

Artigos

Influência da Espessura da Camada de solo na Proteção dos aquíferos Cársticos sob os Climas Tropical Úmido e Europeu Mediterrâneo, pelo Método de Vulnerabilidade COP

Influence of Soil Layer Thickness on Karst Aquifers Protection in Humid and Mediterranean Climates by the COP Vulnerability Method

Rogério Tadeu de Souza¹; Olga Susana Heredia²; Luiz Eduardo Panisset Travassos³; Leila Nunes Menegasse Velásquez¹; Jarbas Lima Dias Sampaio¹ ✉

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

² Universidad de Buenos Aires (UBA), Buenos Aires, AR

³ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUCMinas), Belo Horizonte, MG

✉ rtssouza1@gmail.com, heredia@agro.uba.ar, luizepanisset@gmail.com, menegasse@yahoo.com.br, jarbasdias@ufmg.br

Palavras-chave:

Aquífero Cárstico.
Clima Tropical.
Método COP.
Vulnerabilidade.
Espessura.

Resumo

Carste se refere a um estilo especial de paisagem onde coexistem cavernas e um extenso sistema de água subterrânea desenvolvido especialmente sobre rochas solúveis. Os aquíferos cársticos possuem alta fragilidade devido à circulação da água por meio de condutos, fissuras ou fraturas. Uma vez contaminados sua descontaminação é quase impossível. Métodos de vulnerabilidade foram criados para prever a susceptibilidade da contaminação de um aquífero por atividades antrópicas. São vários métodos, mas poucos são de uso específico ao carste. O método COP, acrônimo utilizado para designar os parâmetros C=concentração de fluxo, O=camadas sobrepostas e P=precipitação, foi desenvolvido para proteção de aquíferos cársticos de países europeus de clima mediterrâneo e apresentou bons resultados. Porém, sua aplicação no carste de clima tropical úmido requer modificações, principalmente porque há diferenças na camada protetora do aquífero (Fator O) entre o carste Mediterrâneo Europeu e o carste tropical úmido, que apresenta maior espessura de solo. Neste artigo, foram simuladas duas situações para uma área cárstica de 240 km²: uma com a aplicação direta do método COP original e outra adaptando o método a espessuras mais realistas do solo tropical. Os resultados mostram que a aplicação direta do método proporcionou uma proteção predominantemente alta para o Fator O, que se altera a predominantemente moderada para a realidade do carste de clima tropical úmido, apontando para a necessidade de adaptação desse fator.

Abstract

Karst refers to a unique type of landscape where caves coexist and an extensive groundwater system developed especially on soluble rocks. Karst aquifers are highly fragile due to their highly developmental nature, where water circulates through conducts, fissures or fractures. Once contaminated, decontamination is almost impossible. Vulnerability methods have been created to predict the susceptibility of aquifer contamination by anthropogenic activities. There are several methods, but few are specific to karst. The COP method, an acronym used to designate the parameters C= Concentration flow, O= Overlaying layers, and P= Precipitation, was developed for the protection of karst aquifers of European Mediterranean countries and had good results. However, its application in humid tropical karst requires modification, mainly because there are differences in the aquifer protective layer (O Factor) between European Mediterranean karst and humid tropical karst which has a higher soil thickness. In this paper, two situations were simulated for a 240 km² karst area: first, one with the direct application of the original COP method and the other adapting the method to more realistic tropical soil thickness. The results showed that the direct application of the method generate high protection, hanged to predominantly moderate given the reality of humid tropical climate karst, pointing to the need for adaptation of the original method.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i1.29762>

1 INTRODUÇÃO

Áreas cársticas desenvolvem um importante papel para a sociedade, tendo em vista que, em geral, estão associadas a boas terras cultiváveis, guardam registros de grande parte da vida do planeta e têm grande relevância no abastecimento de água potável (PILÓ, 2000; ZWALEN *et al.*, 2004; CHEN *et al.*,

2017). Como exemplo, 50% da água potável da Áustria e Eslovênia são originárias de aquíferos cársticos e em algumas regiões europeias as águas subterrâneas advindas desse aquífero são a única fonte de água potável disponível (ZWALEN, 2004). As áreas cársticas assentam 20 a 25% da população mundial, a qual depende enormemente ou quase exclusivamente da água desses aquíferos (FORD e WILLIAMS,

2007). No Brasil, é estimado que 3,1 % do território nacional é coberto por carste (AULER, 2019).

