

Espacialização e classificação de topos como zonas preferenciais de recarga natural de aquíferos: o caso de Belo Horizonte – MG

Miguel Fernandes Felipe
(IGC/UFMG, Mestrando em Geografia e Análise Ambiental pela UFMG)

Antônio Pereira Magalhães Júnior
(IGC/UFMG; Doutor em Desenvolvimento Sustentável pela UnB)

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de classificação qualitativa de topos como zonas de recarga de aquíferos, tendo como estudo de caso o município de Belo Horizonte. A metodologia foi embasada em pressupostos teóricos do comportamento natural dos topos em relação aos processos de infiltração, percolação, armazenamento e transmissão de água. Além disso, as pressões humanas de um espaço metropolitano foram consideradas. Uma matriz de oito variáveis ambientais foi produzida e os resultados mostram que a recarga de aquíferos de Belo Horizonte está comprometida pela intensa ocupação humana, bem como pelas limitações naturais do ambiente.

Abstract

This work presents a qualitative proposition for hilltops classification as aquifer recharge zones. The study areal unit is the municipality of Belo Horizonte, MG, Brazil. The methodology was based in theoretical statements about the natural patterns of the hilltops to infiltration, percolation and underground water storage and transmission. Besides, human influences in a metropolitan space were also considered. A matrix of eight environmental variables was produced and the results show that the aquifer recharge in Belo Horizonte is harmed by the intense human occupation, and by natural limitations of environment.

Palavras-chave aquíferos; recarga; topos; meio ambiente; Belo Horizonte.

Key words *aquifers; recharge; hilltops; environment; Belo Horizonte.*

felippegeo@yahoo.com.br
magalhaesufmg@yahoo.com.br

Introdução

A recarga dos aquíferos é um processo essencial para a dinâmica entre águas superficiais e subterrâneas. Porém, o discurso do senso comum – reproduzido equivocadamente por alguns cientistas – tende a considerar as águas tendo em vista apenas a parcela superficial da hidrosfera. A dinâmica desta com a atmosfera e a subsuperfície é imprescindível na manutenção da vida no planeta. Por isso, alterações em quaisquer das etapas do ciclo hidrossocial são evidenciadas, em maior ou menor escala, na drenagem superficial.

Sendo clara a importância das águas subterrâneas, a recarga dos aquíferos emerge como um problema-chave na dinâmica hidrológica de áreas densamente ocupadas, como as metrópoles (HALL, 1984; TUCCI *et al.*, 1995; SILVEIRA *et al.*, 2002). O intenso uso deste recurso, associado à impermeabilização do solo, tende a distorcer a dinâmica das águas subterrâneas, podendo apresentar graves conseqüências à população.

Todavia, a recarga dos aquíferos não ocorre de forma homogênea no espaço. Tomando-se a vertente como unidade de interpretação hidrogeomorfológica, o topo representa uma zona preferencial para os processos de infiltração, os quais tendem a alimentar as zonas mais profundas dos aquíferos.

A eficiência das zonas de recarga de aquíferos está relacionada, sobretudo, à capacidade dos ambientes superficiais em permitir a infiltração de água, bem como à capacidade de armazenamento hidrológico subterrâneo (FETTER, 1994). Indubitavelmente, as condições determinantes do processo de infiltração condicionam a recarga (REBOUÇAS, 1999; WARD e TRIMBLE, 2004). Todavia, também é fundamental o processo de percolação que determina a dinâmica dos fluxos subsuperficiais (TODD e MAYS, 2005).

Por outro lado, as capacidades de armazenamento e transmissividade dos aquíferos são, também, determinantes para a recarga ao constituírem um fator limitante (TODD e MAYS, 2005). Características litológicas, estruturais e estratigráficas promovem comportamentos variados das rochas em relação à água subterrânea (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 1997; FREEZE e CHERRY, 1979).

As características climáticas, em princípio, também são importantes para a recarga de aquíferos. Entretanto, possuem a limitação temporal dos dados, posto que cada evento climático terá um comportamento distinto em relação à recarga. Isso complexifica a inclusão da precipitação, por exemplo, em análises de escala tempo-espaciais não restritas.

Dessa forma, pode-se dizer que a eficiência das zonas de recarga relaciona-se à potencialidade de transferência da água superficial para os materiais que possuem capacidade de transmiti-la e armazená-la em subsuperfície, em determinado evento chuvoso.

A dinâmica hidrológica, contudo, é vulnerável às ações humanas. É nesse ponto que surge a discussão sobre a recarga dos aquíferos de Belo Horizonte. No município, estima-se que são retirados, anualmente, 5.987.985,6 m³ de água subterrânea para fins diversos. Os volumes infiltrados naturalmente são estimados em 11.239.250 m³. Por um cálculo simples (infiltração - retirada), chega-se à recarga positiva de 5.251.264,4 m³/ano (COSTA, 2002).

Porém, esse raciocínio ignora a ocupação urbana, ou seja, não reconhece os impactos que o meio urbano exerce sobre a capacidade de infiltração e percolação do ambiente. Primeiramente, deve-se afirmar que nem toda água que infiltra atinge os aquíferos: volumes podem evaporar pelo fluxo de retorno, podem percolar diretamente para cursos d'água no meio não saturado ou podem ficar retidos por capilaridade (PYNE, 1995). Além disto, no meio metropolitano há muitos locais onde

a infiltração é nula, devido à impermeabilização do solo por materiais como asfalto e concreto (SILVEIRA *et al.*, 2002). Assim, o escoamento superficial e a evaporação ampliam suas taxas em detrimento da infiltração.

Aproximadamente 83% do município encontram-se total ou parcialmente impermeabilizados; com essa nova variável o total recarregado anualmente em Belo Horizonte seria reduzido a aproximadamente 1.910.672,5 m³, um terço do que é retirado (FELIPPE e MAGALHÃES Jr, 2007).

Tendo essa problemática em vista e buscando tatear possíveis soluções, o objetivo deste trabalho é elaborar uma proposta metodológica de classificação de topos como zonas de recarga de aquíferos, em função de suas características ambientais – aspectos físicos e humanos do meio. Para este fim, foi adotado, como estudo de caso, o município de Belo Horizonte-MG. Parte-se do pressuposto que tal proposta deve ser qualitativa, baseada da comparação entre as zonas de recarga de um espaço pré-definido, pois cada sistema ambiental promoverá diferentes níveis de eficiência que só fazem sentido quando comparados.

Bases teórico-conceituais

As zonas de recarga de aquíferos são locais da superfície terrestre que possibilitam a infiltração e a percolação da água em direção a um sistema geológico capaz de armazená-la e distribuí-la (FREEZE e CHERRY, 1979; FETTER, 1994; PYNE, 1995; WARD e TRIMBLE, 2004). Não obstante, existem recortes espaciais que são mais eficazes na recarga dos aquíferos, ou seja, são zonas preferenciais.

