



RECARGA DO TIPO LOCALIZADA EM REGIÃO SEMIÁRIDA: ESTUDO DE CASO EM DOLINAS DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE, MINAS GERAIS

*LOCALIZED RECHARGE IN SEMI-ARID REGION: A CASE STUDY OF SINKHOLES IN THE VERDE GRANDE RIVER BASIN, MINAS GERAIS – BRAZIL*

Letícia Teixeira Palla Braga<sup>1</sup>; Leila Nunes Menegasse Velásquez<sup>1</sup>; Peter Marshall Fleming<sup>2</sup>; Paulo César Horta Rodrigues<sup>2</sup>

Artigo recebido em: 13/06/2014 e aceito para publicação em: 27/05/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i2.27924>

**Resumo:** A recarga localizada a partir de dolinas é muito importante no ambiente cárstico e especialmente em regiões áridas e semiáridas onde assume importância na recarga de aquíferos cárstico-fissurais, uma vez que essas estruturas geomorfológicas favorecem a concentração de água de escoamento superficial em ambiente com escassez hídrica. A área de estudos, sub-bacias do Rio Verde Grande, nos municípios de Verdelândia e Varzelândia, insere-se no clima semiárido (Pluviometria média regional = 790 mm), sendo fortemente marcada pela presença de dolinas instaladas na sequência carbonática-pelítica neoproterozóica do Grupo Bambuí. A fim de compreender os processos desse tipo de recarga e quantificá-la na área de estudo, selecionaram-se duas dolinas a partir da identificação automatizada em ArcGis, nas quais procedeu-se ao seguinte roteiro metodológico: caracterização textural do solo; ensaios de infiltração in loco do solo; ensaios de permeabilidade do aquífero/aquíclodo no fundo da dolina; monitoramentos automatizados da pluviometria e do nível d'água subterrânea; balanço hídrico e estimativa da recarga pelos métodos balanço hídrico e pelo método da variação do nível d'água. Os resultados apontaram valores de recarga pontuais entre 7,8% e 19,5% da precipitação permitindo destacar a importância de se preservar essas feições na região.

**Palavras-chaves:** Dolinas. Recarga localizada. Semiárido. Aquífero cárstico. Balanço hídrico.

**Abstract:** Localized recharge from sinkholes is very important in karst environment and especially in arid and semiarid regions, where it contributes to the recharge on karst fissured aquifers because these geomorphic structures favor the concentration of water runoff in areas with shortage of water. The study area is located in sub-basins of the Rio Verde Grande, in the Verdelândia and Varzelândia cities and it is part of the semi-arid climate (average regional rainfall = 790 mm), and is strongly marked by the presence of sinkholes in Neoproterozoic pelitic-carbonate of karst Bambuí Group. To understand the processes of this kind of recharge and quantify it in the study area, we used the automated identification in ArcGIS to select two sinkholes and the following methodological procedure was adopted: soil texture characterization; soil infiltration tests; permeability tests of aquitard/aquiclude from the bottom of the sinkhole; automated monitoring of rainfall and underground water level; hydric balance, estimated with the hydric balance and water level variation methods. The results showed local recharge values between 7,8% and 19,5% of the precipitation, demonstrating the importance of preserving these features in the region.

**Keywords:** Sinkholes. Recharge localized. Semiarid. Karst aquifer. Hydric balance.

## 1 INTRODUÇÃO

Quantificar a taxa de recarga em regiões áridas e semiáridas é fundamental para uma gestão eficiente dos recursos de águas

subterrâneas (SIMMERS *et al.*, 1997). Nas regiões cársticas sob esse contexto climático, a recarga aquífera do tipo localizada ganha real importância, dadas as significativas variações espacial e temporal da precipitação e das pe-

<sup>1</sup> Mestrandas na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG. ([letsteixeira@gmail.com](mailto:letsteixeira@gmail.com) [menegase@yahoo.com.br](mailto:menegase@yahoo.com.br))

<sup>2</sup> Pesquisadores no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Divisão de Ciência e Tecnologia, Supervisão de Meio Ambiente ([pmfleming@gmail.com](mailto:pmfleming@gmail.com) , [pchr@cdtn.br](mailto:pchr@cdtn.br))

culiaridades das feições de absorção (dolinas, sumidouros, fraturas), as quais controlam as condições de infiltração. Assim, tais características demandam uma investigação em escala de detalhe dos sistemas exo e endocárstico. No exocarste dá-se ênfase ao tipo de feição geomorfológica, à topografia, ao solo e ao uso e ocupação do terreno, enquanto no endocarste o estudo é focado nas cavidades do interior do aquífero.

A baixa pluviosidade e longos períodos de estiagem da região Norte de Minas, conjugada com temperatura e insolação elevadas, contribuem para uma condição de *déficit* hídrico significativo (SILVA, *et al.*, 2008). Velásquez *et al.* (2009) monitoraram seis infiltrômetros por 24 meses instalados em zonas de divisores hidrográficos de relevo aplainado do município de Verdelândia visando investigar se alguma recarga direta poderia ocorrer nesse compartimento hidrológico. Entretanto nenhuma infiltração efetiva foi registrada, o que é atribuído ao elevado *déficit hídrico*. Pressupõe-se, assim, que, na área de estudos os tipos de recargas mais importantes são a indireta, ao longo das drenagens, e a do tipo localizada, através do grande número de dolinas que marcam a paisagem da região. As chuvas intensas que marcam o regime pluviométrico da região contribuem para a concentração das

águas pluviais e favorecem tais tipos de recarga, garantindo a continuidade do aporte do recurso hídrico subterrâneo.

Nesse estudo, objetivou-se a investigação da recarga aquífera do tipo localizada através de duas dolinas presentes no município de Verdelândia, Minas Gerais, sob um clima semiárido. Foi caracterizado o processo sazonal da infiltração durante um ano hidrológico e quantificou-se a recarga nas dolinas selecionadas.

## 2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

As áreas de estudo encontram-se em duas sub-bacias do Rio Verde Grande localizadas em partes dos municípios de Verdelândia e Varzelândia, norte de Minas Gerais, no domínio do clima semiárido (Fig. 01). Situada sobre um relevo cárstico, a região é fortemente marcada pela presença das dolinas instaladas nos domínios das rochas carbonáticas e pelíticas do Grupo Bambuí, em grande parte recoberta por sedimentos detrito-lateríticas ferruginosas. A leste, acompanhando a planície do rio Verde Grande, encontram-se expressivos depósitos aluvionares (CPRM, 2003).



**Figura 01** - Mapa da bacia do rio Verde Grande em Minas Gerais e as sub-bacias objeto de estudos  
**Figure 01** - Map of the Verde Grande River basin in Minas Gerais and the studied sub-basins

O pacote de rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí e os sedimentos das coberturas cretáceas e cenozóicas permitem definir dois sistemas aquíferos: o inferior, cárstico-fissural, correspondente às rochas da Formação Lagoa do Jacaré e o superior, granular, correspondente às coberturas detrítico-lateríticas, que recobrem grande parte da área (MOURÃO *et al.*, 2001).

Costa *et al.* (2011) comunicam um fluxo preferencial da água subterrânea no aquífero cárstico a partir das Serras do Sabonetal, São Felipe e Jaíba no sentido NE, do vale do rio Verde Grande, exutório natural. Contudo, alguns trechos deste rio cedem água para o aquífero através de sumidouros. Outro fluxo, este mais profundo e regional tende para NW tendo como exutório natural o rio São Francisco.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas duas dolinas, visando à caracterização do solo e ao monitoramento hidrológico. Os solos foram caracterizados quanto à classe pedológica, textura e capacidade de infiltração. O monitoramento hidrológico envolveu a instalação de um sistema para monitoramento pluviométrico e do nível d'água (NA) em poço de monitoramento (PM) instalado no fundo da dolina com tal propósito.

As dolinas foram selecionadas com o emprego da técnica de identificação semiautomática de dolinas de autoria de Rodrigues (2011), que aplicou sua técnica nesta mesma área. Dez dolinas foram selecionadas para aferição em campo e dentre estas, duas foram eleitas para o estudo, cujos critérios foram: dimensão estatisticamente representativa, presença de água pelo menos uma vez ao ano, facilidade de acesso e segurança dos equipamentos instalados.

