

Artigos

Balço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais

Water balance in karstic hydrogeologic system, region of Lagoa Santa, Minas Gerais

Rodrigo Sergio Paula¹; Leila Nunes Menegasse Velásquez¹ ✉

¹ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

✉ rodrigo.spdm@yahoo.com.br, menegasse@yahoo.com.br

Resumo

Palavras-chave:

APA Lagoa Santa.
Balanço Hídrico.
Cárstico-fissural.
Recarga.

A área estudada, APA Carste de Lagoa Santa e seus entornos, localiza-se a 35 km norte de Belo Horizonte abrange cerca de 505 km². A região tem sido alvo de vários empreendimentos que prever um aumento pela demanda de água, diante deste crescimento e da fragilidade do sistema carste é imprescindível o conhecimento do sistema hidrológico, tal como a compreensão balanço hídrico. Geologicamente, a região é representada por metacalcárias e metapelíticas neoproterozoicas do Grupo Bambuí, com rica densidade de feições de dissolução cársticas que favorecem a recarga e a condução rápida da água. As drenagens da região são afluentes pela margem esquerda do rio das Velhas que funciona como nível de base. O objetivo do trabalho foi realizar o balanço hídrico, com ênfase na recarga aquífera, atentando para a complexa rede de drenagem subterrânea com entradas e saídas do sistema. Informações disponíveis sobre conexões hídricas auxiliaram no modelo de circulação adotado para equacionamento do balanço hídrico. Foram instaladas 6 estações fluviométricas em 6 bacias, monitoradas no ano hidrológico 2016/2017, cujos dados foram empregados no cálculo da recarga aplicando a metodologia de Rutledge e Daniel (1994). O escoamento de base médio das bacias de 91% do total confirma a importância da água subterrânea para o sistema hidrológico e a recarga de 12% da precipitação anual (1010 mm) pode ser adotada como valor mínimo por haver ainda outras saídas hídricas não contempladas no trabalho.

Abstract

Keywords:

APA Lagoa Santa.
Karstic-fissural.
Water Balance.
Aquifer Recharge.

The studied area, APA Lagoa Santa Karst and its surroundings, is located 35 km north from Belo Horizonte and it covers around 505 km². The region has been a target to many enterprises that demand an increase on water request. Having as a scenario this growth and the fragility of the Karst system, it becomes necessary to know the hydrological system, as well as to understand the hydric balance. Geologically, the area is represented by metacalcarium and neoproterozoic metapelitic rocks from The Bambuí Group, with rich density of features of karstic dissolution that make the recharge and the fast conduction of the flows water. The drainage of the region is affluent by the left bank of Das Velhas river that functions as its base level. The objective of this project was to perform the water balance, with emphasis on the aquifer recharge, considering the complex underground drainage network with inputs and outputs of the system. Available information about hydric connections have helped on the adopted circulation model used to equate hydric balance. 6 fluviometric stations were installed in 6 basins, having monitored the hydrological year of 2016/2017, whose data was used to calculate its recharge using the methodology of Rutledge and Daniel (1994). The average flow of the basin in 91% of the total confirms the importance of underground water to the hydrological system and the recharge of 12% of the annual precipitation (1010 mm) can be adopted as minimum value, once there are other hydric outputs that are not analysed in this work.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>

1. INTRODUÇÃO

A área considerada, de aproximadamente 505 km², engloba totalmente a região da APA - Carste de Lagoa Santa, alcançando uma área de proteção ambiental de aproximadamente 350 km². A região da APA definida pelo conjunto paisagístico e cultural, composto por um sistema de cavernas e demais formações cársticas, sítios arqueopaleontológicos, com cobertura vegetal e fauna silvestre, cuja preservação é fundamental para o ecossistema da região (VIANA, 1998).

O balanço hídrico em qualquer região resulta nos quantitativos de entrada e saída. Segundo Tucci (2002), é uma aplicação da equação da continuidade de massa em uma região. Em regiões cársticas, além do monitoramento climático e fluvial, é preciso conhecer as principais rotas de fluxo de água subterrânea. Goldscheider & Drew (2007) afirma que o fluxo subterrâneo em áreas cársticas é muitas vezes independente da topografia, embora geralmente guiado por formações geológicas e estruturais. Portanto, os compartimentos hidrogeológico não necessariamente coincidem com as bacias hidrográficas.

Em termos de recarga, as águas pluviais podem chegar aos sistemas cársticos de quatro maneiras: recarga alogênica, infiltração difusa, escoamento interno e por aquíferos suspensos. Já a descarga, a água retorna à superfície geralmente através de grandes surgências (WHITE, 2002).

Portanto, torna-se necessária a identificação da origem das águas subterrâneas nas sub-bacias estudadas para melhor caracterização do balanço hídrico. A interpretação da origem da água subterrânea e sua relação com a bacia aflorante contribui para uma melhor interpretação dos quantitativos de saída e entrada do sistema.

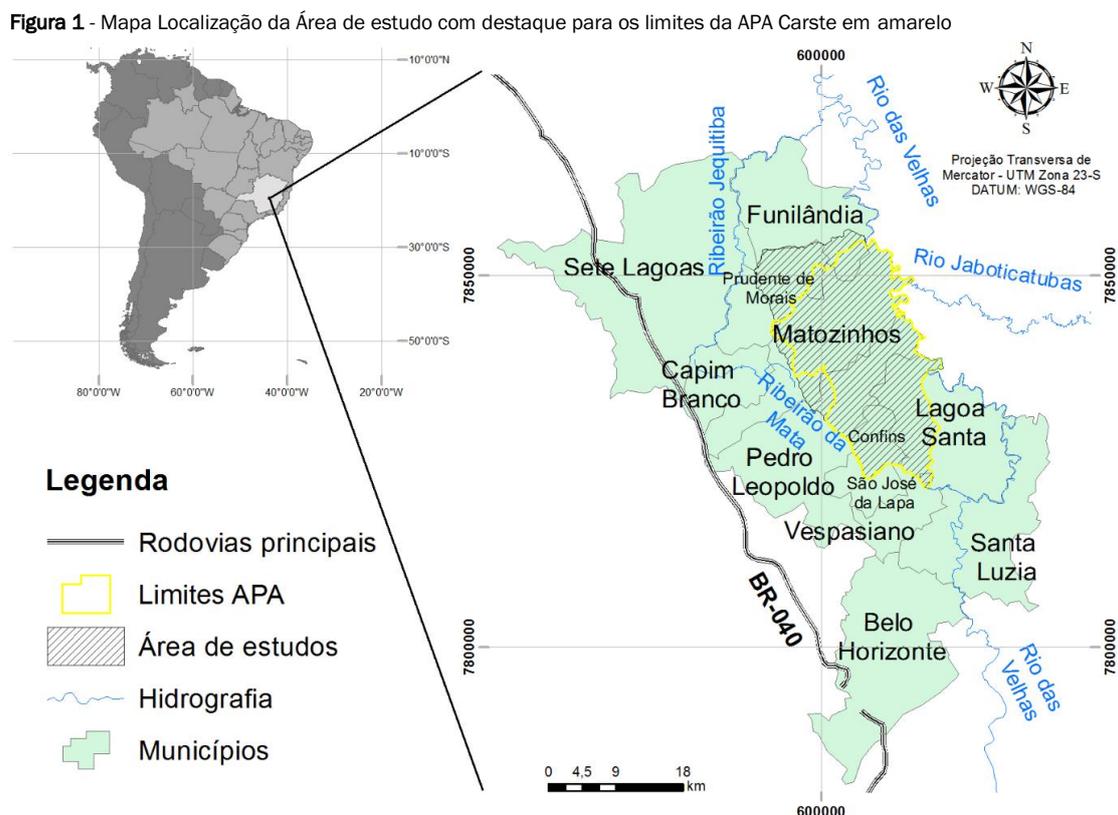
Para melhor aproximação das características do sistema carste (baixo armazenamento e rápidas respostas a eventos pluviométricos), foi adotado o método de Rutledge e Daniel (1994), que o propuseram por meio de uma curva de recessão média representativa de todo o sistema, a qual é gerada a partir de pequenas curvas de recessão, em resposta a eventos de chuva mais próximos. Costa (2005) aplicou, dentre outros métodos, o método citado em aquíferos granulares, encontrando curvas de recessão mais eficientes para esse. Albuquerque (2009) demonstrou a eficiência do método comparando-o com outros aplicados em aquíferos granulares do Grupo Uruçuia, obtendo valores de recarga mais precisos do que os métodos tradicionais.

Devido à fragilidade ambiental deste sistema cárstico e uso extensivo dos recursos hídricos, propôs-se quantificar um balanço hídrico para possibilitar a individualização da participação de cada sub-bacia.

