



ESTIMATIVA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI POR MEIO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA VARIAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE NA BACIA DO RIO IBICUI-RS

ESTIMATION OF RECHARGE OF THE GUARANI AQUIFER SYSTEM BASED ON THE APPLICATION OF THE WATER-TABLE FLUCTUATION METHOD IN THE IBICUI RIVER-RS

Flora Würth Simon¹; Pedro Antonio Roehe Reginato¹;
Roberto Eduardo Kirchheim²; Guilherme Casarotto Troian²;

Artigo recebido em: 19/05/2016 e aceito para publicação em: 23/02/2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i2.28631>

Resumo: A estimativa da recarga subterrânea é determinante para a gestão sustentável das águas subterrâneas. A recarga pode ser estimada usando diferentes métodos que variam de acordo com as características da área estudada, as escalas temporais e espaciais adotadas e a disponibilidade de dados. O objetivo é estimar a recarga de unidades hidroestratigráficas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG), localizado na bacia do rio Ibicuí, com base na aplicação do método Variação dos Níveis d'Água (VNA). Os dados de nível d'água foram obtidos a partir de cinco poços de monitoramento pertencentes à rede RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas) da CPRM/Serviço Geológico do Brasil, instalados na bacia. O método foi aplicado para a média mensal dos níveis de água em cada poço de monitoramento, em períodos que variaram entre 24 e 39 meses. A recarga mensal foi estimada entre 417 mm e 730,7 mm, e as porcentagens de recarga em relação à precipitação variaram entre 11% e 18%, com média de 13,82%. Na região noroeste da bacia foram encontrados valores mais altos em contraposição à região sul. O método apresentou resultados compatíveis com outros estudos realizados na mesma região.

Palavras-chave: Recarga subterrânea. Aquíferos livres.VNA. Bacia do Ibicuí.

Abstract: The estimation of groundwater recharge is determinant for the sustainable groundwater management. The recharge can be estimated using different methods according to the characteristics of the studied area, the spatial and temporal scales and data availability. The goal is to estimate the recharge of unconfined aquifer units that belong to the Guarani Aquifer System, located in the Ibicuí River basin, based on the application of the Water-Table Fluctuation (WTF) method. The water level data were obtained from five monitoring wells of the RIMAS project operated by the CPRM/Brazilian Geological Service. The method was applied to the monthly average of the water level to each monitoring well, in periods between 24 and 39 months. The monthly recharge estimations were about 417,0 mm to 730,7 mm, and the values of precipitation that correspond to recharge varied between 11% and 18%, with an average of 13,82%. It was observed that the highest values occurred in the northwest region of the basin, while the lowest were found in the southern region. The method delivered good results when compared to other assessments that were carried out in the same region.

Keywords: Groundwater recharge. Unconfined aquifers. WTF. Ibicuí basin.

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam uma fonte expressiva para o abastecimento urbano no Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul (ANA, 2010). No Brasil, estima-se que

os aquíferos sirvam ao abastecimento de 30 à 40% da população, sobretudo em cidades de médio e pequeno porte (HIRATA et al., 2010). No estado do Rio Grande do Sul, segundo o Atlas de Abastecimento Urbano de Água da Agência Nacional das Águas (2010),

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mails: (flora.ws@hotmail.com, pedro.reginato@ufrgs.br)

² Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM / Serviço Geológico do Brasil). E-mails: (roberto.kirchheim@cprm.gov.br, guilherme.troian@cprm.gov.br)

cerca de 60% dos municípios são abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas e 13% são abastecidos de forma mista.

Apesar de ser largamente utilizada no Brasil, Hirata et al. (2010) apontam que o conhecimento da quantidade e da qualidade da água subterrânea dos sistemas aquíferos brasileiros é bastante limitado em função da ausência ou precariedade de monitoramento. Mesmo em regiões onde as águas subterrâneas não são utilizadas como fonte de abastecimento ou para outros fins, elas possuem um papel importante no ciclo hidrológico. Em muitos locais elas garantem o fluxo permanente nos cursos d'água superficiais, na forma de vazões mínimas, durante os períodos de estiagem (FILHO et al., 2011). Os mesmos autores citam vários cuidados para o aproveitamento sustentável das águas subterrâneas, dando especial destaque para estudos hidrogeológicos e o monitoramento quantitativo e qualitativo dos aquíferos ao longo do tempo. As disponibilidades hídricas de um corpo aquífero podem ser descritas através de suas reservas permanentes e renováveis (ou reguladoras), sendo estas últimas continuamente repostas pelas recargas.

Os estudos de recarga aquífera são fundamentais para a determinação do volume de recursos hídricos subterrâneos anualmente renováveis (PARALTA et al., 2003), fato que faz com que sua estimativa seja indispensável à gestão das águas subterrâneas. Sua quantificação é considerada complexa, já que suas taxas variam amplamente no espaço e no tempo (PINTO et al., 2010).

A recarga é definida como sendo o fluxo descendente de água que definitivamente chega até a superfície freática, resultando em acréscimos volumétricos ao armazenamento (HEALY, 2010), definição esta muito parecida com a que foi desenvolvida por Meinzer (1923), Freeze e Cherry (1979), além de Lerner et al. (1990). Interessante observar que esta definição não contempla o fluxo de água tido como interaquífero, ou seja, entre dois sistemas distintos, com ou sem estratos confinantes entre eles. As recargas podem ser

diretas, geradas por mecanismos difusivos, distribuídas através de extensas áreas em resposta à precipitação, ou pontuais, devido ao movimento de água provinda de corpos de água superficiais adentrando o sistema aquífero (HEALY, 2010).

Existem vários métodos para a estimativa de recargas, sendo que sua escolha depende dos objetivos do estudo em questão, da escala espacial e temporal, das restrições orçamentárias e da disponibilidade de tempo para execução. Dentre o grupo dos métodos físicos na zona saturada, figuram aqueles baseados nas variações do nível d'água (VNA), os quais vêm sendo utilizados principalmente devido à facilidade do cômputo da recarga através das variações temporais ou padrões espaciais dos respectivos níveis (HEALY; COOK, 2002).

No Brasil, alguns autores já aplicaram o método VNA para estimar recarga em aquíferos. Baum et al. (2015) aplicaram o método utilizando os dados de flutuação de nível de treze poços, em área urbana do município de Frederico Westphalen/RS, encontrando a recarga direta correspondente à 13,74% da precipitação anual, durante um ano de estudo. Carvalho et al. (2014) aplicaram o método VNA em cinco poços de uma sub-bacia hidrográfica rural localizada no município de Viçosa (MG), encontrando recarga média anual dos poços correspondente à 17,4% da precipitação para o ano estudado.

O objetivo do presente estudo é estimar a recarga de unidades aquíferas não confinadas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG) na bacia do Ibicuí através do método VNA.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização e Caracterização Climática

A área deste estudo pertence à bacia hidrográfica do rio Ibicuí (U050, conforme DRH/SEMA), neste caso composta da bacia do seu principal afluente, o rio Santa Maria (U070, conforme DRH/SEMA). Ambas conformam a bacia do Uruguai 3, com área total

de 47.320 km², inserida na região hidrográfica do rio Uruguai (Figura 1).

O clima do Rio Grande do Sul é temperado do tipo subtropical, classificado como mesotérmico úmido (classificação de Köppen). Na região do estudo, a temperatura média anual situa-se entre 16 e 20 °C, e o clima é classificado como subtropical úmido sem estação seca, sendo a temperatura do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio variando entre 3 a 18 ° C (MOTA, 1951).

Os dados de precipitação mensal selecionados entre 1977 e 2006, obtidos do Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM/Serviço Geológico do Brasil, 2014), demonstram a sazonalidade das precipitações na região

(Figura 2). Segundo o gráfico, percebe-se que o mês mais chuvoso para este período foi abril, seguido pelos meses de outubro e novembro. Os meses mais secos concentram-se entre maio e setembro, também com uma queda de precipitação em dezembro.

Para a determinação da precipitação anual nesta região, selecionou-se os dados referentes ao somatório das precipitações mensais de sete estações pluviométricas situadas nas proximidades dos poços de monitoramento - PMs (Tabela 1 e Figura 3). A precipitação varia de 1400 mm a 1900 mm, apresentando valores mais elevados na porção norte, entre 1600 mm e 1800 mm, e entre 1400 mm e 1600 mm na porção sul da área.

