



## Importância da carta de unidades aquíferas para a elaboração de zoneamento (geo)ambiental - estudo de caso na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos)

## Importance of aquifer unit chart to the preparation of (geo)environmental zoning - case study of the Monjolinho river watershed (São Carlos, SP, Brazil)

Contri Campanelli, Leandro <sup>1</sup> ✉ - Lorandi, Reinaldo

Recibido: 06 de Julio de 2012 • Aceptado: 28 de Diciembre de 2012

### Resumen

*La zonificación ambiental está siendo utilizada como instrumento para el planeamiento ambiental de cuencas hidrográficas, principalmente en lo que se refiere a la expansión urbana. Para la elaboración de la zonificación (geo)ambiental, uno de los atributos del medio físico que debe ser considerado son las unidades aquíferas - cuerpos rocosos con características favorables a la circulación y almacenamiento de agua subterránea. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo la elaboración de una carta de unidades aquíferas para la cuenca hidrográfica del río do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos), en escala 1:50.000. Esta cuenca se extiende por, aproximadamente, 275 km<sup>2</sup>, con la mayor parte de su área dentro del municipio de São Carlos y una pequeña área en el municipio vecino de Ibaté. Para la elaboración de este documento cartográfico fueron necesarios los siguientes procedimientos: delimitación de la cuenca a partir de la articulación de cartas topográficas en el software de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 9.3; vectorización del perímetro urbano de São Carlos y de parte de Ibaté a partir de imagen de satélite Landsat 5; elaboración de la carta de formaciones geológicas de superficie de la cuenca a partir de cuatro mapeos geológicos-geotécnicos. La carta de formaciones geológicas de superficie así creada, fue reclasificada, atribuyendo a cada una de las formaciones geológicas su unidad aquífera específica. Como resultado se obtuvo una carta de unidades aquíferas de la cuenca hidrográfica del río do Monjolinho en escala 1:50.000, la cual reúne dos tipos de aquíferos: sedimentarios (acuíferos Bauru, Guaraní y Aluvionar) y fracturados (acuíferos Serra Geral y Fraturado).*

**Palabras clave:** Zonificación (Geo)ambiental; Cuenca Hidrográfica; Unidades Aquíferas.

1. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

✉ leandrocontricampanelli@yahoo.com.br

## Abstract

*(Geo)environmental zoning has been increasingly employed to plan and manage watersheds vis-à-vis urban expansion. In order to conduct (geo)environmental zoning it is necessary to take into account some physical attributes of the area in question, especially aquifer units, i.e., rock bodies whose characteristics favor underground water flow and storage. In this context, the purpose of this study was to draw an aquifer unit chart for Monjolinho river basin (São Carlos, SP, Brazil) at 1:50.000 scale. This water basin encompasses an area of 275km<sup>2</sup>, most of which located in the municipality of São Carlos (a smaller part of which located in the neighboring municipality of Ibaté). In order to prepare this cartographic document the following procedures were conducted: delineation of watershed in question from topographic maps with the help of the Geographic Information System (GIS) software ArcGIS 9.3; vectorization of São Carlos perimeter - and part of Ibaté perimeter - based on Landsat 5 satellite images; drawing of a geological formation map of the basin surface based on four geological-geotechnical maps. The surface geological formation chart drawn was reclassified by having specific aquifer units assigned to each of its geological formations. The resulting 1:50.000-scale aquifer unit chart of Monjolinho river basin brings together two groups of aquifers: sedimentary (Bauru, Guarani, and Aluvionar aquifers) and fractured (Serra Geral and Fraturado aquifers).*

**Keywords:** *(Geo)environmental Zoning; Water Basin; Aquifer Units.*

## Resumo

*Um instrumento que tem sido utilizado no planejamento ambiental de bacias hidrográficas é o zoneamento (geo)ambiental, principalmente no que diz respeito à expansão urbana. Para a elaboração do zoneamento (geo)ambiental, um dos atributos do meio físico que deve ser considerado são as unidades aquíferas - corpos rochosos com características favoráveis à circulação e ao armazenamento de água subterrânea. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo a elaboração da carta de unidades aquíferas para a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos), na escala de 1:50.000. Esta bacia estende-se por aproximadamente 275 km<sup>2</sup>, tendo a maior parte de sua área contida no município de São Carlos e uma pequena parcela no município vizinho de Ibaté. Para a elaboração deste documento cartográfico foram necessários os seguintes procedimentos: delimitação da bacia a partir da articulação de cartas topográficas no software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis 9.3; vetorização do perímetro urbano de São Carlos e de parte de Ibaté a partir de imagem do satélite Landsat 5; elaboração da carta de formações geológicas de superfície da bacia a partir de quatro mapeamentos geológico-geotécnicos. A carta de formações geológicas de superfície gerada foi reclassificada, atribuindo-se a cada uma das formações geológicas sua unidade aquífera específica. Como resultado obteve-se a carta de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho na escala de 1:50.000, a qual reúne dois grupos de aquíferos: sedimentares (aquíferos Bauru, Guarani e Aluvionar) e fraturados (aquíferos Serra Geral e Fraturado).*

**Palavras chave:** *Zoneamento (Geo)ambiental; Bacia Hidrográfica; Unidades Aquíferas.*

## INTRODUÇÃO

Atualmente verifica-se uma tendência dos planejadores adotarem a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão.