Para a *Caracterização Pedológica* as dolinas foram compartimentadas em três áreas concêntricas denominadas de alta, média e baixa vertente. Em cada um destes compartimentos abriu-se uma trincheira com 2m de profundidade, conforme Santos (2005), para a caracterização tátil visual, classificação do

perfil pedológico *in situ* e amostragem de cada horizonte visando as seguintes análises laboratoriais: ensaio granulométrico, pH (CaCl<sub>2</sub>), H+Al, matéria orgânica, macronutrientes (P, K, Ca, Mg e Al), Soma de Bases (SB), CTC, V% e relações, micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B, S, SO<sub>4</sub> e Na), Cloreto, pH da água, metais pesados solúveis (Cd, Cr, Ni, Hg e Pb). Essas análises são pré-requisitos para enquadrar os solos na Classificação Brasileira conforme a Embrapa.

Nas mesmas áreas concêntricas foram realizadas sondagens de 2m de profundidade com um trado motorizado para recolhimento de amostras de solo para ensaio granulométrico em laboratório. No fundo das dolinas as sondagens alcançaram 6 m de profundidade onde as mesmas foram aproveitadas para a instalação dos poços de monitoramento, um em cada dolina. Cada poço ficou a aproximadamente 1 m da margem do lago.

A determinação em campo do *coeficiente de permeabilidade saturado* na zona mais superficial do solo, isto é, neste caso, da própria condutividade hidráulica, foi realizada segundo duas técnicas distintas: o *Permeâmetro de Guelph* (REYNOLDS *et al.*, 1983 *apud* SOTO *et al.*, 2009) e o *Infiltrômetro de Anéis Duplos Concêntricos* (FRANCH *et al.*, 2008, KATHER *et al.*, 2009 e CICHOTA *et al.*, 2003). Nos poços de monitoramento o ensaio para obtenção desse coeficiente de permeabilidade foi realizado pelo método *Slug Test* (VORSLEV, 1951 *apud* SOUZA, 2008), executado em setembro de 2010.

Em cada dolina foi instalada uma estação de monitoramento hidrológico tendo-se colocado em operação por um ano – fev/2010 a fev/2011 a seguinte instrumentação (Figs. 02 e 03): um Pluviógrafo; um Poço de monitoramento de 10 cm de diâmetro, com aproximadamente 6m de profundidade (5,91m e 6,01m) instalado a 1m da zona alagada; 1 transdutor de pressão instalado no poço de monitoramento para medição do NA com frequência de 30 minutos, e outro dentro do lago para monitorar a lâmina d'água, entretanto, todos os dados desse transdutor da lâmina d'água foram perdidos; um *Baro* para compensação da pressão atmosférica; e uma caixa

de armazenamento de dados.



**Figura 02** - Dolina Santana: (1) Pluviógrafo; (2) Caixa de armazenamento dos dados e o baro e (3) Poço de monitoramento (Autor: Geraldo Araújo)

**Figure 02** - Santana Sinkhole: (1) Rain Gauge; (2) Data storage box and the baro and 3 – Well monitoring (Author: Geraldo Araújo)



**Figura 03** - Dolina Pedro Moura: 1- Pluviógrafo; 2- Caixa de armazenamento dos dados e o baro; 3 – Poço de monitoramento e 4 – Poço para monitoramento do espelho d'água<sup>1</sup> (Autor: Letícia Braga)

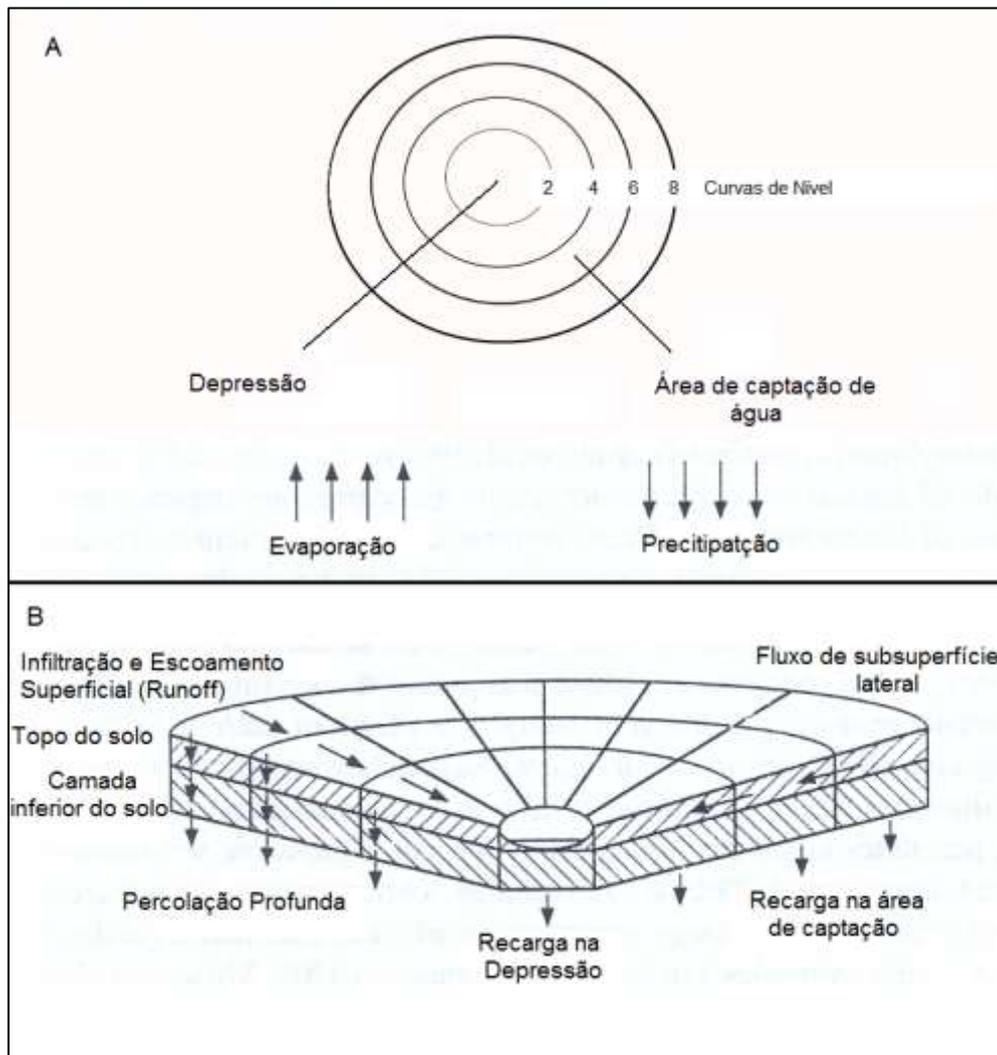
**Figure 03** - Pedro Moura Sinkhole: 1 – Rain Gauge; 2- Data storage box and the baro; 3 – Well monitoring and 4 - Well monitoring of the water surface (Author: Letícia Braga)

<sup>1</sup> Havia ainda transdutores de pressão dentro do lago da dolina Pedro Moura a fim de monitorar a lâmina d'água. No entanto, estes dados foram perdidos em sua totalidade não podendo ser aproveitados neste estudo.

O tempo de resposta do nível freático em relação a um evento pluviométrico foi avaliado aplicando-se a Função de Correlação Cruzada - FCC (FERRARI e KARMANN, 2008), com *lag* diário, entre a pluviometria e a variação do nível d'água.

A recarga foi calculada para cada dolina a partir das elevações diárias do nível de água no poço de monitoramento instalado próximo à lagoa. Assim, a variação da carga hidráulica total para o período monitorado ( $\Delta H$ ) correspondeu à somatória de todas as elevações diárias das cargas hidráulicas ( $\Delta h$ ). Quando esta variação resultou na diminuição da carga hidráulica diária, ou abaixamento do nível d'água, ela foi desconsiderada.

Como as bacias de drenagem neste estudo são fechadas e cobertas com solo, o modelo de circulação hídrica adotado admite como recarga localizada a que ocorre no fundo da depressão, a partir de onde ocorre a infiltração oriunda da água pluvial acumulada (Fig. 04), tendo sido considerada insignificante a *Recarga Direta*, através do solo, a que ocorreria ao longo das vertentes, devido ao alto *déficit* hídrico da região. O escoamento superficial (ou *runoff*) bem como o fluxo hipodérmico lateral foram tratados como um só fluxo, representante do montante de água que seria armazenado no fundo da dolina (Fig. 4B). O balanço hídrico climático em cada dolina foi efetuado para se obter o excedente hídrico, este com potencial ou não de gerar recarga.