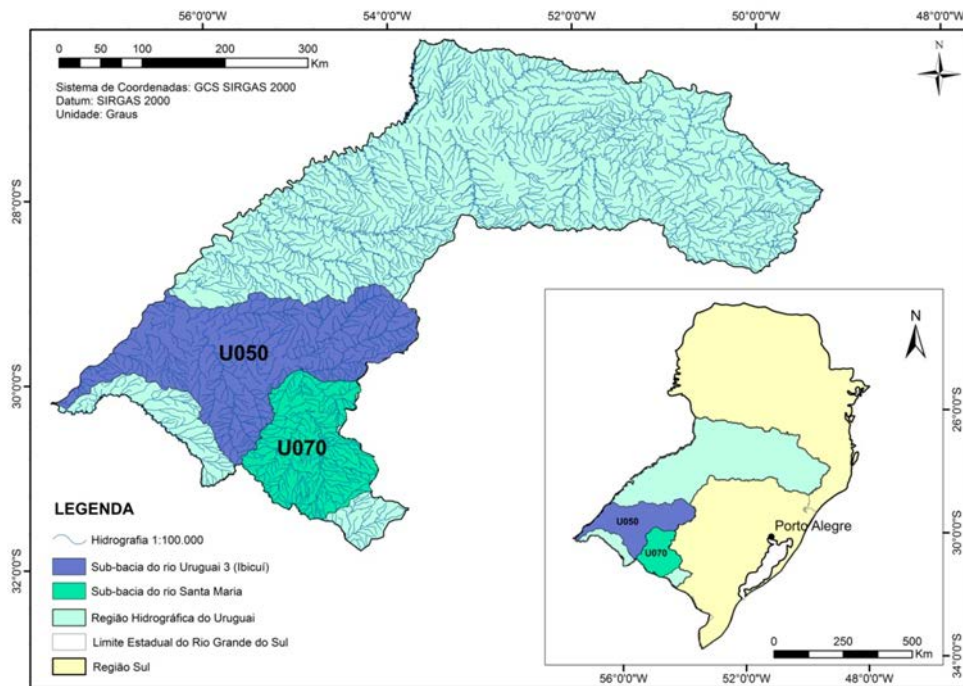


Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do rio Ibicuí

Fonte: Adaptado de ANA, FEPAM e CPRM (2014)

Figure 1 – Location of the Ibicuí hydrographic basin

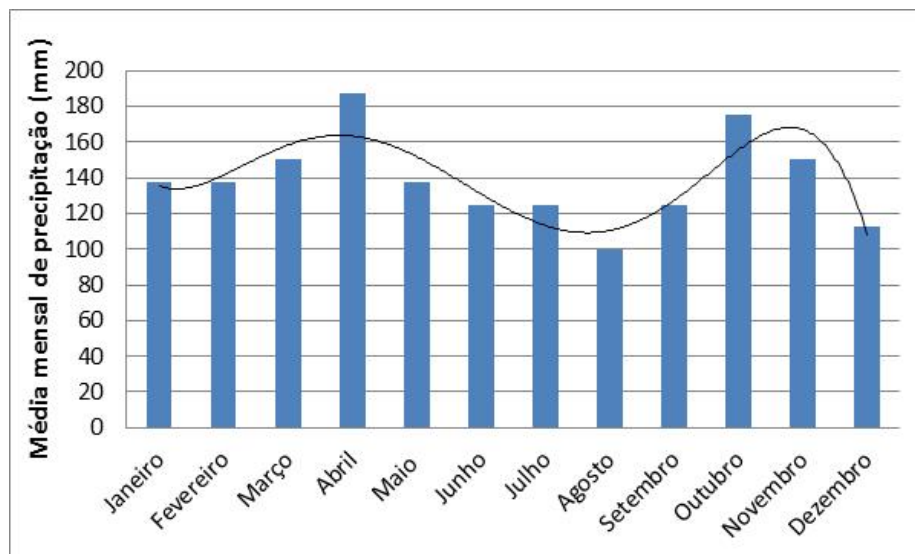


Figura 2 - Sazonalidade da precipitação na bacia do Ibicuí (1977 a 2006)

Fonte: Atlas Pluviométrico (CPRM, 2014)

Figure 2 – Precipitation seasonality in the Ibicuí basin (From 1977 to 2006)

Tabela 1 - Estações pluviométricas e poços de monitoramento dentro da área de estudo

Table 1 - Rain gauge and groundwater monitoring wells within the study area

Estação	Código	Latitude	Longitude	Poços de monitoramento
Cachoeira St. Cecília	02955002	-29,196	-55,475	Puitã
São João	02955017	-29,832	-55,343	Escola Agrícola
São Carlos	03055007	-30,204	-55,491	São Carlos
Santa Rita	03055005	-30,516	-55,127	Estância Santa Rita
BR-293	03055009	-30,792	-55,179	Torrão

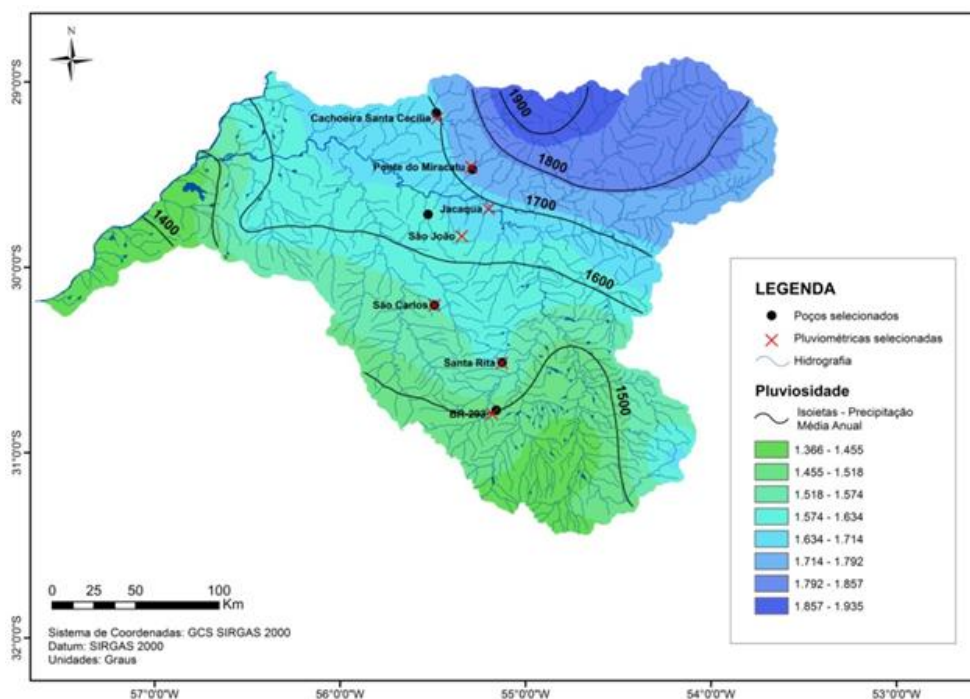


Figura 3 - Distribuição da precipitação na bacia do Ibicuí, isoietas de 1997 a 2006

Fonte: Adaptado de Atlas Pluviométrico, ANA e CPRM

Figure 3 – Precipitation distribution in the Ibicuí basin (isohyets from 1997 to 2006)

2.2 Caracterização Geológica e Pedológica

Segundo a OEA (2009), grande parte da bacia coincide com áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), sendo este associado ao conjunto de rochas mesozoicas formadas por sedimentos originados da acumulação mecânica de partículas detríticas da Bacia do Paraná (Brasil e Paraguai), Bacia Chacoparanaense (Argentina) e Bacia Norte (Uruguai). Neste estudo, os poços de monitoramento selecionados captam águas subterrâneas das Formações Botucatu, Guará, Sanga do Cabral e Pirambóia.