“A bacia hidrográfica é uma unidade física e biogeofisiográfica com fronteiras delimitadas e que pode estender-se por várias escalas espaciais - desde pequenas bacias hidrográficas de 10, 20, 200 km<sup>2</sup>, até grandes bacias hidrográficas, como, por exemplo, a bacia do rio da Prata (3.000.000 km<sup>2</sup>)” (IIE-GA, 2009).

As bacias hidrográficas encontram-se submetidas a um grande número impactos ambientais diversificados, como, por exemplo, incidência de processos erosivos (sulcos, ravinas e voçorocas), assoreamento de canais de drenagem, disposição inadequada de resíduos sólidos diversificados, poluição e contaminação de corpos d'água continentais (rios, lagos, represas e reservatórios), exposição do solo e remobilização de materiais inconsolidados, remoção de matas ciliares e de áreas de várzea, os quais, muitas vezes, são decorrentes do crescimento desordenado das cidades.

Um instrumento que, nos últimos anos, tem sido utilizado para subsidiar o planejamento ambiental de bacias e microbacias hidrográficas, sobretudo no que diz respeito à expansão urbana, é o zoneamento (geo)ambiental.

Este último corresponde à compartimentação do território em zonas, com base na avaliação dos atributos do meio físico mais relevantes e de suas dinâmicas.

Quando se pretende elaborar um documento cartográfico de zoneamento (geo)ambiental, com o intuito de auxiliar a atuação de gestores e planejadores nos processos de produção do espaço, um dos atributos do meio físico que deve ser considerado são as unidades aquíferas, cujas características estão relacionadas principalmente com as formações geológicas existentes ao longo do território.

As unidades aquíferas se colocam em uma posição estratégica no contexto da elaboração de um zoneamento (geo)ambiental, pelo fato de que, muitas delas, constituem grandes mananciais subterrâneos de água doce utilizados para fins diversificados.

“No Brasil, em função dos quadros hidrogeológicos dominantes ao longo de toda a extensão do território do país, os corpos rochosos que possuem características favoráveis à circulação e ao armazenamento de água subterrânea – os aquíferos – apresentam as seguintes características: a) podem ter extensões que variam entre alguns quilômetros quadrados até milhões de quilômetros quadrados; b) podem ter espessuras de alguns metros até centenas de metros; c) podem ocorrer na superfície ou se encontrarem em profundidades de até milhares de metros; d) podem estar encerrados entre camadas pouco permeáveis; e) podem ter porosidade/permeabilidade intergranular ou de fraturas; f) podem fornecer água de excelente qualidade para fins diversificados; g) podem apresentar águas relativamente salinizadas” (Rebouças, 2006).

Ainda em relação ao Brasil, a grande quantidade de água subterrânea existente ao longo de toda a extensão do território do país é distribuída, de maneira simplificada, em dois grandes grupos de aquíferos: aquíferos de rochas e materiais sedimentares e aquíferos de rochas fraturadas.

“Os aquíferos de rochas e materiais sedimentares são associados aos terrenos sedimentares, os quais ocupam cerca de 4,13 milhões de km<sup>2</sup>, ou seja, 48,5% do país. Bacias sedimentares relacionadas a esses terrenos são as bacias do Proterozóico/Paleozóico, Proterozóico/Mesozóico e Paleozóico e as bacias menores do Mesozóico e Cenozóico. Nesses terrenos encontram-se 27 sistemas aquíferos de porosidade granular e, subordinadamente, cársticos e fraturados, com área de afloramento ou recarga de 2,76 milhões de km<sup>2</sup> (aproximadamente 32% do país)” (Hirata, Zoby & Oliveira, 2010).

“Os aquíferos de rochas fraturadas são associados aos terrenos cristalinos pré-cambrianos, os quais ocupam área de cerca de 4,38 milhões de km<sup>2</sup> (aproximadamente 51,5% do território brasileiro) e se comportam como aquíferos fraturados típicos. Esses terrenos coincidem, em grande parte, com o Cráton do Amazonas e os cinturões de dobramento do Neoproterozóico, englobando parte do Cráton do São Francisco” (Hirata, Zoby & Oliveira, 2010).

“No Estado de São Paulo, os aquíferos de rochas e materiais sedimentares que se destacam pela capacidade de produção de água subterrânea são os Aquíferos Guarani, Bauru, Taubaté, São Paulo e Tubarão. Já com relação aos aquíferos de rochas fraturadas (ígneas e metamórficas), os que se destacam no Estado são o Aquífero Serra Geral e o Aquífero Cristalino” (Iritani & Ezaki, 2008).

É importante ressaltar que as águas subterrâneas reservadas em aquíferos são fundamentais para o desenvolvimento humano e a composição química dessas águas é influenciada pelas rochas e sedimentos que conformam os aquíferos e pelas características climáticas ocorrentes nas áreas de recarga - locais onde os aquíferos são recarregados pelas águas da precipitação.