De acordo com a ANA (2010), 39% dos municípios brasileiros são abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas, enquanto 14% utilizam tanto mananciais superficiais quanto subterrâneos. Os demais 47% dependem somente de fontes superficiais sendo que, em Minas Gerais, 19,93% dos municípios são abastecidos exclusivamente de água subterrânea.

As áreas cársticas são extremamente sensíveis às pressões antrópicas (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). No que se refere especificamente à água subterrânea, o aquífero cárstico apresenta uma complexidade muito grande na recarga, armazenamento e transmissão dessa água, tornando-o mais vulnerável a potenciais contaminações (BAKALOWICZ, 2005). As áreas cársticas em regiões mediterrâneas apresentam, na maioria das vezes (principalmente no sul da Espanha onde a metodologia COP foi desenvolvida) cobertura de solo pouco espessa e presença de argilominerais 2:1 com pH básico (VÍAS, 2010; MEGIA, MUÑOZ, 2006; RODRIGUEZ, 1989; GUERRERO; GOMÉZ, 1966; RODRIGUEZ; MARTINEZ, 1966) que propicia baixa atenuação natural de potenciais contaminantes. Além disso, apresentam recarga concentrada por meio de sumidouros, e algumas vezes, por meio de dolinas, o que pode configurar ao sistema uma alta vulnerabilidade natural.

A vulnerabilidade natural, associada à importância econômica, histórica, ambiental e paisagística dessas áreas justificam a necessidade de sua proteção. Dessa forma, visando a proteção desse importante recurso, foi definido o termo vulnerabilidade à contaminação. Desde quando os primeiros conceitos sobre vulnerabilidade de aquífero foram elaborados no final da década de 60 e início da década de 70, surgiram vários métodos para avaliação de vulnerabilidade. Dentre eles podemos destacar: DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), GOD (FOSTER; HIRATA, 1988), AVI (VAN STEMPWOORT *et al.*, 1993) e SINTACS (CIVITA, 1994). Contudo, os métodos mais utilizados mundialmente para áreas cársticas são: EPIK (TRIPET *et al.*, 2000), PI (GOLDSCHIEDER *et al.*, 2000) e COP (VÍAS *et al.*, 2006).

Em termos gerais, a vulnerabilidade de um aquífero depende, essencialmente, da suscetibilidade da camada não saturada (também chamada de zona vadosa) apresentar maior ou menor proteção à contaminação. Por zona vadosa, entende-se a região constituída por solo e rocha acima do nível d'água do aquífero, ou seja, acima da zona saturada (STEPHENS, 1996).

Segundo Selker (1999), quase metade da água subterrânea existente no mundo, a qual se deve considerar mais da metade da água potável, é gerada por infiltração por meio da zona vadosa. Nesta camada podem ser desencadeados vários processos de atenuação da contaminação através de mecanismos físico-químicos e biológicos característicos de cada local.

