 7,571 | 3,138 | 6,263 |
| Argila | < 0,002 | 12,169 | 9,280 | 6,704 |
| Classificação textural | | Franco-arenoso | Arenoso-franco | Arenoso-franco |

O ensaio de granulometria também permitiu construir a curva granulométrica. Esta indica a porcentagem cumulativa qual a variabilidade na distribuição granulométrica das amostras (Figura 26).

A curva granulométrica é fundamental para visualização rápida do comportamento granulométrico das amostras. Portanto, sucintamente, pode-se afirmar que as três amostras analisadas apresentam uniformidade nas respostas dos ensaios. Esta condição da curva indica que as três amostras apresentam características texturais semelhantes, provavelmente oriundas do processo de paleodeposição. Salienta-se que esta condição que as curvas apresentam é característica de material arenoso fino, que compõe a maior fração da matriz. Sua granulometria apresenta-se uniforme entre 80 e 90% do material das amostras (Figura 26).

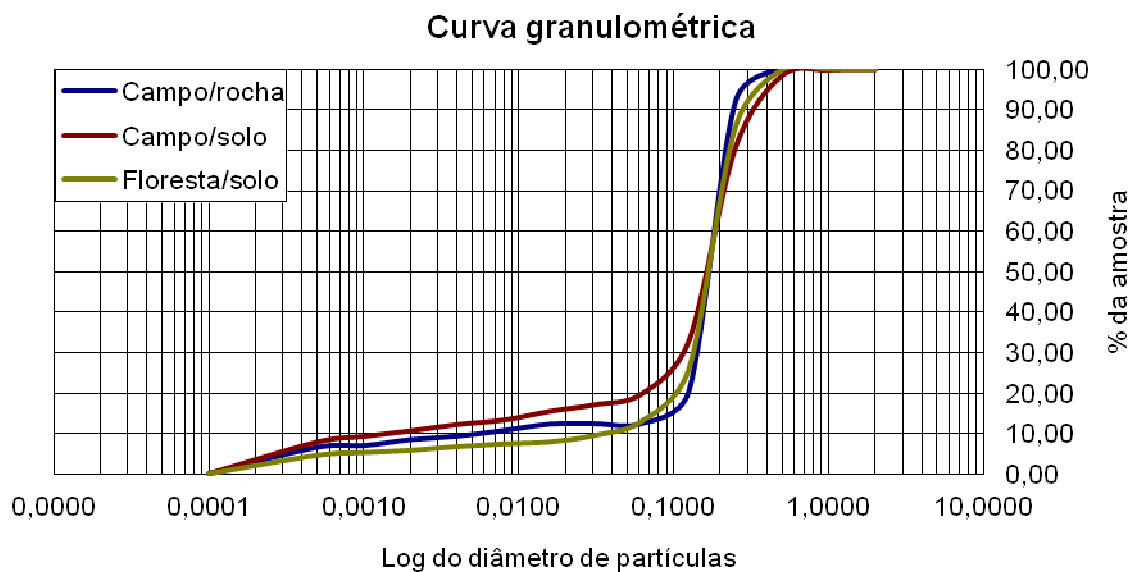


Figura 26: Comportamento da curva granulométrica a partir dos resultados obtidos no ensaio de granulometria realizado com as amostras coletadas nas áreas em estudo.

Ressalta-se a importância de se conhecer as características granulométricas do solo ou da rocha, pois estas são responsáveis pela capacidade de recarga e transmissividade da água subterrânea.

5.2 Condutividade hidráulica

Realizou-se ensaio de condutividade hidráulica carga constante em laboratório, em amostras não deformadas saturadas, tanto em solos quanto em rocha.

Na Tabela 3, apresenta-se os valores obtidos para cada material percolado. Nota-se que, o valor percolado na amostra de rocha foi menor que nas demais, provavelmente, devido ao processo de litificação resultado da estratificação em camadas plano-paralelas típicas de paleoambiente fluvial.

Heath (1983) apresenta uma ampla faixa de variabilidade da condutividade hidráulica em arenitos, da ordem de 10^{-5} a 1 m/d. E que esta depende do tamanho e do arranjo das aberturas transmissoras de água (poros) e das características dinâmicas do fluido (água), tais como, viscosidade cinemática, densidade e a intensidade do campo gravitacional.

Por outro lado, os valores em ambos os solos avaliados apresentaram valores bastante próximos e superiores ao da rocha, devido à inexistência de litificação/estratificação, o que favorece uma maior percolação do líquido no meio poroso.

A determinação do coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica de cada amostra e posteriormente de cada sub-bacia, deu-se empregando a Equação 2, sendo que os resultados estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3: Valores médios de condutividade hidráulica saturada para solo e rocha da sub-bacia hidrográfica de campo nativo e do solo da sub-bacia hidrográfica florestada.

| | CAMPO | | FLORESTA (solo) |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Solo | Rocha | |
| K (cm/h) | 0,592 | 0,485 | 0,562 |
| K (cm/s) | $1,644 \times 10^{-4}$ | $1,347 \times 10^{-4}$ | $1,561 \times 10^{-4}$ |

Observando os resultados granulométricos, tanto nas amostras de solo como na de rocha, percebe-se que há maior concentração de grãos do tamanho areia fina. Deste modo, destaca-se que os valores médios de ensaios de condutividade hidráulica realizados por Fetter (1988, *apud* CABRAL, 2008), apresentam dados médios que variam entre 10^{-3} a 10^{-5} cm/s. Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica saturada, tanto em amostra de solo quanto de rocha em materiais sedimentares porosos concordam com os valores da literatura.

5.3 Porosidade total

Uma vez que a relação entre as aberturas (vazios) e o volume total de um solo ou rocha é referida como sua porosidade Heath (1983) selecionou alguns materiais. Dentre estes estimou para as aberturas primárias em um solo cerca de 55%, enquanto que em uma areia cerca de 25% de aberturas primárias. Ainda considerou um arenito semiconsolidado constituído por 10% de aberturas primárias. Os valores de porosidade total apresentado na Tabela 4 e 5 estão de acordo com os dados da literatura.

Adotando os valores de macroporosidade obtidos para as cada amostra, como sendo equivalentes ao rendimento específico, estes demonstrados na Tabela 2.

Tabela 4: Dados obtidos no ensaio de porosidade realizando-se uma repetição.

| Amostras | Porosidade Total (cm³/cm³) | Macroporosidade (cm³/cm³) | Microporosidade (cm³/cm³) |
|------------------------|---|--|--|
| Rocha – campo | 0,399 | 0,209525574 | 0,190171806 |
| | 0,434 | 0,212891447 | 0,221586617 |
| Solo – campo | 0,463 | 0,173061954 | 0,290026029 |
| | 0,453 | 0,164366783 | 0,28918456 |
| Solo – floresta | 0,505 | 0,168293634 | 0,337428735 |
| | 0,389 | 0,106585968 | 0,283294283 |

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 médio (%) |
|---------------|----------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------|--------------|
| Campo/rocha | 39,90 | 20,95 | 20,95 | 18,95 | 21,12 |
| | 43,4 | 21,29 | 21,29 | 22,11 | |
| Campo/solo | 46,30 | 17,31 | 17,31 | 28,99 | 16,87 |
| | 45,30 | 16,44 | 16,44 | 28,86 | |
| Floresta/solo | 50,50 | 16,83 | 16,83 | 33,67 | 13,75 |
| | 38,90 | 10,66 | 10,66 | 28,24 | |

O valor médio de rendimento específico mais elevado na rocha do que em ambos os solos avaliados pode relacionar-se a uma maior homogeneidade da matriz constituída pela fração areia fina o que pode ser visualizado na Figura 27.

Em ambas as amostras avaliadas a retenção específica elevada (Tabela 5), deve associar-se a ocorrência de microporos e este as porcentagens das frações de silte + argila (Tabela 4).

A determinação do rendimento específico (Sy) é imprescindível, pois este é uma das variáveis necessárias para a determinação da recarga do aquífero livre, utilizadas pelo método WTF.

5.4 Análise da flutuação do nível da água subterrânea no período 2009-2011

As figuras 28 a 32 apresentam o comportamento da flutuação do nível da água subterrânea nas duas sub-bacias buscando-se uma relação com eventos de precipitação.

Pelos medidores automáticos, foi possível obter dados do nível da água subterrânea em intervalos de 60 minutos durante 766 dias, na sub-bacia de campo

enquanto na sub-bacia florestada, durante 721 dias. Devido à grande volume de dados, os mesmos foram sistematizados em valores médios em intervalos de tempo de 24 horas, facilitando as leituras e as interpretações dos mesmos.