Segundo Machado (2005), a Formação Botucatu compreende todos os afloramentos contínuos de arenito ao longo do contato com o Grupo Rosário do Sul, estendendo-se abaixo dos derrames da Formação Serra Geral. A Formação Guará trata-se de um espesso pacote sedimentar fluvio-eólico que ocorre na base dos arenitos eólicos da Formação Botucatu, enquanto que a Formação Sanga do Cabral é composta principalmente por arenitos finos a muito finos de origem fluvial. A Formação Piramboia é caracterizada por arenitos médios a finos, siltosos de coloração branca, avermelhada e arroxeadas, com estratificações cruzadas acanaladas e planares, depositados em ambientes fluvio-lacustres e eólicos. Essa formação ocorre entre as rochas das Formações Botucatu e Rio do Rastro, e possui ampla distribuição nas áreas onde o SAG aflora.

De acordo com o mapa de solos do Brasil (IBGE, 2001), verifica-se que os PMs Puitã e Escola Agrícola localizam-se em unidades de Latossolo Vermelho (LV 26 para o primeiro, LV 25 para o segundo), os PMs Santa Rita e Torrão localizam-se nas unidades de Planossolo Háptico (SX16), e o PM São Carlos em unidades de Argissolo Vermelho (PV7). Os latossolos vermelhos correspondem a solos com grande profundidade, homogêneos, com boa drenagem e quase sempre com baixa fertilidade natural (IBGE, 2001). Conforme Sartori et al. (2005), estes solos têm taxa de infiltração média a alta, geralmente bem drenados. Os planossolos hápticos correspondem a solos minerais, imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, adensado e geralmente com acentuada concentração de argila e permeabilidade lenta ou muito lenta. Já os argissolos vermelhos têm como característica marcante o aumento de argila do horizonte superficial A para o subsuperficial B, sendo em geral pouco profundos. Segundo a classificação de Sartori et al. (2005), estes solos geralmente possuem baixas taxas de infiltração.

Segundo consta em DRH/SEMA (2011), as classes de uso e ocupação do solo com maior incidência espacial são agropecuária, campo, orizicultura e mata nativa (Tabela 2).

Tabela 2 - Classes de uso e ocupação do solo na bacia do rio Ibicuí

Table 2 - Land use classes in the Ibicuí basin

Classe de uso e cobertura	Área (ha)	Participação (%)
Agropecuária	1.613.600	45,9
Campo	1.339.600	38,1
Mata Nativa	227.100	6,5
Silvicultura	6.900	0,2
Orizicultura	234.500	6,7
Lamina da Água	69.800	2,0
Terras Úmidas/Áreas Alagáveis	17.100	0,5
Área Urbana	10.200	0,3
Total	3.518.800	100

Fonte: DRM/SEMA (2011)

2.3 Hidrogeologia na bacia do Ibicuí

As informações dos cinco PMs selecionados para o estudo foram obtidas junto ao Projeto RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas, da CPRM/Serviço Geológico do Brasil, conforme Tabela 3 e Figura 4. Os PMs que se localizam na unidade hidroestratigráfica Botucatu/Guará (bg) são Puitã, Escola Agrícola Federal e São Carlos. Conforme o Mapa Hidrogeológico do RS (CPRM, 2005), as litologias predominantes desta unidade são arenitos finos a médios com intercalações siltico-arenosas e capacidades específicas da ordem de 0,5 m³/h/m. Para os que possuíam ensaios de vazão, foi possível estimar capacidades específicas de 1,115 m³/h/m para o PM São Carlos e 2,53 m³/h/m para o PM Puitã. Esses dados também foram utilizados para cálculo dos parâmetros de transmis-

sividade (T) e condutividade hidráulica (K) da referida unidade, sendo que os valores encontrados foram 28,56 a 40,8 m²/dia para T e 0,583 a 0,828 m/dia para a K. Ressalta-se que os referidos ensaios tiveram duração entre 6 a 12 horas.

Os PMs que se localizam na unidade hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Piramboia (SP) são Estância Santa Rita e Assentamento Torrão. Essa unidade é caracterizada por camadas siltico-arenosas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos com cimento calcífero e capacidades específicas variando em geral entre 0,5 e 1,5 m³/h/m (CPRM, 2005). Para essa unidade somente o PM Estância Santa Rita possuía dados de ensaio de vazão, cuja análise permitiu estimar valor de T de 4,254 m²/dia e K igual a 0,164 m/dia.

Os perfis geológicos dos referidos PMs são apresentados nas Figuras 5 e 6.

Tabela 3 - Características dos poços de monitoramento (PMs) do estudo
Table 3 - Characteristics of the monitoring wells in the study area

Localidade	U.H. ¹	Latitude (g°m's")	Longitude (g°m's")	Município	Data ²	N° SIAGAS	NE (m) ³	Prof. (m) ⁴	Cota (m) ⁵
Assentamento Torrão	Sanga do Cabral - Piramboia	- 30°46'15"	-55°9'25"	Livramento	28/09/2010	4300020126	18,6	75	186,76
Estância Santa Rita	Sanga do Cabral - Piramboia	- 30°30'48"	-55°7'33"	Livramento	28/09/2010	4300020123	37,6	98	193,22
São Carlos	Botucatu-Guará	- 30°12'16"	- 55°29'27"	Rosário do sul	14/10/2010	4300020121	4,8	65	162,34
Escola Agrícola Federal	Botucatu-Guará	- 29°42'52"	- 55°31'33"	Alegrete	09/08/2011	4300020534	6	56	117,10
Puitã	Botucatu-Guará	-29°10'1"	- 55°28'52"	Itaqui	07/10/2010	4300020119	4	40	107,06

Fonte: SIAGAS e CPRM. Mapa Hidrogeológico do RS

Legenda: UH¹ - Unidades Hidroestratigráficas; Data² - Data de instalação; NE(m)³- Nível estático do PM; Prof(m)⁴ - Profundidade do PM; Cota(m)⁵ - Cota topográfica do PM.

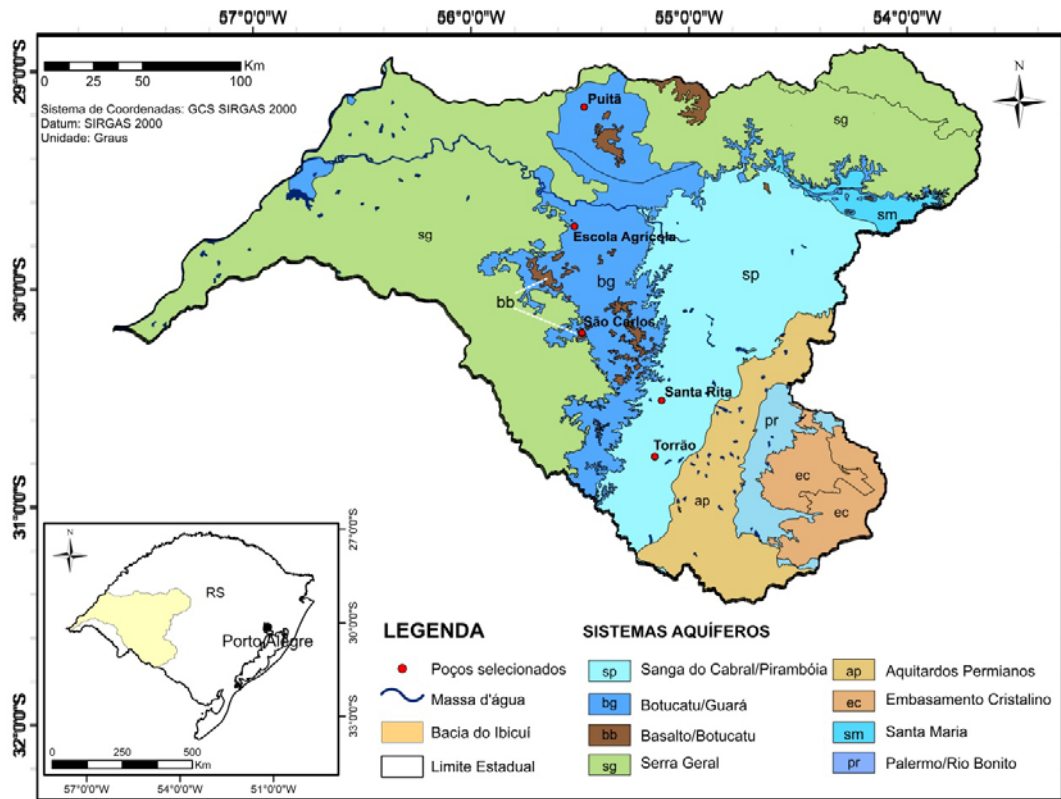


Figura 4 - Localização dos poços de monitoramento dentro da bacia do Ibicuí
Fonte: Adaptado de Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005)
Figure 4 – Location of the monitoring wells within the Ibicuí basin