**Figura 04** - Modelo do sistema hidrológico de dolina. Geometria em planta (A) e seção transversal (B) de bacia utilizada por adaptado de Nieber et al., (1993) *apud* Simmers et al., (1997)

**Figure 04** - Hydrological model system sinkhole. Geometry in the plant (A) and cross section (B) of the basin used by Nieber et al., (1993) *apud* Simmers et al., (1997)

Por se tratar de um período hidrológico completo (1 ano) considerou-se insignificante a variação no armazenamento ( $\Delta S$ ) da equação 1, da qual resulta a equação 2. A recarga através da cobertura de solo (I) ao longo das vertentes foi também considerada insignificante, visto os resultados dos experimentos realizados na região em estudos anteriores utilizando-se infiltrômetros (SILVA, *et al.*, 2008; Velásquez *et al.*, 2009).

$$P - ETR - R - I = \Delta S \quad (\text{equação 1})$$

$$P = ETR + R \quad (\text{equação 2})$$

Onde,

P = precipitação

ETR = evapotranspiração real,

R = *runoff* – escoamento superficial e hipodérmico de toda a dolina

I = a recarga direta da chuva a partir do solo e

$\Delta S$  = variação no armazenamento.

Neste modelo admitiu-se que a *runoff* (R) é armazenado superficialmente no fundo da dolina formando o lago. Ao longo do ano hidrológico, parte desta água armazenada sofreria evaporação direta do espelho d'água (EV) e parte infiltraria pelo fundo da dolina, a qual viria a constituir a recarga localizada (In) - equação 3, tendo em conta que a recarga direta através do solo nas vertentes foi considerada desprezível.

$$R = EV + In \quad (\text{equação 3})$$

Substituindo a equação 3 na equação 2, o balanço hídrico adotado neste modelo é assim simplificado:

$$P = ETR + EV + In \quad (\text{equação 4})$$

O balanço hídrico climático, decenal (HENDRICKX e WALKER, 1997), foi efetuado em cada dolina pelo método de Thornthwaite (1948) *apud* Rolim *et al.*, (1998), considerando o sistema fechado, em que precipitação foi a única entrada de água no sistema dolina considerada, e as saídas corresponderam as perdas por evapotranspiração real, a evaporação direta do espelho d'água do lago e

a infiltração efetiva (recarga), já que o escoamento superficial fica retido no sistema, se concentrando no fundo da dolina.

Segundo o modelo proposto, para efeito de cálculo, a recarga localizada a partir do fundo da dolina correspondeu ao montante do excedente hídrico descontado da evaporação direta do espelho d'água do lago (equação 5). Quando o excedente hídrico foi ausente a recarga localizada foi considerada nula. Pressupondo-se a ausência de variação no armazenamento ( $\Delta S$ ) durante um ano hidrológico, a recarga foi assim calculada (equação 5):

$$In = EXC - EV \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

In = infiltração direta efetiva ou recarga localizada

EV = Evaporação direta do espelho d'água do lago

EXC = Excedente hídrico

Os dados de entrada para o cálculo do balanço hídrico foram assim obtidos: a pluviometria foi derivada dos pluviógrafos instalados com medição de dez/2009 a abr/2011; a temperatura média do ar, já com a média compensada adotada pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, da Estação Meteorológica de Mocambinho, operada pelo INMET, no município de Jaíba, a cerca de 40 km das áreas de estudo, mas também dentro da região classificada como Semiárida pelo IBGE; e a Capacidade de Água Disponível – CAD adotada foi a de 100 mm, mais usualmente utilizada, como sugerem Vianello e Alves (1991). Os dados de saída foram a Evapotranspiração Real e Potencial, *Déficit* e Excedente Hídrico. E os dados de evaporação foram obtidos também na mesma estação acima citada.

## 4 RESULTADOS

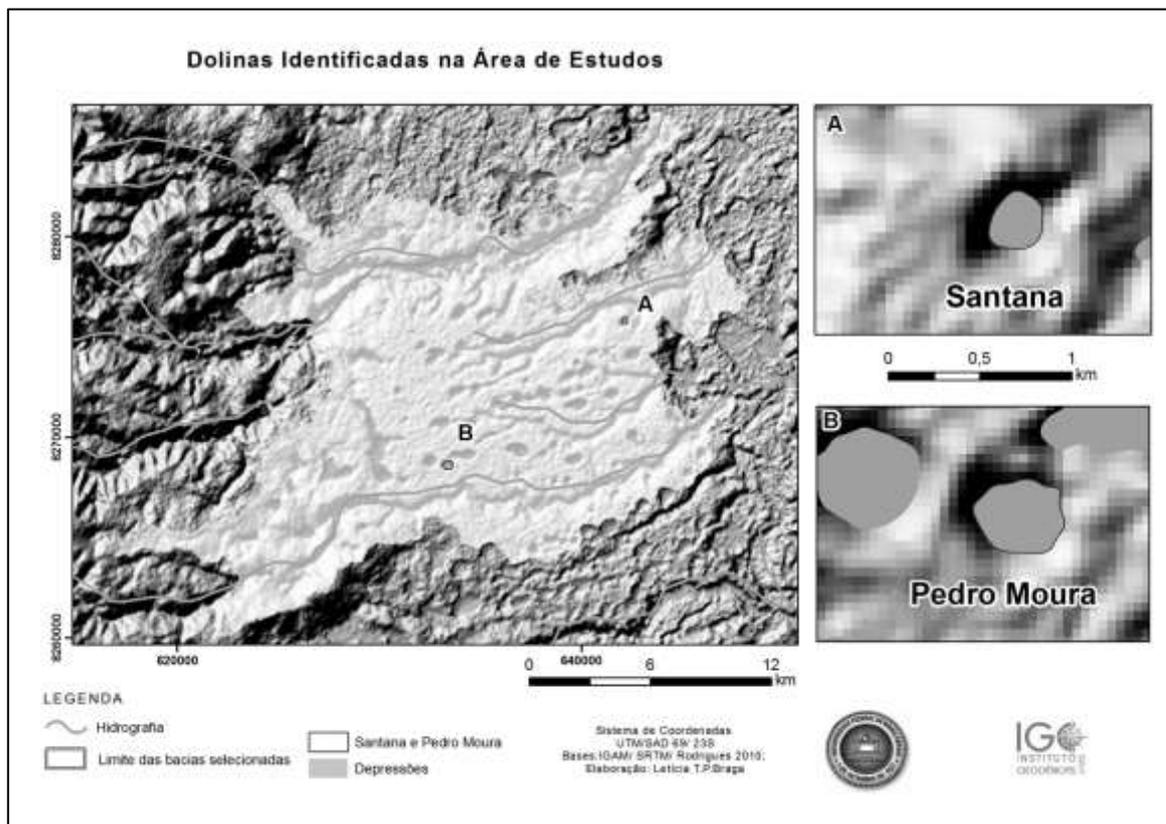
As dolinas eleitas denominadas Santana (72.885 m<sup>2</sup>) e Pedro Moura (158.121 m<sup>2</sup>) – Fig. 05, homônimas às fazendas onde se inserem, são parcialmente cobertas por vegetação de mata seca, mais pronunciada em Santana, e por solo exposto. As dolinas são usadas para

pastagem de gado, especialmente em Pedro Moura.

O lago em Santana não secou durante o período monitorado enquanto em Pedro Moura o lago, mais raso do que em Santana, secou completamente no período de estiagem.

#### *Caracterização Pedológica e granulométrica*

Os solos de ambas as dolinas se comportaram de forma semelhante, classificados como Vertissolos Hidromórficos (VG) no fundo e Cambissolos Háplicos (CX) em meia e alta vertentes.

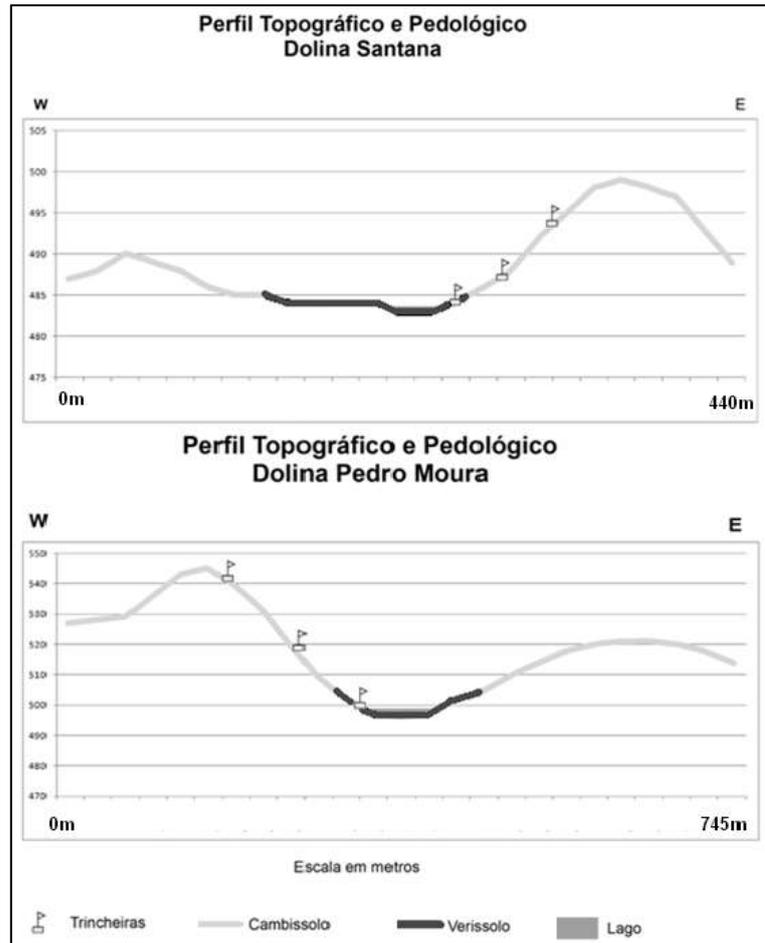


**Figura 05** - Mapa com a identificação das dolinas Santana e Pedro Moura selecionadas na área de estudos  
**Figure 05** - Map identifying the Santana and Pedro Moura sinkholes in the study area