O poço P1 localizado na sub-bacia hidrográfica de campo, apresenta a flutuação do nível de água expressa na Figura 28. Destaca-se, visível relação entre a variação do nível com os eventos de precipitação. Sendo que, entre os dias 160 a 270⁴, correspondentes aos meses de novembro e dezembro de 2009 e, janeiro e fevereiro de 2010, ocorreram eventos extremos. Um destes ocorreu no dia 162, quando precipitaram 269 mm. Salienta-se também que durante o período de monitoramento o P1, apresentou variação total de 2,61 metros de flutuação do nível da água subterrânea.

A Figura 27 ilustra um perfil (SE/NW) da sub-bacia hidrográfica florestada, onde se inserem quatro poços de monitoramento.

⁴ Corresponde aos dias em que os poços foram monitorados.

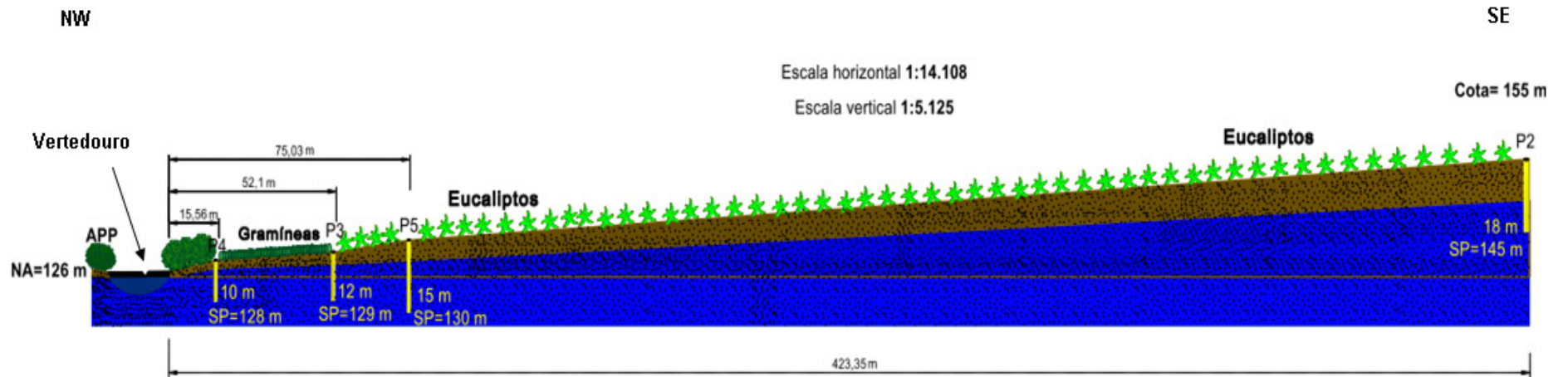


Figura 27: Perfil topográfico dos poços de monitoramento na sub-bacia hidrográfica florestada, Rosário do Sul/RS.
Fonte: LABHIDROGEO, 2010.

Também é relevante lembrar que os poços da sub-bacia hidrográfica florestada, foram perfurados posteriormente ao P1. Assim, entre os dias 160 a 270 (Figura 28), quando ocorreram eventos extremos, correspondem aos dias 115 a 225 nas Figuras 30, 31, 32 e 33.

Estimou-se a partir das cotas altimétricas dos poços de monitoramento até o vertedouro uma declividade média do terreno de cerca de 8,71%, o que de acordo com a classificação de De Biasi (1992), sugere um relevo suave ondulado a ondulado. Este relevo juntamente com a ocorrência de vegetação entre os poços P2, P3 e P5 florestada com eucaliptos favoreceria uma maior infiltração direta no aquífero a partir da precipitação pluviométrica.

O Poço P4, inserido na APP, está localizado na Planície Aluvial, próximo ao curso de água permanente no qual está instalado o vertedouro. Este apresentou seu nível mais próximo à superfície do terreno, com uma assinatura bastante marcada a cada evento de precipitação pluviométrica. Apresentando uma faixa de flutuação do nível de 1,80 m (Figura 29).

As camadas subsuperficiais pertencentes à planície aluvial (poços P3 e P4) recebem contribuição lateral de fluxos subterrâneos como inferidos através da superfície potenciométrica (Figura 27). E, ainda devem receber contribuição de águas de escoamento superficial das porções mais elevadas da vertente convexa, onde estão inseridos os poços de monitoramento (P2 e P5).

Diferentemente dos demais poços, o Poço 3, apresentou uma assinatura mais suave nas suas respostas aos eventos de precipitação, refletindo-se esta condição na faixa de flutuação observada de 1,36 m. Salienta-se, ainda que este poço está localizado na interface da área florestada com a APP (Figura 30).

Os poços P5 e P2 estão localizados dentro da floresta de eucaliptos. O Poço 5 apresentou nos eventos de maior precipitação, movimentos abruptos do nível da água subterrânea, e nos períodos entre estes eventos o nível da água apresentou variações mínimas. Destaca-se que sua variação do nível foi de 2,5 m (Figura 31).

O Poço 2 apresentou uma assinatura diferenciada quando comparado aos outros. Destaca-se que em relação aos demais poços da sub-bacia, este se encontra em posição mais distante em relação ao vertedouro. A flutuação do nível no P2 foi de 4,52 metros durante o período monitorado. (Figura 32).

Buscando-se uma possível explicação para esta faixa elevada de flutuação utilizou-se estimativas realizadas por Avila (2011). Comparou a área florestada com

as áreas de campo percebendo um valor significativamente menor de umidade do solo, possivelmente atribuído à atividade de evapotranspiração das plantas, cujo efeito tende a diminuir a quantidade de água no solo. Gouvêa (2009) afirmou que evapotranspiração tem maior influência do que a porosidade na variação do nível da água.

Avila (2011) ainda constatou que a área florestada apresentou uma menor porcentagem de umidade inicial no solo, em relação às áreas de campo. Destaca-se que esta pesquisa foi realizada nas mesmas áreas do presente estudo.

Comparando-se os resultados de curto período de flutuação do nível (49 dias), Silvério et al. (2009) com um longo período (aproximadamente dois anos hidrológicos), esta pesquisa. Notou-se que a maior faixa de flutuação do nível da água subterrânea ocorreu na sub-bacia hidrográfica florestada, poço P2, localizado em cota altimétrica mais elevadas que os demais poços de monitoramento, Figura 27.

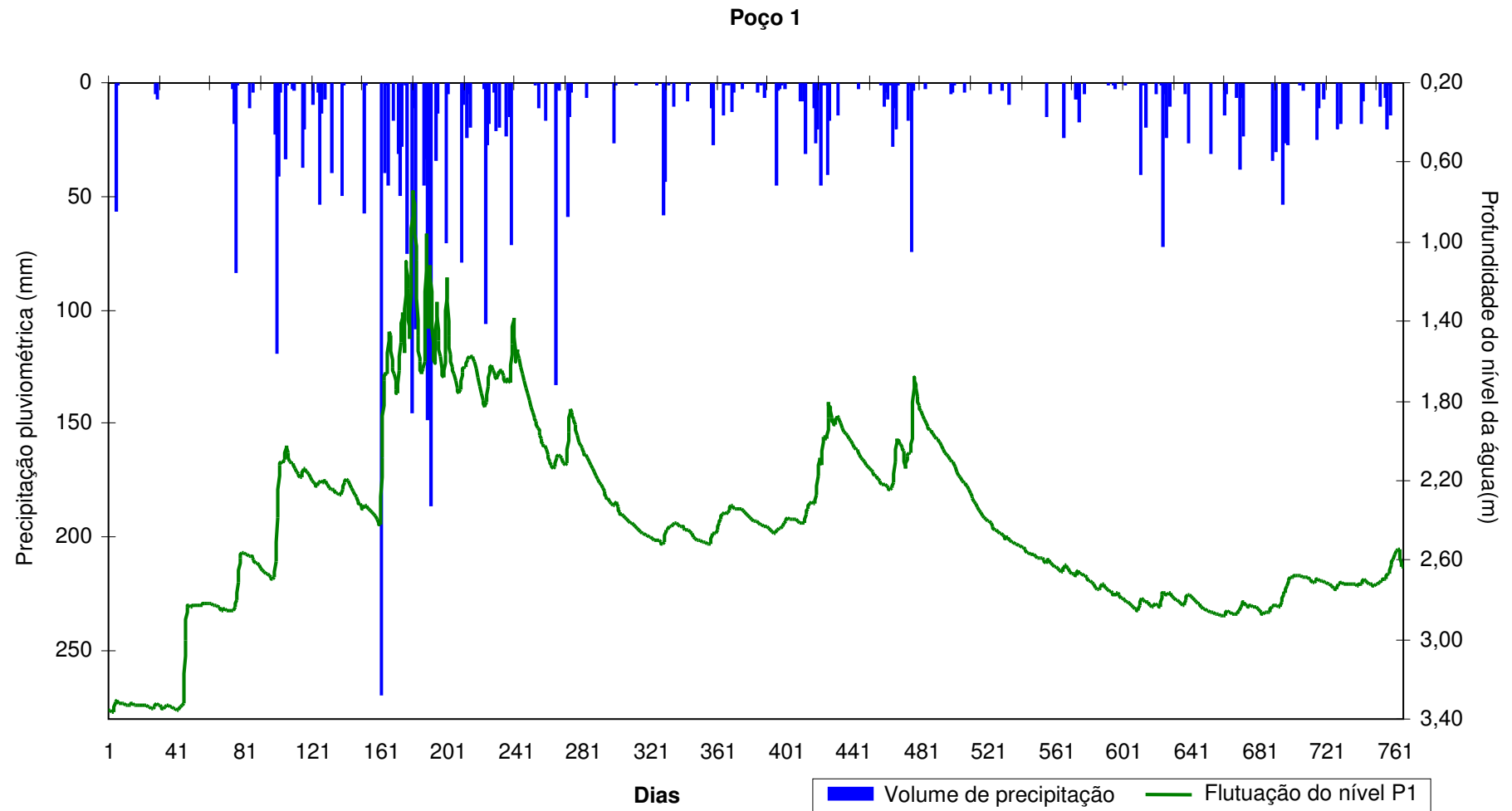


Figura 28: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P1, sub-bacia hidrográfica de campo em relação a precipitação pluviométrica no período de 26/05/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS.