A espacialização dessas zonas é determinada pela dinâmica dos fluxos subterrâneos e, por consequência, pelo potencial hidráulico. As zonas de recarga caracterizam-se por elevada energia potencial, contrariamente às zonas de descarga.

De uma forma geral, há três tipos de energia envolvidas nesses fluxos: de elevação, de pressão e de velocidade (WARD e TRIMBLE, 2004). Tendo em vista que os aquíferos em Belo Horizonte são preferencialmente do tipo livre a semi-confinado (COSTA, 2002; BEATO, 2001; SILVA *et al.* 1995), a energia de elevação é o principal fator de determinação das zonas de recarga. Por estarem em posição altimétrica mais elevada, promovendo maior potencial hidráulico às águas infiltradas, os topos são zonas preferenciais de recarga de aquíferos.

Sabendo-se que a infiltração, a percolação, a transmissão e o armazenamento são os principais processos na efetivação da recarga (FETTER, 1994; REBOUÇAS, 1999; WARD e TRIMBLE, 2004; TODD e MAYS, 2005), o primeiro esforço para a classificação é no sentido de definir os elementos do sistema ambiental mais importantes no condicionamento dos processos supracitados. Esse procedimento deve ser precedido um levantamento com o máximo de detalhe possível do quadro geográfico da unidade de estudo.

A *capacidade de infiltração* de um meio é determinada por uma conjuntura de elementos entre os quais se destacam as propriedades do solo, as características da cobertura superficial e a declividade do terreno (COELHO-NETO, 1998 *apud* SOARES, 2005; WARD e TRIMBLE, 2004; BRANDÃO *et al.* 2006). Quanto à percolação, sua dinâmica está diretamente relacionada à infiltração, sendo que os mesmos elementos a condicionam (WARD e TRIMBLE, 2004).

Em termos da dinâmica hidrogeológica, esta é traduzida pelos processos de transmissão e armazenamento da água subterrânea. A diferenciação dos aquíferos se configura, essencialmente, em relação à sua porosidade, permeabilidade e capacidade de armazenamento. Neste sentido, carac-

terísticas litológicas, como a granulometria, e estruturais, como a existência de falhas, fraturas ou outras descontinuidades, são ímpares para a determinação da transmissividade e armazenamento (TODD e MAYS, 2005). No caso de Belo Horizonte, a importância dos mantos de intemperismo que revestem os substratos cristalinos também deve ser considerada.

Além disso, as características climáticas também são importantes variáveis na interpretação do processo de recarga dos aquíferos. O balanço hídrico de Belo Horizonte (COSTA, 2002) mostra que nos meses de outubro a março, a curva de precipitação é superior à curva de evapotranspiração potencial. Assim, há um excedente hídrico.

No mês de abril, a evapotranspiração potencial supera a precipitação, estado que se mantém até o final de setembro. Nessa situação, há a retirada de água do sistema. O primeiro momento desse período é marcado pela retirada de água do solo para a manutenção do equilíbrio hidrológico. Tal processo ocorre entre abril e junho, totalizando um montante de 100 mm. Após esse período, estendendo-se até setembro, há uma fase típica de deficiência hídrica, em que a recarga subterrânea é praticamente nula (COSTA, 2002). O volume de água envolvido nesse período é de 127 mm.

Com a intensificação das chuvas, a precipitação volta a superar a evapotranspiração potencial, promovendo, novamente, um excedente. Entretanto, com a retirada anterior de água do solo, os meses de outubro e novembro são marcados pela reposição do volume perdido pelas camadas superiores do solo – 100 mm. Finalmente, entre novembro e abril o excedente produzido pela elevada taxa de precipitação pode ser destinado à realimentação dos aquíferos (COSTA, 2002).

Além das fontes convencionais de recarga, em áreas urbanas os vazamentos nas redes de saneamento possuem significativa participação nesse processo (VELÁSQUEZ, 1996). As redes subterrâneas de drenagem pluvial, esgotamento sanitário ou mesmo distribuição de água, quando em condições adversas de conservação podem fornecer água para o manto, contribuindo, no caso dos esgotos, para o comprometimento da qualidade das águas subterrâneas (BEATO, 2001). Em áreas densamente construídas, com elevada taxa de impermeabilização do solo, essas fontes indiretas de recarga podem ser as principais responsáveis pela transmissão da água para subsuperfície.

Espacialização das zonas preferenciais de recarga em Belo Horizonte

A configuração hidrogeológica de Belo Horizonte é, resumidamente, determinada pelas rochas do embasamento cristalino e pelas rochas do Quadrilátero Ferrífero (MOURÃO *et al.*, 2001). Assim, apoiando-se em Costa (2002), todos os sistemas aquíferos do município são livres, com importante papel do manto de intemperismo na estruturação dos processos hidrogeológicos. Isso implica que a principal força determinante dos fluxos subterrâneos é a energia de elevação (WARD e TRIMBLE, 2004), posto que a energia de pressão – resultante do confinamento – e a energia de movimento livre – resultante da carstificação – são inexpressivas.

Dessa forma, reafirma-se que devido às características ambientais de Belo Horizonte, os topos são zonas preferenciais de recarga de aquíferos. Corroboram essa afirmação os Mapas Potenciométricos apresentados em Costa (2002) e Silva *et al.* (1995). As linhas de maior potencial hidráulico se encontram nas áreas mais elevadas do relevo. Assim, os fluxos divergem dessas regiões, drenando as sub-bacias subterrâneas.

Os fluxos subterrâneos em Belo Horizonte possuem direção predominante E-W (SILVA *et al.*, 1995). Um primeiro nível de base se configura nos talwegues dos canais de drenagem das sub-bacias

superficiais. Todavia, o nível de base geral da drenagem subterrânea do município é o Rio das Velhas (SILVA *et al.*, 1995; BEATO, 2001; COSTA, 2002). Ademais, o divisor de águas das bacias do Onça e do Arrudas é, também, o divisor dos fluxos das águas subterrâneas (COSTA, 2002).

Portanto, a interpretação dessa dinâmica colaborou para a definição conceitual dos topos como as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos, viabilizando a espacialização dessas unidades no município de Belo Horizonte (Mapa 1). O mapeamento dos topos foi realizado pela delimitação das curvas de nível fechadas (escala 1:50.000). No caso de sucessão de curvas fechadas para um mesmo topo, foi considerada para delimitação aquela de cota mais baixa.