No Brasil, as águas subterrâneas desempenham papel estratégico no abastecimento público e privado, suprimindo as mais variadas necessidades de água em cidades e comunidades, assim como em sistemas autônomos residenciais, indústrias, serviços, irrigação de cultivos agrícolas e lazer.

“Avaliações preliminares dão indicação de que as águas subterrâneas armazenadas em aquíferos servem para o abastecimento de 30 a 40% da população do Brasil, sobretudo em cidades de pequeno e médio porte” (Hirata, Zoby & Oliveira, 2010).

Nesse contexto, é fundamental que as obras de captação de águas subterrâneas – poço escavado (cacimbão) ou tubular

profundo, galeria ou túnel – sejam construídas conforme as características técnicas mínimas necessárias de uso e proteção, minimizando a incidência de processos de contaminação. “A definição sistemática do perfil hidrogeológico – características e espessuras dos tipos litológicos atravessados pela perfuração – constitui uma das tarefas básicas mais importantes a ser executada durante a exploração dos mananciais subterrâneos” (Rebouças, 2006).

Por último, o papel ecológico das águas subterrâneas também deve ser destacado, principalmente no que diz respeito à manutenção da fauna e da flora e à perenização da maior parte dos rios, lagos e pântanos. Esta última atribuição das águas subterrâneas encontra-se diretamente relacionada com a descarga de aquíferos, através dos fluxos de base.

## OBJETIVO

O trabalho teve como objetivo a elaboração da carta de unidades aquíferas para a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos), na escala de 1:50.000, a qual poderá auxiliar trabalhos futuros da área de planejamento ambiental e do meio físico, relacionados à elaboração da carta de zoneamento (geo)ambiental da bacia em questão (Campanelli, 2012).

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

“A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho estende-se por área de aproximadamente 275 km<sup>2</sup>, tendo a maior parte de sua área contida no município de São Carlos e uma pequena parcela correspondendo ao município vizinho de Ibaté, no Estado de São Paulo” (Espíndola, 2000).

Essa bacia hidrográfica (Figura 1) tem como característica principal o desenvolvimento urbano de São Carlos e todos os impactos decorrentes deste processo, muitos dos quais com reflexos diretos sobre o meio físico (ex.: feições erosivas, desestabilização de taludes, etc.) e sobre a qualidade da água dos ecossistemas aquáticos pertencentes à bacia (ex.: degradação da qualidade da água, em função da lixiviação de poluentes e contaminantes).

A sub-bacia hidrográfica do rio do Monjolinho é parte integrante da bacia hidrográfica do rio Jacaré-Guaçu, sendo este um dos afluentes da margem direita do rio Tietê, o qual recebe este afluente no reservatório de Ibitinga – um dos sistemas que pertence ao complexo de reservatórios construídos em cascata no rio Tietê.

Levando-se em consideração a divisão do Estado de São Paulo em Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), com base nas principais bacias hidrográficas do Estado, a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho encontra-se inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 (UGRHI 13), a qual corresponde à bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré.

Em relação ao uso e ocupação do solo da bacia, as principais atividades que, ao longo dos anos, foram responsáveis pela modificação da paisagem natural, gerando, em algumas situações, grandes impactos ambientais, foram: cultura do café (ciclo cafeeiro – apogeu entre 1876 e 1888); indústrias (as primeiras atividades industriais se instalaram na região em função do ciclo cafeeiro e em consonância com a imigração); agroindústria açucareira (fator relevante na modificação da paisagem natural desde a década de 1950); pecuária.