Figura 29: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P4, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS.

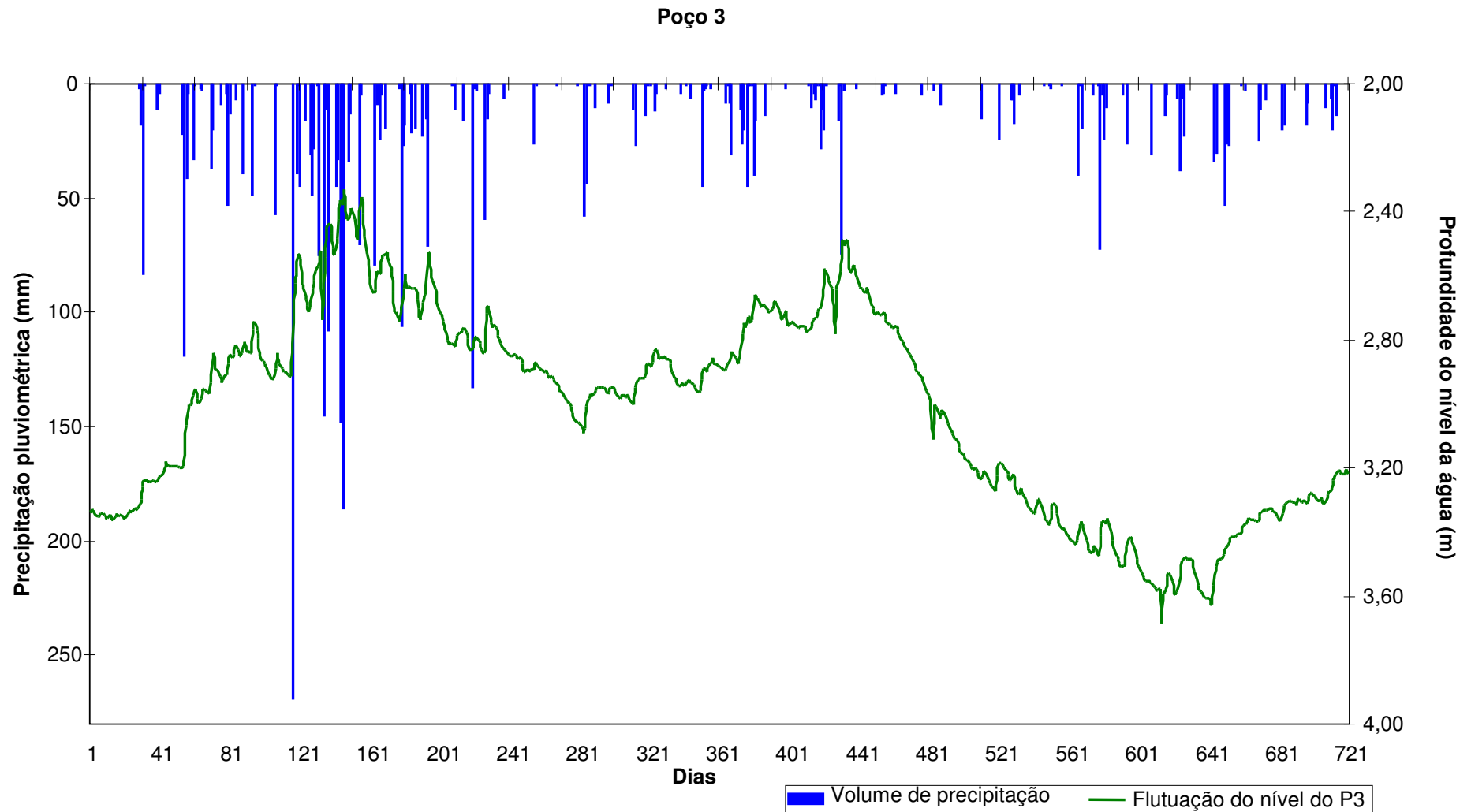


Figura 30: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P3, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS.

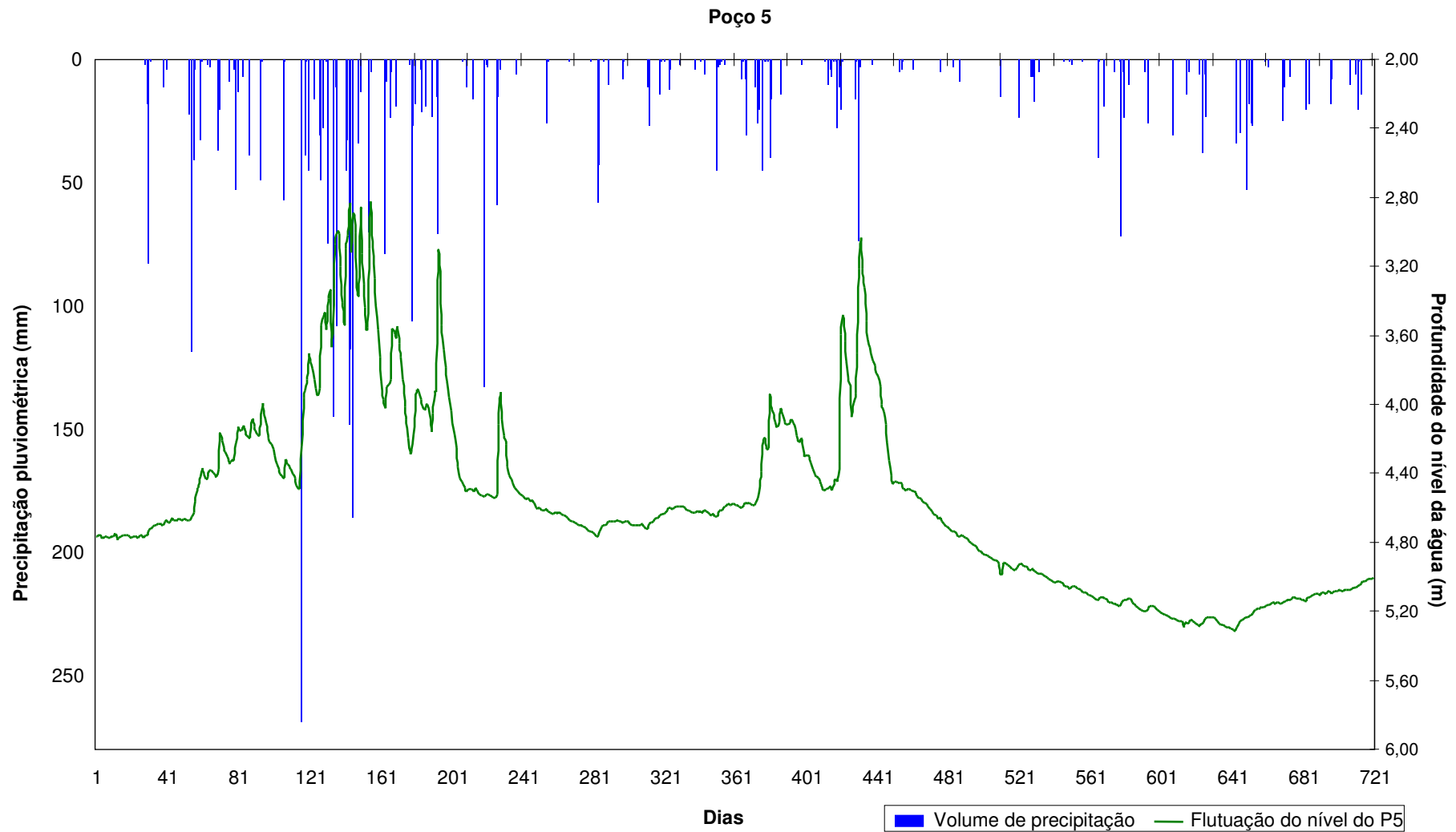


Figura 31: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P5, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS.