O estudo objetivou o equacionamento das entradas e saídas de água do sistema, discretizando os aportes externos, a recarga, as descargas naturais normais e atípicas ao fluxo, e as descargas por bombeamento. Esse balanço hídrico foi comparado com o balanço hídrico climático realizado, pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), para se verificar a aplicabilidade desse método clássico, amplamente empregado, nesse tipo de sistema, um carste ativo, bem desenvolvido e interconectado.

2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO

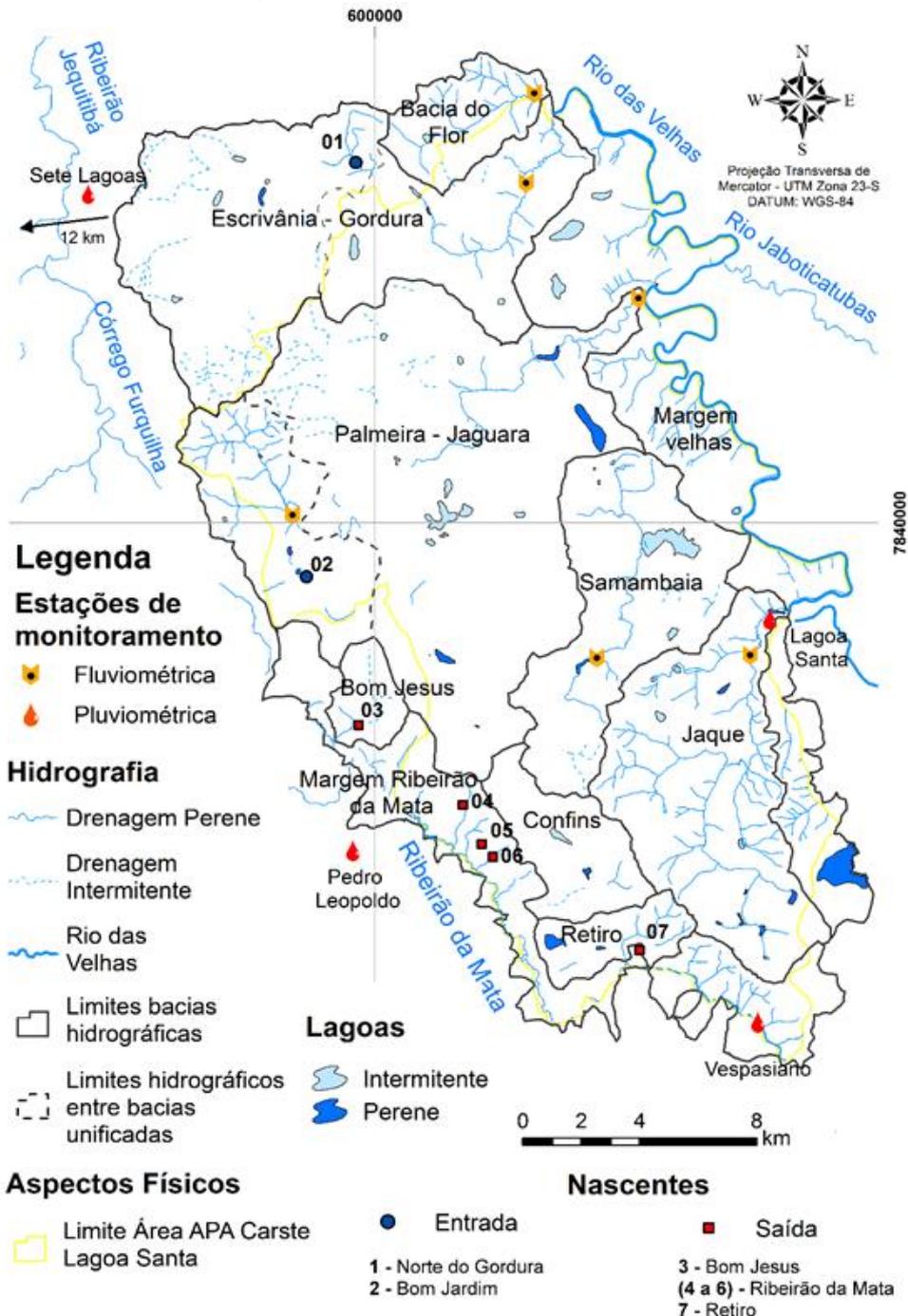
A área possui cerca de 505 Km² e dista 35 km a norte de Belo Horizonte, envolvendo parcial ou integralmente os municípios de Lagoa Santa, Vespasiano, Funilândia, Confins, Matozinhos, Pedro Leopoldo e Prudente de Moraes, e engloba por completo a região denominada APA Carste de Lagoa Santa e entornos (Fig. 1).



HIDROGRAFIA - A área insere-se na margem esquerda do rio das Velhas, flanqueando-a nas suas porções nordeste e leste, o qual atua como nível de base, com cotas de 630 m a 660 m. A sudoeste e oeste, a área é balizada pelo Ribeirão da Mata, afluente do rio das Velhas logo a montante da área (Fig. 2). A Tabela 1 exibe as dimensões das bacias, destacando as

monitoradas. Seis delas drenam direta ou indiretamente para o rio das Velhas pelos cursos d'água homônimos, os quais são: Palmeira, Jaguará, Escrivânia, Gordura, Jaque e Flor; enquanto o córrego Samambaia imerge em um sumidouro próximo ao rio das Velhas, porém o destino do fluxo é ainda desconhecido.

Figura 2 - Mapa hidrográfico e dos pontos de aquisição dos dados hidrológicos realçando as nascentes de entradas e saídas água da área de estudo



A bacia Escrivânia é completamente fechada e possui apenas uma importante descarga por uma surgência cárstica, que percorre superficialmente 500 m e ressurge na bacia Gordura, formando assim um compartimento único denominado Escrivânia-Gordura (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018).

Igualmente ocorre com o córrego Palmeira que drena superfi-

cialmente numa bacia fechada, recebendo a maior contribuição de uma surgência cárstica na porção baixa da bacia, imergindo em um sumidouro e ressurgindo na bacia Jaguará. Nesta mesma bacia, outro sumidouro drena água da nascente da Lagoa Bom Jardim (2 da Fig. 2), ressurgindo também na bacia Jaguará. Essas conexões formam um compartimento único, denominado de Palmeira-Jaguará (AULER, 1994).

As demais bacias são, ou completamente fechadas, sem drenagem de imersão conhecida (Confins), ou parcialmente fechadas, drenando através de surgências cársticas diretamente para o Ribeirão da Mata (3 Bom Jesus e 7 Retiro Fig. 2). Ocorrem ainda drenagens marginais diretas para o Velhas e Ribeirão da Mata (4, 5, 6 da Fig. 2), a maioria em sedimentos de cobertura, mas também ocorrem surgências cársticas caudalosas. Embora ainda sem comprovação, há fortes indícios de que todas as surgências cársticas drenantes para a bacia

do Ribeirão da Mata funcionam como pontos de descargas (atípicas) oriundas das porções interiores da área estudada, devendo ser relevadas no balanço hídrico.

À exceção do Jaque e Flor, que drenam parcialmente sobre os metapelitos (Fig. 3), as demais se encontram predominantemente em terreno cárstico e as marginais em sedimentos de coberturas (Tab.1)

Tabela 1 - Características das bacias hidrográficas monitoradas e não monitoradas

Bacias	Área (Km ²)	Comprimento do córrego (Km)	Litologia
Bom Jesus *	7	3,5	Calcário
Retiro *	10	4,0	Calcário
Flor	16	5,0	Pelito - Calcário
Confins *	18	0,0	Calcário
Palmeira	31	6,0	Calcário
Margem Rib. da Mata	38	--	Coberturas
Gordura	39	14,0	Calcário
Samambaia	48	9,0	Calcário
Escrivânia *	57	0,5	Calcário
Margem Velhas *	57	--	Coberturas
Jaque	59	17,0	Pelito - Calcário
Jaguara	125	14,0	Calcário