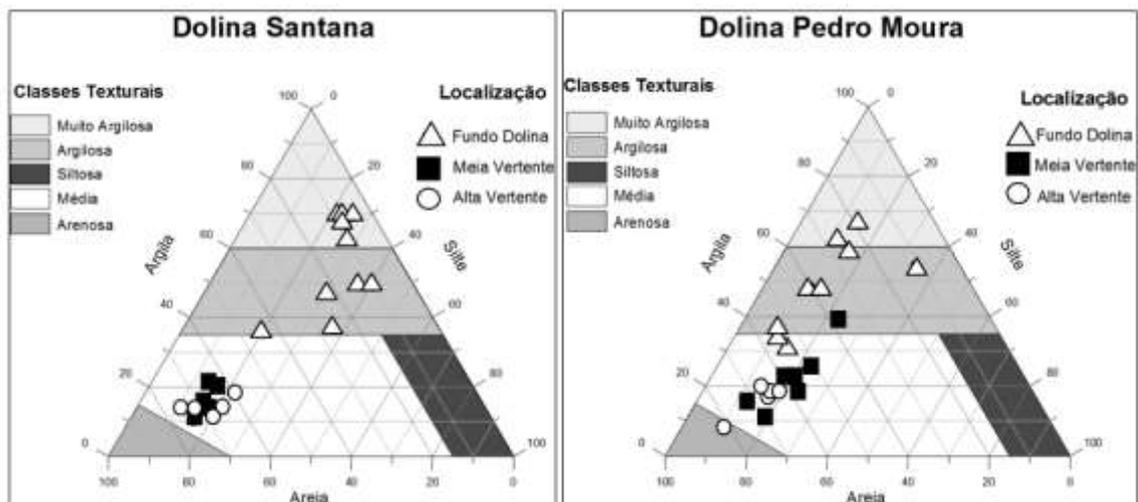
Os vertissolos compreendem solos constituídos por material mineral apresentando horizonte vértico. O caráter vértico é marcado pela presença de slickensides (superfície de fricção). Estas estruturas são formadas devido à expansão e contração das argilas. Os cambissolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente. Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro (EMBRAPA, 2006).

A Fig. 06 apresenta o perfil topográfico e pedológico das dolinas Santana e Pedro Moura.

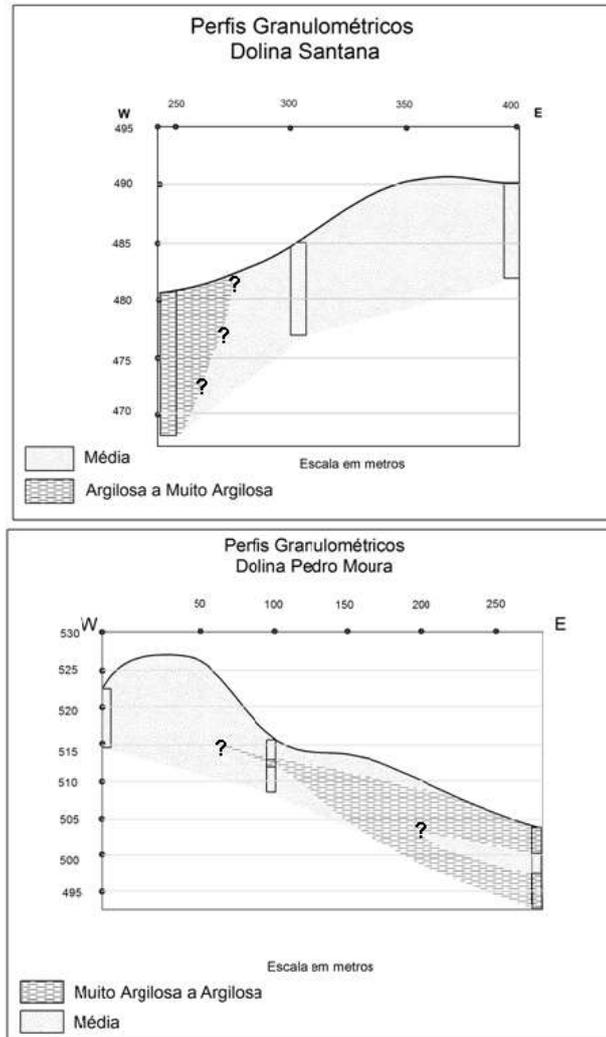
Em ambas as dolinas os solos apresentaram variações granulométrica semelhantes entre si. Nos setores “Fundo das Dolinas” as classes texturais se concentraram em “muito argilosa” e “argilosa” contrastando com os setores Meia e Alta Vertentes, onde predominou a classe textural “média” (Figs. 07 e 08), de acordo com o grupamento sugerido pela Embrapa. Uma diferença que não chega a alterar a classificação textural ocorre no Fundo das dolinas, qual seja, em Pedro Moura ocorre uma maior quantidade da fração areia do que em Santana e comportamento contrário quanto à fração silte.



**Figura 06** - Perfil topográfico e pedológico das dolinas Santana e Pedro Moura  
**Figure 06** - Pedological and topographic profile of Santana and Pedro Moura sinkholes



**Figura 07** - Gráfico Ternário para Grupamento de Classes de Textura representativo para as dolinas Santana e Pedro Moura  
**Figure 07** - Ternary graph for Textural Classes for Santana and Pedro Moura sinkholes



**Figura 08** - Perfil Granulométrico representativo para as vertentes das dolinas Santana e Pedro Moura  
**Figure 08** – Grain size profile representative to the slopes of sinkholes Santana and Pedro Moura

### *Permeabilidade dos solos*

A Tab. 01 sintetiza os resultados de cálculo da permeabilidade saturada a partir dos dois métodos de testes de infiltração adotados e do *slug test* para o vertissolo no fundo da dolinas.

Em ambas dolinas e em ambos os métodos de testes de infiltração, os solos dos setores Fundo da Dolina possuem valores de permeabilidade saturada ligeiramente menores do que nos setores de vertente.

Em todos os setores de solos, seja de

Santana ou de Pedro Moura, a condutividade hidráulica saturada de campo exibiu a mesma ordem de grandeza, ou seja, apesar da diferença textural entre os setores, eles se enquadraram na classe de permeabilidade alta. Uma exceção ocorreu no setor Fundo da dolina de Pedro Moura, que, a despeito de uma maior fração arenosa do vertissolo, se enquadrou em permeabilidade moderadamente alta, e, mesmo assim, apenas pelo método de Anéis duplos.

**Tabela 01** - Síntese dos resultados de Coeficiente de permeabilidade do solo (condutividade hidráulica) nas dolinas Santana e Pedro Moura em cm/s

**Table 01** - Summarizes the results of soil permeability (hydraulic conductivity) on Santana and Pedro Moura sinkholes in cm/s

DOLINA	SANTANA			PEDRO MOURA		
	Setor	Solo superficial não saturado		Meio saturado	Solo superficial não saturado	
Método	Guelph	Anéis Duplos	Slug Test (meio saturado)	Guelph	Anéis Duplos	Slug Test (meio saturado)
Alta Vertente	0,0048 (alta)	0,0081 (alta)		0,0019 (alta)	0,0047 (alta)	
Meia Vertente	0,0043 (alta)	0,0063 (alta)	0,000005 (aquiclude)	0,0022 (alta)	0,0074 (alta)	0,000004 (aquiclude)
Fundo da Dolina	0,0030 (alta)	0,0018 (alta)		0,0019 (alta)	0,00011 (moderadamente alta)	

Esses resultados apontam para a importância das rachaduras ou superfícies de fricção presentes nos Vertissolos (Fig. 09) para a infiltração da água no solo no Setor Fundo das dolina, pois elas possibilitam o processo de infiltração ao menos nas primeiras chuvas, quando estas superfícies das rachaduras ainda se encontram abertas. Quando o vertissolo encontra-se encharcado a argila dilata

de forma que as fendas, ou superfícies de fricção, deixem de existir temporariamente.