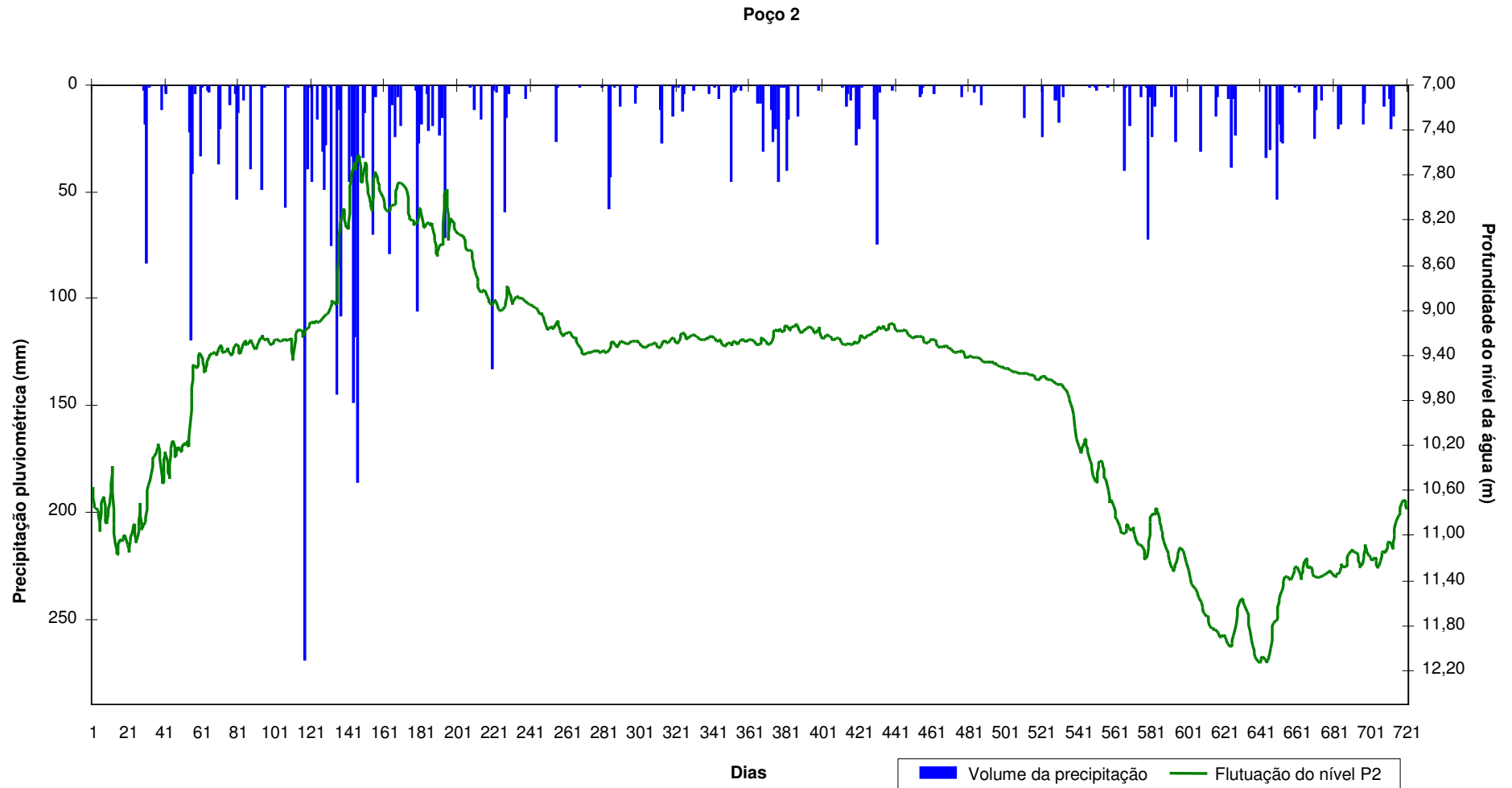


Figura 32: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P2, sub-bacia hidrográfica florestada em relação à precipitação pluviométrica no período de 10/07/2009 a 30/06/2011, em Rosário do Sul/RS.

A figura 33 ilustra a correlação determinada pela regressão linear obtida entre o nível da água subterrânea e a precipitação. Verificou-se que há alta correlação linear entre estas duas variáveis no período. Assim, elegeu-se um evento, para tal verificação, entre os dias 187 a 191. Utilizando-se os dados referentes ao poço P1.

Testou-se a correlação em outros eventos que também apresentaram muita semelhança. Deste modo, pode-se afirmar que no evento (Figura 33), pelo menos 80% da variação do nível da água subterrânea corresponde a ocorrência da precipitação naquele período de tempo analisado.

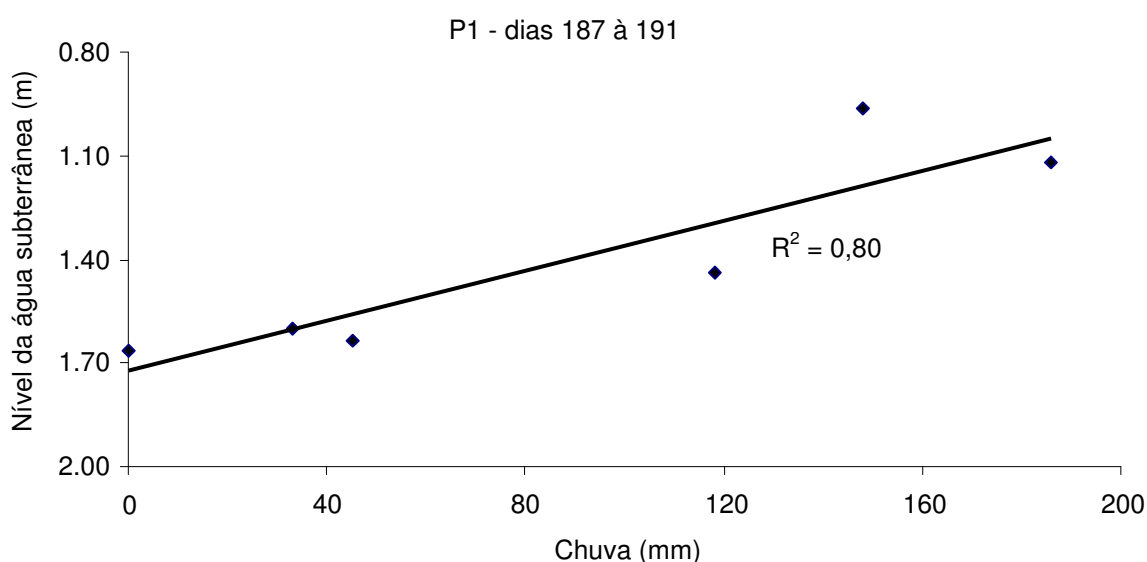


Figura 33: Comportamento da regressão linear entre o nível da água subterrânea e a precipitação no período de monitoramento que compreende os dias de 187 a 191 no poço P1 e determinação de sua correlação (R^2).

Portanto a flutuação do nível da água subterrânea nos poços de monitoramento apresenta correlação em relação à precipitação pluviométrica em uma série de longa duração. Isto significa a existência de outros fatores que podem influenciar na flutuação do nível da água subterrânea, uma vez que a precipitação pluviométrica foi a principal responsável pela flutuação do nível. Sendo assim, validou as premissas do método WTF que estima a recarga a partir dos eventos de

precipitação pluviométrica em aquífero livre, intergranular, constituído da Fm. Pirambóia.

5.5 Aplicação do método *Water Table Fluctuation* – WTF

As figuras de números 34 a 38 apresentam aplicação do método WTF, na estimativa da recarga subterrânea. Considerando-se a Equação 1, 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, totalizando 721 dias. 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.

Buscando-se realizar estimativas de recarga no mesmo período em todos os poços de monitoramento, realizou-se a supressão de um pequeno período avaliado no poço P1.

A figura 34 ilustra o comportamento do poço P1 da sub-bacia hidrográfica de campo, que a cada recessão significativa (em torno de 0,25 m), se estabeleceu uma curva 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. Identificaram-se onze (11) recessões significativas, que na somatória destas diferenças de altura (h), determinou-se o Δh do período. Igual procedimento foi realizado para os demais poços (Figura 35, 36, 37 e 38).

A determinação do S_y foi determinada a partir dos dados de porosidade total, obtidos em ensaio de laboratório. Destaca-se que o S_y das amostras de solo, representativas da zona vadosa, obtido para a sub-bacia hidrográfica de campo foi de 16,87% e, para a sub-bacia hidrográfica florestada e 13,75% (Tabela 5).