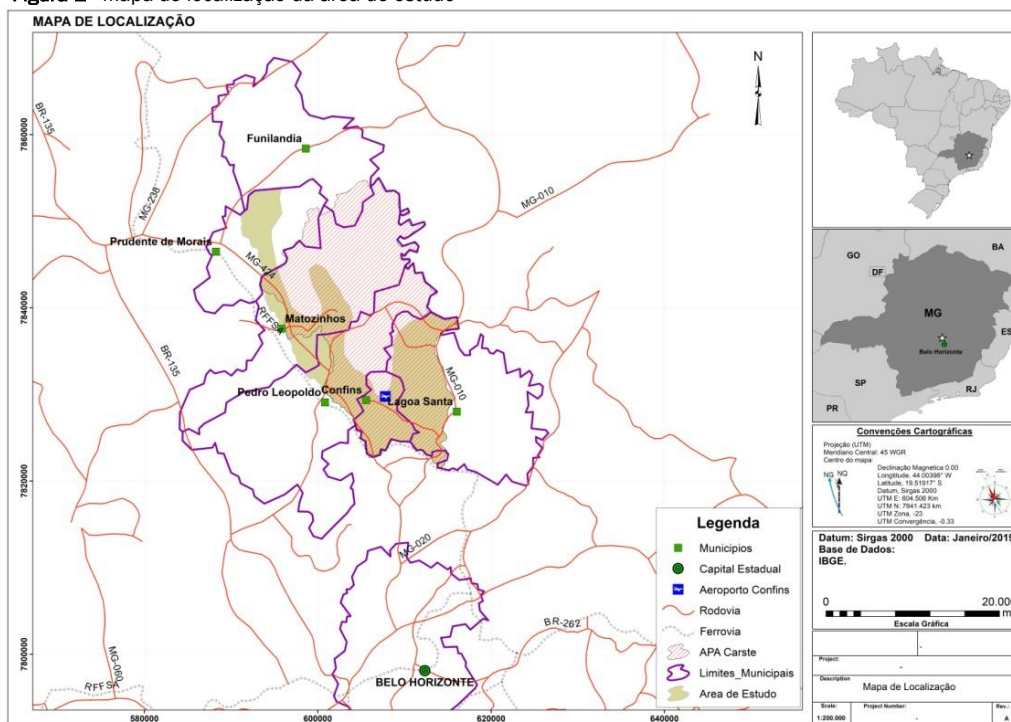
Em geral, os aquíferos cársticos são considerados de alta vulnerabilidade e a qualidade de sua água depende basicamente da composição química da rocha, dos fatores climáticos e estruturais, além das atividades humanas (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007; FORD e WILLIAMS, 2007). Segundo Foster e Hirata (1988), a condição essencial para o desenvolvimento de estratégias visando a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, é o estabelecimento de áreas ou atividades com maior risco de degradação dos aquíferos, a fim de priorizar a aplicação de recursos técnicos e financeiros locais de maior interesse socioeconômico e ambiental. Esses mesmos autores lembram que as águas subterrâneas, por se encontrarem confinadas ou semiconfinadas, são geralmente mais protegidas da poluição que as águas superficiais, devido à presença de solo atuando como meio filtrante.

No caso de aquíferos cársticos, e principalmente o carste encoberto da área de estudo com espessa camada de solo, é na zona vadosa em que efetivamente ocorre o processo de atenuação de poluentes, devido aos processos microbiológicos e físico-químicos que ocorrem nessa camada (SELKER, 1999). Na camada de rocha, o sistema de fissuras das rochas calcárias facilita a rápida penetração dos poluentes no aquífero dificultando processos de atenuação natural (FRITZSONS *et al.*, 2001). A definição da espessura de solo é o aspecto de maior desafio na aplicação da metodologia na área de estudo, tendo em vista que há uma escassez de estudos associando medidas de espessura e a ausência de poços que poderiam ser utilizados para aquisição desse dado. Sendo assim, o objetivo deste estudo é demonstrar como a diferença de espessura de solo encontrada entre os carstes europeu mediterrâneo e o tropical úmido impacta no resultado da aplicação da metodologia COP.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange 240 km² e engloba parte da APA Carste Lagoa Santa, além de extensões a norte, noroeste e sul desta região. No total a área abrange seis municípios: Lagoa Santa, Prudente de Morais, Pedro Leopoldo, Funilândia, Matozinhos e Confins (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Os principais acessos à área se dão pela MG-010 (a leste) e pela MG-424 (a oeste), conforme mostrado na Figura 1. A área de estudo dista aproximadamente 50 km ao norte da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte.

As feições cársticas da região da área de estudo estão desenvolvidas em litótipos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, componentes da Formação Sete Lagoas, aflorantes no extremo sudeste da extensa bacia sedimentar pré-cambriana do Bambuí que integra o Cráton do São Francisco (BERBERT-BORN, 2002).

Sob a designação de Grupo Bambuí identifica-se uma das mais extensas e discutidas unidades estratigráficas do Brasil, que vem sendo descrita desde o século XIX. As primeiras referências históricas às rochas carbonáticas e ardosiâneas, situadas na margem ocidental do rio São Francisco, e atualmente designadas como pertencentes ao Grupo Bambuí, devem-se ao Barão Alemão Von Eschwege que, em 1817, nomeou-as Formação de Transição “*Ubergangsgebirge*”. Eschwege fez interessantes observações na região de cachoeira de Pirapora, onde descreveu um “*gres vermelho*” que se prolonga pela Serra da Porteira. Essa formação arenosa, essencialmente horizontal, e superposta a “*xistos argilosos mais antigos*” denominou de arenito Pirapora, atual Fm. Três Marias (MARTÍNEZ, 2007).