A compartimentação geomorfológica de Belo Horizonte, promove uma distribuição heterogênea das zonas de recarga no território. Todavia, de acordo com a morfologia do terreno, os topos podem apresentar formatos espaciais distintos.

A porção nordeste do município apresenta um grande número de zonas potenciais de recarga de aquíferos, fato condicionado pela morfologia de colinas com topos amplos e planos. Por outro lado, a proximidade com o nível de base – Rio das Velhas – promove uma recarga restrita aos fluxos locais que podem, em curto tempo, destinar a água à superfície¹.

A porção central do município é outra área importante de recarga e possui topos extensos e relativamente planos. Por serem interflúvios das bacias do Arrudas e do Onça e, conseqüentemente, divisores dos fluxos subterrâneos (BEATO, 2001), essas zonas potenciais de recarga possuem uma importância ainda maior, com uma área drenada mais vasta.

Outra importante área de recarga dos aquíferos em Belo Horizonte é a Serra do Curral, o limite setentrional do Quadrilátero Ferrífero. A morfologia dos topos é bem distinta daqueles da porção setentrional, apresentando-se comumente alongados e estreitos sob forma de cristas. Esta configuração é determinada pelas resistentes rochas que sustentam as serras do Quadrilátero, principalmente quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas.

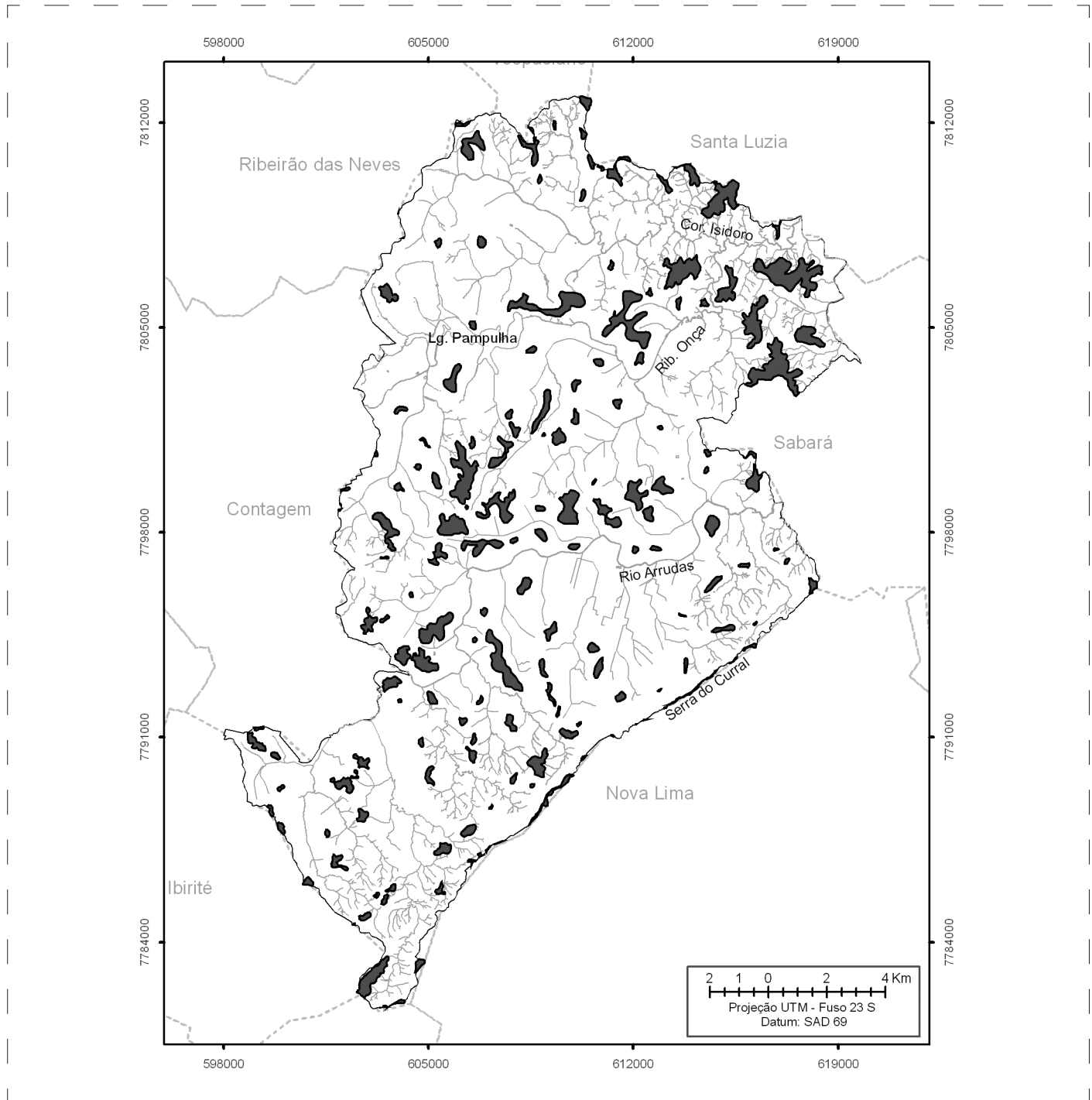
Além dessas três áreas, há topos distribuídos em todo o território que, hidrológicamente, funcionam como zonas preferenciais de recarga de aquíferos. A escala adotada – curvas de nível com 20 metros de equidistância – tende a ocultar os pequenos topos, mas a importância da extensão areal na recarga minimiza esta limitação metodológica. Deste modo, os procedimentos adotados permitiram que as mais importantes zonas de recarga de aquíferos de Belo Horizonte fossem espacializadas, indicando que a escala de estudo atendeu aos anseios propostos.

Proposta metodológica: cruzamento qualitativo de variáveis ambientais

A seleção das variáveis utilizadas para a classificação das zonas potenciais de recarga de aquíferos de Belo Horizonte respeitou critérios de seletividade, simplicidade e analogia (CHRISTOFOLLETTI, 1999), bem como a disponibilidade dos dados. Assim, para a compreensão da infiltração e da percolação, quatro elementos essenciais na estruturação desses processos foram selecionados: morfologia do topo, cobertura superficial, proteção por unidades de conservação (parques) e permeabilidade da camada superior do solo. Como aproximação aos processos de armazenamento e transmissão subterrânea, foram selecionadas as variáveis: potencial de água subterrânea, frequência de discontinuidades geológicas (falhas, fraturas e contatos geológicos obtidos no mapa de Silva *et al.*, 1995), espessura do manto de intemperismo e número de nascentes (consideradas o começo dos canais de drenagem mapeados por IBGE, 1979).