Resultados semelhantes foram obtidos por Ávila (2011) na mesma área de estudo, utilizando o método do infiltrômetro. Desta forma, preferiu-se não considerar nas estimativas de recarga subterrânea o valor do material rochoso não deformado, uma vez que durante as sondagens não se identificou com precisão sua posição nos perfis.

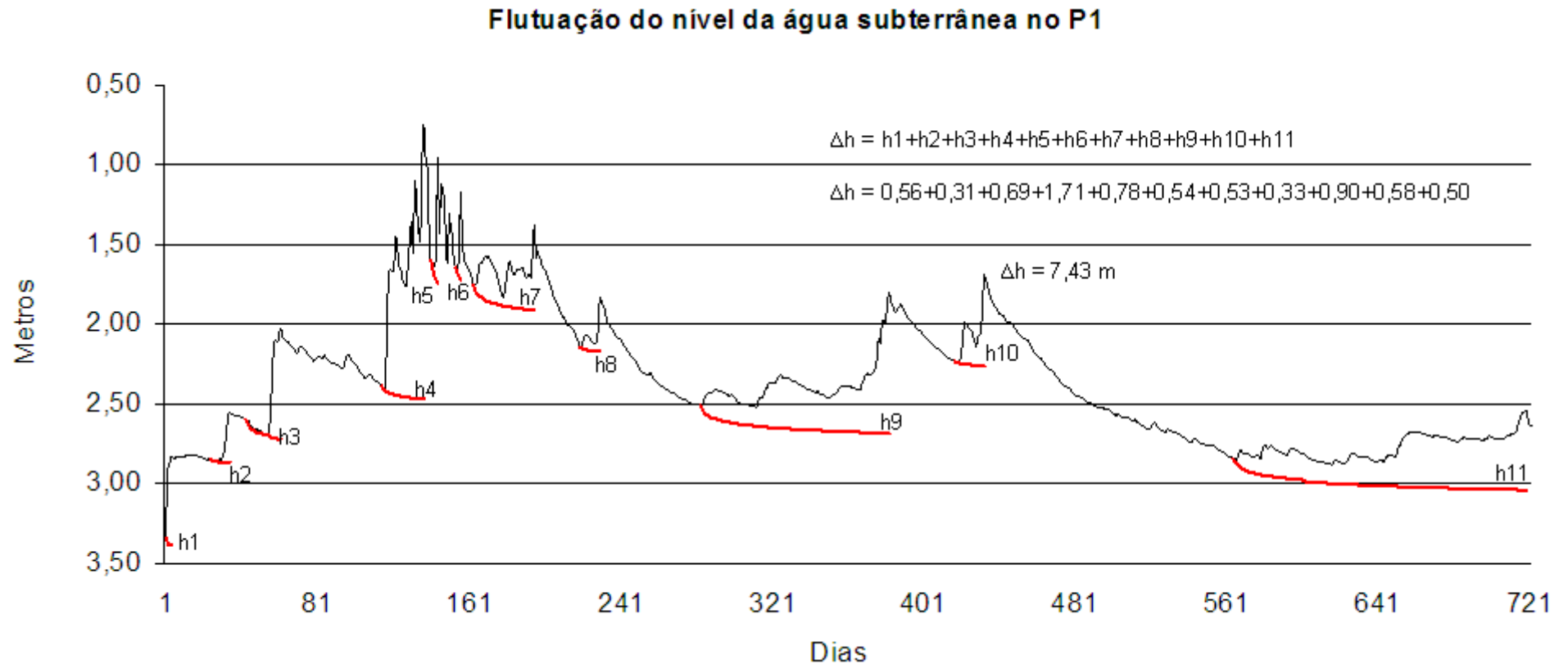


Figura 34: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P1.
h1 a h11: identificação das curvas de recensão e, a partir delas, prolongamento da linha de tendência.
Determinação do Δh do P1.

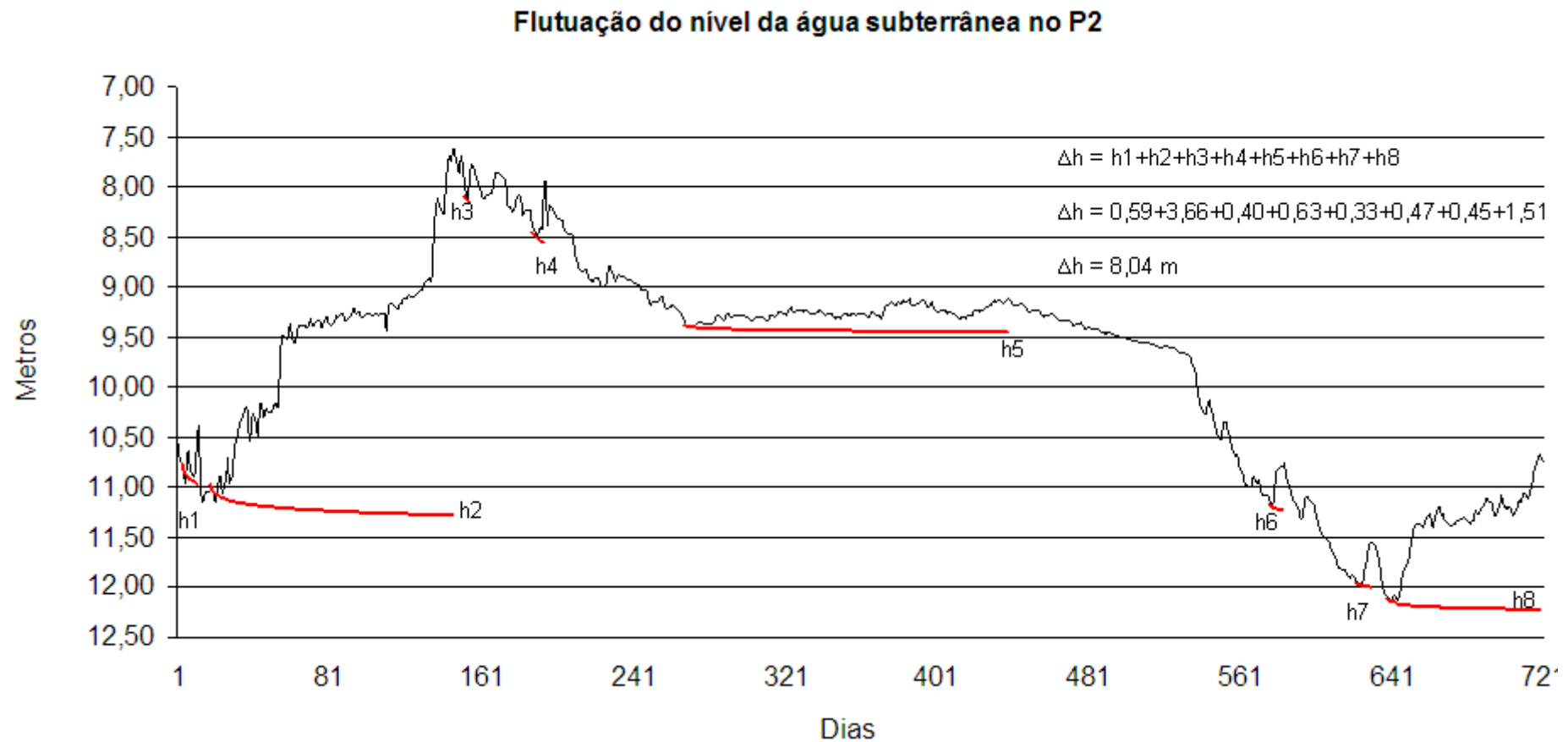


Figura 35: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P2.
h1 a h8: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, o prolongamento da linha de tendência.
Determinação do Δh do P2.