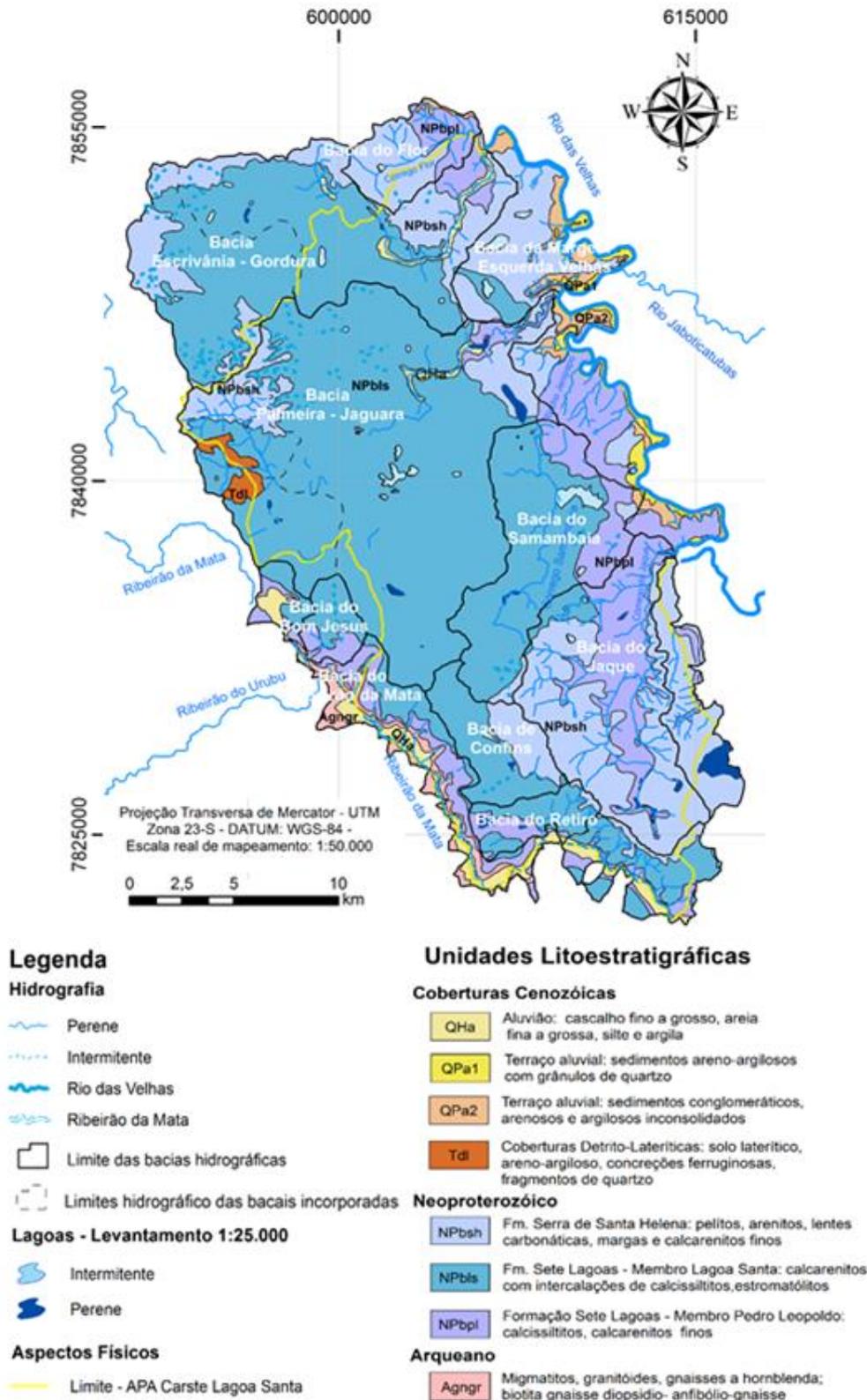
Em negrito - bacias monitoradas; * bacias não monitoradas

GEOMORFOLOGIA – A área é formada por terrenos carbonáticos desenvolvidos, com abundância de feições de dissolução como maciços fraturados, sumidouros, dolinas, surgências caudalosas, dutos e cavernas. Conforme Pessoa (2005), as três primeiras representam um indicativo de um sistema cárstico desenvolvido, favorecendo a recarga aquífera pluvial.

GEOLOGIA - A área de estudo abrange, da base para o topo, o Complexo Gnássico-Granítico-Migmatítico Belo Horizonte, sobreposto pelas rochas carbonáticas e siliclásticas da sequência transgressiva-regressiva do Grupo Bambuí, formada pelas

Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena. O topo da sequência é constituído pelas Coberturas Cenozoicas (Ribeiro *et al.*, 2003) (Fig. 3). Estruturalmente, os contatos entre as unidades se apresentam de forma brusca e discordante, podendo também ocorrer por descolamento basal e com indicadores cinemáticos apontando o movimento reverso. Galvão *et al.* (2016) sugere, a partir de perfis litológicos de poços, a existência de falhas responsáveis por deslocar as sequências inferiores e as posicionar em contato com sequências superiores nas proximidades da região.

Figura 3 - Mapa Geológico (adaptado de RIBEIRO et al., 2003) evidenciando as bacias hidrogeológicas detalhadas no trabalho



HIDROGEOLOGIA - Os aquíferos cársticos semi-confinados a livres são predominantes, sendo bastante produtivos e vulneráveis. A conformação desses aquíferos está vinculada à presença dos carbonatos com feições de dissolução como dolinas em superfície e cavernas em profundidade, as quais, de maneira interligada, formam uma rede de dutos e fendas alargados pela ação da água (VIANA,1998).

O embasamento, representado por uma aquífero fissural de

baixo potencial, aflora restritamente na borda da bacia, nas porções oeste e sul.

A unidade aquífera formada pela formação Sete Lagoas é constituída pelos calcários impuros de granulometria fina cor cinza claro subordinados a calcarenitos e margas do membro Pedro Leopoldo, e o membro Lagoa Santa, sobreposto, consiste de calcários puros de granulometria grossa e cor mais escura. Perfis de poços tubulares próximos ao rio das Velhas

mostram espessuras superiores a 300 m desta unidade aquífera, apresentando fluxo predominantemente para o rio das Velhas. Conforme detalho por Velásquez *et al.* (2018), o Mb lagoa Santa apresenta o maior potencial hídrico deste aquífero, as principais feições cársticas, maiores permeabilidades e principais zonas de recarga.

A unidade aquífera da formação Serra de Santa Helena encerra os metapelitos intemperizados, formando aquíferos ou localmente aquíferos pobres. Esta unidade geológica e as coberturas cenozoicas podem atuar localmente como zonas de recarga localizada para os aquíferos sotopostos (PESSOA, 2005).

CLIMA - os valores climáticos médios anuais, com base nos anos de 1961 a 1990, da Estação Lagoa Santa, são: Precipitação: 1287 mm, Evapotranspiração Real: 996 mm (77%), Excedente Hídrico: 291 mm (22,6%) e Deficit: 99 mm (8%) (VIANA, 1998).

3. MÉTODOS

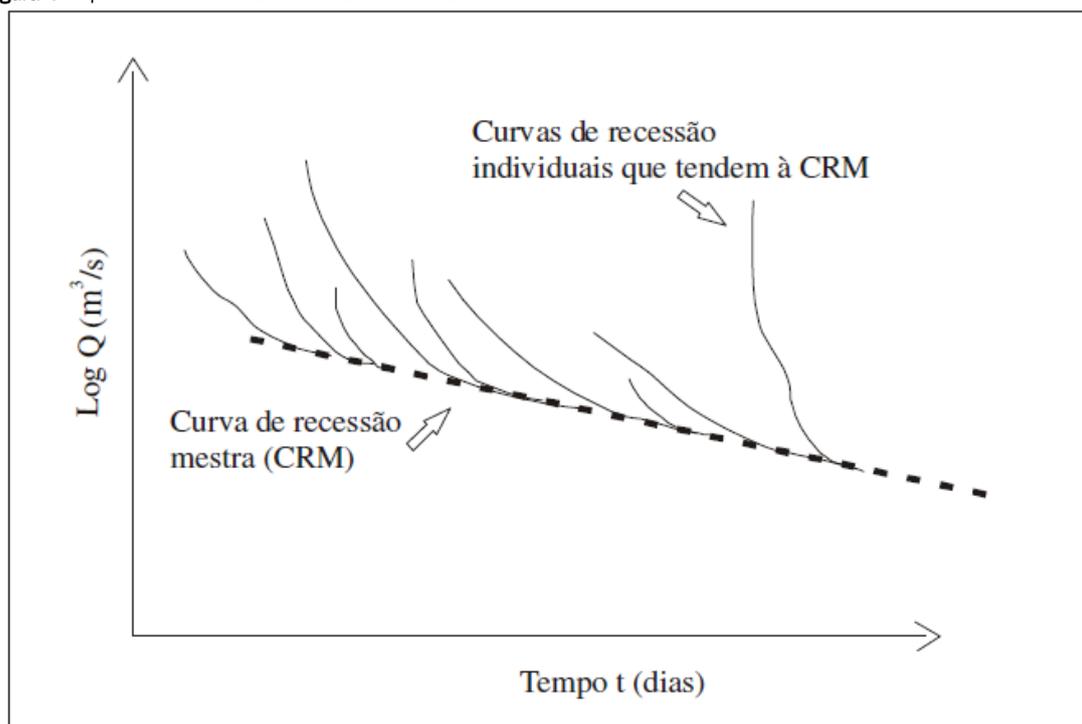
Todos os dados hidrológicos monitorados corresponderam ao ano hidrológico, outubro/2016 a setembro/2017. O estudo foi realizado segundo os métodos detalhados abaixo:

- i) Monitoramento fluviométrico das bacias (Tab. 1; Fig. 2) por meio de transdutores de pressão, com leitura automática a cada 15 min., nos locais de mais baixo curso possível. As curvas chaves elaboradas seguiram padrão gráfico internacional da relação de variação da cota (h) com a vazão (Q) - h/Q , (FILHO *et al.*, 2001; TUCCI, 2002; PISCOYA *et al.*, 2013).