¹ Isso também pode ocorrer em função de níveis de base locais, porém, nesses casos, o gradiente potenciométrico tende a ser inferior, intensificando a recarga em detrimento da descarga.

Mapa 1 Espacialização das zonas preferenciais de recarga de aquíferos de Belo Horizonte.



Fonte: Bases cartográficas digitais obtidas de PBH e IBGE.

As informações dessas diversas fontes foram, então, compiladas e especializadas. No software ArcGIS 9.0 foram geradas bases cartográficas digitais para cada um dos elementos selecionados. Posteriormente, houve um cruzamento dessas com a base das zonas preferenciais de recarga. Assim, foram identificadas as características ambientais em todos os topos de Belo Horizonte, possibilitando a organização de uma matriz.

Priorizando os aspectos qualitativos e comparativos, foi realizado um primeiro esforço de diferenciação das características ambientais dos topos em termos da contribuição para a realimentação subterrânea. O Quadro 1 apresenta síntese do raciocínio acerca das variáveis selecionadas, em função de sua contribuição para os processos envolvidos na recarga.

Quadro 1 Contribuição dos elementos do quadro ambiental na recarga dos aquíferos

VARIÁVEL / QUALIFICAÇÃO	BOM	RAZOÁVEL	RUIM
Morfologia do topo	arredondado	crista	-
Cobertura Superficial	vegetada	semi-vegetada	ocupada
Proteção por parques	integral	parcial	ausente
Permeabilidade (geologia)	Formação Cercadinho	Grupo Sabará	Máficas e Ultra-máficas
	Formação Cauê	Formação Gandarela	
	Formação Taboões	Formação Barreiro	
	Complexo Belo Horizonte	Formação Fecho do Funil	
Nº de nascentes	mais de 5	1 a 4	0
Profundidade do manto	superior a 40 metros	21 a 40 metros	inferior a 20 metros
Potencial de água subterrânea	alto	médio	baixo
Nº de discontinuidades geológicas	mais de 2	1	0

Classificação das zonas de recarga de aquíferos de Belo Horizonte

A classificação da eficiência das zonas preferenciais de recarga em Belo Horizonte, foi realizada a partir do cruzamento das variáveis selecionadas, qualificadas em termos de suas características. O procedimento utilizado foi classificar os topos com base em valores de eficiência entre 0 e 2, significando “Bom” (2), “Razoável” (1) ou “Ruim” (0).

A classificação não foi gerada a partir da soma simples de valores, pois é importante compreender o processo geral a partir das componentes que o constituem. Dessa forma, os procedimentos

permitiram uma classificação quanto à eficiência dos topos para a infiltração/percolação e outra da mesma natureza para o armazenamento/transmissão. Um novo cruzamento das informações produziu uma classificação geral da eficiência dessas zonas para a recarga dos aquíferos.

Várias são as possibilidades de classificação. Por isso, foi necessário realizar diversos testes de verificação da aplicabilidade das propostas. Após a comparação dos resultados, foi selecionada aquela mais adequada para a realidade das zonas preferenciais de recarga de aquíferos de Belo Horizonte.

Definido este modelo, o primeiro procedimento foi separar as variáveis em função dos grupos de processos. Com isso, para a infiltração/percolação foram selecionadas a morfologia do topo, a cobertura superficial, a permeabilidade e a proteção por parques; já para o grupo de processos armazenamento/transmissão trabalhou-se com o número de descontinuidades geológicas, a espessura do manto de intemperismo, o número de nascentes e o potencial de disponibilidade de água subterrânea. Utilizando-se a soma simples dos valores atribuídos a cada variável, as zonas foram agrupadas em três faixas de eficiência de recarga: “alta” – 6 a 8; “média” – 3 a 5; e “baixa” – 0 a 2. Considerando a impossibilidade de hierarquizar os condicionantes da recarga, não foi atribuído peso às variáveis.

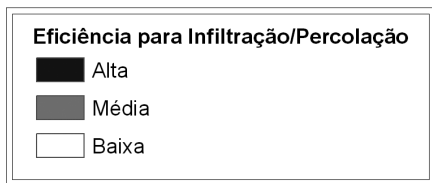
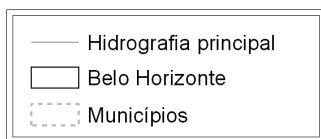
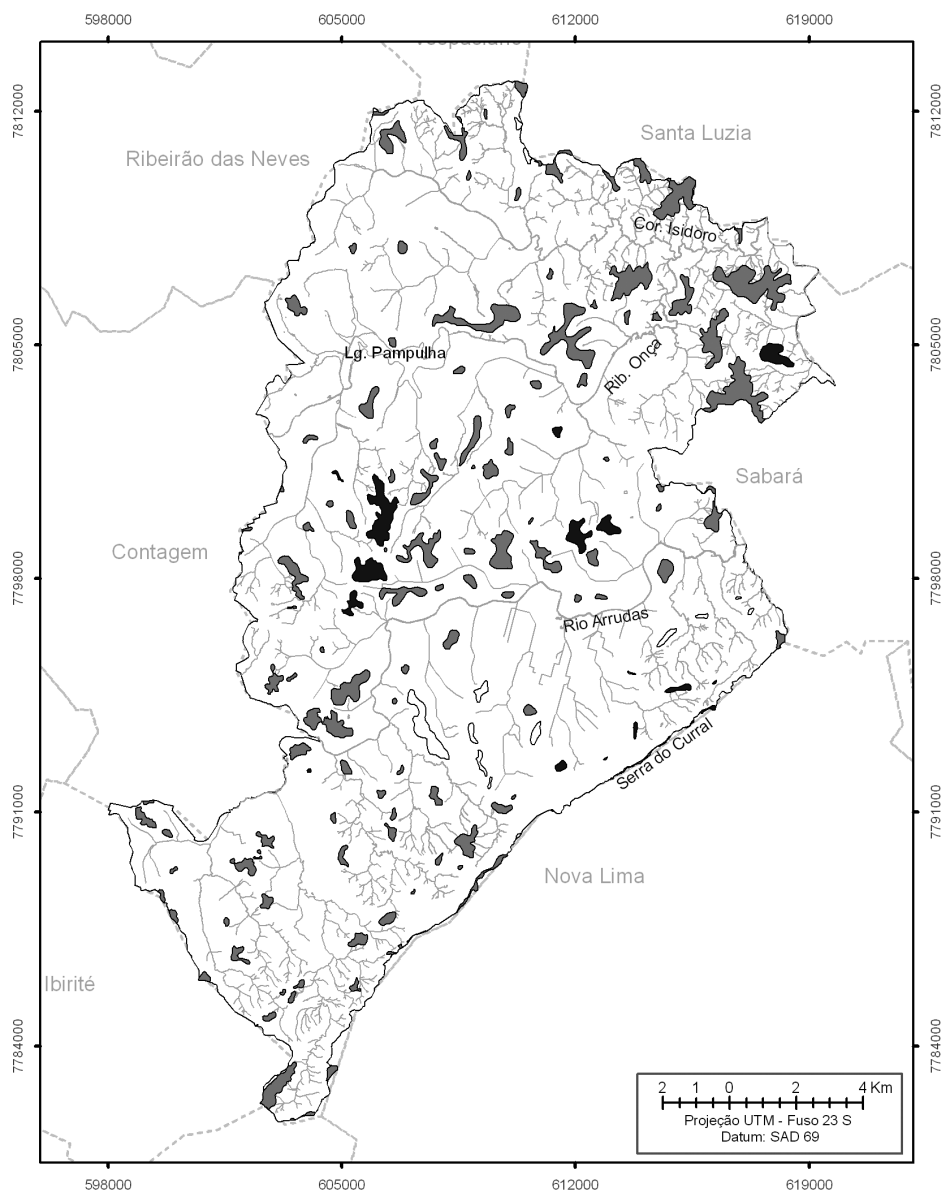
Quanto aos processos de infiltração/percolação, 14 zonas de recarga foram classificadas de baixa eficiência, 126 de média e 17 de alta eficiência. Para os processos de armazenamento/transmissão o cenário é bem diferente. As zonas de recarga de baixa eficiência quanto a esses processos totalizaram 104, sendo que 47 foram consideradas de média eficiência e apenas 6 de alta. Os Mapas 2 e 3 espacializam esses resultados.