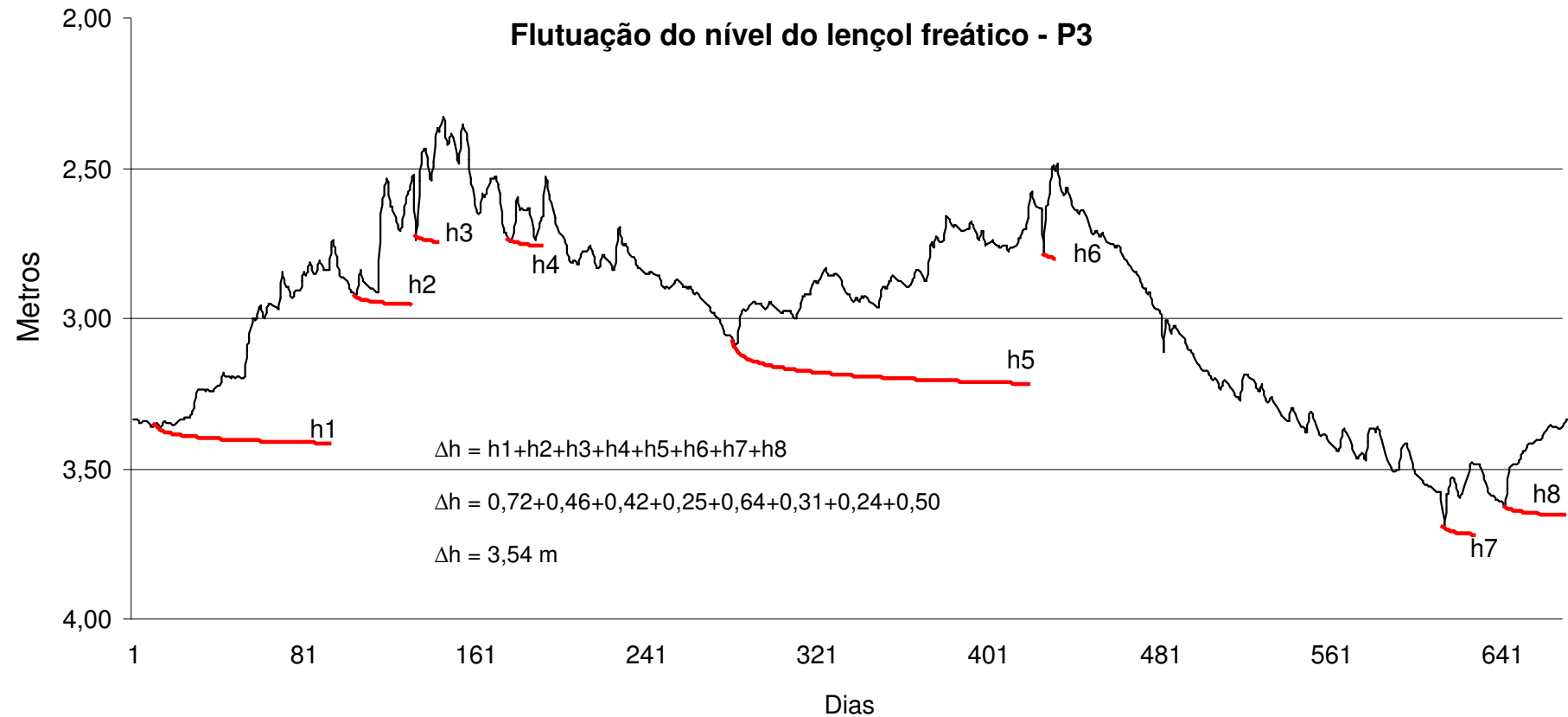


Figura 36: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P3.

h1 a h8 – identificação das curvas de recessão e a partir delas prolongamento da linha de tendência.

Determinação do Δh do P3.

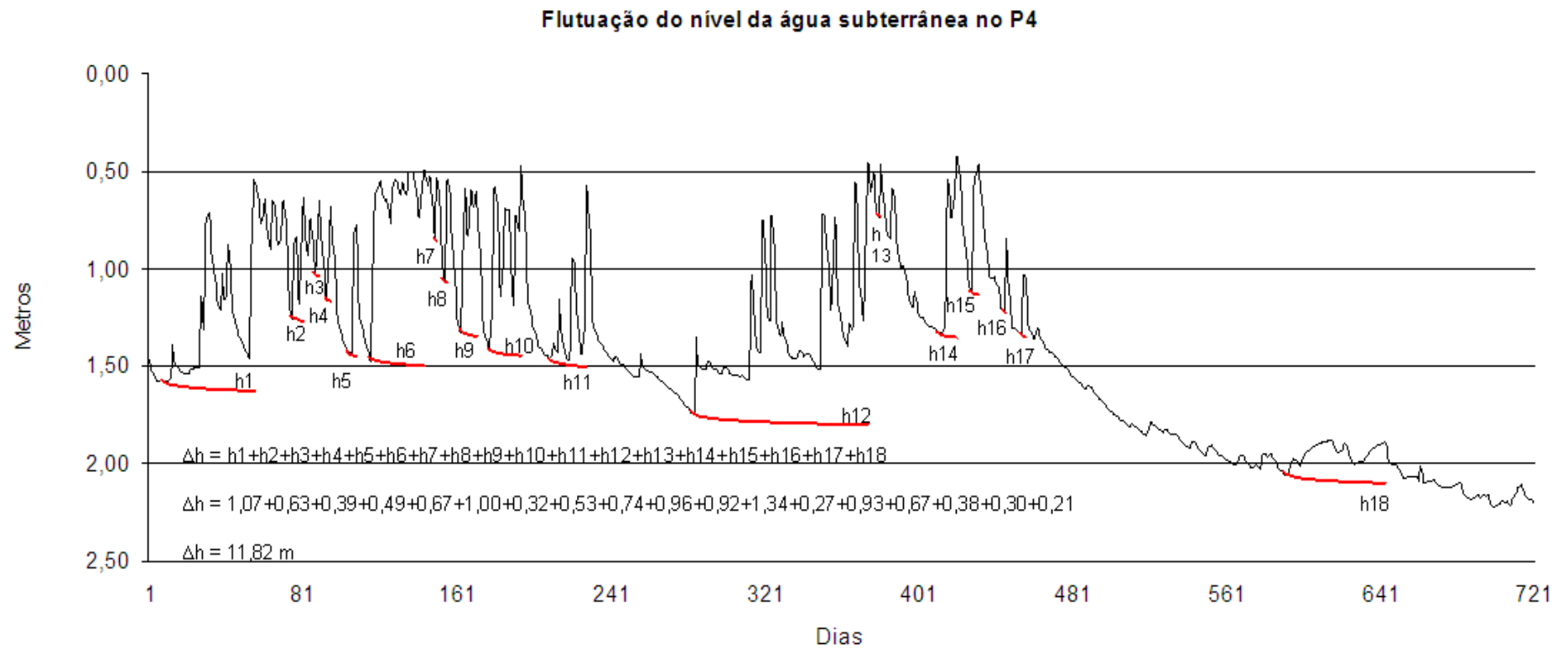


Figura 37: Flutuação do nível da água subterrânea do poço P4.
h1 a h18: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, o prolongamento da linha de tendência.
Determinação do Δh do P4.

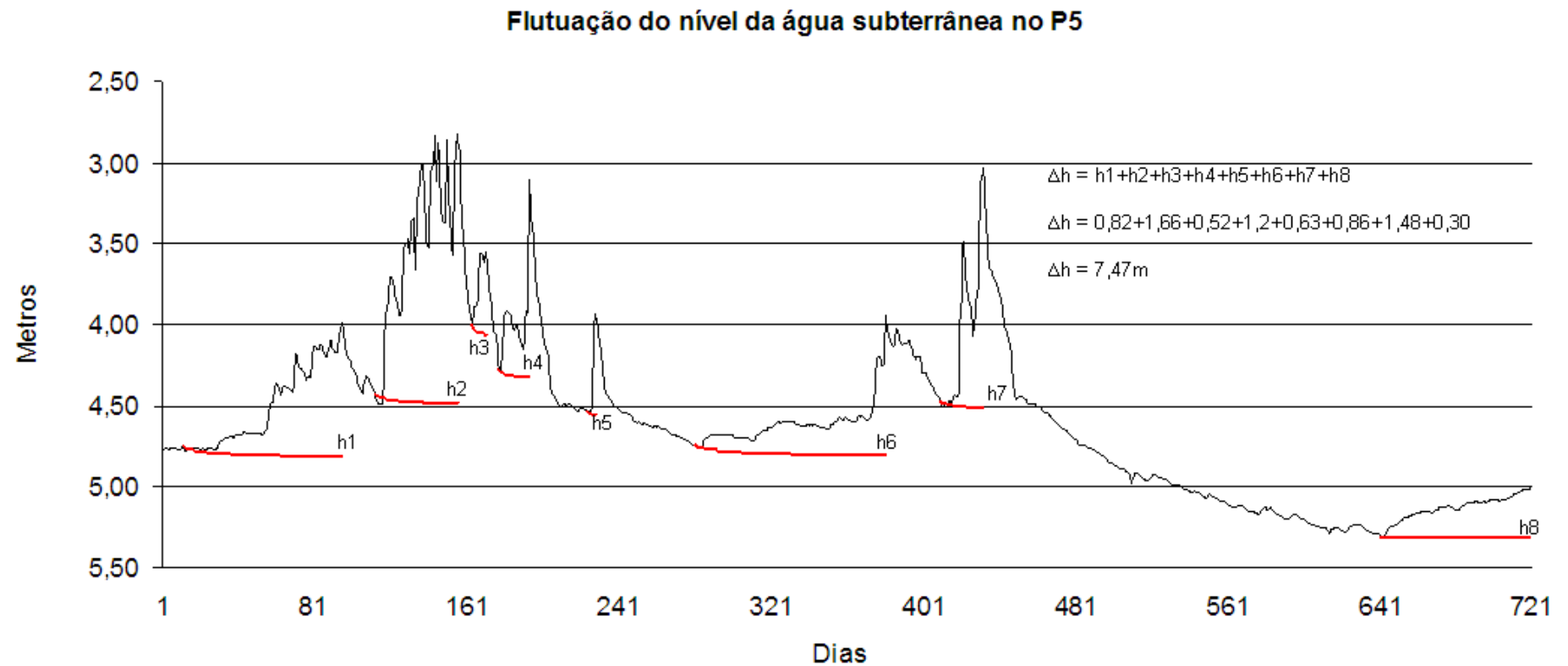


Figura 38: Assinatura da variação do nível da água subterrânea do poço P5.
h1 a h8: identificação das curvas de recessão e, a partir delas, o prolongamento da linha de tendência.
Determinação do Δh do P5.