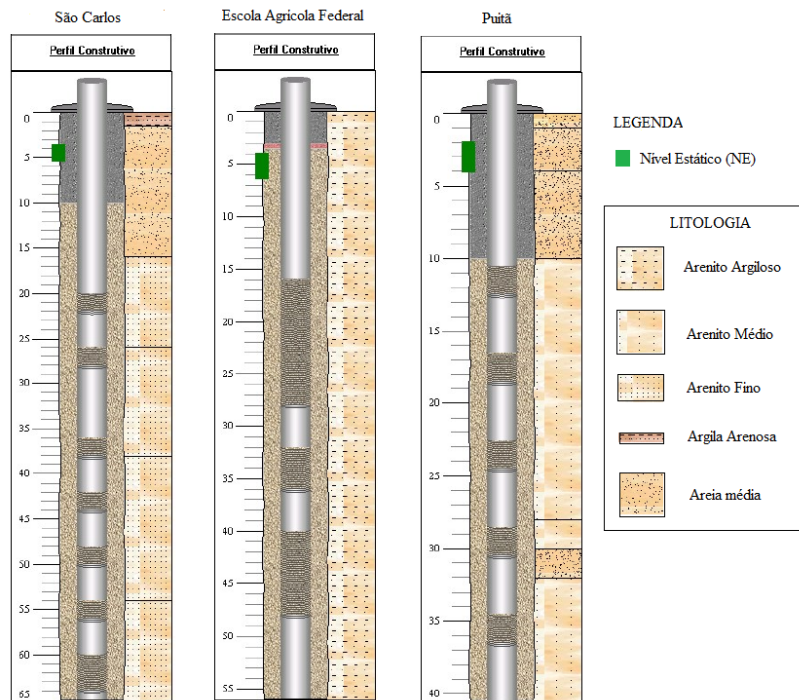


Figura 5 - Perfil geológico dos poços de monitoramento que se localizam na unidade Hidroestratigráfica Botucatu/Guará
Figure 5 - Geological profiles of the monitoring wells at the Botucatu/Guará hydrostratigraphic unit

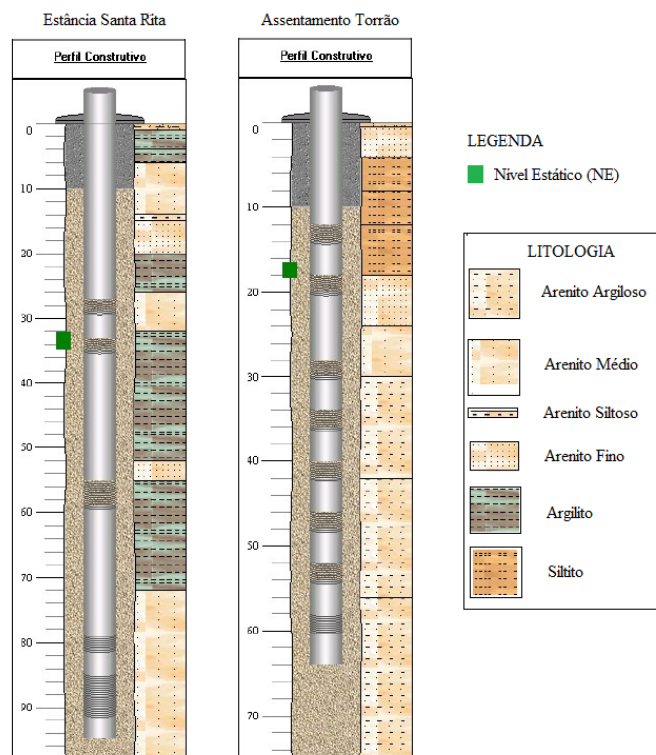


Figura 6 - Perfil geológico dos poços de monitoramento que se localizam na unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Pirambóia
Figure 6 – Geological profiles of the monitoring wells at the Sanga do Cabral/Pirambóia hydrostratigraphic unit

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Método VNA

Os dados de nível freático foram obtidos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) mantido pela CPRM/Serviço Geológico do Brasil. Foram selecionados os poços da rede RIMAS dedicados especificamente ao monitoramento, que captam águas subterrâneas das unidades hidroestratigráficas não confinadas pertencentes ao SAG, e com no mínimo 24 meses de observação diária de nível d'água.

O método VNA utiliza flutuações de níveis de água subterrânea ao longo do tempo para estimar recarga em aquíferos livres (HEALY, 2010). Este método é baseado na premissa de que as elevações nos níveis de água subterrânea ocorrem devido à recarga aquífera. Healy e Cook (2002) apresentam a Equação (1):

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que:

R = recarga (mm);

S_y = rendimento específico;

h = altura do nível d'água (mm);

Δt = período escolhido para estimativa (meses).

A equação (1) assume que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todos os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo (evapotranspiração na zona saturada, fluxo de base, entrada e saída de fluxo sub-superficial) são nulos durante o período de recarga. Esta hipótese é válida desde que o intervalo de tempo para o qual o método é aplicado contemple a distribuição da água, recém-chegada por intermédio de evento de recarga, e todos os demais componentes do balanço hídrico, acima citados.

Para determinar a recarga, Δh é considerado igual à diferença entre o pico e

o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico (Figura 7). A curva de recessão antecedente é o traço que a hidrógrafa do poço teria seguido na ausência de elevação do nível d'água (HEALY, 2002; HEALY, 2010). Segundo os mesmos autores, este traço pode ser feito manualmente, técnica que acomoda intuição hidrológica. Já o rendimento específico S_y de um solo (ou rocha) pode ser definido como a proporção

do volume d'água que, depois de saturado, é drenado por gravidade com relação ao seu próprio volume (MAZIERO; WENDLAND, 2005).

Neste estudo, o valor para o parâmetro S_y foi escolhido como sendo um valor médio (16%) dentre outros valores determinados nas mesmas unidades hidroestratigráficas identificadas na literatura (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de rendimento específico para o Sistema Aquífero Guarani

Table 4 - Values of specific yield for the GAS (Guarani Aquifer System)

Autor	Local do estudo	Faixa de valores ¹	Valor médio
Rocha (1997)	SAG - área total	15% - 20%	17,5%
OEA (2009)	SAG indistinto e regional	13 % - 17%	15%
Martelli (2012)	SAG na cidade de Cacequi (RS)	15% - 16%	15,5%

¹Valores mínimos e máximos

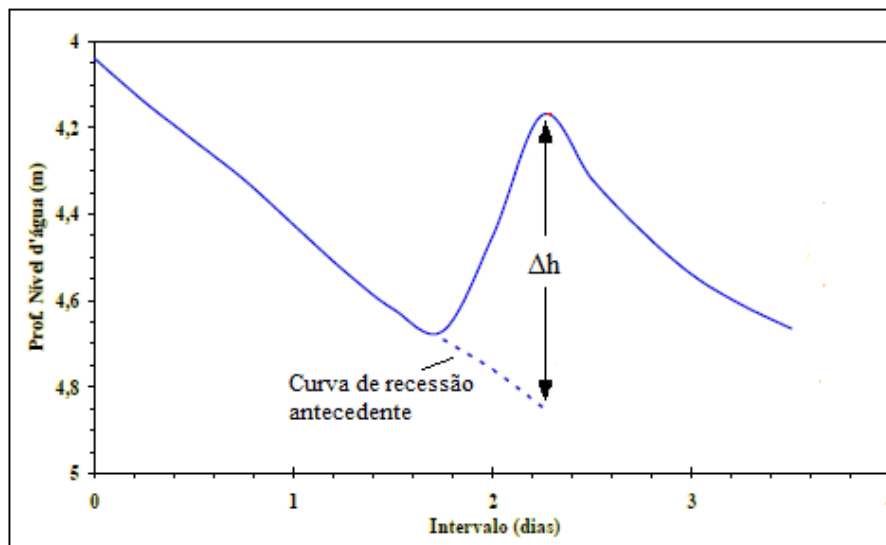


Figura 7 - Exemplo hipotético da elevação do nível de água do poço em resposta à precipitação

Fonte - Adaptado de Maziero e Wendland (2005)

Figure 7 - Hypothetical example for the groundwater level rise in response to precipitation

3.2 Aplicação do método VNA

Os dados diários foram obtidos a partir da mediana dos dados horários, os quais são registrados e armazenados por meio de transdutores de pressão providos de datalogger. Como os dados diários não apresentaram uma variação percentual significativa decidiu-se adotar a média mensal para avaliar a recarga durante um período mais longo. Portanto, para cada um dos meses

de monitoramento foi calculada a média aritmética, descartando-se meses que não apresentassem no mínimo 15 dias consecutivos de dados diários. O Δh foi determinado aplicando-se a metodologia apresentada por Healy e Cook (2002).