O Grupo Bambuí constitui um pacote de rochas carbonáticas de sedimentação química alternadas com terrígenos (PESSOA, 2005).

A sedimentação do Grupo Bambuí ocorre normalmente sobre uma crosta continental orientada relativamente na direção N-S, por falhas antigas do escudo cristalino

(HERRMANN, 1998).

Segundo Cabral (1994), na coluna estratigráfica adotada para os trabalhos de mapeamento geológico, o Grupo Bambuí, na área estudada, é subdividido em duas formações: Formação Sete Lagoas e Formação Serra de Santa Helena.

A Formação Sete Lagoas é constituída por uma sequência de rochas carbonáticas com intercalações de níveis argilosos. As características desses metassedimentos sugerem a existência de um mar epicontinental raso à época de suas deposições, cobrindo o paleorrelevo, constituído pelas rochas gnáissicos-migmatíticas (CABRAL, 1994).

Cabral (1994) aponta que os estágios iniciais de formação dessa bacia se deram pela invasão de áreas continentais pelo mar (ciclo transgressivo), inundando as partes mais baixas desse paleorrelevo. Devido à circulação restrita das águas em vários pontos da bacia, ocorreu hipersalinidade dessas águas, com precipitação dos carbonatos mais impuros, finos e claros, componentes do membro basal da formação – Membro Pedro Leopoldo representados pelos litótipos: calcissiltitos e, subordinadamente, calcarenitos e margas. Com o recuo do mar (ciclo regressivo), ocorreu a deposição dos calcários mais puros, grosseiros e escuros, componentes predominantes do membro superior da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa, representados pelos litótipos: calcarenitos, e subordinadamente, calcissiltitos e calciruditos.

Regionalmente, sob o efeito de ações tectônicas, as rochas mais impuras da Formação Sete Lagoas adquiriram laminação incipiente com abundante formação de minerais

micáceos (CABRAL, 1994).

Um último ciclo transgressivo se caracterizou por uma sedimentação em águas calmas e mais profundas, possibilitando a constituição de estratos plano-paralelos, característicos dos metapelitos e metargilitos da Formação Serra de Santa Helena. Os metassedimentos dessa formação se assentam através de contato brusco ou gradacional concordante sobre os calcários do Membro Lagoa Santa da Formação Sete Lagoas. Em outros locais, capeam as rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiviso e, em outros, repousam diretamente sobre os calcários do Membro Pedro Leopoldo.

Um conjunto de depósitos superficiais, de idades terciária e quaternária, relacionadas a superfícies de aplainamento formam as planícies fluviais e cársticas, recobrimo praticamente toda a área preenchendo as depressões do paleorrelevo das rochas supracrustais e do embasamento cristalino ou constituindo depósitos horizontais sobre a

superfícies arrasadas dessas rochas.

A tectônica que afetou as rochas supracrustais do Grupo Bambuí originou, na sequência pelítico-carbonática, famílias de fraturas em direções variadas. A deformação parece relacionar-se aos esforços compressivos oriundos das faixas marginais dobradas no caso o Cinturão Brasília a oeste, e Faixa de Dobramentos Araçuaí, a leste (Silva, 1986 *apud* Cabral, 1994). Assim as rochas do Grupo Bambuí funcionam como um anteparo rígido (Cráton São Francisco) que assimilou os esforços compressivos refletidos em dobramentos acentuados encontrados próximos às bordas e que diminuem ou desaparecem para o interior da bacia.

O quadro 1 fornece um resumo da geologia regional.