A Tabela 6 auxilia na visualização dos valores obtidos na determinação da recarga subterrânea através do método WTF (Equação 1), para o período de monitoramento de cerca de dois anos hidrológicos (2009/2011).

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

| Sub-bacia | Poços | Δh (m) | Δt *** (período) | S_y | WTF - recarga (m/período) | WTF - recarga (mm/período) |
|------------|-------|----------------|-----------------------------|-------|---------------------------------|----------------------------------|
| Campo | P1* | 7,43 | 721 | 16,87 | 0,17 | 170 |
| | P2** | 8,04 | 721 | 13,75 | 0,15 | 150 |
| Florestada | P3** | 3,54 | 721 | 13,75 | 0,06 | 60 |
| | P4** | 11,82 | 721 | 13,75 | 0,22 | 220 |
| | P5** | 7,47 | 721 | 13,75 | 0,140 | 140 |

Δh = somatório das diferenças altimétricas das curvas extrapoladas.

S_y = rendimento específico.

* Sub-bacia hidrográfica de campo.

** Sub-bacia hidrográfica florestada.

*** O período de monitoramento é composto por 721 dias.

Destaca-se que autores como Montañó e Carrión (1990), Silva Busso (1999), Perez e Rocha (2002) e Pacheco (2004) também realizaram estudos referente à recarga de água subterrânea em áreas do SAG aflorantes sendo que os valores encontrados variam de 3 a 3,6% da precipitação média anual.

Na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, em São Carlos/SP, Barreto (2006), Wendland et al. (2007), Barreto et al. (2009) e Gomes (2008), estimaram valores de recarga, tanto superficial quanto profunda (WENDLAND 2007, GOMES, 2008) da ordem de 14 a 38% e 0,4 a 2,4%, respectivamente, da precipitação média anual, estes dados foram obtidos pelo método WTF e balanço hídrico.

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 sub-bacia hidrográfica (Tabela 7).

Tabela 7: Porcentagem da precipitação na recarga da água subterrânea e recarga média de cada sub-bacia hidrográfica em função da precipitação pluviométrica.

| Sub-bacia | Poços | WTF - recarga (mm/período) | Precipitação total no período (mm) | (%) de precipitação de recarga | (%) recarga média em cada sub-bacia no período |
|------------|-------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--|
| Campo | P1 | 170 | 4279 | 3,97 | 3,97 |
| | P2 | 150 | 4279 | 3,50 | |
| Florestada | P3 | 60 | 4279 | 1,40 | 3,20 |
| | P4 | 220 | 4279 | 5,14 | |
| | P5 | 140 | 4279 | 3,27 | |

Utilizando-se dos dados médios de precipitação no Estado do Rio Grande do Sul, apresentadas por Sotério et al. (2005), para a região em estudo, inserida na sub-bacia 76 (Rio Uruguai, Ibicui e outros), 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 foram bem superiores aos valores médios no período de 2009/2011.

Realizando-se uma estimativa a partir do valor médio anual proposto por Sotério et al. (2005), obter-se-ia para a sub-bacia de campo um valor de percentagem de precipitação total anual da recarga de 4,71%. Por outro lado o valor médio anual para a sub-bacia florestada seria de 5,65%. Apresentando um valor um pouco superior aos estimados para as outras áreas aflorantes do SAG.

Pelo fato da sub-bacia hidrográfica de campo apresentar apenas um poço de monitoramento, foi possível apenas obter uma informação em escala pontual sobre a recarga do aquífero livre presente na sub-bacia hidrográfica. Já, na sub-bacia florestada existem quatro poços de monitoramento, porém encontram-se alinhados em uma mesma vertente (Mapa 3). Deste modo, pode-se estimar a recarga média nesta vertente. Sendo que, para o restante da sub-bacia este dado pode não ser representativo, devendo ser aferido utilizando-se outros métodos comparativos como o do Balanço Hídrico (WENDLAND et al., 2007 e BARRETO et al, 2009).

Portanto, a estimativa de recarga de aquíferos livres pelo método WTF, apresenta confiabilidade, pois os resultados obtidos neste trabalho vão ao encontro com resultados obtidos em trabalhos de outros pesquisadores.

6 CONSIDERAÇÕES

Estudos referentes à compreensão da dinâmica que envolve o sistema água subterrânea, ainda apresentam-se como um desafio para a pesquisa, tanto no âmbito do objeto de estudo como teórico-metodológico. Considera-se, também, que os aquíferos não são apenas reservatórios minerais, mas também responsáveis pela dinâmica de um ecossistema, fazendo parte do ciclo hidrológico.

Em termos metodológicos, este trabalho partiu de uma metodologia quantitativa calcada em uma abordagem sistêmica, na tentativa de entender os elementos e suas relações responsáveis pela estimativa de recarga subterrânea em aquífero livre, poroso, intergranular, pertencente a Fm. Pirambóia. Esta é parte componente da zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani na escala de sub-bacia hidrográfica.

Deste modo, considera-se que a recarga depende principalmente da interação de fatores climáticos e ambientais; como o tipo de cobertura vegetal. A partir desta premissa selecionaram-se duas áreas com uso e ocupação distintas. Uma delas com uso agropecuário e outra com florestamento de eucaliptos, ambas situadas próximas de a um curso de água perene.

Foram considerados os aspectos geomorfológicos e as características físicas da interface solo/rocha, formadora da zona aerada e/ou saturada, onde houve a flutuação do nível da água, resultante da precipitação pluviométrica. Este último aspecto apresentou características físicas do solo semelhantes devido à ocorrência de uma matriz arenosa o que favoreceu na proximidade numérica dos resultados. Os fatores geomorfológicos foram inferidos através das cotas altimétricas dos poços de monitoramento, enquanto, para os fatores relativos aos solos, recorreu-se, na sua mensuração, a ensaios de laboratório.

Neste sentido refletiu-se sobre a sustentabilidade do uso de um aquífero, considerando que este só será sustentável se houver recarga subterrânea suficiente que garanta a inexistência de rebaixamento excessivo do nível da água em captações, 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.

O comportamento do nível da água subterrânea nos poços monitorados inferiu-se que, a flutuação do nível da água subterrânea ocorreu tanto na sub-bacia hidrográfica de campo nativo como na sub-bacia hidrográfica florestada, a flutuação do nível da água subterrânea variou de 1,36 m a 4,52 m, no período de estudado (2009/2011).

Verificou-se que entre as duas sub-bacias hidrográficas não houve significativa discordância em relação aos aspectos físicos do meio, o que garantiu capacidade de infiltração similar. Considerou-se como diferencial o tipo de cobertura florestal que deve favorecer a infiltração, mas também na evapotranspiração. Deve-se salientar que a partir, dos níveis da água inferidos na área florestada de eucaliptos (poços P2 e P5), também apresentaram valores de recarga próximos ao valor estimado para a área de campo (poço P1).

A menor variação do nível da água e também o menor valor de recarga, ocorreu no poço P3, localizado na interface floresta/campo (APP). Já, a maior estimativa de recarga ocorreu na APP, influenciada pelo poço P4, o qual está localizado na planície aluvial da sub-bacia. Neste, o fator topográfico mais plano, deve ter tido uma maior influência lateral de fluxos superficiais e/ou subterrâneo o que favoreceu o valor mais elevado de recarga. Acrescenta-se a isto, que sua assinatura relativa à flutuação do nível esteve distribuída em pequenos *pulsos*, apresentando uma pequena faixa de variação entre seus valores máximos e mínimos.

Para aplicação do método WTF, necessitou-se realizar a determinação dos parâmetros: Rendimento Específico – S_y dos materiais penetrados dos poços de monitoramento bem como do somatório dos valores extrapolados para cada curva de recessão em um período de aproximadamente dois anos hidrológicos (2009/2011) - Δh . Para obtenção do S_y realizou-se ensaios de porosidade total determinando valores para cada sub-bacia hidrográfica, em área arenosa formando um aquífero livre intergranular, uma das premissas para a aplicação deste método.

Em comparação com resultados obtidos em pesquisas de estimativas de recarga subterrâneas já realizadas em zonas de afloramento pertencentes ao SAG, considerou-se que, os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios.