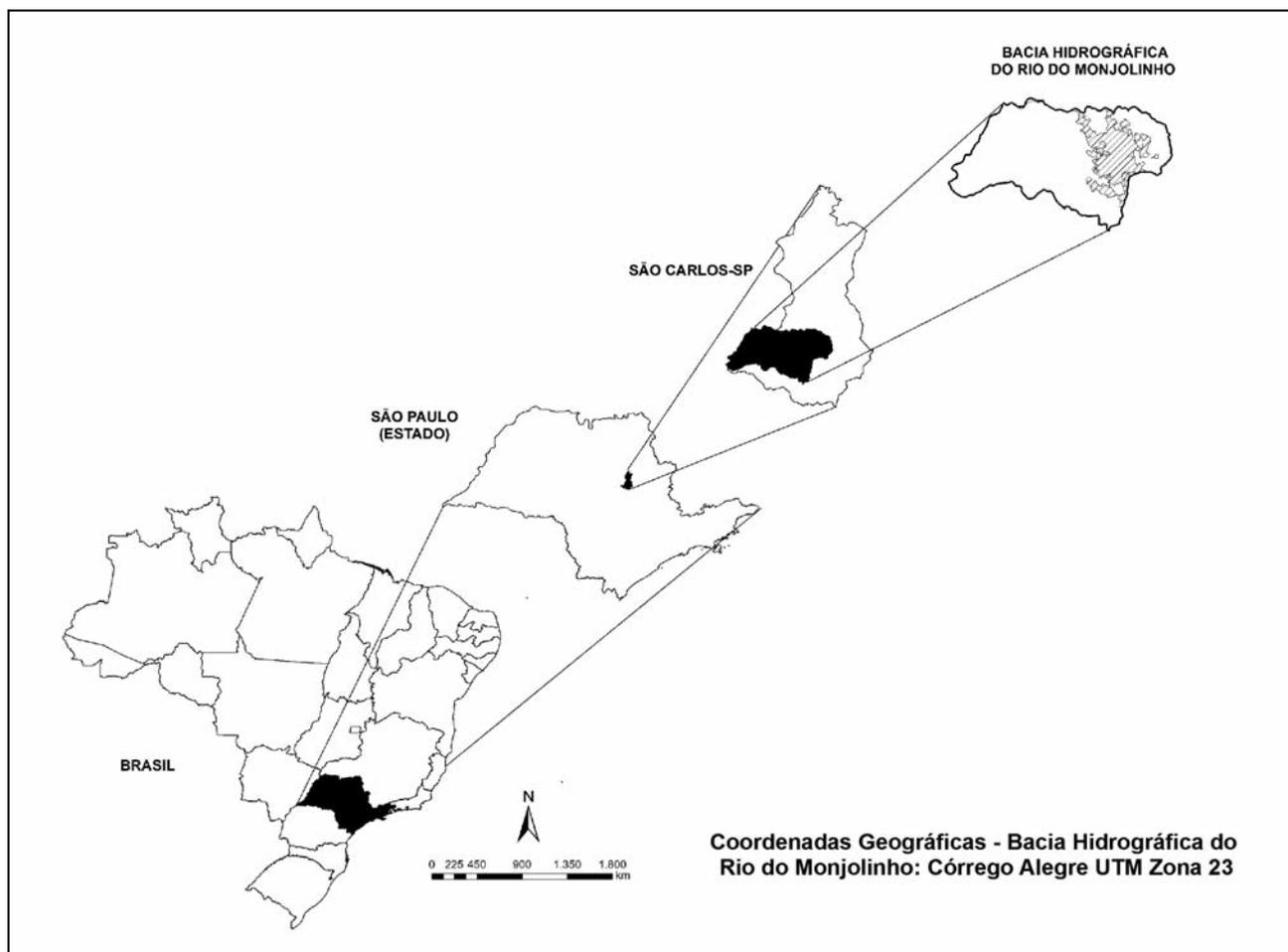


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. Fonte: Leandro Contri Campanelli (2012).

“O rio do Monjolinho, principal córrego da bacia em questão, possui extensão de aproximadamente 43,25 km e nasce no Planalto de São Carlos, a leste do município, na cota de 900 metros, percorrendo o sentido leste-oeste, dando origem a uma grande planície de inundação” (Espíndola, 2000). Ao longo do perímetro urbano de São Carlos, o rio do Monjolinho apresenta alguns trechos canalizados e recebe contribuições de vários tributários, como os córregos Santa Maria Madalena, Tijuco Preto, do Mineirinho e do Gregório e também de águas residuárias – esgotos domésticos e efluentes provenientes de atividades industriais diversificadas (papel, alimentos, tintas, etc.). Fora do perímetro urbano, o rio do Monjolinho recebe contribuições de outros tributários, como os córregos Água Quente, Água Fria, do Cancã, da Serra e do Palmital.

“Com relação às características climáticas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, o clima regional classifica-se, segundo sistemática de Köppen, como Cwb, com duas estações climáticas bem definidas: uma seca (de abril a setembro) e outra chuvosa (de dezembro a fevereiro). As médias anuais de precipitação variam entre 1200 e 1500 mm e os ventos frequentes são os de noroeste (30% do ano) e sudoeste (20% do ano), com velocidade média entre 3,5 e 4 m/s” (Espíndola, 2000).

“Com relação ao relevo, a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho caracteriza-se por uma variedade de formas. As formas de relevo características da bacia em questão são: Relevo

Colinoso e Relevo Escarpado. Formas de relevo menos expressivas e que também são verificadas na bacia são: Planícies Aluviais e Testemunhos” (Sé, 1992 *apud* Maciel, 2000).

Com relação à geologia, pode-se afirmar que as formações geológicas de superfície predominantes ao longo de toda a extensão da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Formação Serra Geral e Formação Botucatu, pertencentes ao Grupo São Bento, Formação Adamantina, relativa ao Grupo Bauru, e Formação Pirambóia. Na bacia hidrográfica em questão também há ocorrência de Suítes Básicas e Depósitos Recentes do Quaternário.

A Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento, caracteriza-se por rochas eruptivas básicas extrusivas, como, por exemplo, o basalto, com a presença de alguns corpos intrusivos subsuperficiais na forma de diques e sills, intercalados localmente por arenito eólico.

A origem das rochas basálticas pertencentes à Formação Serra Geral encontra-se associada a atividades vulcânicas do tipo fissural que ocorreram a partir do período Jurássico Superior, ao longo da região que corresponde à Bacia Sedimentar do Paraná.

A Formação Botucatu, pertencente ao Grupo São Bento, caracteriza-se por arenitos de coloração esbranquiçada, adquirindo coloração avermelhada à medida que os arenitos se aproximam dos magmatitos da Formação Serra Geral.