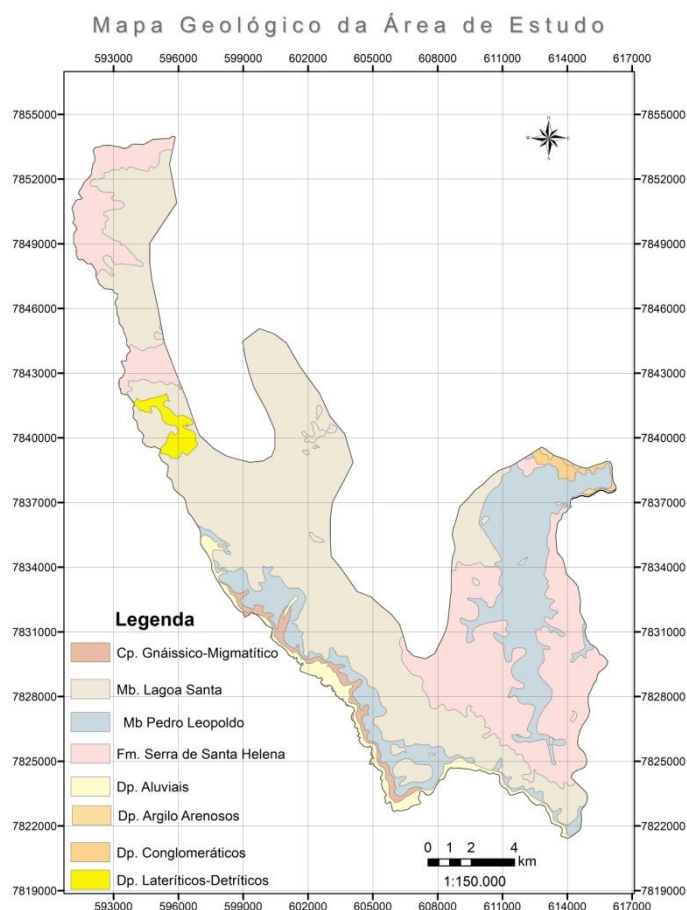
A Figura 2, exhibe a distribuição das rochas do substrato e suas relações de contato dentro da área de estudo.

Quadro 1 - Resumo da geologia regional

Unidades Crono-Estratigráf.	Unidades Lito-estratigráficas	Litótipos/Litofácies	Relação de contato	Deformação / Metamorfismo	Ambiente	
FANEROZÓICO	CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	Aluviões e terraços aluvionares	Disc.	Continental
			Depósitos argilo-silticos de cobertura. Depósitos argilosos em cavidades cársticas.	Disc.	Continental
		TERCIÁRIO	Depósitos argilo-silticos de cobertura.	Disc.	Continental
PRÉ-CAMBRIANO	Proterozóico superior Grupo Bambuí - Super Grupo São Francisco Form. Sete Lagoas	FORMAÇÃO SERRA DE SANTA HELENA	Sequência metapéptica, representada por matassilticos e metargilitos, com estratificação plano paralela.	Brusca, em alguns locais gradacional.	Deformação progressiva e heterogênea, com deslocamento de baixo ângulo. Regime em condições ductil-ruptil a ductil.	Marinho (transgressivo).
		MEMBRO LAGOA SANTA	Sequência carbonática representada predominantemente por calcarenitos e calcirucitos. Os calcarenitos são calcários cinza escuro a negro, com abundante calcita, preenchendo vazios e fraturas.	Gradacional, às vezes indefnida.	Deslocamento progressivo e heterogêneo, com deslocamento de baixo ângulo. Regime predominante ductil-ruptil.	Marinho (regressivo).
		MEMBRO PEDRO LEOPOLDO	Sequência carbonática representada por calcissiltitos e subordinadamente por calcarenitos e margas. Os calcissiltitos são calcários impuros, às vezes, dolomíticos, coloração cinza, com intercalações escuras.	Discordante (angular).	Idem Membro lagoa Santa, com maior efeito de ações tetônicas sobre os calcários impuros.	Marinho (transgressivo).
		COMPLEXO GNÁISSICO MIGMATÍTICO-INDIVISO	As rochas são representadas por gnaisses, granitóides e migmáticos, intensamente recortadas por veios e diques de rocha básica.	Deformação polifásica, gnaissificação, migmatização. Metamorfismo grau médio, com alterações hidrotermais.