Os dados mensais de nível de água foram plotados em um gráfico de dispersão para determinação manual do traço da hidrógrafa de cada poço (Figura 8).

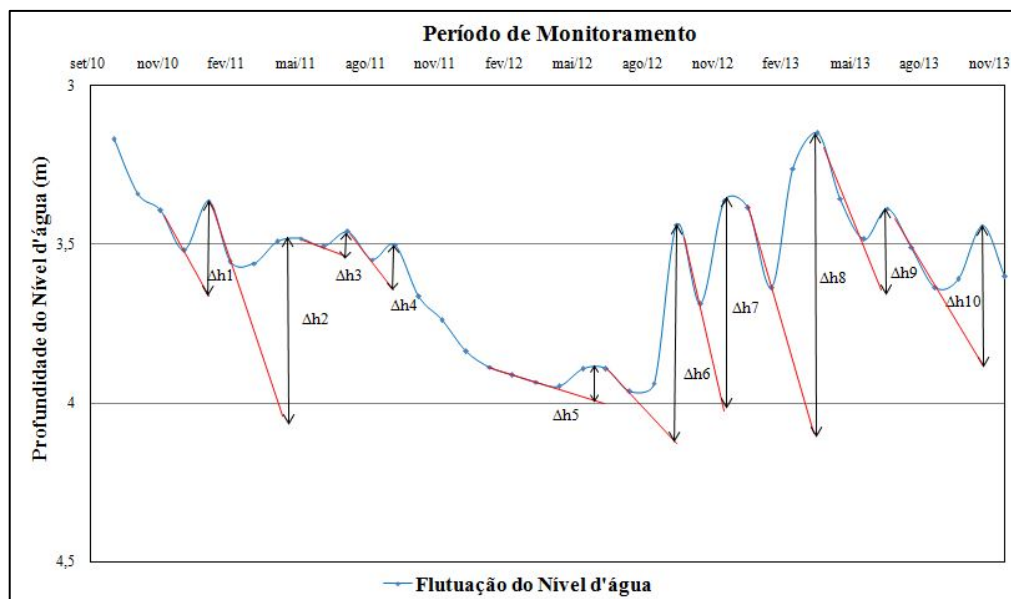


Figura 8 - Aplicação do método VNA (Exemplo para o poço de monitoramento Puitã)

Figure 8 - Application of the WTF method at the Puitã monitoring well

A soma de todas as variações do nível d'água, multiplicadas individualmente pelo S_y escolhido, resultou no total de recarga para cada PM durante o período considerado para análise, variável para cada PM. Dividindo-se este valor de recarga (mm) pela precipitação (mm) no mesmo período, obteve-se o percentual de precipitação que pode ser considerada recarga para cada um dos PMs.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variações do nível d'água e a precipitação, no período considerado para cada PM, são visíveis nos gráficos 9 ao 13. A Tabela 5 resume os valores de recarga encontrados para cada PM e também os valores de recarga em relação à precipitação.

Na Figura 14 tem-se a distribuição destes valores na bacia do rio Ibicuí.

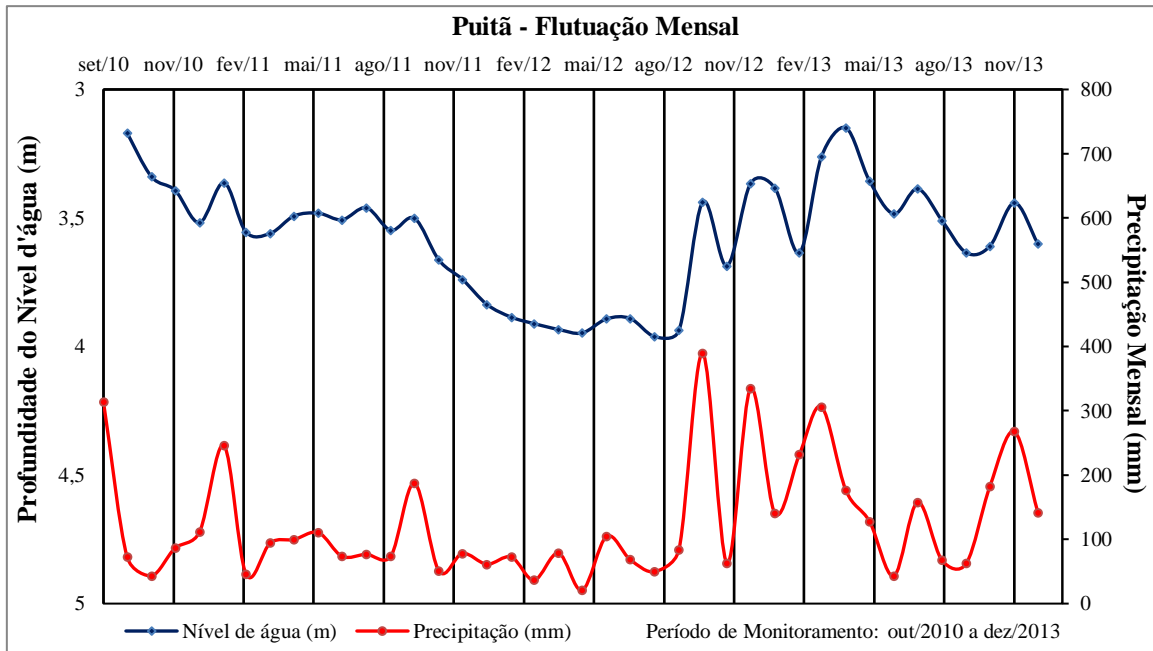


Figura 9 - Gráfico do poço Puitã x precipitação da estação Cachoeira Santa Cecília

Figure 9 - Groundwater level at the PM Puitã x precipitation at the rain gauge Cachoeira Santa Cecília

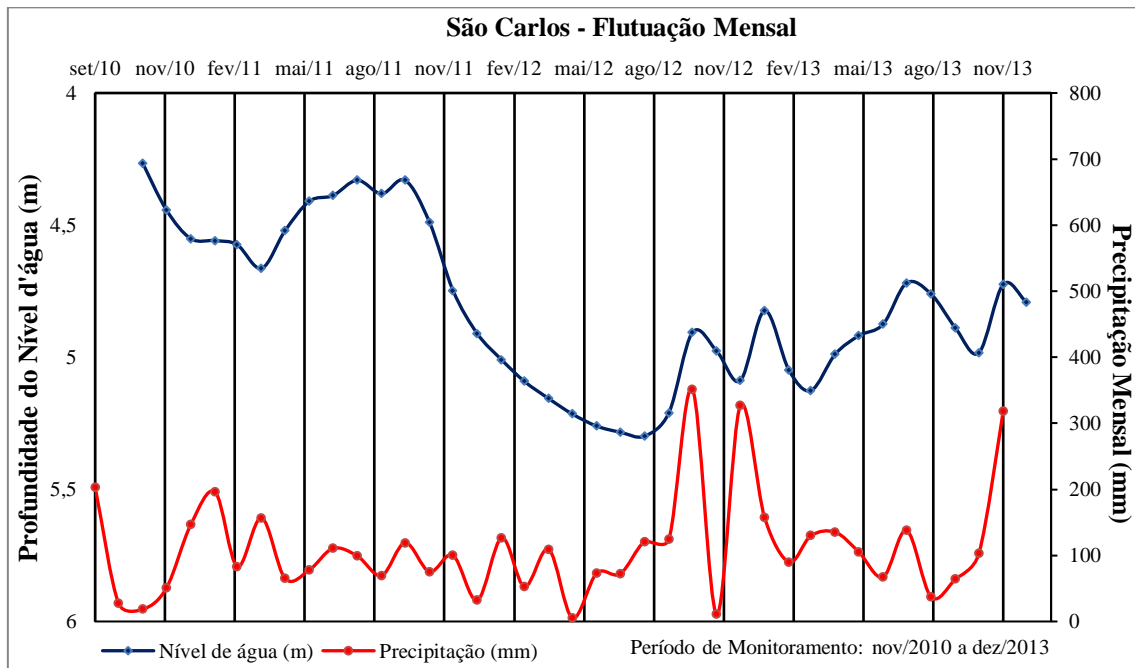


Figura 10 - Gráfico do PM São Carlos x precipitação da estação São Carlos

Figure 10 - Groundwater level at the PM São Carlos x precipitation at the rain gauge São Carlos