“Em função das características dos sedimentos que compõem a Formação Botucatu, sobretudo a predominância do arenito de granulometria fina, elevado grau de arredondamento dos grãos e presença de estruturas sedimentares com estratificação cruzada, acredita-se que a formação geológica em questão ocorreu devido à deposição de origem eólica e contribuição secundária proveniente de sedimentação fluvial e/ou lacustre” (Maciel, 2000).

Do ponto de vista litoestratigráfico, a Formação Botucatu é característica do período Jurássico (Era Mesozoica).

“A Formação Adamantina, relativa ao Grupo Bauru, caracteriza-se por bancos de arenitos de granulação fina, coloração que varia de róseo a castanho, estratificação cruzada e espessuras variando entre 2 e 20 metros, alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos de coloração que varia de castanho-avermelhado a cinza-castanho, maciços ou com acabamento plano-paralelo grosseiro” (IPT, 1981 apud Maciel, 2000).

Do ponto de vista litoestratigráfico, o Grupo Bauru é característico do período Cretáceo Superior (Era Mesozoica).

“A Formação Pirambóia, por sua vez, caracteriza-se por arenitos de granulometria que varia de fina a média, de coloração amarelada e com predominância de finos” (Zuquette, 1981).

Do ponto de vista litoestratigráfico, a Formação Pirambóia é característica do Triássico-Jurássico (Era Mesozoica).

As Suítes Básicas, que também podem ser verificadas na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, especificamente nas proximidades da foz do rio do Monjolinho, caracterizam-se por rochas intrusivas magmáticas básicas, que afloram em decorrência de processos erosivos das rochas sobrejacentes.

Com relação aos Depósitos Recentes do Quaternário, estes caracterizam-se por materiais sedimentares (sedimentos de granulação fina e argilas) e matéria orgânica depositados recentemente pela ação dos rios, ao longo de áreas de fundos de vale (planícies aluvionares).

“Com relação à pedologia, os tipos de solo presentes ao longo da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Latossolos, com destaque para o Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo; Areias Quartzosas Profundas; Solos Litólicos; Solos Hidromórficos; Terra Roxa Estruturada” (Souza, Santos & Palhares, 2000).

“As formações vegetacionais de ocorrência na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Floresta Estacional Semidecidual Submontana (mata); Floresta Estacional Semidecidual Aluvial (mata ciliar); Savana Florestada (Cerradão); Savana Arborizada (Cerrado); Capoeiras (áreas em processo de sucessão ecológica, que caracterizam-se por vegetação secundária composta por gramíneas e arbustos esparsos)” (Silva, Abdon & Paranaguá, 2000).

Ao longo da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho também pode-se verificar fragmentos reflorestados com espécies exóticas de Pinus e Eucalyptus e grandes áreas de pastagem e de cultivo de cana de açúcar que reduziram significativamente, ao longo dos anos, as áreas de vegetação nativa.

## MATERIAIS E MÉTODOS - ELABORAÇÃO DA CARTA DE UNIDADES AQUÍFERAS

Para a elaboração da carta de unidades aquíferas foi necessário, inicialmente, a elaboração da carta de formações geológicas de superfície da bacia, na escala de 1:50.000.

Esta última serviu como base para a produção da carta de unidades aquíferas, uma vez que as unidades aquíferas são correspondentes às formações geológicas existentes na área de estudo.

Para a geração da carta de formações geológicas de superfície, realizou-se a articulação de quatro cartas topográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) na escala de 1:50.000 – folhas de São Carlos (SF-23-Y-A-I-1), Ibaté (SF-23-V-C-IV-3), Araraquara (SF-22-X-D-VI-4) e Ribeirão Bonito (SF-22-Z-B-III-2) – no software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis 9.3 e utilizando-se a referência espacial “Córrego Alegre UTM Zona 23”.

Esta articulação das quatro cartas topográficas do IBGE possibilitou a delimitação da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, partindo da foz do rio do Monjolinho, seguindo perpendicularmente as curvas de nível e passando pelos pontos cotados.

Para a delimitação e vetorização do perímetro urbano de São Carlos e de parte do perímetro urbano de Ibaté, utilizou-se imagem de satélite atualizada proveniente do satélite Landsat 5 e baixada gratuitamente do site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Para completar este documento cartográfico, foram utilizados quatro mapeamentos geológico-geotécnicos, os quais compartimentaram a bacia hidrográfica nas seguintes formações geológicas de superfície: Formação Adamantina, relativa ao Grupo Bauru; Formação Serra Geral e Formação Botucatu, relativas ao Grupo São Bento; Formação Pirambóia; Depósitos Recentes do Quaternário; Suítes Básicas.

Os mapeamentos geológico-geotécnicos utilizados foram: a) Mapa de Substrato Rochoso desenvolvido por Muro (2000) para o município de São Carlos; b) Mapa Geológico da Região de São Carlos, realizado por Zuquette (1981); c) Mapeamento geológico-geotécnico da folha de Ribeirão Bonito; d) Mapa Fotogeológico da Região de São Carlos, desenvolvido por Fiori, Gama Jr. & Caetano (1976).