Fonte: Cabral (1994)

Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo

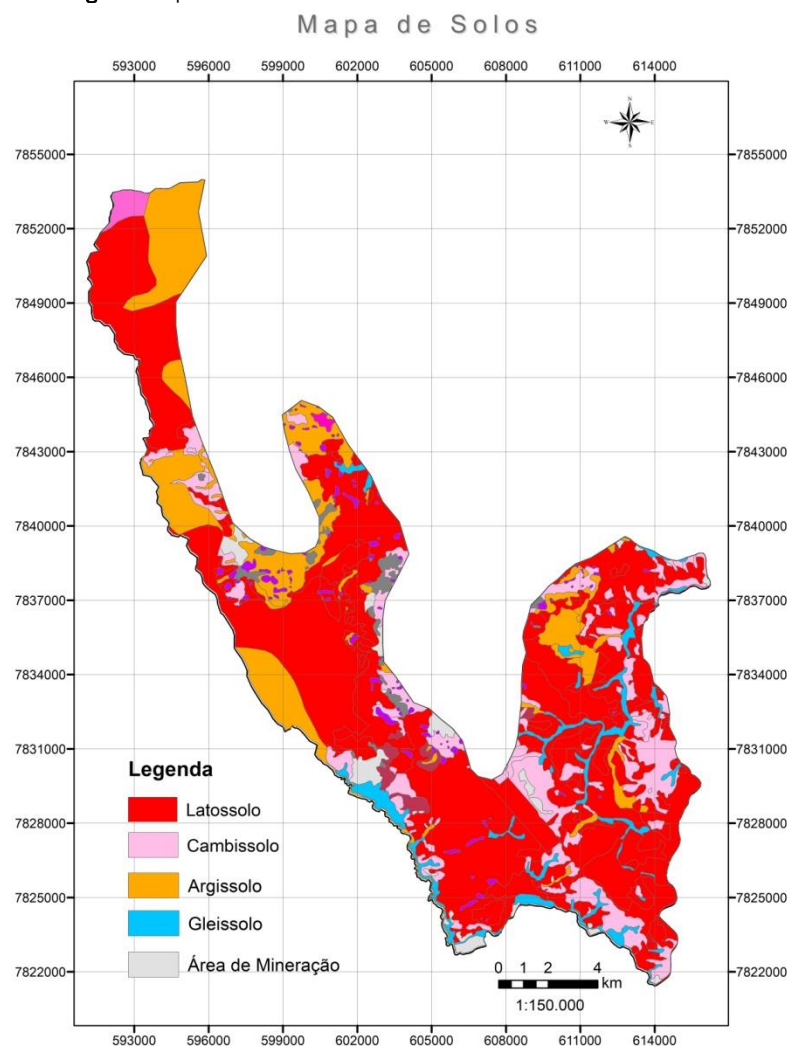


Fonte: Modificado de Cabral (1994)

Destaca-se, em nível regional no domínio clássico da porção do carste Lagoa Santa, que a área de estudo destoa do referido cenário, em face de seus atributos intrínsecos retratados pela espessa cobertura de solos sobreposta aos carbonatos, refletindo uma paisagem que se manifesta de forma marginal ao carste típico, ocupando toda uma porção entre o rio das Velhas a leste, e Lagoa Santa a oeste, a qual pode ser denominada de carste coberto de Lagoa Santa (PESSOA, 2005). Meneses (2003) descreve as mesmas classes de solos citadas por Herrmann (1998) e CETEC (1994) e que são encontradas na área de estudo: Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos. A classe dos Latossolos, seguida de Cambissolos, cobrem grande parte da área total, seguidas por Argissolos e Gleissolos, conforme apresentado na Figura 3.

De acordo com Shinzato (1998), os solos da área de estudo são morfologicamente profundos. Ressalta-se que há uma escassez muito grande de estudos que mencionem a real profundidade do solo na área; este autor também não mensura essa profundidade e a mesma está limitada pela profundidade dos perfis de solo (2,0 m) e algumas tradagens que chegaram até 5,0 m. Estes solos são constituídos basicamente por argilomineral 1:1 (caulinita), com teores superiores a 78%. Este autor descreveu 18 perfis de solo, com espessura média de 1,3 m e 49 tradagens. Por meio dos estudos realizados por Shinzato, sabe-se que as tradagens chegaram à profundidade máxima de 5,0 m, o que não é, necessariamente, a profundidade final de solo. Ressalta-se que não há estudos específicos que mediram a real espessura de solo na área de estudo

Figura 3 - Tipos de solos encontrados na área de estudo



Fonte: Modificado de Herrmann (1998)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