O Mapa 2 reafirma que a maior parte dos topos de Belo Horizonte possui média eficiência para a infiltração e percolação. No interflúvio das bacias do Arrudas e do Onça e em parte da Serra do Curral, na região Sul, as zonas de recarga são de alta eficiência, apresentando como fatores-chave para esse enquadramento, mormente, a cobertura superficial de vegetação, com o reforço da proteção integral ou parcial.

De forma geral, os topos da porção nordeste de Belo Horizonte apresentam média eficiência na infiltração e percolação. Entretanto, a pequena profundidade do manto de intemperismo e a ausência de unidades de conservação prejudicam sua classificação.

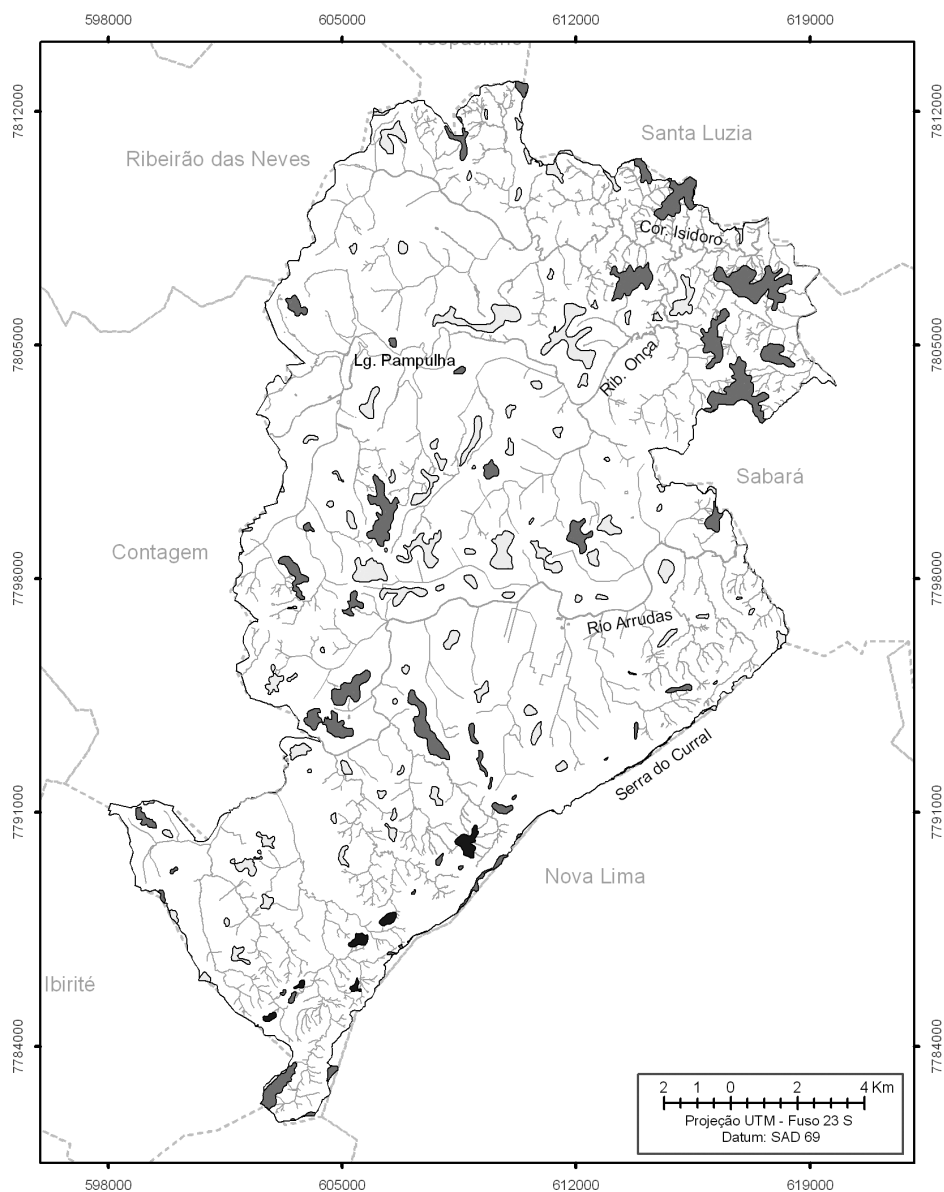
As zonas de recarga de baixa eficiência se encontram somente em duas áreas: no extremo norte e no extremo sul do município, este último em zona de ocorrência das rochas do Grupo Sabará. Os primeiros são peculiares, pois, além de estarem impermeabilizados, são modelados em rochas básicas e metabásicas que não favorecem uma eficiente condutividade hidráulica. Na região sul, o fator limitante da eficiência das zonas de recarga para a infiltração/percolação é, também, a geologia, já que as rochas do Grupo Sabará favorecem um modelado de cristas estreitas dissecadas e solos pouco espessos e permeáveis.