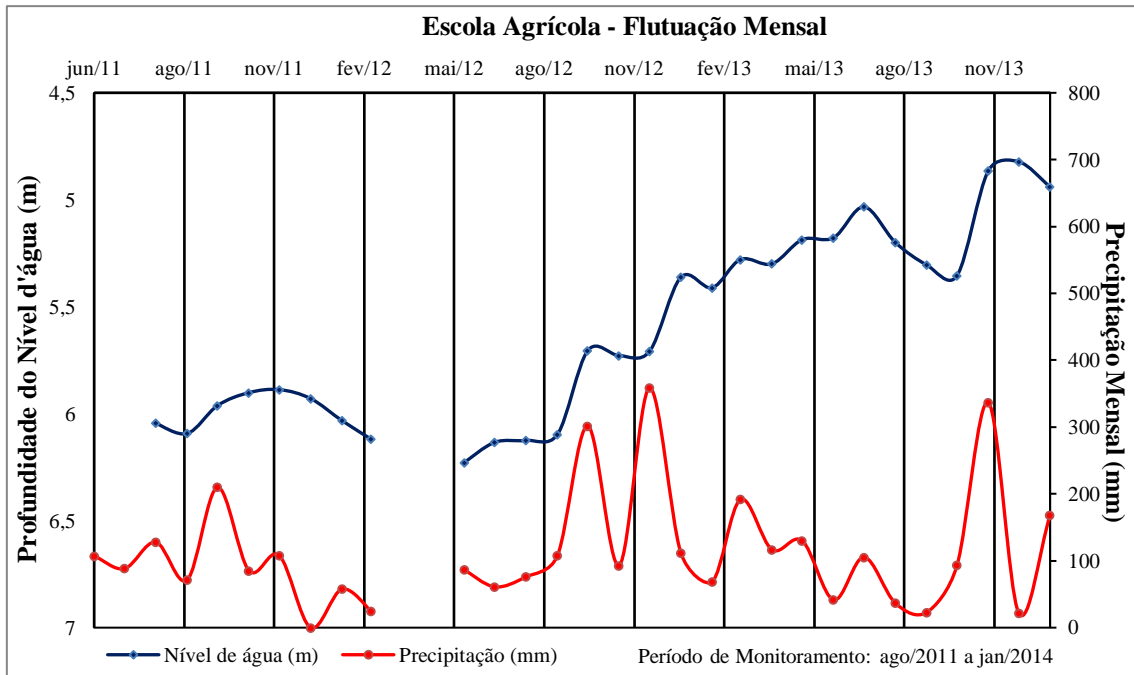


Figura 11 - Gráfico do poço Escola Agrícola x precipitação da estação São João

Figure 11 – Groundwater level at the PM Escola Agrícola x precipitation at the rain gauge São João

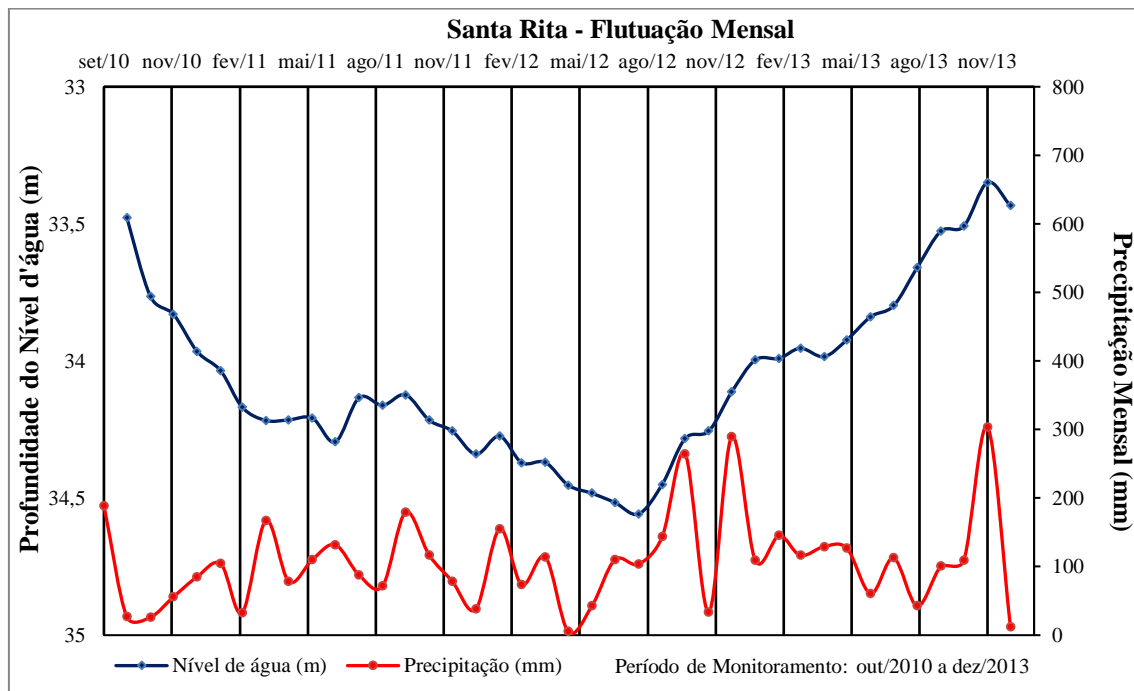


Figura 12 - Gráfico do poço Estância Santa Rita x precipitação da estação Santa Rita

Figure 12 – Groundwater level at the PM Santa Rita x precipitation at the rain gauge Santa Rita

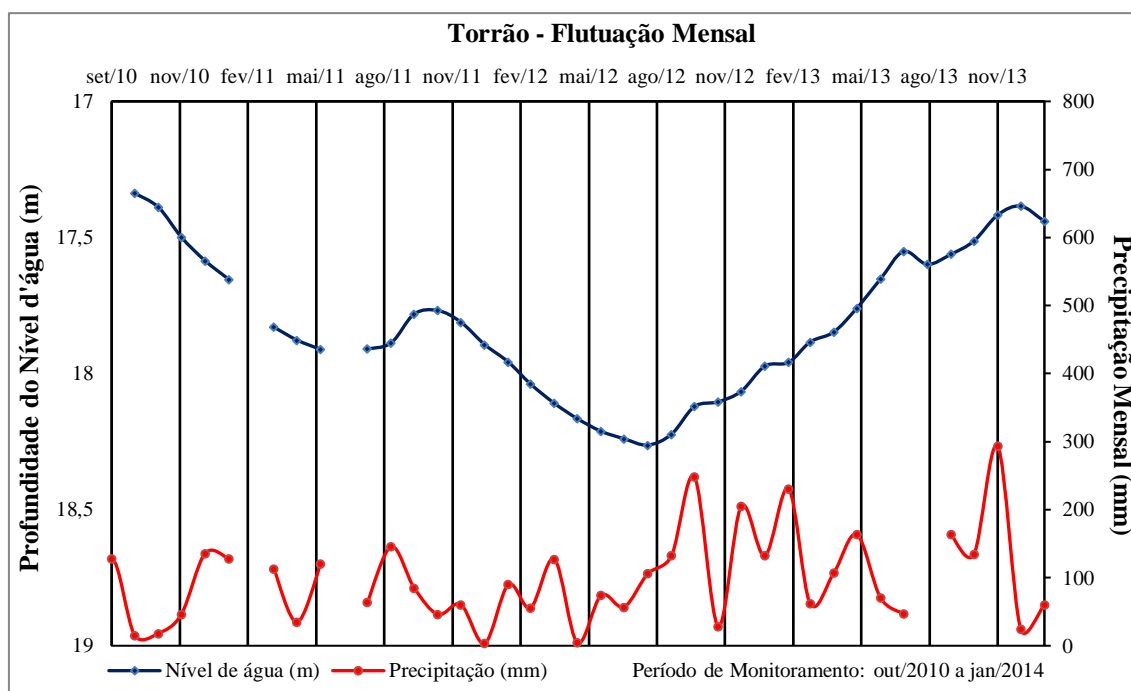


Figura 13 - Gráfico do PM Torrão x precipitação da estação BR-293

Figure 13 – Groundwater level at the PM Torrão x precipitation at the rain gauge BR-293