Os ensaios *slug test* resultaram em condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-6}$  cm/s em ambos os materiais argilosos atravessados pelos poços nas duas dolinas, permitindo classificar esse material como no limiar de um aquitarde para aquiclude (Tab. 02).



**Figura 09** - Trincheira do Vertissolo Hidromórfico no fundo da dolina Santana marcado pela presença de estruturas de fricção destacadas (Autor Leticia Braga – Setembro 2009)

**Figure 09** - Profile Vertisoiil Hydromorphic the bottom of the sinkhole Santana with the presence of friction structures (Author Leticia Braga - September 2009)

**Tabela 02** - Porosidade efetiva de alguns materiais (adaptado de Rebouças et al., 2006)**Table 02** - Specific porosity of some materials (adapted from Rebouças et al., 2006)

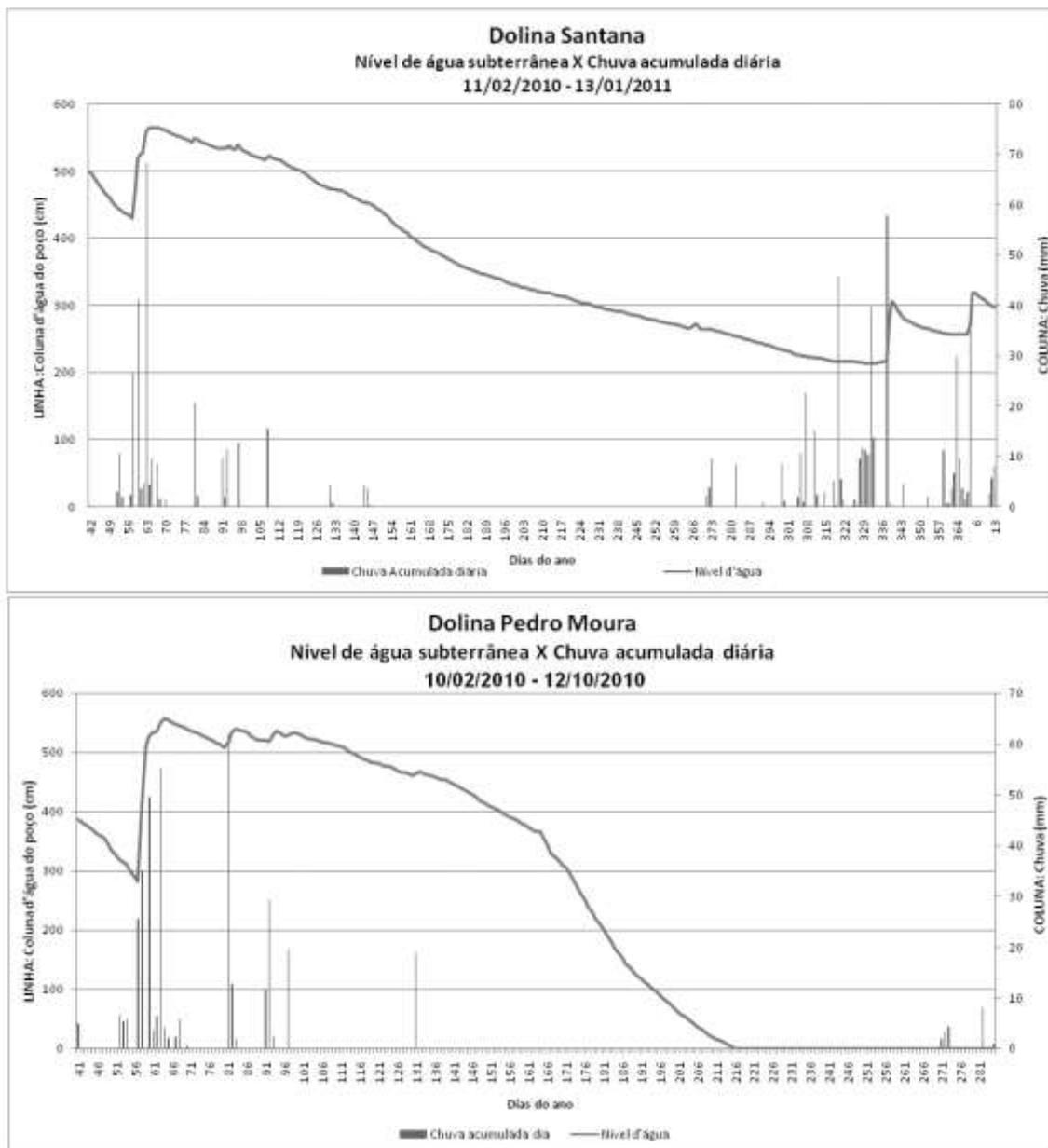
<b>SEDIMENTOS</b>	<b>POROSIDADE EFETIVA</b>
Cascalho	12 – 35%
Areia bem selecionada	15 – 35%
Silte arenoso, areia fina	10 – 28%
Silte, areia siltica, argila arenosa	3 – 19 %
Argila	0 – 5%
<b>CLASSES HIDROGEOLÓGICAS</b>	<b>POROSIDADE EFETIVA</b>
Aquíferos	
Conductividade hidráulica: $1 - 10^{-4}$ cm/s	5 – 27%
Areais, arenitos, rochas muito fraturadas/alteradas	
Aquitardes	
Conductividade hidráulica: $10^{-3} - 10^{-5}$ cm/s	3 – 5%
Siltes, areias argilosas, argila arenosa, rochas pouco fraturadas/alteradas	
Aquicludes	
Conductividade hidráulica: $10^{-6} - 10^{-9}$ cm/s	2 – 3%
Argilas, folhelhos, rochas muito pouco fraturadas/alteradas	
Aquifugos	
Conductividade hidráulica: $<10^{-9}$ cm/s	<1%
Rochas compactadas não fraturadas/alteradas	

### *Monitoramento Hidrológico*

O período de monitoramento planejado para os transdutores de pressão dos poços de monitoramento no Fundo das Dolinas foi de fevereiro de 2010 a abril de 2011 (14 meses), entretanto, falhas técnicas dos equipamentos abreviaram esse tempo para 11 meses em Santana (11/02/2010 – 13/01/2011) e 8 meses em Pedro Moura (10/02/2010 – 12/10/2010). Os pluviógrafos registraram os dados sem falhas por 16 meses em ambas as dolinas: Santana (19/12/2009 - 18/04/2011) e Pedro Moura (18/12/2009 - 11/04/2011). Como mencionado no item 2, os dados dos transdutores instalados nos lagos para monitorarem a lâmina d'água foram completamente perdidos por falhas técnicas dos equipamentos. Os resultados dos monitoramentos obtidos são apresentados na Fig. 10.

Apesar do significativo abaixamento do N.A. na época seca em Santana, o poço

acusou a presença de água durante todo período monitorado. Diferentemente do que aconteceu em Pedro Moura, em que a partir do mês de agosto de 2010 o poço encontrou-se seco. Enquanto em Pedro Moura a maior presença da fração arenosa pode estar favorecendo uma maior infiltração e escoamento de dentro do próprio aquíclode, em Santana, tanto a infiltração quanto o escoamento do infiltrado são mais lentos. Os resultados de K testados em superfície se mostraram um pouco mais elevados em Santana, a despeito da maior infiltração ocorrer em Pedro Moura, devido a maior fração de areia neste. Tal comportamento pode estar refletindo uma maior quantidade de fissuras superficiais no solo mais argiloso que ocorre em Santana. No processo da infiltração efetiva, no entanto, essas fissuras tenderiam a se fechar, contribuindo, assim, para uma menor recarga em Santana.



**Figura 10** - Resultados dos monitoramentos obtidos de nível d'água e chuva acumulada diária para as dolinas Santana e Pedro Moura

**Figure 10** - Results obtained from monitoring the water level daily and accumulated rainfall for Santana and Pedro Moura sinkholes<sup>2</sup>

#### *Análise Estatística dos Dados: Correlação Cruzada*

Na correlação cruzada entre a precipitação e a resposta do nível d'água do poço de monitoramento em Santana, o *lag* foi de 1 dia para a maior correlação obtida,  $r_{xy}(k) = 0,49$ .