No caso dos processos de armazenamento e transmissão de água subterrânea, o Mapa 3 apresenta uma distribuição espacial menos uniforme das classes. Sobressaem-se, na porção sul do município, as únicas zonas de recarga de alta eficiência para esses processos. O destaque dessa região se deve ao alto potencial de água subterrânea associado ao grande número de descontinuidades geológicas das rochas. Somam-se a essas características a presença das nascentes dos afluentes da margem direita do ribeirão Arrudas.



Fonte: Bases cartográficas digitais obtidas de PBH e IBGE.

Classificação dos topos quanto à eficiência para armazenamento/transmissão.



	Hidrografia principal
	Belo Horizonte
	Municípios

Eficiência para Armazenamento/Transmissão	
	Alta
	Média
	Baixa

Fonte: Bases cartográficas digitais obtidas de PBH e IBGE.

A grande maioria das zonas de recarga possui eficiência baixa para o armazenamento e transmissão. O principal motivo é o relativo baixo número de descontinuidades geológicas encontrados nos topos. O interflúvio das bacias dos ribeirões Arrudas e do Onça aparece como uma área importante. Esses topos tendem a possuir espessos mantos de intemperismo desenvolvidos em rochas cristalinas, fato que, quando associado às descontinuidades geológicas, favorecem a eficiência de recarga.

Da mesma forma, na porção nordeste a maioria dos topos também se insere na classe média. Desta vez, a principal variável que contribuiu para tal classificação é o número de nascentes.

Por estarem sobre um aquífero de elevado potencial e com inúmeras descontinuidades geológicas, os topos da Serra do Curral possuem classificação melhor que os circunvizinhos e demais porções do município.

Um segundo passo foi o de unir essas duas classificações em uma que abarcasse todos os processos e contemplasse a recarga subterrânea. As informações obtidas foram cruzadas tendo por modelo o Quadro 2. Finalmente, a classificação geral da eficiência das zonas preferenciais de recarga de aquíferos de Belo Horizonte pode ser apresentada. No mapa 4 encontram-se espacializados os resultados.

Quadro 2 Cruzamento das informações de eficiência de recarga nos grupos de processos para classificação final

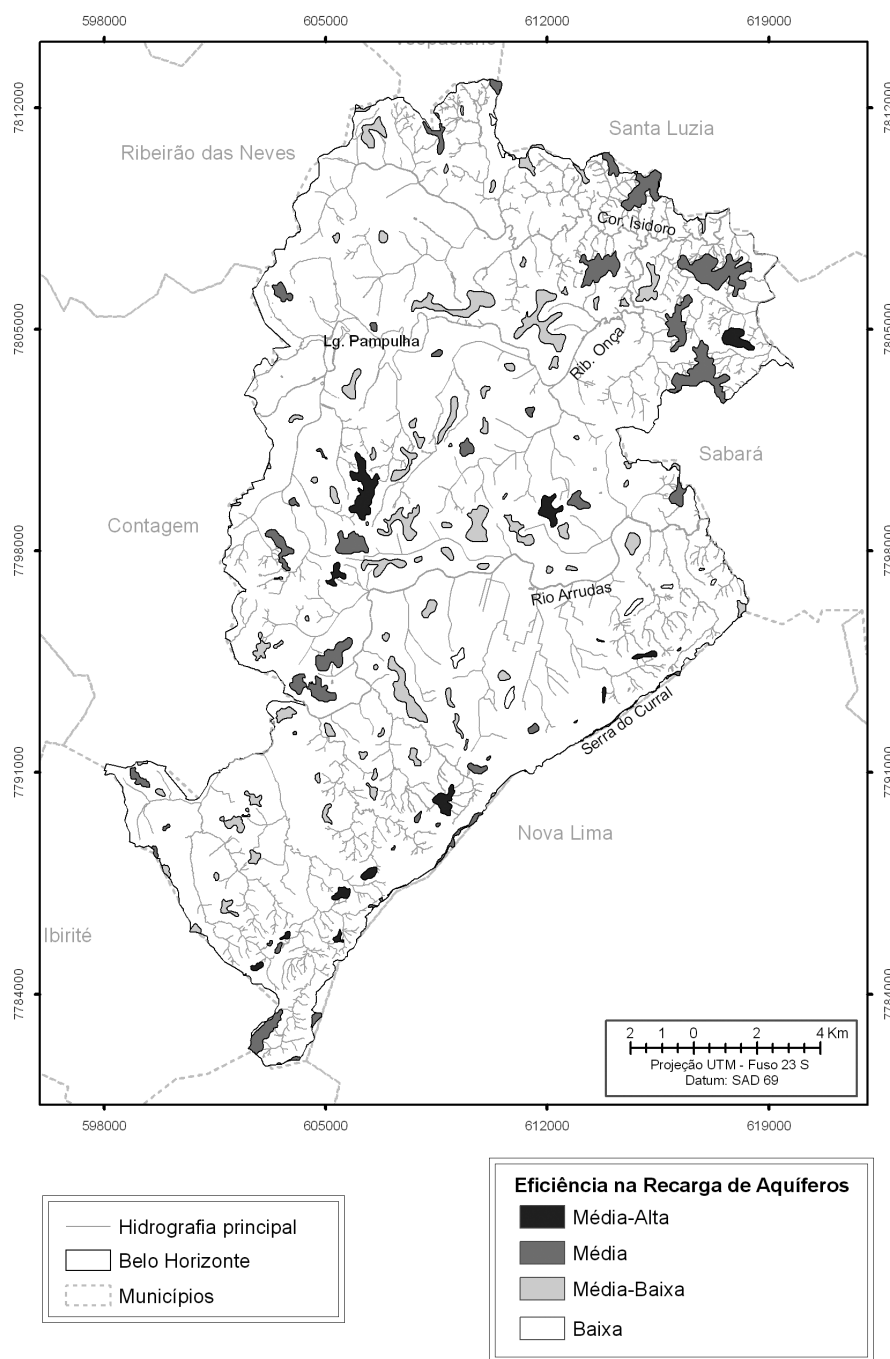
		Infiltração/Percolação		
		Alta	Média	Baixa
Armazenamento/ Transmissividade	Alta	Alta	Média-Alta	Média
	Média	Média-Alta	Média	Média-Baixa
	Baixa	Média	Média-Baixa	Baixa

Discussão dos resultados

Os resultados obtidos indicam que apenas nove zonas de recarga são consideradas de baixa eficiência, enquanto 89 são de média-baixa. Essa constatação corrobora a idéia de que Belo Horizonte possui sua realimentação subterrânea natural comprometida. Na classe média, se encontram 47 zonas de recarga. A situação é agravada pelo baixo número de topos incluídos na classe média-alta – 12. Além disso, nenhum topo está enquadrado como de alta eficiência.