Por fim, para a geração do documento cartográfico representativo das unidades aquíferas da bacia, efetuou-se a reclassificação da carta de formações geológicas de superfície anteriormente gerada, atribuindo-se a cada uma das formações geológicas de superfície de ocorrência na bacia sua unidade aquífera específica.

Para o cálculo das porcentagens referentes a cada uma das unidades aquíferas em relação à área total da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, utilizou-se o módulo “Calculate Geometry” do software ArcGis 9.3.

## RESULTADOS

Como resultado do trabalho, obteve-se a carta de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, na escala de 1:50.000 (Figura 2). Esta carta reúne dois grupos de aquíferos: aquíferos sedimentares (apresentam porosidade intergranular) e aquíferos fraturados (apresentam porosidade de fraturas).

Os aquíferos sedimentares são representados pelo Aquífero Bauru, Aquífero Guarani e Aquífero Aluvionar.

Os aquíferos fraturados da bacia são representados pelo Aquífero Serra Geral e Aquífero Fraturado.

“O Aquífero Bauru é formado por rochas sedimentares arenosas, areno-argilosas e siltosas pertencentes ao Grupo Bauru e depositadas em ambiente desértico e fluvial, sob clima árido e semi-árido, há mais de 65 milhões de anos” (Iritani & Ezaki, 2008). Trata-se de um aquífero freático, cuja recarga ocorre diretamente pela precipitação pluvial ao longo de toda sua extensão, sendo que sua base de drenagem é constituída pelos rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná. Sua espessura é irregular, atingindo valores superiores a 300 metros na região do Planalto de Marília.

Com relação à litologia do Aquífero Bauru, em sua porção superior, os arenitos são intercalados por camadas de sedimentos de granulometria fina, como, por exemplo, lamitos e siltitos, ou possuem uma cimentação carbonática entre os grãos de areia, que reduz a capacidade deste aquífero de armazenar e transmitir água. Na porção basal ou inferior predominam arenitos com baixo teor de material fino, conferindo maior produtividade aos poços perfurados. Trata-se de um aquífero poroso e livre.

O Aquífero Guarani é relativo às formações geológicas Botucatu e Pirambóia e se caracteriza por ser sedimentar, poroso, livre e confinado. “A porção aflorante deste aquífero, isto é, aquela que pode ser observada na superfície do terreno e que tem comportamento de aquífero livre, é pequena quando comparada com sua área total. No Estado de São Paulo, a porção

aflorante estende-se por cerca de 16.000 km<sup>2</sup>, de Rifaina, ao norte, a Fartura, ao sul, passando pela região de Ribeirão Preto e Botucatu. Nesta porção aflorante, a espessura média atinge 100 metros. Sua maior área de ocorrência no Estado, aproximadamente 174.000 km<sup>2</sup>, em sentido oeste, é confinada pelos basaltos do Aquífero Serra Geral e pelas rochas do Aquífero Bauru” (Iritani & Ezaki, 2008).

“Com relação à litologia, o Aquífero Guarani é constituído principalmente por arenitos de granulação média a fina, depositados pela ação eólica em ambiente desértico há cerca de 130 milhões de anos. Pelo fato de estes arenitos apresentarem certa homogeneidade, os mesmos possuem grandes quantidades de poros interconectados que possibilita o armazenamento de grandes quantidades de água subterrânea” (Iritani & Ezaki, 2008).

O Aquífero Guarani é o maior manancial de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo, fornecendo água de excelente qualidade para usos humanos diversificados, como, por exemplo: abastecimento da população, desenvolvimento de atividades econômicas e lazer. “Está localizado na região centro-leste da América de Sul, estendendo-se pelo Brasil (71%), Paraguai (6,1%), Uruguai (3,8%) e Argentina (19,1%) e ocupando área de 1,2 milhões de km<sup>2</sup>” (OEA, 2009 apud Albuquerque Filho, 2011).

O Aquífero Aluvionar é relativo aos Depósitos Recentes do Quaternário e se caracteriza por ser sedimentar, poroso e livre. Este tipo de aquífero ocorre em fundos de vale, nos quais há depósitos de materiais sedimentares e de matéria orgânica pelas cheias dos rios.