Em Pedro Moura a maior correlação foi de  $r_{xy}(k) = 0,32$  e um *lag* de 0 dias. Este resultado apontaria para o entendimento que os sinais de entrada reagiriam ao mesmo tempo aos sinais de saída, visto que na escala da metodologia cada dia representa uma unidade (FERRARI e KARMANN, 2008). Assim, considerando a escala adotada do *lag* de 1 dia, é bastante plausível o entendimento de que a resposta do aquífero está ocorrendo algumas horas depois do evento chuvoso, em tempo inferior ao prazo de 1 dia.

<sup>2</sup> O primeiro dia do ano (1º de janeiro) é denominado dia 1 e seguindo progressivamente. Santana iniciou o monitoramento no 42º dia do ano e Pedro Moura no 41º.

Apesar do teste de infiltração apontar uma permeabilidade do solo um pouco mais elevada em Santana, a relação impulso-resposta da variação no nível d'água com a ocorrência de chuvas mostra que Pedro Moura responde ao impulso mais rapidamente. Além de uma maior fração arenosa no vertissolo, a maior precipitação em Pedro Moura do que em Santana pode também estar influenciando este resultado, conforme será explicitado a seguir.

#### *Balço Hídrico Climático Decendial Sequencial para um ano hidrológico*

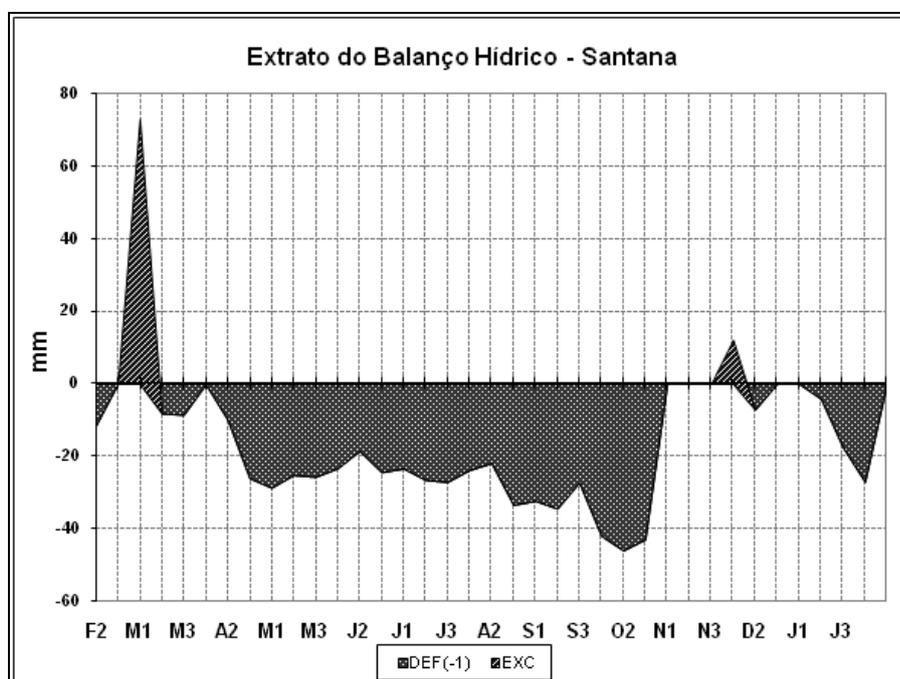
- Santana

O total precipitado em 1 ano hidrológico em Santana foi de 726,8 mm (fev/2010 a fev/de 2011), com maior incidência de novembro a março. Em dois decênios ocorreu excedente hídrico, totalizando de 85,4 mm (março-M1 e dezembro-D1), quando teria ocorrido o escoamento superficial em direção ao fundo da dolina. Na maior parte do ano, entretanto, foi registrado um *déficit* hídrico, totalizando 648,1 mm, com máximo em outubro (O2) – Fig. 11.

- *Pedro Moura*

A pluviometria total no mesmo ano hidrológico em Pedro Moura foi de 912,7 mm (fev/2010 a fev/2011), com maior incidência de novembro a março. Em seis decênios ocorreu excedente hídrico, totalizando 212,6 mm (março-M1, abril-A1, novembro-N3 e dezembro-D1 e D3). O *déficit* hídrico ocorreu na maioria dos decênios somando 594,0 mm, com máximo em outubro (O3) – Fig. 12.

A partir dos valores de excedente hídrico para um ano hidrológico, e considerando o modelo de fluxos adotado, foi calculada a parcela líquida desse excedente que teria efetivamente infiltrado (recarga), oriunda da água armazenada no fundo da dolina. Esse montante líquido foi calculado subtraindo-se do excedente hídrico a quantidade de água evaporada do espelho d'água da lagoa (EV). Em Santana essa recarga foi de **57,7 mm** e em Pedro Moura de **122,2 mm**, correspondente a **7,8%** e a **13,3%** da precipitação, respectivamente.



**Figura 11** - Extrato do balanço hídrico decendial na dolina de Santana de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011

**Figure 11** - Decendial hydric balance extract in Santana sinkhole February 2010 to February 2011

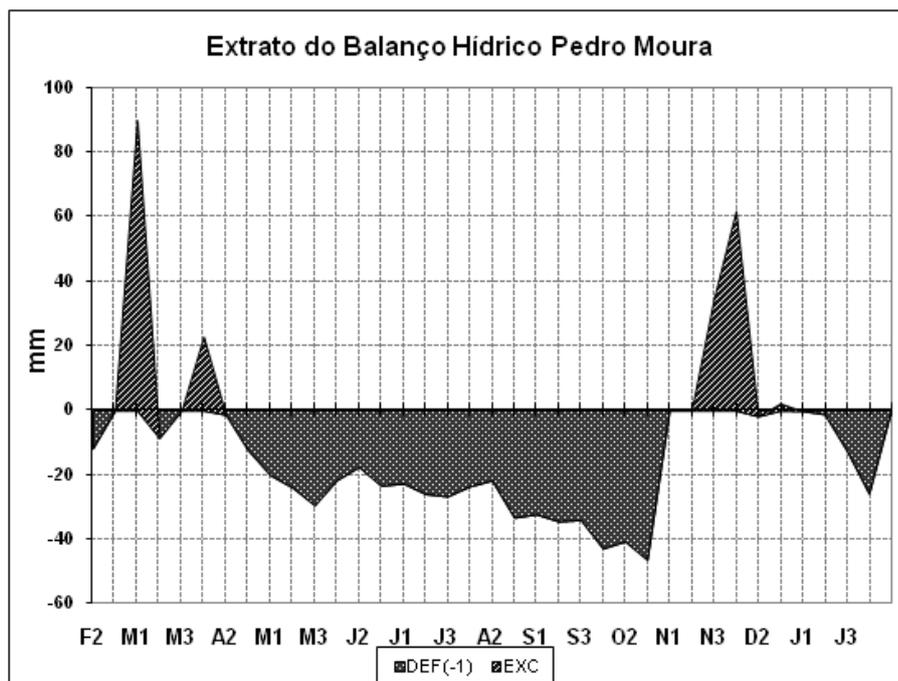


Figura 12 - Extrato do balanço hídrico decendial em Pedro Moura de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011

Figure 12 - Decendial hydric balance extract in Pedro Moura Sinkhole February 2010 to February 2011

Verificou-se uma concordância dos eventos de recarga com os decêndios de altos índices pluviométricos ou com a sua incidência prévia. A maior precipitação em Pedro Moura certamente contribuiu para que aí houvesse um maior valor de recarga em relação a Santana.

*Balanço Hídrico reduzido ao tempo de medição com os transdutores de pressão*

A fim de se comparar o cálculo das recargas pelo método do balanço hídrico com o método do monitoramento do nível d'água nos poços, por conta da perda parcial destes dados, as recargas foram calculadas pelo balanço hídrico reduzido ao mesmo período deste monitoramento, ou seja, em Santana, de fev/2010 a jan/2011 e em Pedro Moura, de fev/2010 a out/2010. Portanto, são balanços hídricos para 11 e 8 meses respectivamente.

A planilha de Rolim *et al.*, (1998) permite a entrada de dados incompletos e da mesma forma, gera os resultados parciais, conforme apresentado a seguir. Assim, Pedro Moura não contou com a mais importante época chuvosa (novembro, dezembro e janeiro).