De modo geral, as zonas de recarga nas classes média e/ou alta para os processos de infiltração/percolação e/ou armazenamento/transmissão destacam-se como as de melhor eficiência. As serras do sul-sudeste do município apresentam um maior número de zonas de recarga – oito – de eficiência média-alta.

Mapa 4 Classificação dos topos como Zonas de Recarga de Aqüíferos de Belo Horizonte.



Fonte: Bases cartográficas digitais obtidas de PBH e IBGE.

O interflúvio das bacias dos ribeirões Arrudas e Onça apresenta, em seu conjunto, três topos de eficiência média-alta. Apesar de estarem inseridos em área de densa ocupação, outras características destes topos contribuem para a recarga, sobretudo, a existência de unidades de conservação e a sua significativa extensão areal.

Tendo em vista a ausência da classe alta, as zonas de recarga de média eficiência ganham importância. A porção nordeste de Belo Horizonte e as serras do Quadrilátero agregam o maior número de topos nessa classe. Há contextos ambientais distintos entre essas áreas e as características que promovem eficiência mediana a ambas são, também, diferentes: enquanto na porção nordeste a cobertura superficial e o número de nascentes são fatores importantes, nas serras o principal fator é o número de discontinuidades e o elevado potencial hidrológico do aquífero.

A classe de eficiência média-baixa é a que possui o maior número de zonas de recarga, totalizando 89. Sua espacialização, contudo, é heterogênea, apresentando topos que obtiveram classificação baixa em pelo menos um dos subprocessos. A maioria das zonas de recarga do interflúvio do Arrudas e do Onça se encontra nessa classe, da mesma forma que os topos próximos à Pampulha e no sul do município.

Por fim, nove zonas de recarga foram incluídas na classe de baixa eficiência, espacializando-se em duas áreas do município: extremo norte e leste-sudeste. Ambas apresentam, como principal fator limitante, a permeabilidade das rochas: metabásicas no primeiro grupo e rochas do grupo Sabará no segundo. Ambos os grupos apresentam similaridade na ocupação urbana, mais uma vez minimizando a eficiência dessas zonas de recarga.

Possibilidades: áreas preferenciais de implantação de ação indutoras de recarga

Após o esforço analítico de espacialização das zonas preferenciais de recarga de aquíferos, é importante apresentar propostas de intervenções no espaço para a melhoria nas condições de equilíbrio da dinâmica hidrológica local.

Sabendo que há um severo comprometimento da realimentação de aquíferos devido às condições ambientais do município, foram mapeados os espaços que devem ser priorizados no planejamento ambiental, com o objetivo de melhorar as condições de recarga, promovendo ações de indução de infiltração.

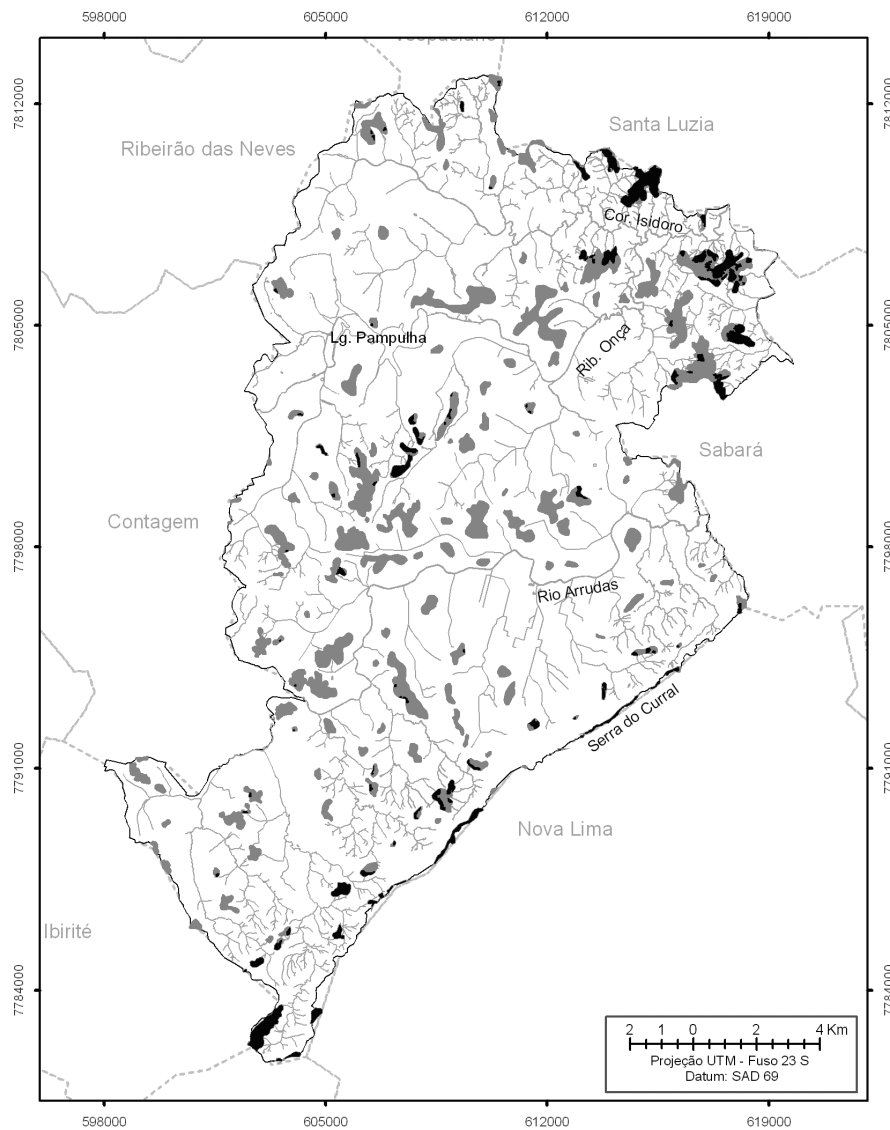
A lógica dessas intervenções deve buscar a minimização de impactos da impermeabilização fomentando, mesmo que artificialmente, a infiltração. Alguns exemplos são dutos de drenagem pluvial, sarjetas permeáveis, calçadas gramadas, lagos, barragens, etc.

Foram consideradas de primeira importância para o planejamento, as áreas de baixa densidade populacional e com alguma cobertura vegetal, posto que os custos de implementação dessas obras nesses locais seria menor.

Podem ser citadas, como exemplos de intervenções que contribuem para a recarga subterrânea, as barragens da Pampulha (zona norte) e de Santa Lúcia (zona sul), mesmo que não tenham sido projetadas para este fim.