Com as vazões obtidas, foi possível relacionar estes dados com a área das bacias obtendo as vazões específicas. Em caso das nascentes monitoradas, adotou-se a vazão específica aparente por ter sido realizado apenas a medida de vazão na máxima estiagem no ano de 2017.

- ii) Obtenção da recarga aquífera: foi adotado o método de Rutledge e Daniel (1994), que propuseram o deslocamento dos vários pequenos períodos de recessão do hidrograma, compondo a curva mestra de recessão (CRM - Fig. 4), a partir da qual obteve-se o índice de recessão médio e, conseqüentemente, a recarga. O valor de recarga, tal como os valores de escoamento, terá seu percentual relacionado à pluviometria anual ($P - 1010$ mm) da região. Com os dados de escoamento foi realizado a razão entre escoamento subterrâneo e total para obtenção do potencial hídrico e índice de fluxo de base de cada bacia.

Figura 4 - Típica curva de recessão mestra evidenciando as curvas individuais



Fonte: Retirado de Costa (2005)

Tal método é adequado ao sistema cárstico pois consiste em analisar todas as curvas de recessão formadas por eventos de chuvas pelo ajuste de uma única reta de tendência (curva de recessão média), porquanto as respostas das vazões aos eventos pluviais em terrenos carbonáticos são quase imediatas e se desfazem rapidamente. O método foi aplicado automaticamente, eliminando a subjetividade na separação dos hidrogramas e da recarga. Para tanto, foi adotado o software USGS GW-Toolbox desenvolvido por Barlow *et al.* (2014) e Bar-

low *et al.* (2017). A partir dos programas internos, HYSEP, RECESS e RORA, calculou-se os hidrogramas e escoamentos; a CRM e a Recarga, respectivamente.

- iii) Realização do Balanço Hídrico Climatológico (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018), que resultou nos dados de Evapotranspiração Real (ETR), Excedente Hídrico (EXC), o qual traduz o escoamento superficial e subterrâneo indistintamente, Deficit Hídrico (DEF) e o Armazenamento (ARM). Utilizou-se o método de Thornthwaite e Mather (1955), e

Thorntwaite (1948), para o cálculo da ETR. Os dados de temperatura derivaram da estação meteorológica de Sete Lagoas (Código OMM: 8670), 12 km da área, e a pluviometria, de 4 estações dentro da região, todos disponíveis nos sites do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2017) ou da Agência Nacional de Águas – ANA (2017). Os cálculos foram tratados nas planilhas eletrônicas de Rolim (1998) por ser aplicável a diferentes tipos de climas com exigência de um número mínimo de dados meteorológicos existentes.

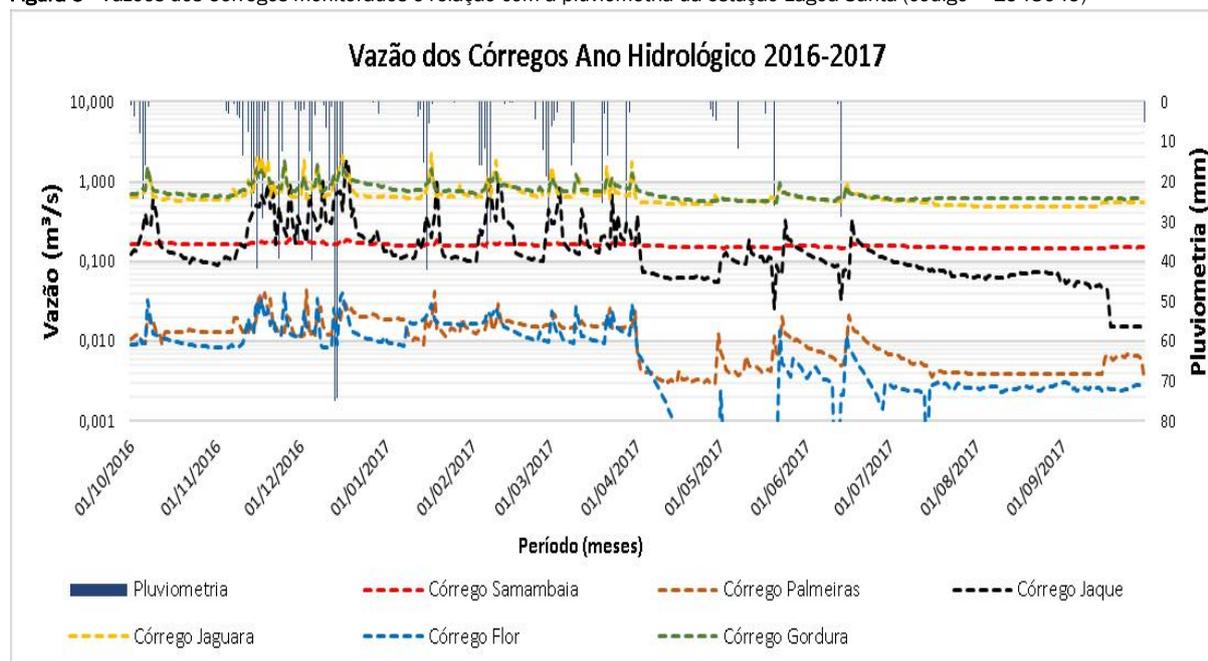
4. RESULTADOS

FLUVIOMETRIA – a vazão aumenta e diminui quase imediata

mente aos eventos pluviométricos, denotando baixo armazenamento e alta velocidade dos fluxos na porção superior dos aquíferos, predominando a atuação dos dutos cársticos (Fig. 5). Encontraram-se 3 níveis de vazão (Tab. 2); i) caudalosas, com médias de 0,744 m³/s e 0,695 m³/s, dos sistemas Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara, respectivamente; ii) intermediárias, 0,180 m³/s e 0,159 m³/s, do Jaque e Samambaia, respectivamente e iii) baixas, 0,008 m³/s, do Flor.

Salienta-se o comportamento mais uniforme do córrego samambaia (Fig. 6) devido a regularização da vazão causada por barramento a montante do ponto monitorado O córrego Flor é afetado por captações a fio d'água, chegando a secar na estiagem.

Figura 5 - Vazões dos Córregos monitorados e relação com a pluviometria da estação Lagoa Santa (código – 1943049)



Distinguiram-se 3 níveis de Vazão Específica (Q/s) (Tab. 2), que, com exceção do sistema Pameira-Jaguara, seguiram a mesma tendência de vazão: i) alta (0,0053 m³/s/km²); ii) média (0,0031 a 0,0033 m³/s/km²) e iii) baixa (0,0005 m³/s/km²). Destaca-se a bacia Escrivânia-Gordura por apresentar a maior Q/s (0,0053 m³/s/km²) mesmo sem aporte externo da surgência. Tal produção seria de 0,0077 m³/s/km² se considerado o suposto aporte de água externo ao sistema através da surgência cárstica de 0,23 m³/s (1 da Fig.2) (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018), configurando uma vazão específica aparente, Q/sap.

As bacias Samambaia, Palmeira-Jaguara e Jaque possuem valores médios de Q/s (0,0033 a 0,0031 m³/s/km²) respectivamente. A produção do Palmeira-Jaguara saltaria para 0,0045 m³/s/km² se considerado o suposto aporte de água externo ao sistema através de uma surgência denominada Lagoa Bom Jardim de 0,191 m³/s (2 da Fig. 2).

A bacia do Flor apresentou uma ínfima Q/s, 0,0005 m³/s/km², explicada pela forte captação no curso, pelo predomi-

nínio de pelitos e pela presença de feições de recarga (maciços e depressões) apenas na porção baixa da bacia.

A característica das bacias correlatas é a presença de surgências caudalosas de aporte externo drenando para dentro destas bacias, 0,421 m³/s (somatório das nascentes 1 e 2 da Fig. 2); ou para fora do sistema global por meio dessas bacias: 0,171 m³/s (somatório das nascentes 3, 4, 5, 6 e 7 da Fig. 2). Embora exista outras surgências menores saindo pela margem do Velhas, não se pode medi-las por formarem regiões brejadas com fluxo lento ou por desaguiarem diretamente em lagoas sem uma seção adequada.

RECARGA – a análise dos escoamentos mostra um escoamento total de 194 mm (19,2% do total pluviométrico P – 1010 mm), um índice do fluxo de base (BFI) entre 73% e 99% do escoamento total entre as bacias (Tab. 3; Fig. 6), e um escoamento superficial de 18 mm (1,8% da P – 1010 mm). Tal resultado é bastante coerente com a hidrologia predominantemente subterrânea, com baixa densidade de drenagem superficial (Fig. 2).