Deve-se ressaltar que o método aplicado não permite identificar o caminho da água infiltrada a partir de precipitações, em seu percurso entre a zona aerada até a zona saturada. Assim, com os resultados apresentados, espera-se contribuir com subsídios para o gerenciamento hídrico da bacia hidrográfica e seu uso sustentável.

Considera-se que estudos que buscam identificar a recarga de aquíferos livres ou confinados são fundamentais nas tomadas de decisões quanto ao gerenciamento sustentável de uma bacia hidrogeológica.

Portanto, os avanços obtidos relativos à série histórica de níveis de água subterrânea e de estimativa de recarga, possibilitarão compreender cada vez melhor as inter-relações rio-aquífero, sua importância funcional na manutenção do fluxo de base, dos cursos de água, bem como nas dinâmicas organizacionais complexas e singulares do Ciclo Hidrológico.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho vai ao encontro de discussões a cerca da temática, água subterrânea, contribuindo para o, desvendar de particularidades dos aquíferos e, para a melhoria na eficiência de se seu gerenciamento. Deste modo, buscou-se responder algumas perguntas durante a execução da pesquisa, que contribuíram para as seguintes conclusões.

Há relação entre a flutuação do nível freático e a precipitação pluviométrica. Nas sub-bacias hidrográficas em estudo houve pelo menos 80% da variação do nível da água subterrânea em relação à precipitação pluviométrica.

A aplicação do método utilizado para a estimativa de recarga. Obteve-se recarga da água subterrânea de 3,97% da precipitação pluviométrica, na para sub-bacia hidrográfica de campo, enquanto que para a sub-bacia hidrográfica floresta, obteve-se 3,20% da precipitação pluviométrica na recarga da água subterrânea, para a sub-bacia hidrográfica florestada.

O uso do método WTF para a estimativa de recarga da água subterrânea, em aquífero livre, demonstra fácil aplicabilidade e alcança resultados satisfatórios, embora represente grosseiramente um sistema complexo, como o meio poroso.

8 RECOMENDAÇÕES

- 1) Ampliação dos poços de monitoramento.
- 2) Planejamento prévio de seu posicionamento nas sub-bacias hidrográficas.
- 3) Coletas de amostras não deformadas durante o processo de perfuração dos poços de monitoramento.
- 4) Levantamento de topometria das sub-bacias hidrográficas.
- 5) Aprimorar análises sistêmicas referente às inter-relações entre as variáveis climatológicas com as variáveis do meio.

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>

AGSOLVE. Distribuidora dos medidores automáticos. Disponível em: www.agsolve.com.br. Acesso: agosto de 2010.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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

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. Poço tubular – Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea. 2006.

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

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.

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

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

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

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

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

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

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. [a]

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. [b]

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 CBAS E XVI EPP, Feira Nacional da Água, 2008. **Anais....** 2008.

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

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.

DRISCOLL, F.G. **Groundwater ans Wells**. Johnson Screens, St Paul, MN. 1986.

DAVIS, S. N.; DEWIEST, R. J. M. **Hydrogeology**. New York: JOHN WILEY & SONS. 1996.

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

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.

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).

FOSTER, S. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. Instituto de Geologia:USP, São Paulo. 1993.

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

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do balanço hídrico em zona saturada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos: USP, São Carlos. 2008.

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.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos: USP, 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.

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.** United States Geological Survey Water-Supply Paper. Traduzido por Mario Wrege e Paul Potter, IPH/UFRGS. Porto Alegre. 1983.

HEINEN, C.; 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.

KALF, F. R. P.; 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.

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

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.

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.

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

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.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos**. 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.

MILLAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agrônômicas**. São Paulo:Editerra. 1988.

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.

MORAES, A. C. R. **Geografia: pequena história crítica**. São Paulo: Hucitec, 1987.

NENTWING SILVA, B. Métodos quantitativos aplicados em geografia: uma introdução. **AGETEO**. Rio Claro, SP. Vol. 3, N° 6. 1978. p. 33-73.

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

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.

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.

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.

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. p. 598-605.

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

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.

REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUDINISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: Capital ecológico, uso e conservação. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Escrituras, 2002.

REBOUÇAS, A. da C. **Uso inteligente da água**. Ed.: Escrituras, São Paulo, 2004.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

RIO GRANDE DO SUL/SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. **Macrozoneamento agroecológico e econômico do estado do Rio Grande do Sul**. Secretaria da Agricultura e abastecimento, Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. Porto Alegre. 1994. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/>. Acesso em: 23 de abril de 2010.

RIO GRANDE DO SUL. SEMA, 2004. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/>. Acesso em: 23 de abril de 2010.

RONEN, D.; SCHER, H.; BLUNT, M., 2000. Field observations of a capillary fringe before and after a rainy season. **Journal of Contaminant Hydrology**. Elsevier, vol. 44, July 2000. Disponível em: <http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/503341/description#description>. Acesso em: 02 fev. 2010.

RONEN, D., GRABER, E. R. AND LAOR, Y., 2005. Volatile Organic Compounds in the Saturated-Unsaturated Interface Region of a Contaminated Phreatic Aquifer. Vadose Zone. **Journal**. Madison/USA, maio 2005. Disponível em <<http://vzj.sciijournals.org/cgi/content/abstract/4/2/337>>. Acesso em: 10/06/ 2010.

RUSHTON, K. R.; KAWECKI, M. W.; BRASSINGTON, F. C. Groundwater model conditions in Liverpool sandstone aquifer. **Journal Institution of Water & Environmental Management**. Volume 2. 1988. p. 67-85.

SANTANA, D. P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

SANTOS, M. **Espaço e método**. São Paulo: Nobel, 1985.

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.

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.

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

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.

SILVÉRIO 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.

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

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.

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.

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

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, Guanhões – 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.

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.

UFSM. Laboratório de Física do Solo. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/fisicadosolo/>. Acesso: 10 de maio de 2011.

UFSM/MDT. **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.

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. In: CONGR. BRAS. ÁGUAS SUBTERR., 13, **Anais...** Cuiabá: ABAS, 2006, CD-ROM.

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.

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, p 15 - 25.

WENDLAND, E.; BARRETO, M C.; GOMES, L.H.; PAIVA, J.B.D. **Balanço 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**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

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

APÊNDICES

Apêndice 1: Dados detalhados do ensaio de condutividade hidráulica

| Tempo | CAMPO | | FLORESTA |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | Solo (ml) | Rocha (ml) | |
| 9:38 | 0 | 0 | 0 |
| 10:08 | 167 | 141 | 127 |
| 10:38 | 153 | 122 | 117 |
| 11:08 | 157 | 116 | 120 |
| 11:38 | 155 | 108 | 119 |
| 12:08 | 149 | 105 | 125 |
| 12:38 | 143 | 97 | 122 |
| 13:08 | 99 | 91 | 126 |
| 13:38 | 104 | 90 | 126 |
| 14:08 | 92 | 89 | 119 |
| 14:38 | 94 | 91 | 121 |
| 15:08 | 93 | 90 | 119 |
| Média | 117,17 | 95,00 | 111,75 |
| Média de cada área | 106,08 | | 111,75 |

Apêndice 2: Dados informantes sobre o peso das amostras de solo.

| | CAMPO | | | | FLORESTA | |
|-----------------------------|--------------|------------|--------------|-----------|-----------------|------------|
| | Solo | | Rocha | | | |
| Identificação | AA | 27B | BB | 53 | 15B | 40B |
| Peso cápsula* | 6,822 | 8,022 | 7,623 | 11,173 | 7,489 | 7,456 |
| Peso anel* | 27,298 | 26,932 | 27,070 | 26,892 | 26,775 | 27,000 |
| Peso cápsula + anel + solo* | 92,640 | 94,821 | 97,024 | 100,238 | 88,196 | 84,266 |
| Peso solo* | 58,52 | 59,867 | 62,331 | 62,173 | 53,932 | 49,81 |

*gramas

Apêndice 3: Dados detalhados do ensaio de porosidade total.

| Rep | Densidade, (g/cm³) | P. Total/usolo* (cm ³ /cm ³) | P. total (%) | Macro/usolo* (cm ³ /cm ³) | Micro/usolo* (cm ³ /cm ³) |
|-------------------|--|---|-------------------------|--|--|
| 1- rocha | 1.393471241 | 0.39969738 | 39,9 | 0.209525574 | 0.190171806 |
| 2 -- rocha | 1.459666729 | 0.434478064 | 43,4 | 0.212891447 | 0.221586617 |
| 3 – solo | 1.350275874 | 0.463087982 | 46,3 | 0.173061954 | 0.290026029 |
| 4- solo | 1.385617614 | 0.453551343 | 45,3 | 0.164366783 | 0.28918456 |
| 5 - solo | 1.274263263 | 0.505722369 | 50,5 | 0.168293634 | 0.337428735 |
| 6 - solo | 1.491362095 | 0.389880251 | 38,9 | 0.106585968 | 0.283294283 |

Obs.: * usolo = umidade do solo