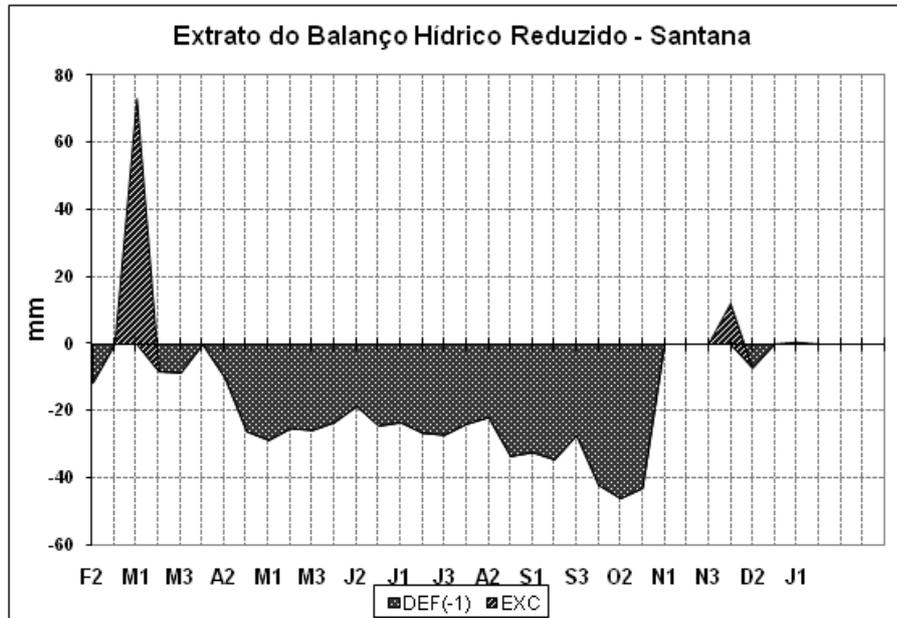
- *Santana – 11 meses*

No cálculo do balanço hídrico decendial reduzido de Santana a pluviometria foi de 703,5 mm, o excedente hídrico de 85,4 mm e o déficit hídrico de 599,4 mm (Fig. 13).

- *Pedro Moura – 8 meses*

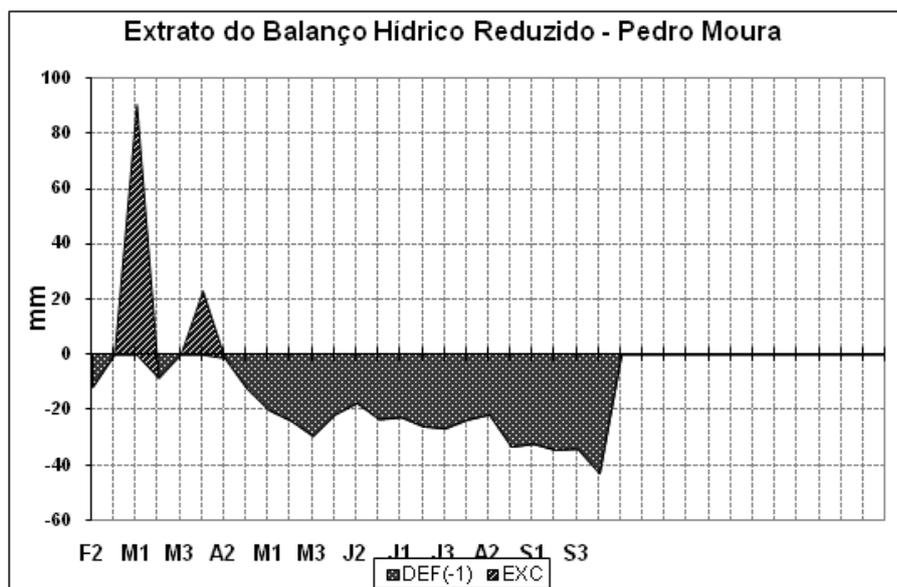
No cálculo do balanço hídrico decendial reduzido de Pedro Moura a pluviometria foi de 382 mm, o excedente hídrico de 113,7 mm e o déficit de 466,0 mm (Fig. 14).

Subtraindo-se as perdas por evaporação direta pela lâmina d'água formada pelo excedente hídrico, a cada decêndio, obtiveram-se as recargas que foram de **57,7 mm** em Santana e de **74,7 mm** em Pedro Moura, valores correspondentes, respectivamente a 8,2% e 19,5% da precipitação registrada nos seus respectivos períodos de monitoramento, ou seja, de fev/2010 a jan/2011 em Santana e de fev/2010 a out/2010 em Pedro Moura. É importante enfatizar que esse alto índice de 19,5% verificado em Pedro Moura está relacionado com o reduzido tempo de precipitação (8 meses) em que registrou apenas 382 mm.



**Figura 13** - Extrato do Balanço Hídrico Decennial Reduzido na dolina Santana de fevereiro de 2010 a janeiro de 2011

**Figure 13** - Decennial hydric balance extract in Santana sinkhole February 2010 to January 2011



**Figura 14** – Extrato do Balanço Hídrico Decennial Reduzido na dolina Pedro Moura de fevereiro de 2010 a outubro de 2010

**Figure 14** - Decennial hydric balance extract in Pedro Moura Sinkhole February 2010 to October 2010

Os dados para o Balanço Hídrico Climático Decennial Sequencial para um ano hidrológico e para o Balanço Hídrico reduzido ao

tempo de medição com os transdutores de pressão podem ser comparados na Tab. 03.

**Tabela 03** - Comparação da Recarga entre os métodos de Balanço Hídrico de um Ano Hidrológico e Balanço Hídrico Reduzido ao Tempo de Medição com Transdutores de Pressão nas Dolinas  
**Table 03** – Recharge comparison with methods Yearly Hydric Balance and Hydric Balance Reduced to Measure Time with Pressure Transducers in Sinkholes

Balanço Hídrico	1 ANO HIDROLÓGICO fev/2010 – fev/2011		BALANÇO HÍDRICO REDUZIDO	
	Santana	Pedro Moura	Santana fev/2010 – jan/2011	Pedro Moura fev/2010 – out/2010
Pluviometria (mm)	726,80	912,7	703,5	382
Excedente Hídrico (mm)	85,4	212,6	85,8	113,7
Recarga	57,7	122,2	57,7	74,7
Índice Recarga/ Pluviometria (%)	7,8	13,3	8,2	19,5

#### *Cálculo da Recarga por Variação do Nível D'água*

A recarga foi calculada relativa aos 11 meses de monitoramento do N.A. na dolina de Santana e aos 8 meses na dolina de Pedro Moura, com seus respectivos valores de precipitação para o período, conforme o Balanço hídrico reduzido.

Adotou-se como prerrogativa que todas as variações positivas ( $\Delta h+$ ) do monitoramento de nível d'água diários dos poços são consideradas *inputs* de recarga. A coluna d'água referente a variação do N.A. em cada poço representa a coluna porosa adjacente ao poço.

A recarga pela variação do nível d'água é dada por:

$$R = \sum \Delta h \cdot n_e$$

(equação 06)

Em que R é a recarga,  $n_e$  a porosidade efetiva e  $\sum \Delta h+$  o somatório das elevações do nível de água.

Em Santana o poço de monitoramento do fundo da dolina apresentou um  $\sum \Delta h$  de 3.086 mm para os 11 meses de monitoramento. Considerando uma porosidade efetiva ( $n_e$ ) de 0,02 para o meio circundante ao poço (Tab. 01), obteve-se uma recarga de 61,7 mm nos 11 meses, isto é 5,6 mm/mês. Isso equivale a um índice de 8,8% em relação à precipitação correspondente de 703,5 mm.

Em Pedro Moura o  $\sum \Delta h$  foi de 3.363 mm para os 8 meses de monitoramento. Considerando também uma porosidade efetiva de 0,02 para o meio circundante ao poço, obteve-se em Santana uma recarga de 67,3 mm para os 08 meses, isto é 8,4mm/mês. Isso equivale a 17,6% em relação à precipitação correspondente de 382 mm.

A Tab. 04 reúne os valores de recarga obtidos pelos métodos aplicados neste trabalho. Em Santana tanto a recarga absoluta quanto a relativa foram bastante concordantes em ambos métodos, e, no caso do balanço hídrico, tanto no período completo quanto reduzido, já que a diferença entre ambos períodos é de apenas um mês. Já em Pedro Moura a recarga absoluta, de fato, deve ser superior, visto que o  $\sum \Delta h+$  superou em 277mm o de Santana. A despeito de apenas 8 meses de medição do nível d'água. Tal resultado está em concordância com a maior fração de areia em Pedro Moura. Ainda em Pedro Moura, houve uma boa aproximação de valores de recarga absoluta e relativa reduzido aos 8 meses de monitoramento para os dois métodos, indicando a eficácia dos mesmos. Porém, a recarga relativa à precipitação do período ficou mais distante da obtida pelo balanço hídrico completo, justificado pela perda da precipitação que ocorre com maior incidência justamente nos meses com lapso de monitoramento.