Tabela 2 - Vazão específica do escoamento total das bacias

Bacias	Área (km ²)	Q.média (m ³ /s)	DP Q.	Q/s (m ³ /s/km ²)	Q/sap. (m ³ /s/km ²)
Palmeira	31	0,011	0,0058	0,0004	-
Palmeira/Jaguara*	156	0,695	0,151	0,0032	0,0045
Jaguara	125	0,684	0,134	0,0055	-
Gordura	39	-	-	-	0,0089
Escrivânia	57	-	-	-	0,0027
Escrivânia/Gordura*	96	0,744	0,0014	0,0053	0,0077
Jaque	59	0,18	0,119	0,0031	-
Samambaia	48	0,159	0,008	0,0033	-
Flor	16	0,008	0,006	0,0005	-
Bom Jesus	7	-	-	-	0,003
Retiro	10	-	-	-	0,0112
Confins	18	-	-	-	***
Margem Rib. da Mata	38	-	-	-	0,001
Margem Velhas	57	-	-	-	-
Média	42	0,2084	0,0546	0,0026	0,0054
Total	505	-	-	-	-

*Os dados da bacia unificada não foram contemplados na Média e no Total para não haver dupla contagem. Q (vazão média); DP (desvio padrão); Q/s (vazão específica); Q/sap. (vazão específica aparente); em negrito - entram no cálculo da Média e do Total

Tabela 3 - Relação da água subterrânea com escoamento total das bacias.

Bacias	Área (km ²)	BFI (%)	Escoamento Total (mm)	Escoamento Subterrâneo (mm)	Escoamento Superficial (mm)
Jaque	59	73	66	48	18
Flor	16	79	3	2	0,6
Escrivânia-Gordura	96	89	281*	251*	30
Gordura	39	94	281*	264*	17
Palmeira-Jaguara	156	96	231*	221*	10
Palmeira	31	85	4,3	3,7**	0,6
Jaguara	125	96	231	221*	10
Samambaia	48	99	59	58	0,9
Total Ponderado	375	91	194	176	18

* inclui cerca de 30% de aporte externo; BFI: índice do fluxo de base; ** não inclui o aporte externo de surgência cástica de Bom Jardim, o qual é conectado à bacia Jaguara onde é medido no sistema Palmeira-Jaguara; em negrito - entram no cálculo Ponderado.