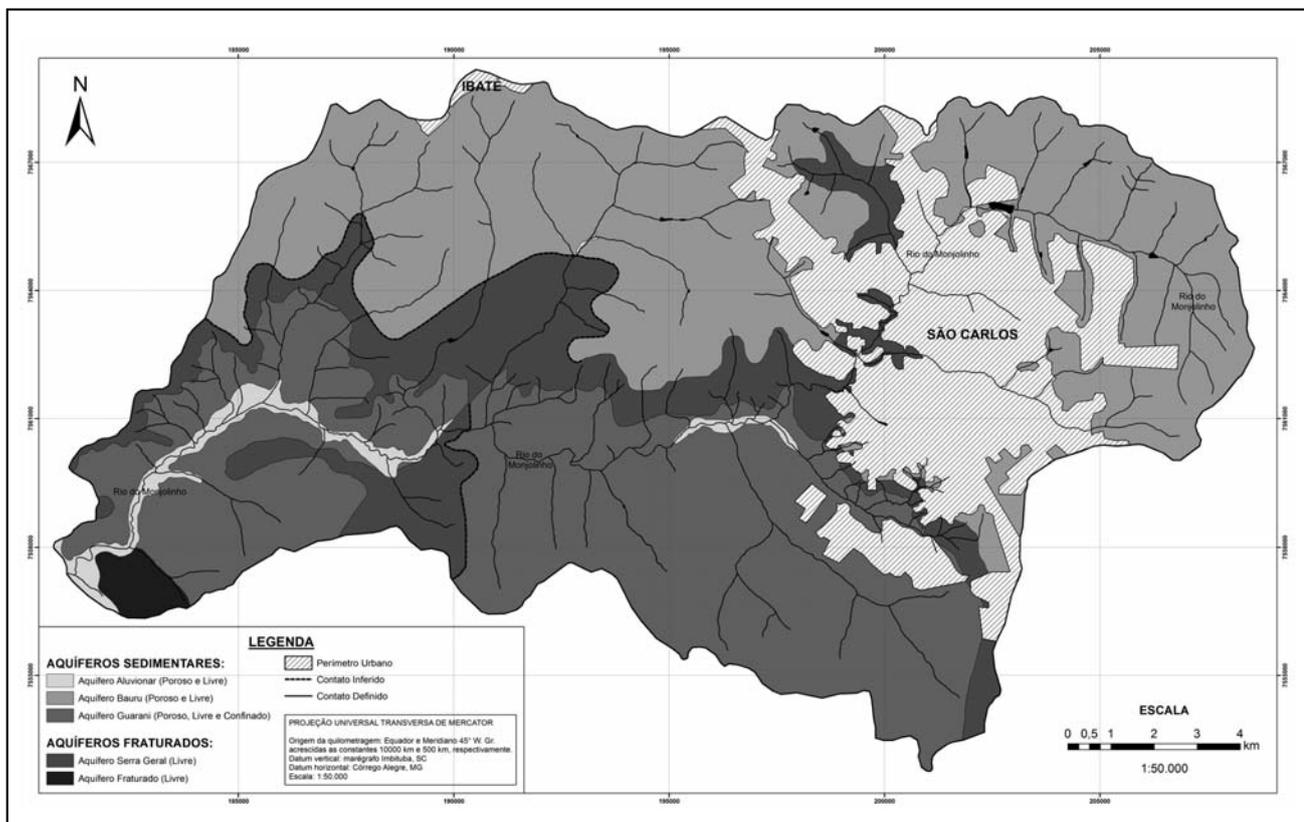


Figura 2. Mapa de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (São Carlos, SP). Fonte: Leandro Contri Campanelli & Reinaldo Lorandi (2012).

“O Aquífero Serra Geral, por sua vez, foi formado entre 138 e 127 milhões de anos atrás e é constituído por rochas, sobretudo basaltos, originadas dos derrames basálticos (derrames de lava vulcânica) da Formação Serra Geral e intrusões diabásicas. Nos basaltos (rochas compactas, duras e de coloração escura), as aberturas favoráveis ao armazenamento e ao fluxo de água subterrânea são fraturas originadas durante o resfriamento dos derrames de lava vulcânica e também posteriormente à consolidação das rochas como resultado dos esforços tectônicos decorrentes da movimentação da crosta terrestre. Entre os derrames de lava vulcânica também podem aparecer outras feições geológicas favoráveis à circulação de água, as quais são representadas por camadas arenosas restritas e níveis de amígdalas e vesículas (bolhas aprisionadas durante o resfriamento da lava vulcânica, gerando estruturas em forma de pequenas cavidades ocas ou preenchidas por minerais)” (Iritani & Ezaki, 2008).

“Em sua área de afloramento, onde se concentra grande parte dos poços perfurados, a espessura do Aquífero Serra Geral alcança, em média, 300 metros” (Iritani & Ezaki, 2008).

Este aquífero também se caracteriza por apresentar água de excelente qualidade para usos diversificados, incluindo abastecimento público e consumo humano.

O tipo de aquífero associado às Suítes Básicas é o fraturado, que se caracteriza por ser livre.

As porcentagens referentes a cada uma das unidades aquíferas em relação à área total da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Aquífero Bauru (34%), Aquífero Guarani (31%), Aquífero Aluvionar (2%), Aquífero Serra Geral (14%) e Aquífero Fraturado (1%). O perímetro urbano de São Carlos e parte do perímetro urbano de Ibaté correspondem a 18% em relação à área total da bacia.

## DISCUSSÃO

A definição das unidades aquíferas no contexto da elaboração de um zoneamento (geo)ambiental para uma bacia hidrográfica, visando balizar a expansão urbana, é fundamental para se restringir a ocupação de porções da bacia que abrigam áreas de recarga (áreas frágeis, nas quais ocorre o recarregamento do aquífero pelas águas provenientes da precipitação).