**Tabela 04** - Resultados dos métodos de Balanço Hídrico e de Variação do nível d'água  
**Table 04** - Results of the methods of Hydric Balance and Variation in water level

Localidade / Métodos	SANTANA			PEDRO MOURA		
	Balanço Hídrico Completo	Balanço Hídrico Reduzido	Variação do Nível D'Água	Balanço Hídrico Completo	Balanço Hídrico Reduzido	Variação do Nível D'Água
<b>Recarga (mm)</b>	57,7	57,7	61,7	122,2	74,7	67,3
<b>Índice Recarga/Pluviometria anual (%)</b>	7,8	8,2	8,8	13,3	19,5	17,6

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados para os métodos *Balanço Hídrico Climático Decendial Sequencial para um ano hidrológico e Cálculo da Recarga por Variação do Nível D'água*, a dolina de Santana contribuiu com uma recarga média de 8% da precipitação enquanto a dolina de Pedro Moura em torno de 13%. Essas diferenças devem refletir as diferenças de precipitação (maior em Pedro Moura), a textura no fundo da dolina (mais arenosa em Pedro Moura), dimensão da dolina (duas vezes maior em Pedro Moura) e forma de relevo (maior desnível em Pedro Moura).

Os resultados de recarga pelos métodos do balanço hídrico decendial e pela variação do nível d'água foram bastante próximos entre si, elevando a confiança no estudo e corroborou o importante papel desempenhado pelas dolinas na recarga aquífera para o sistema hidrogeológico cárstico-fissural subjacente, especialmente no meio semiárido.

Os transdutores de pressão mostraram

a importância desse instrumento nesse tipo de estudo, pois permitiram se detalhar em escala diária as respostas do nível d'água aos eventos chuvosos (lag). As análises de correlação Precipitação versus Profundidade do Nível d'água corroboraram a verificação da rápida resposta do aquífero quando do evento chuvoso, de 24 horas ou menos, resultado das infiltrações através das fissuras dos vertissolos nos fundos das dolinas e do meio intergranular.

Um aspecto importante a se considerar é a necessidade de proteção dessas dolinas, que ocorrem em grande quantidade na região.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo apoio financeiro (CRA-220 PPM-00070-08 Programa Pesquisador Mineiro) e pela bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria nº 2914 de dezembro de 2011. Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 dez., 2011.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q.; LEGUIZAMÓN ROJAS, C. A. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.789-798, 2003.

COSTA, D. A.; VELASQUEZ, L. N. M. **Controle litostrutural e estratigráfico na hidrogeoquímica e nas concentrações de fluoreto no sistema aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí, norte de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2011. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências.

CPRM – **Serviço Geológico do Brasil**. Disponível em: [www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br).

- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa em Solo. 2006. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, Brasil: Embrapa-Solos. 306 p.
- ESPINHA MARQUES, J; DUARTE, J. M; CONSANTINO, A. T; AGUIAR, C; ROCHA, F. T; MARQUES, J. M; SAMPER, J; BORGES, F. S; CARVALHO, J. M; CHAMINÉ, H. I. Avaliação in situ da condutividade hidráulica de solos de montanha: um caso de estudo na Serra da Estrela (Centro de Portugal). **Cadernos do Laboratório Xeológico De Laxe**, v.34, p.143-164, 2009.
- FERRARI, J. A. e KARMANN, I. 2008. Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Cársticos na Bacia do Rio Betari, Município de Iporanga – SP. Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v.8, n.1: 1-13.
- FRANCH, F. A. J. P. **Influência do Tipo de Revestimento Superficial no Fluxo Não Saturado e Sua Influência na Estabilidade de Taludes**. 2008. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HENDRICKX, J.M.H.; WALKER, G.R. (1997) – “**Recharge from Precipitation**”, in Simmers, I. (ed.) “Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-)Arid Areas”. 78 International Association of Hydrogeologists, Nº 19, Cap. 2, pp. 19-143. A.A. Balkema, 227 p.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>
- KATHER, C.; DINIZ, H. N.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; RODRIGUES, E. M. Características de infiltração de água nos solos da várzea do rio Paraíba do Sul, em Tremembé, SP. **Anais. II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade**, Taubaté, Brasil, 2009, IPABHi, p. 493-500.
- MOURÃO M.A.A., CRUZ W.B., GONÇALVES R.L.F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco. In: PINTO C.P.; Martins-Neto M.A. (eds.) **Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais**. Belo Horizonte: SBG-MG, 2001. p.327-350.
- RODRIGUES, P.C.H. - **Deteção semi-automática de depressões altimétricas por Geoprocessamento a partir de Sensoriamento Remoto (dados SRTM) potencialidades para deteção de dolinas (cársticas ou não)**. 2011. Publicação CDTN - 970. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.
- ROLIM, G.S.,SENTELHAS, P.C., BARBIERI, V. Planilhas no Ambiente Excel TM para cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.133-137, 1998
- SILVA, S.M.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; FREITAS, A.M.; PEREIRA, C.; COSTA, D.A.; SOARES, L.C.; FANTINEL, L. M.; FLEMING, P. M.; RODRIGUES, P. C. H. 2008. Hidroquímica das Águas Subterrâneas e Anomalias de Fluoreto em Região do Semi-árido Mineiro. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, Natal. **Livro de Resumo**, p.209.
- SIMMERS, I. (ed.). 1997. **Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas**. International Association of Hydrogeologists, 19, Balkema, Rotterdam.
- SOTO, M. A; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. Análise do Método do Permeâmetro Guelph na Determinação Da Condutividade Hidráulica Saturada. **Águas Subterrâneas**, v.23, n.01, p.137-152, 2009
- SOUZA, R. C. S. **Caracterização da Permeabilidade de Aquíferos em Cordões Arenosos Cenozóicos no Município de Itaguaí – Rio de Janeiro**. 2008. Fl 79 (Monografia). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- VELÁSQUEZ L.N.M., Fantinel L.M., Fleming P.M., Minardi P.S.P., Rodrigues P.C.H., Nacif W.F.N., Viola Z.G.G., Silva, S.M., Soares L.C., Costa D.A., Pereira C., Freitas, A.M. 2009. **Processos Geradores de Concentração Anômala de Fluoreto na Água Subterrânea em Região Semi-Árida: Estudo de Caso em Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí nos Municípios de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fapemig (EDT 83032/06) 236p.
- VELÁSQUEZ, L. N. M.; Fantinel, L. M.; Costa, W. D.; Uhlein, A.; Ferreira, E. F. E.; Castilho, L. S.; Paixão, H. H. **Origem do Flúor na Água Subterrânea e sua Relação com os Casos de Fluorose Dental no Município de São Francisco, Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fapemig (Relatório CRA 294/99), 2003. 138p.
- VELÁSQUEZ, L. N. M.; Fantinel, L. M.; Ferreira, E. F.; Castilho, L. S.; Vargas, A. M. D.; Marques, G. F.; Minardi, P.; Rodrigues, P. C. H.; Uhlein, A. 2007b. **Estudo da Tipologia das Ocorrências de Fluorita que Ocasionalmente Anomalias nos Níveis de Fluoreto da Água 230 Subterrânea e a sua Relação com os Casos de Fluorose Dental no Município de São Francisco, Minas Gerais**. Belo Horizonte, Relatório de Pesquisa.
- VELÁSQUEZ, L. N. M.; Fantinel, L. M.; Uhlein, A.; Ferreira, E. F.; Castilho, L. S.; Vargas, A. M. D.; Aranha, P. R. A. 2007a. **Investigação Hidrogeológica do Flúor em Aquíferos Carbonáticos do Médio São**

**Francisco, MG, e Epidemiologia da Fluorose Dentária Associada.** 2007. Belo Horizonte, Relatório de Pesquisa.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; Fantinel, L. M.; Ferreira, E. F. E.; Castilho, L. S.; Uhlein, A.; Vargas, A. M. D.; Aranha, P. R. A. Fluorose Dentária e Anomalias de Flúor na Água Subterrânea no Município de São Francisco, Minas Gerais. In: Silva, C. R. da; Figueiredo, B. R.; de Capitani, E. M.; Cunha, F. G. da. (Org). **Geologia Mé-**

**dica no Brasil.** Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2006. p. 110-117.

VELÁSQUEZ, L.N.M; Fleming P.M. **Ênfase no estudo da recarga aquífera no projeto Processos geradores de concentração anômala de fluoreto na água subterrânea em região semiárida:** estudo de caso em aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí em Verdelândia, Minas Gerais, FAPEMIG. UFMG E CDTN. 2010