Tabela 5 - Valores de recarga encontrados para cada PM

Table 5 - Recharge estimation values for the monitoring wells

PMs	Meses de Monitoramento	Recarga anual (mm)			Recarga (mm)	Precipitação (mm)	Recarga/ Precipitação (%)
		2011	2012	2013			
Puitã	39	169,9	244,2	316,6	730,7	4719,1	15,48
São Carlos	38	130,8	107,4	311,1	549,3	4152,0	13,23
Escola Agrícola	28	65,8	173,4	315,4	554,6	3214,7	17,25
Santa Rita	39	77,9	65,9	325,0	468,8	4092,6	11,45
Torrão	38	95,7	246	75,3	417,0	3572,9	11,67
						Média=	13,82

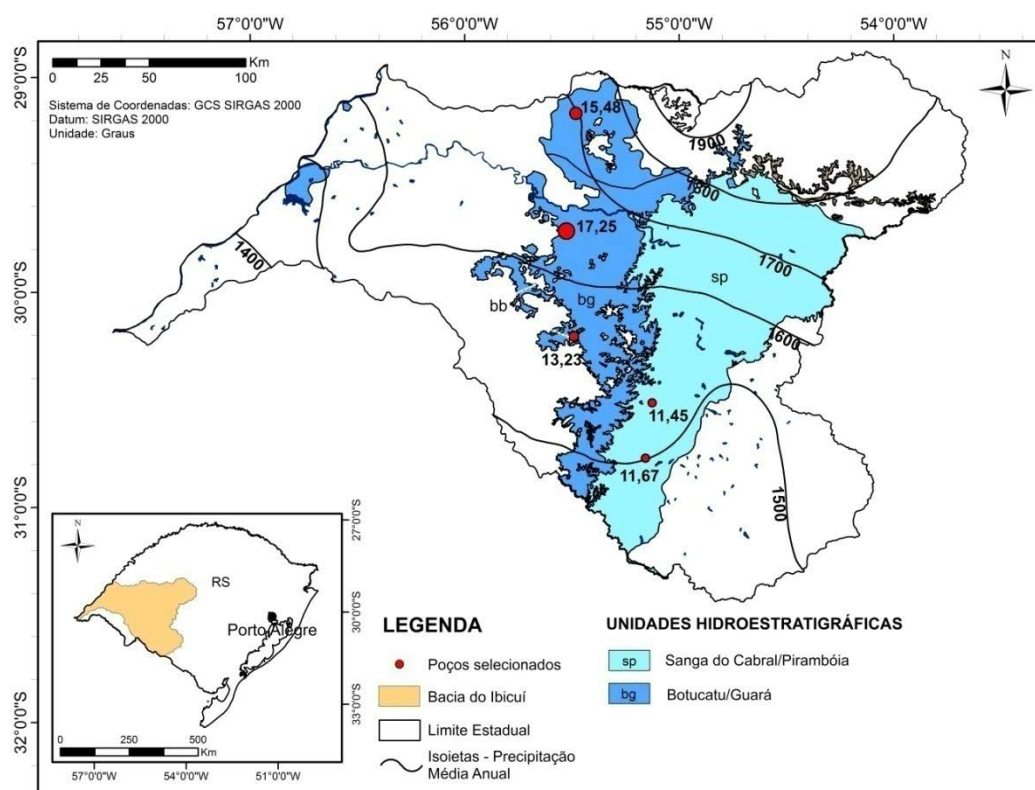


Figura 14 - Recarga em relação à precipitação para cinco PMs

Adaptado de Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005)

Figure 14 – Recharge values in relation to precipitation amounts

Os PMs apresentam elevação de nível d'água em praticamente todos os eventos de precipitação mais intensa (acima de 100 mm). De uma maneira geral, os eventos com a maior precipitação e consequente subida no nível de água ocorreram nos meses de outubro e novembro, sendo o ano de 2013 mais chuvoso que os anteriores. Os valores de recarga estimados para cada PM variaram entre 417,0 mm a 730,7 mm para os intervalos de meses específicos. Através da Tabela 5 é possível visualizar que as maiores contribuições de recarga ocorreram de fato no ano de 2013.

Os valores de recarga expressos como parcela da precipitação variaram entre 11% e 18%, com média de 13,82%. Ao sul da bacia, na Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Pirambóia, os PMs Santa Rita e Torrão apresentaram valores similares de recarga, enquanto que os PMs São Carlos, Escola Agrícola e Puitã, localizados na Unidade Hidroestratigráfica Botucatu/Guará, apresentaram valores mais elevados.

Além do gradiente de chuva existente na bacia, outras variáveis físicas pedológicas e hidrogeológicas explicam as variações de recarga que foram estimadas. Os PMs Escola Agrícola e Puitã, cujas variações de nível forneceram as maiores recargas, coincidem com áreas de latossolo de boa drenagem e alta taxa de infiltração. Tanto estes PMs quanto o PM São Carlos situam-se na unidade hidroestratigráfica Botucatu/Guará, de alta porosidade e permeabilidade, com valores de transmissividade e condutividade hidráulica mais elevada. Por outro lado, os PMs Santa Rita e Torrão incidem em áreas de solo do tipo argissolo, de menor taxa de infiltração e substrato geológico caracterizado por arenitos mais finos com intercalações pelíticas (unidade hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Pirambóia). Em função dessas características há uma diminuição da porosidade e permeabilidade, o que explica os menores valores de recarga encontrados para os poços localizados nessas unidades. Os valores de transmissividade e condutividade

hidráulica encontrados para os poços que captam água da unidade de Sanga do Cabral/Pirambóia também são inferiores aos valores encontrados nos outros PMs.

Os valores encontrados neste estudo apresentam correlação com resultados obtidos por Mattiuzi (2013), trabalho baseado na estimativa de recargas na bacia hidrográfica do rio Ibicui (RS) através do método de separação de escoamento de base, utilizando a metodologia aplicada em Collischonn e Fan (2012). Os valores encontrados de porcentagem de recarga com relação à precipitação anual foram de 11% a 21%, sendo que em áreas de drenagem com predominância da unidade hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Pirambóia os valores foram aproximados, com média de 11% da recarga em relação à precipitação.

Martelli (2012) estimou a recarga efetiva (ou direta), classificando como aquela que abastece de água o aquífero pela percolação vertical direta que atravessa toda a zona não-saturada. Ele aplicou o método VNA em área de afloramento do SAG em Cacequi (RS) e encontrou resultados de

mesma ordem de magnitude: (i) em área sem uso de água subterrânea as recargas efetivas equivalem a 11,5 % e 13,9 % da precipitação (1572 mm) ocorrida durante o período hidrológico de 386 dias e, (ii) em áreas com exploração subterrânea para abastecimento público, as recargas efetivas representaram cerca de 25% da precipitação (778,1 mm) ocorrida durante um período hidrológico de 243 dias.