Nesse contexto, é importante ressaltar que a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho abriga porções que correspondem a áreas de recarga dos aquíferos que fazem parte da bacia, com destaque para as áreas de recarga do Aquífero Guarani, as quais demonstram um histórico de ocupação irregular, principalmente em áreas periféricas da cidade de São Carlos (SP).

Diversos estudos mostram que os aquíferos vêm sofrendo um processo difuso de contaminação em suas áreas de afloramento, que culmina em alterações significativas na qualidade da água reservada.

Como exemplo pode-se citar o trabalho de *Barbosa et al. (2011)*, o qual demonstra que “o Aquífero Guarani vem sofrendo um processo difuso de contaminação em sua área de afloramento no Estado de São Paulo, em função, principalmente, do avanço do uso da terra para as atividades agrícolas que utilizam agroquímicos (fertilizantes, pesticidas, herbicidas, fungicidas, nematicidas, acaricidas e formicidas - compostos que apresentam grande mobilidade na água subterrânea), como, por exemplo, cana de açúcar, café, cítricos e milho” (*Barbosa et al., 2011*).

*Barbosa et al. (2011)* também enfatizaram “a necessidade de ampliação do conhecimento hidrogeológico relacionado ao Aquífero Guarani, dos aspectos de uso e ocupação do solo nos terrenos correspondentes às áreas de afloramento e também o monitoramento contínuo da qualidade da água, pois os resultados do estudo demonstraram que a vulnerabilidade à contaminação do aquífero varia de média a alta” (*Barbosa et al., 2011*).

“Alguns compostos, provenientes de atividades urbanas e rurais, que são capazes de gerar cenários de contaminação nos aquíferos brasileiros são: nitrato (reflexo da falta de sistemas de esgotamento sanitário em diversos municípios e da aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas); combustíveis líquidos derivados do petróleo (vazamentos em tanques de armazenamento dá origem à pluma de contaminação); metais pesados e solventes clorados (muito comuns em diferentes atividades industriais); chorume (líquido resultante da decomposição da matéria orgânica presente em resíduos sólidos domésticos, que apresenta alto potencial poluidor); vírus e bactérias” (*Hirata, Zoby & Oliveira, 2010*).

Diante disso, algumas medidas capazes de assegurar a não progressão dos processos difusos de contaminação e a consequente inviabilização da utilização das águas subterrâneas provenientes das diferentes unidades aquíferas para fins humanos diversificados são: caracterização detalhada do perigo de contaminação (identificação de locais que podem sofrer contaminação das águas com mais facilidade); iniciativas de planejamento e ordenamento do território, voltadas para o disciplinamento do uso e ocupação do solo, principalmente nas áreas de recarga; implantação e manutenção de vegetação no entorno e ao longo de áreas de recarga, a qual além de facilitar a recarga do aquífero pelas águas da precipitação atua como um filtro natural na retenção de poluentes e contaminantes.

## TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

ALBUQUERQUE FILHO, J. L., 2011.

Subsídios ao plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do sistema aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.

BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M. DE; IKEMATSU, P.; FILHO, J. L. A. & CAVANI, A. C. M., 2011.

Avaliação do perigo de contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua área de afloramento do Estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas.

*Águas Subterrâneas*, v. 25, n.1, p.1-14.

CAMPANELLI, L. C., 2012.

Zoneamento (geo)ambiental analítico da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (São Carlos - SP).

*Trabalho de Qualificação (Mestrado Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos.*

- ESPÍNDOLA, E. L. G., 2000.  
O rio do Monjolinho: um estudo de caso.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Editora Rima.*
- FIORI, A. P.; GAMA JR., E. & CAETANO, M. R., 1976.  
Mapa fotogeológico da região de São Carlos.  
*Escala 1:100.000.*
- HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G. & OLIVEIRA, F. R. DE, 2010.  
Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial.  
*In: Bicudo, C. E. De M.; Tundisi, J. G. & Scheuenstuhl, M. C. B. Águas do Brasil: análises estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica.*
- INSTITUTO INTERNACIONAL DE ECOLOGIA E GERENCIAMENTO AMBIENTAL - IIEGA, 2009.  
Manual de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas.  
*São Carlos: Editora Cubo.*
- IRITANI, M. A. & EZAKI, S., 2008.  
As águas subterrâneas do Estado de São Paulo.  
*São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente - SMA.*
- MACIEL, G. DE C., 2000.  
Geologia e geomorfologia.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Ed. Rima.*
- MURO, M. D., 2000.  
Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos -SP.  
*Dissertação (Mestrado Geotecnica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.*
- REBOUÇAS, A. DA C., 2006.  
Águas subterrâneas.  
*In: Rebouças, A. da C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Ed. Escrituras.*
- SILVA, J. DOS S. V. DA; ABDON, M. DE M.; PARANAGUÁ, P. A., 2000.  
Remanescentes de vegetação.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Ed. Rima.*
- SOUZA, P. A. P.; SANTOS, M. B. DOS; PALHARES, J. C., 2000.  
Pedologia.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Ed. Rima.*
- ZUQUETTE, L. V., 1981.  
Mapeamento geotécnico preliminar da região de São Carlos.  
*Dissertação (Mestrado Geotecnica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.*