Figura 6a - Hidrograma da bacia do Flor

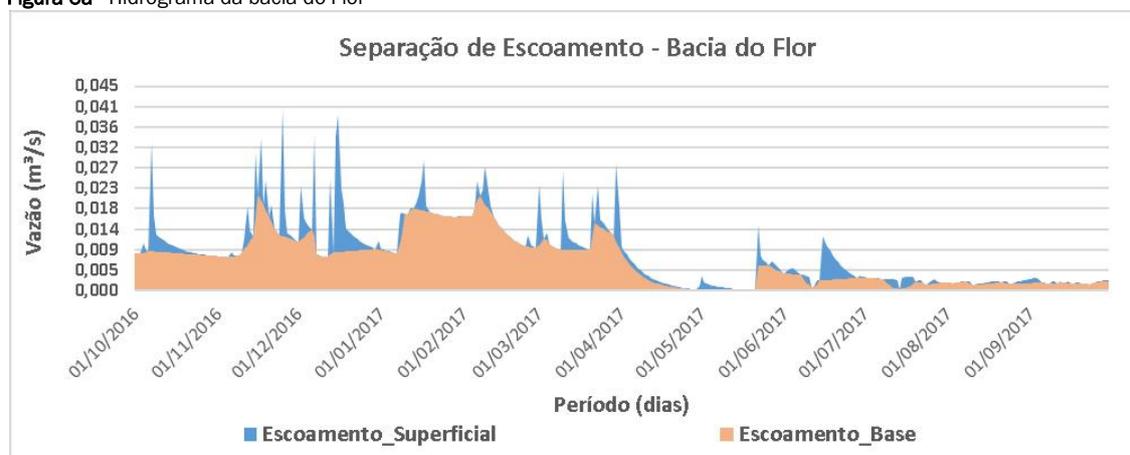


Figura 6b - Hidrograma da bacia do Samambaia

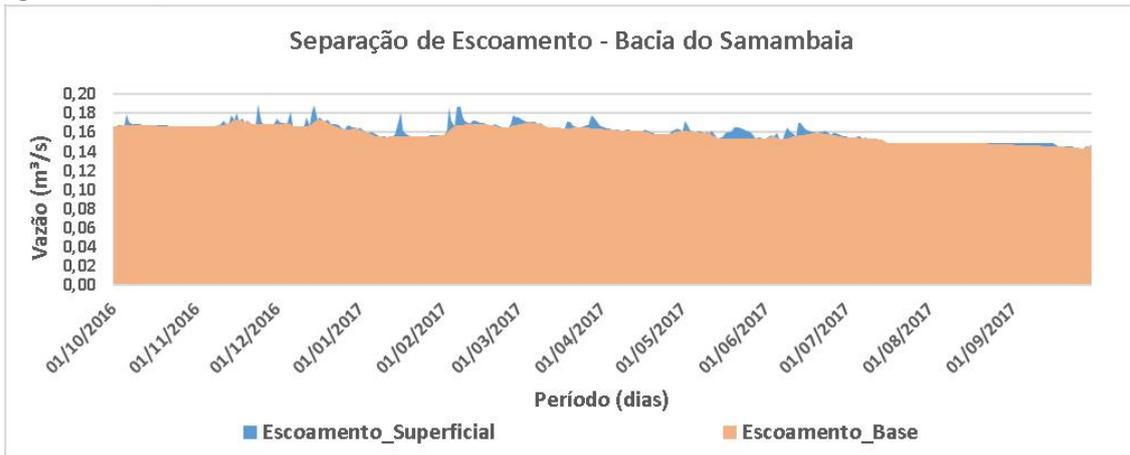


Figura 6c - Hidrograma da bacia do Jaque

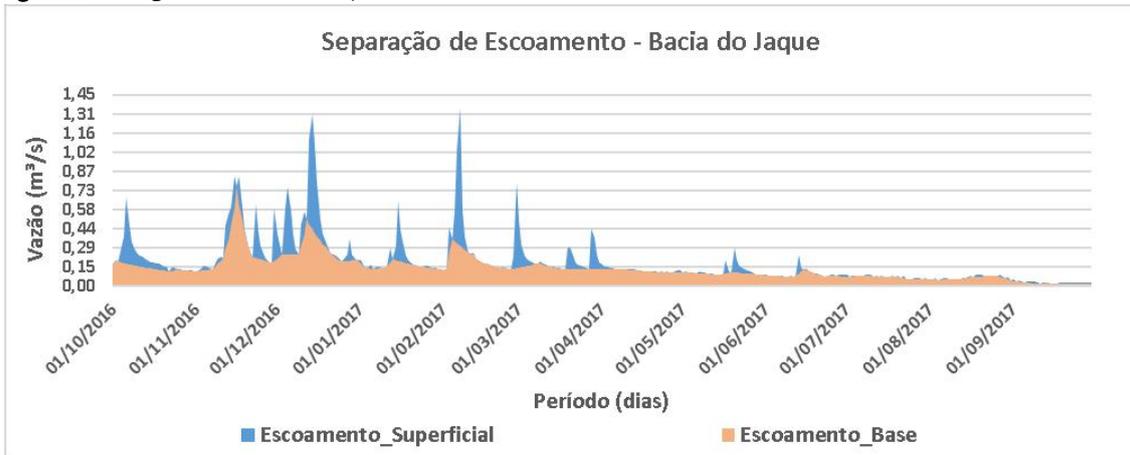


Figura 6d - Hidrograma da bacia do Escrivânia-Gordura

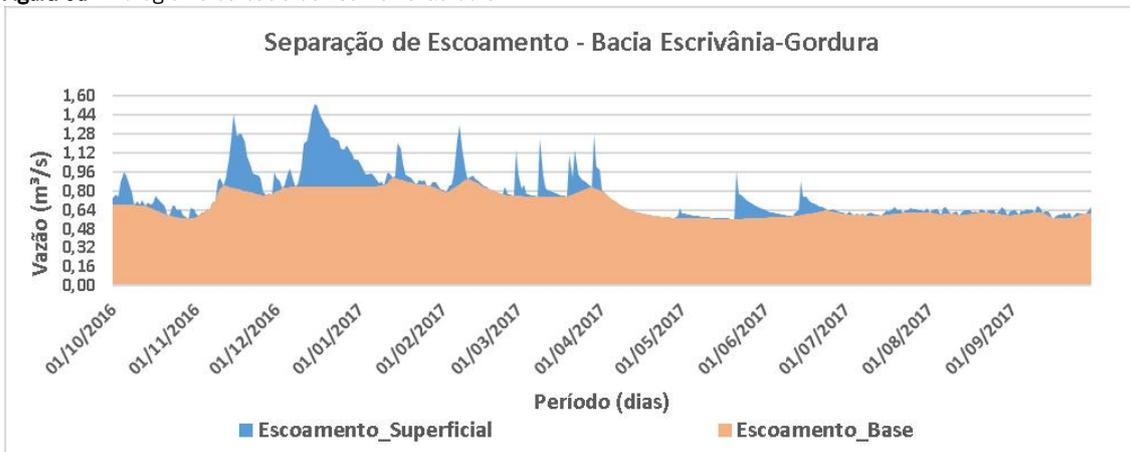
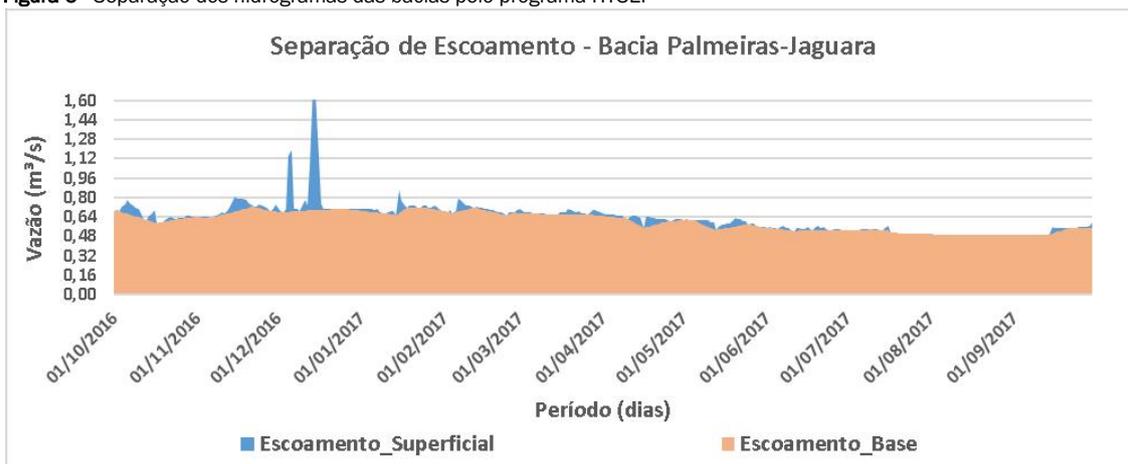


Figura 6e - Hidrograma da bacia do Palmeiras-Jaguara
Figura 6 - Separação dos hidrogramas das bacias pelo programa HYSEP



O elevado índice do fluxo de base (BFI) da bacia Palmeira-Jaguara (96%)_corrobora o elevado grau de carstificação, fato atestado pela presença de grande densidade de sumidouros nesta região mapeados por Silva *et al.* (1987), que garantem ótimas condições de recarga aquífera, corroborado pelo seu alto valor de escoamento subterrâneo (221 mm).

O BFI da bacia do Escrivânia-Gordura é de 89%, com o maior escoamento subterrâneo, de 251 mm (Tab. 3). O maior escoamento superficial (30 mm) se deve ao fato que 59% desse sistema pertencer a bacia de Escrivânia (Fig. 2), completamente fechada, sem produção de drenagem superficial, com exceção de uma surgência, conforme explicado anteriormente. Esse escoamento superficial cai para 17% quando desconsidera a bacia de Escrivânia (Tab. 3).

Ressalta-se que ambos os sistemas de bacias citadas possuem um aporte externo mínimo, medido na estiagem, de aproximadamente 30%.

O alto BFI da bacia do Samambaia (99%) está sendo superes-

timado devido à regularização da vazão, conforme já mencionado. Apesar dos elevados valores encontrados em razão da regularização por barramento, os dados desta bacia foram considerados para os cálculos de recarga.

Na bacia do Jaque, o valor mais baixo de BFI (73%) é coerente com a litologia metapelítica predominante, onde as drenagens percorrem.

Na bacia Flor, o escoamento subterrâneo de 2 mm para um escoamento total de 3 mm, evidencia as intensas retiradas por poços tubulares e por captações a fio d'água, chegando a secar o córrego, não representando o comportamento natural da bacia.

O número das pequenas recessões em resposta aos eventos pluviométricos identificados variou de 20 a 23, e os índices de recessão (K) obtidos pelo programa RECESS foi de 19 a 240 dias/ciclo log, cujas influências sobre esses valores estão apontadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Cálculo dos Índices de recessão das bacias

Bacias	Nº de Eventos de Recessão	Índice de Recessão - K (dias/ciclo log)	Principais influências sobre K
Palmeira-Jaguara	23	178	Alto armazenamento
Escrivânia-Gordura	20	68	Alta velocidade de escoamento
Samambaia	21	240	Efeito do barramento artificial
Flor	20	19	Baixo armazenamento
Jaque	22	20	Baixo armazenamento

A partir dos dados de recessão e escoamento básico, calculou-se os valores de recarga líquida anual pelo programa RORA (Tab. 5), resultando em 12 a 164 mm para a recarga, isto é, sem o aporte externo de cerca de 30% em duas delas. Nas

bacias monitoradas, a recarga foi de 108 mm ou 11% da precipitação, não incorporando os volumes descarregados para fora do sistema. Esse valor mínimo será admitido nas demais bacias não monitoradas.

Tabela 5 - Recarga nas bacias monitoradas em relação à pluviometria de 1010 mm.

Bacias	Área (km ²)	Recarga Bruta (mm)	Rec. Bruta/Pluv. (%)	Recarga Líquida (mm)	Rec Líq./Pluv. (%)
Bacia do Flor	16	12	1,2	12	1,2
Escrivânia-Gordura	96	234*	21,3	164**	16,2
Gordura	39	596*	59	179**	18,0
Palmeira-jaguara	156	140*	13,5	98**	9,7
Samambaia	48	104	10,4	104	10,4
Jaque	59	72	7,1	72	7,1
Média	--	113	10,6	90	8,9
Total Ponderado (exceto Gordura)	375	143	12,2	108	10,7

* com aporte externo; ** sem o aporte externo

A bacia do Escrivânia-Gordura destacou-se pelo maior percentual de recarga, 16,2% da precipitação (164 mm), seguida do Samambaia e Palmeira-Jaguara, com 10,4% (104 mm) e 9,7% (98 mm), respectivamente. A bacia do Jaque obteve o menor valor desse percentual, 7,1% (72 mm), devido à cobertura pedregosa. Já a bacia do Flor apresentou valores insignificantes, 1,2% (12 mm), por se apresentar extremamente antropizada.

BALANÇO DE MASSA – a retirada de água dos poços tubulares e dos córregos foi avaliada. Velásquez *et al.* (2018) realizou um cadastro de 380 poços, os quais possuíam uma média de operação de 12 h/d. Para as captações superficiais, foi admitida uma retirada de 8 h/d. A partir destes dados, estimou-se a retirada de água por bacia (Tab. 6).

Tabela 6 - Balanço de massa com as retiradas por poços e captações a fio d'água

Bacias	Área (km ²)	Núm. Poços	Q Mediana poços (m ³ /h)	Q Total poços (m ³ /h)	Q superficiais (m ³ /h)	Captações poços (mm/ano)	Captações córregos (mm)
Palmeira	31	29	9,2	357,2	--	50	--
Flor	16	2	5,2	10,4	--	3	--
Jaque	59	74	9,2	902,3	--	67	--
Samambaia	48	22	10	398,1	--	36	--
Palmeira/Jaguara*	156	80	9,2	921	--	26	--
Jaguara	125	51	10	583,1	--	20	--
Escrivânia/Gordura*	96	24	12,5	251,7	75	11	2
Bom Jesus	7	5	4,8	26,5	--	17	--
Retiro	10	19	10,7	734,1	--	322	--
Confins	18	35	10	849,7	73	207	12
Margem Rib. da Mata	38	79	9,3	1727,9	194	199	15
Margem Velhas	57	40	9,3	1015,6	43	78	2
Média	46	35	9,1	623,32	96	92	31
Total área global	505	380	--	6856,5	385	119	2

*Os dados da bacia conjunta, não foi contemplado na média e no total para evitar dupla contagem; em negrito - bacias não monitoradas.

As bacias não monitoradas apresentam retiradas consideravelmente maiores por poços tubulares do que as monitoradas (Tab. 6), graças à maior densidade de poços junto aos centros urbanos na metade sul da área.