Apesar dos valores coerentes encontrados no presente estudo, é preciso considerar variáveis, às quais o cálculo da recarga pelo método VNA é mais sensível. Tanto variações na função de ajuste do prolongamento da hidrógrafa do poço como o parâmetro rendimento específico exercem expressiva influência nos resultados finais de recarga. Exemplo deste fato é fornecido pela Tabela 6, na qual se reproduz uma análise de sensibilidade para um mesmo PM (Puitã) com diferentes valores de rendimento específico. Ressalta-se que os mesmos valores encontrados podem ser aplicados para os outros PMs, pois trata-se de uma relação proporcional.

Tabela 6 - Variação da recarga para diferentes rendimentos específicos

Table 6 - Recharge estimation values for different specific yields

Variáveis	Sy = 0,14	Sy = 0,15	Sy = 0,16	Sy = 0,17	Sy = 0,18
Recarga (mm)	639,4	685,1	730,7	776,4	822,1
Recarga/precipitação (%)	13,55	14,52	15,48	16,45	17,42
Variação percentual	-12%	-6,2%	-	6,2%	12%

Sendo assim, pequenas variações de rendimento específico geram variações percentuais da ordem de +/-12% nos valores de recarga estimados. Salienta-se a importância da determinação deste parâmetro em cada porção de aquífero monitorado.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação do método VNA demonstrou a facilidade em se estimar recargas quando há disponibilidade de dados de nível d'água ao longo do tempo. As variações em magnitude dos valores de recarga encontrados são coerentes com as

características geológicas, pedológicas e hidrogeológicas do entorno dos poços de monitoramento.

O grande desafio que se estabelece diz respeito à regionalização destes dados de caráter pontual para o conjunto de áreas com mesmas características físicas dentro de uma bacia, e, finalmente, para a totalidade da área da bacia. Vale lembrar que, nestes casos, os valores de recarga obtidos servem ao propósito de estimar as reservas reguladoras (renováveis) de uma determinada região, informação esta indispensável para sua gestão.

Nenhum método isolado satisfaz a todos objetivos e, além disto, os dados de entrada disponíveis impõem restrições e desafios adicionais. Recomenda-se a utilização de outros métodos para a estimação das recargas nesta bacia e uma análise comparativa dos resultados.

AGRADECIMENTOS

À Superintendência Regional de Porto Alegre da CPRM e à equipe da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) pela cessão dos dados para uso acadêmico.

REFERÊNCIAS

ANA (Agência Nacional das Águas). **Atlas Brasil**. Abastecimento urbano de água. 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=3>>. Acesso em 04 jul. 2016.

BAUM, C. A.; MANCUSO, M. A.; FRITZEN, R. R.; FORTES, P. R. Aplicação do método WTF para cálculo da recarga de aquífero freático em área urbana. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15., 2015. **Anais...** Outubro de 2015, Bento Gonçalves.

CARVALHO, V. E. C. C. REZENDE, K. S.; PAES, B. S. T. P.; BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G. Estimativa de recarga aquífera em uma sub-bacia hidrográfica rural através do método de variação do nível d'água (VNA). **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 271-280., jan./mar. 2014.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em 20 abr. 2016.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em 20 ago. 2016.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. Escala 1:750.000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_rio_grande_sul.pdf>. Acesso em 10 mai. 2016.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, 2009**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=35&infoid=1463>>. Acesso em 25 mar. 2016.

DRH/SEMA. **Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí**. Abril de 2011. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/upload/Relatorio_Diagnostico_e_%20Prognostico.pdf>. Acesso em 10 jul. 2016.

FILHO, J. L. A.; BARBOSA, M. C.; AZEVENDO, S. G.; CARVALHO, A. M. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p. 53-61, nov. 2011. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rh/pdf/rh32_n2-5.pdf>. Acesso em 25 jun 2016.

FREEZZE, A.; CHERRY, J. **Groundwater**. Disponível em: <<http://hydrogeologistswithoutborders.org/worpress/textbook-project/>>. Acesso em 15 jan 2017.

- HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p 91-109. February 2002. Springer-Verlag, Berlin. Disponível em: <http://www.hydrosys.net/myplus/bbs/table/hydrosys_doc/upload/Using%20groundwater%20levels%20to%20estimate%20recharge.pdf>. Acesso em 20 mai. 2016.
- HEALY, R.W. **Estimating groundwater recharge**. Cambrigde, 2010.
- HIRATA, R. C. A.; Zoby, J. L. G.; Oliveira, F. R. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, Tundisi, Scheuenstuhl (orgs.). **Águas do Brasil: análises estratégicas**. Cap. IX, 2010, p. 149-161. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/downloads/C3%A1gua%20subterr%C3%A2nea%20-%20reserva%20estrat%C3%A9gica%20ou%20emergencial.pdf>>. Acesso em 10 jun 2016.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Solos do Brasil**. Escala 1:5.000.000. 2001. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/brasil/solos.pdf>. Acesso em 20 ago. 2016.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia** – 2. ed. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>>. Acesso em 20 ago. 2016.
- LERNER, D.N, ISSAR, A.S. & SIMMERS, I. 1990. **Groundwater recharge**: a guide to understanding and estimating natural recharge. International Contributions to Hydrogeology, 8, Heise, Germany.
- LUCAS, M. C, GUARABARA, R. C. e WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani; Estimativa de recarga subterrânea. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 311-323, 2012.
- MACHADO, J. L. F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. 237 f. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Sedimentar. - São Leopoldo, 2005. ilust. Tese – Doutorado – Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/media/aquifero.pdf>>. Acesso em 22 jul. 2016.
- MARTELLI, G. V. **Monitoramento de flutuação de níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do sistema aquífero guarani em Cacequi**. Dissertação (Mestrado). Santa Maria, 2012.
- MATTIUZI, C. D. P. **Estimativa de recarga a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do rio Ibicuí/RS**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental). Porto Alegre, dezembro de 2013.
- MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, II SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE. 2005. **Anais...** Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23197>> Acesso em 5 abr. 2016.
- MEINZER, O.E. **The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principle**. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/wsp/0489/report.pdf>> Acesso em 10 jan 2017.
- MOTA, F. S. Estudos do Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo o sistema de Köppen. **Revista Brasileira de Geografia**, 12, p. 275 – 284, 1951.
- NETO, D. C., KIANG, C.H., Aplicação do Método de Flutuação de Nível da Água para a Estimativa de Recarga – Exemplo do

- Aquífero Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, v. 22, n. 1, p.39-48, 2008.
- OEA (Organização dos Estados Americanos). **Aquífero Guarani**: programa estratégico de ação = Aquífero Guarani: programa estatégico de acción.– Edição bilíngüe.– Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai: Organização dos Estados Americanos (OEA), janeiro 2009. 424 p. ISBN: 978-85-98276-07-6. Disponível em:
<http://www2.ana.gov.br/Paginas/projetos/G_EFAquiferoGuarani.aspx>. Acesso em 13 mar. 2016.
- PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W.; RIBEIRO, L. F. Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, Cabo Verde, 6., 2003. Disponível em:
<http://www.itc.nl/library/papers_2003/art_p_roc/lubczynski_ava.pdf>. Acesso em 12 jun. 2016.
- PINTO, E. J. de A.; LIMA, J. do. E. S.; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J. da.; DANTAS, C. D. de. O.; CANDIDO, M. de. O.; PALMIER, L. R.; MONTE-MOR, R. C. de. A. Estimativa da recarga natural do aquífero livre de uma sub-bacia da bacia representativa de Juatuba (MG) aplicado o método da variação dos níveis d'água (VNA). In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS. **Anais...** São Luís – MA, 2010. Disponível em:
<http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_PAP004229.pdf>. Acesso em 19 jun. 2016.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G.. **Águas doces do Brasil**: Capital Ecológico, Uso e Conservação. São Paulo. Editora Escrituras, 1999.
- ROCHA, G. O grande manancial do Cone Sul. **Estudos Avançados**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. v.30, p. 191-213.
- SARTORI, A.; NETO, F.L.; GENOVEZ, A.M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos - Parte 1: Classificação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005.
- SIMIONI, J. P. D.; ROVANI, F. F. M.; IENSSE, A. C.; WOLLMANN, C. A. Caracterização da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, RS. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 28, p. 112-133, 2014. Disponível em:
<<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/90008>>. Acesso em 25 jul. 2016.
- VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo, v. 19, n. 1, p. 83-102, jan./mar. 2016. Disponível em:
<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00085.pdf>. Acesso em 15 jul. 2016.