O Mapa 5 apresenta cartograficamente o cruzamento de informações da densidade de ocupação e cobertura vegetal com a localização das zonas de recarga. Sendo assim, são evidenciados os locais que são facilitados para melhoria nas condições de recarga, tendo em vista que, devido à baixa ocupação urbana, os custos de implementação das ações de indução de recarga são menores.

Mapa 5 Zonas com maior potencial para implementação de ações indutoras de infiltração e recarga



Fonte: Bases cartográficas digitais obtidas de PBH e IBGE.

Os resultados mostram que apesar de poucas e muito diminutas, essas áreas são potencialmente importantes para a manutenção do equilíbrio hidrológico. Há fragmentos por todo o município. Isso é um aspecto importante a ser considerado, pois quanto mais bem distribuídas, especialmente essas ações de indução de infiltração, melhor a contribuição para a recarga.

A bacia do córrego do Isidoro – nordeste do município – possui extensas áreas de importância para efetivação de obras que viabilizem a infiltração. Outras áreas que devem ser priorizadas nas ações de recarga são a zona sul da capital, nas serras do quadrilátero, e o campus da UFMG, na região da Pampulha.

Considerações Finais

Belo Horizonte é uma metrópole que passou no último século por intensas transformações. A área total ocupada por infra-estrutura urbana se elevou de pouco mais de 3% em 1918 para mais de 80% do município em 2007. Além disso, estudos realizados indicam que atualmente a impermeabilização do solo atinge aproximadamente 75% dos topos, zonas preferenciais de recarga de aquíferos.

Como as demais metrópoles brasileiras, Belo Horizonte apresenta, então, um histórico e crescente processo de comprometimento da dinâmica hidrológica subsuperficial, posto que a infiltração natural é praticamente nula em grande parte do município. Mesmo com o processo quase irreversível de impermeabilização em grande parte da área urbana, é possível e desejável que as políticas públicas sejam capazes de fomentar a recarga de aquíferos a partir da criação ou proteção de zonas não impermeabilizadas.

A classificação apresentada permite identificar, comparativamente, no espaço de Belo Horizonte as zonas de recarga que possuem melhor eficiência. Os resultados obtidos contribuem para a melhor compreensão do quadro hidrológico municipal e dos impactos na recarga subterrânea natural causado pela ocupação urbana. Neste contexto, algumas variáveis naturais contribuem em maior ou menor grau para a recarga. As variáveis selecionadas que mais influenciaram para a classificação da maioria das zonas de recarga entre as faixas de média e baixa eficiência foram a cobertura superficial e o número de fraturas e contatos.

Os topos classificados de eficiência média-alta se concentram nas serras do Quadrilátero Ferrífero, no interflúvio das bacias do Arrudas e do Onça e um topo isolado na bacia do córrego do Isidoro – nordeste do município. Por outro lado os de baixa eficiência se encontram no bairro Serra Verde – extremo norte – e na porção leste/sudeste do município, coincidindo com as rochas metabásicas de São Benedito e com o Grupo Sabará.

Acredita-se que a classificação das zonas de recarga de aquíferos em Belo Horizonte, tendo por base as potencialidades ambientais nos processos de infiltração, percolação, armazenamento e transmissão subterrânea, apresentou resultados satisfatórios em relação aos objetivos propostos. A proposta poderá ser continuamente aprimorada, já que permite a inclusão, a exclusão e/ou a revisão das variáveis ambientais consideradas. Um painel de especialistas, nos moldes da técnica Delphi, também pode ser útil neste processo, auxiliando na escolha dos parâmetros, na construção de indicadores e determinação dos seus respectivos pesos. Além disso, experimentos de campo poderiam complementar a matriz. Ressalta-se a grande contribuição metodológica que emergiria da aplicação dos procedimentos apresentados em outras unidades espaciais de estudo.

Referências

- BEATO, D. A. C. (coord). *Estudo Hidrogeológico da Bacia da Pampulha: relatório final*. CPRM/PBH: Belo Horizonte, 2001.
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R.A.; POUSKI, F.F. e SILVA, D.D. *Infiltração da água no solo* (3ª ed.). Ed. UFV: Viçosa, 2006
- CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. Edgard Blucher: São Paulo, 1999.
- COSTA, W. D. *Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte – MG*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 2002.
- CPRM – Serviço Geológico Do Brasil. *Carta geológica de Belo Horizonte*. Escala 1:100.000. CPRM, 2000.
- FEITOSA F.A.C. e MANOEL-FILHO, J. (coord). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM, LABHID-UFPE: Fortaleza, 1997.
- FELIPPE, Miguel Fernandes; MAGALHÃES Jr, Antônio Pereira. *Especialização e classificação dos topos como zonas preferenciais de recarga de aquíferos em Belo Horizonte – MG*. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 3ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- FREEZE, R. A. e CHERRY, J. A. *Groundwater*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1979.
- HALL, M. J. *Urban Hydrology*. London: Elsevier Applied Science, 1984.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas nacional do Brasil. IBGE: Rio de Janeiro, 2000.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Belo Horizonte. Escala 1:50.000. IBGE: Rio de Janeiro, 1979.
- MOURÃO, Maria A. A.; CRUZ, W. B.; GONÇALVES, R. L. F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia do São Francisco. In: PINTO, Claiton P.; MARTINS NETO, Marcelo A. *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001
- PYNE, R. D. G. *Groundwater recharge and wells: a guide to aquifer storage recovery*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995.
- REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: Rebouças, A.; Braga, B. e Tundisi, J. (org.). *Águas doces do Brasil*. Escrituras: São Paulo, 1999. p. 117-150.
- SILVA, A. B.; CARVALHO, E. T.; FANTINEL, L. M.; ROMANO, A. W. e VIANA, C. S. *Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte: projeto estudos técnicos para o levantamento da carta geológica do município de Belo Horizonte; relatório final*. FUNDEP/UFMG-IGC: Belo Horizonte, 1995.
- SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. (org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS; São Paulo: EDUSP; Rio de Janeiro: ABRH, 2002. p. 335-389.
- SOARES, P. V. *As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul*. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- TODD, David. K. e MAYS, Larry. W. *Groundwater hydrology*. 3ª ed. Hoboken: John Willey & Sons, 2005.
- TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.; BARROS, M.T., *Drenagem urbana*. Editora da UFRGS, ABRH: Porto Alegre, 1995.
- VELÁSQUEZ, L. N. M. *Efeitos da urbanização sobre o sistema hidrológico: aspectos da recarga no aquífero freático e escoamento superficial - área piloto: sub-bacias Sumaré e Pompéia, Município de São Paulo*. 1996. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo.
- WARD, A. e TRIMBLE, S. *Environmental hydrology*. 2ª ed. Lewis Publishers: Boca Raton, 2004.