A Tabela 7 sintetiza os valores do balanço entre a recarga líquida e a saída de água por bombeamento e captação superficial. Atenta-se para os *déficits* importantes (-214 mm a -106 mm) verificados nas bacias de maior extração, Retiro, Confins e Margem Ribeirão da Mata. As demais tiveram os *superávits*: alto, de 150 mm (Escrivânia-Gordura), médio, de 68 mm, 72 mm e 91 mm (Samambaia, Palmeira-Jaguara, Bom Jesus, respectivamente) e baixo, de 4 mm, 9 mm e 28 mm (Jaque, Flor e Margem Velhas, respectivamente). No geral, a área registrou um *déficit* de -13 mm, influenciado pelas bacias da região sul.

No balanço de massa (recarga líquida) apresentado na tabela 7, foram consideradas como entradas a precipitação de 1010 mm e as duas surgências cársticas 1 e 2 (Fig. 7 e Tab. 8), com valores de 828 m³/h e 691 m³/h respectivamente, somando 1519 m³/h ou 26 mm para a área. As saídas contabilizadas são representadas pela extração dos poços tubulares, 6.856,5 m³/h ou 119 mm (Fig. 7 e Tab. 8); as captações superficiais, totalizando 385 m³/h ou 2 mm (Fig. 7 e Tab. 8); e as descargas para o Ribeirão da Mata, que descarregam através das surgências 3 (76 m³/h); 4 (25 m³/h); 5 (15 m³/h); 6 (122 m³/h) e 7 (404 m³/h) (Fig. 7 e Tab. 8), totalizando 642 m³/h ou 11 mm para a área total.

A Tabela 8 e Figura 7 resume o balanço hídrico com os quantitativos das entradas e saídas.

Tabela 7 - Recarga líquida, saídas de água das bacias e balanço hídrico

Bacias	Área (km ²)	Recarga Líquida pluvial (mm/ano)	Vol. recarga Líquida pluvial (m ³)	Saída poços (mm/ano)	Saída captações em córregos (mm)	Balanço Entradas-Saídas (mm)
Palmeira	31	--	--	--	--	--
Palmeira/Jaguara*	156	98	15.288.000	26	--	72
Gordura	39	--	--	--	--	--
Escrivânia/Gordura*	96	164	15.744.000	12	2	150
Flor	16	12	192.000	3	--	9
Jaque	59	71	4.189.000	67	--	4
Samambaia	48	104	4.992.000	36	--	68
Jaguara	125	--	--	--	--	--
Escrivânia	57	--	--	--	--	--
Bom Jesus	7	108**	756.000	17	--	91
Retiro	10	108**	1.080.000	322	--	-214
Confins	18	108**	1.944.000	207	12	-111
Margem Rib. da Mata	38	108**	4.104.000	199	15	-106
Margem Velhas	57	108**	6.156.000	78	2	28
Média	42	--	5.445.000	104	30	-0,9
Total área global	505	108	54.445.000	119	2	-13

*Os dados da bacia conjunta, não foram contemplados na média e no total para evitar dupla contagem; ** valor adotado da recarga líquida das bacias monitoradas da Tabela 5

Tabela 8 - Balanço hídrico geral da área a partir dos dados monitorados

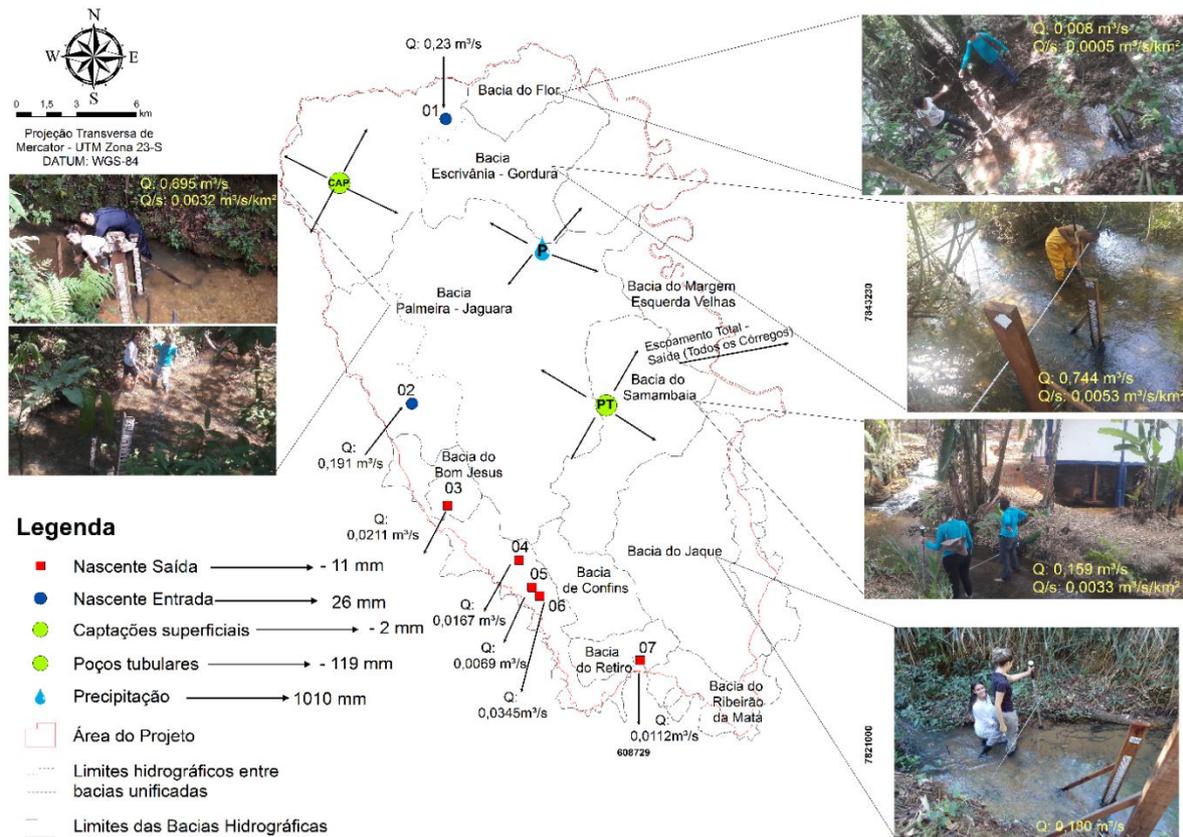
	Entradas (mm)	Saídas (mm)	Balanço Hídrico (mm)
Pluviometria	1010	--	--
Surgências cársticas 1 e 2	26	--	--
Surgências cársticas 3 a 7	--	-11	--
Captações Poços Tubulares	--	-119	--
Captações superficiais	--	-2	--
Escoamento Total (sup + subt)	--	-194	--
Total sob condições antropizadas	1036	-326	710
Total sob condições naturais	1036	-205	831

Num cenário sob condições naturais, em que as saídas de origem antrópica não ocorrem, a descarga bruta natural total é de 194 mm (19,2% da P - 1010 mm), na proporção de 1,1/1,0 (escoamento total/escoamento subterrâneo). Entretanto, desse montante total, devem ser subtraídos 26 mm oriundos das surgências caudalosas 1 e 2 (Fig. 7), resultando num escoamento total natural de 168 mm. Aplicando-se a proporção acima, o escoamento subterrâneo seria corrigido para 152 mm e o superficial para 16 mm. Esse escoamento total (168 mm) ficou aquém do estimado pelo balanço climático (260 mm) em 92 mm. Esse fato pode ser adotado como ver-

dadeiro, visto que a prática de captações a fio d'água e não outorgados são frequentes na região.

A recarga aquífera foi avaliada em 108 mm (11% da P - 1010 mm), Tabela 5, porém, os escoamentos das descargas naturais 3 a 7 (11 mm, Tab. 8) são uma parcela dessa recarga, que, ajustada, corresponde a 119 mm (12% da P - 1010 mm). Tal valor de recarga, representando 7,4 vezes o valor do escoamento superficial corrobora as excelentes condições de infiltração, como os abundantes maciços fraturados, sumidouros e dolinas.

Figura 7 - Croqui esquemático do balanço hídrico global com destaque para nascentes de entradas e de saídas de água externas ao sistema estudado



Do escoamento subterrâneo, há ainda um excedente de 33 mm que pode ser total ou parcialmente incorporado à recarga aquífera, pois diversas outras surgências na margem do rio das Velhas não puderam ser medidas. Considera-se ainda recargas de maciços calcários para zonas aquíferas mais profundas de baixa conexão com a rede de circulação superior que facilita as descargas monitoradas.

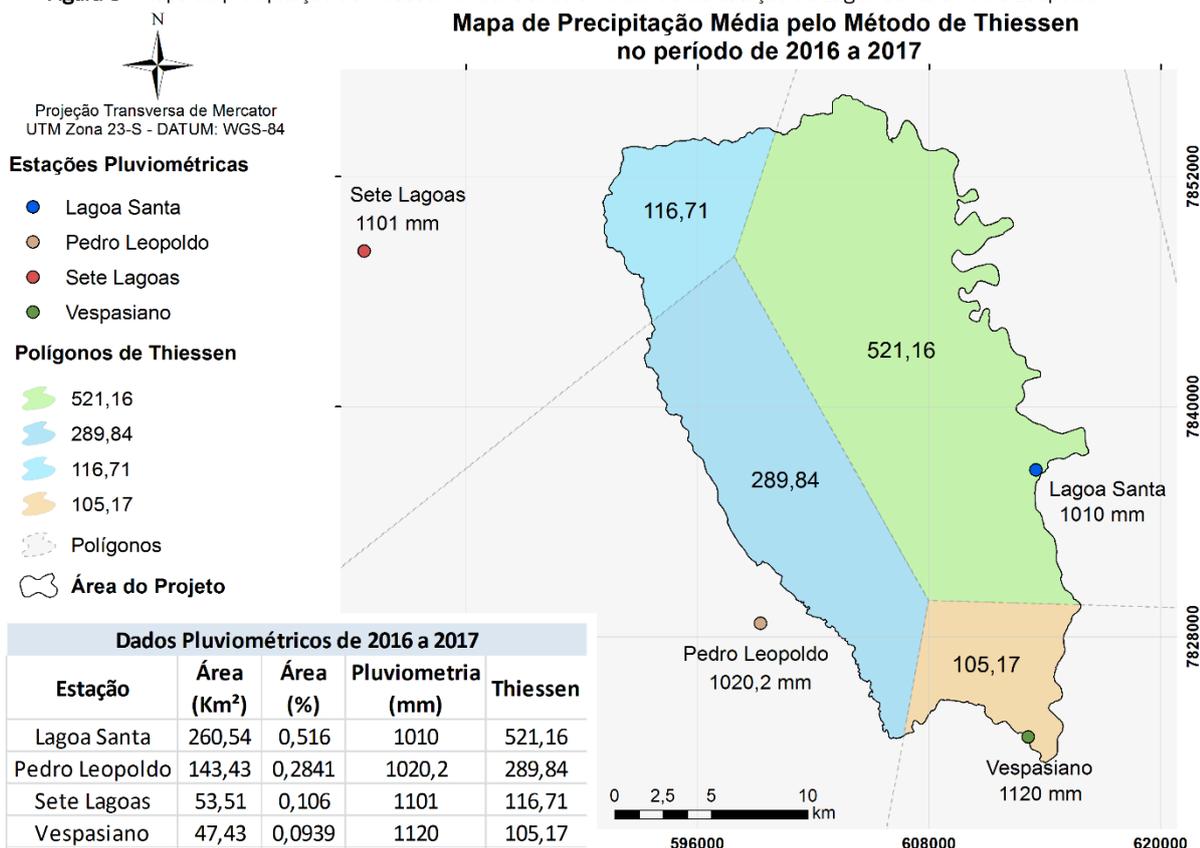
Assim, a recarga encontrada, deve ser considerada como um valor mínimo.

A pluviometria de Thiessen, 1033 mm (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018), obtida a partir de dados mensais de precipitação e temperatura resultou que as estações de Lagoa Santa e Pedro Leopoldo exercem maior influência, 50% e 25% na área, respectivamente (Fig. 8).

Assim, o balanço hídrico climático de Thornthwaite-Mather (1955) foi realizado para um total pluviométrico de 1010 mm na estação Lagoa Santa, uma capacidade de campo de 250 mm. Obtiveram-se para toda a área: ETR de 750 mm (74%), ETP de 895 mm EXC de 260 mm (26%), DEF de 145 mm, valores muito próximos aos históricos de 1961 a 1990 de Viana (1998), considerando a pluviometria de 1287 mm, ETR de 996 mm (77%), EXC de 291 mm (22,6%) e DEF de 99 mm (8%).

Ainda num cenário sob condições naturais, o escoamento total seria de 205 mm (Tab. 8), resultando um superávit de 831 mm, baixando para 710 mm se as retiradas forem incorporadas. Assim, O ETR do balanço climático estimado de 750 mm é coerente com os valores de superávit encontrados no monitoramento.

Figura 8 - Mapa de precipitação de Thiessen evidenciando a influência da estação de Lagoa Santa e Pedro Leopoldo



5. CONCLUSÕES

Os métodos empregados para o monitoramento e análise dos dados hidrológicos resultaram em quantitativos coerentes com o sistema hidrogeológico cárstico local. Permitiram identificar as variações de produtividade e de recarga entre as bacias em função das suas características hidrogeológicas e seu grau de antropização.

A recarga obtida de 119 mm (12% da pluviometria) representou 7,4 vezes o valor do escoamento superficial resultado das excelentes condições de infiltração, como os abundantes maciços fraturados, sumidouros e dolinas, o que é corroborado pela escassa rede de drenagem superficial e pelo índice de 91% do escoamento subterrâneo sobre o superficial.

As explorações em locais de maior densidade de poços tubulares colocaram em evidência 3 das 10 bacias envolvidas no estudo, que já mostram déficits em relação a recarga aplicada. Ademais, a recarga de 119 mm já equivale à água que está sendo bombeada. E as retiradas em córregos revelam elevado grau de antropização em uma bacia, com ínfima capacidade específica.

Esse estudo ainda requer ampliação de pontos de controle de entradas e saídas, contudo, o elevando grau de coerência dos resultados, confirmam a necessidade de semelhante controle em sistemas hidrogeológicos cársticos.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

(CECAV/ICMBio) pelo financiamento, Proc. FUNDEP/GERDAU/UFMG Nº 22.317, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE A. C. S. *Estimativa de recarga da bacia do rio das fêmeas através de métodos manuais e automáticos*. Dissertação (Mestrado, em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, 2009, 101p.

ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em: <http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/Estacao.aspx?est=193343540>. Acesso em: 10 mar. 2017.

AULER A. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. 1994. 110 f. Msc Thesis – Faculty of the Department of Geography and Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, 1994.

BARLOW, P.M., CUNNINGHAM, W.L., ZHAI, TONG, and GRAY, MARK, U.S. *Geological Survey Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0)*: User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. B10, 2014, 27 p.

BARLOW, P.M., CUNNINGHAM, W.L., ZHAI, TONG, and GRAY, MARK, U.S. *Geological Survey Groundwater Toolbox version 1.3.1, a graphical and mapping interface for analysis of hydro*

- logic data*: U.S. Geological Survey Software Release, 26 May 2017.
- COSTA F. M. *Análise por métodos hidrológicos e hidrogeoquímico de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas: estudo de caso no quadrilátero ferrífero – MG*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2005, 147p.
- FILHO, K. Z., SILVA, R. M., PORTO, R. L. L. *Medição de vazão e curva chave*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. PHD – 307 Hidrologia aplicada, 2001, 48p.
- GALVÃO, P., HIRATA, R., CORDEIRO, A., BARBATI, D. & PEÑHARANDA, J. Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 88, n. 1, p. 35-53, 2016.
- GOLDSCHIEDER, N.; DREW D. *Methods in Karst Hydrogeology*. International Contributions to Hydrogeology, 26, London, Taylor & Francis, 2007, 264p.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- PESSOA, P. F. P. 2005. *Hidrogeologia do aquífero cárstico coberto de Lagoa Santa, MG*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005, 375p.
- PISCOYA, R. C. C. C.; LOPES, W. T. A.; LEMOS, G. M.; SILVA, L. S.; SILVA, M. C. A. M. Análise de consistência de dados fluviométricos de estações de monitoramento da ANA localizadas nas sub-bacias hidrográficas 10 (rios Solimões, Javari e Itaquai) e 11 (rios Solimões, Içá e Jandiatuba). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves, RS. *Anais...* ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, A.V.; CÔRDOBA, C.V. *Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Morais, Confins e Funi-lândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000*. 2. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2003, 54p.
- ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.
- RUTLEDGE, A. T., DANIEL, C. C. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records. *Ground Water*. v. 32, n. 2, p. 180-189, 1994.
- SILVA, A. B.; MOREIRA, C. V. R.; CESAR, F. M.; AULER, A. *Estudo da dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos*. Unpublished technical report, CETEC, 1987, p.32.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, v. 38, p.55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. *The water balance*. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955, 104p.
- TUCCI, C. E. M. et al. *Hidrologia ciência e aplicação*. 2. ed. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002, 943 pp.
- VELÁSQUEZ, L.N.M.; (Org.) *3º Relatório parcial de 04 do projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à área piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2018. 142p.(inédito)
- VIANA, H.S.; KOHLER, H.C.; TAVARES, V.P. (Org.). *APA Carste de Lagoa Santa: meio físico – Volume I*. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998, 301p.
- WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, v. 65, p. 85-105, 2002.