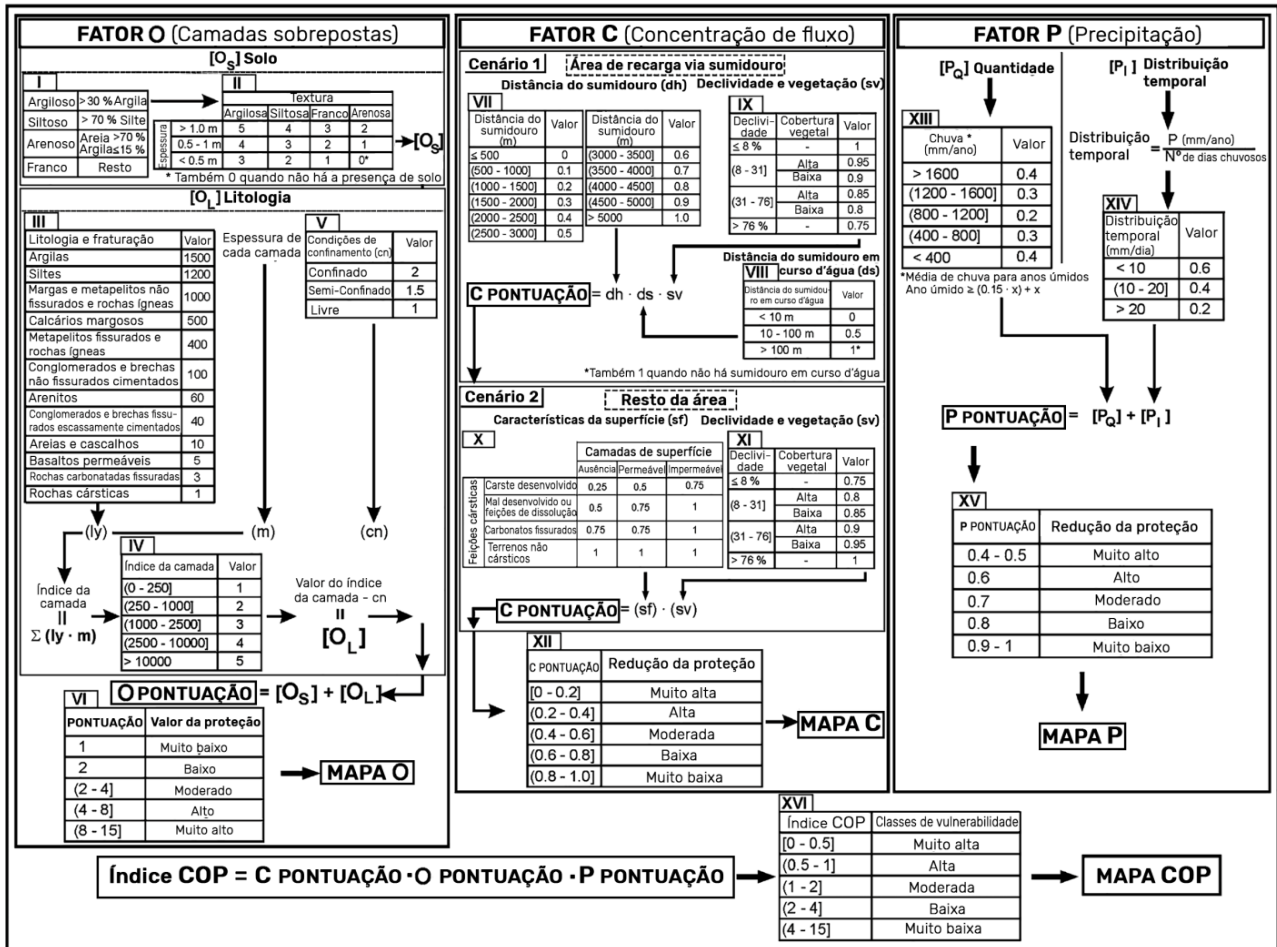
Foi escolhido o método COP para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero da área de estudo. Este método utiliza os parâmetros intrínsecos ao aquífero, os fatores C e O, e o parâmetro extrínseco representado pelo parâmetro P. Um resumo dos parâmetros utilizados no método é apresentado a seguir.

O método COP foi desenvolvido para avaliação da vulnerabilidade intrínseca em aquíferos cársticos em conformidade com a abordagem *COST Action 620*, usando as propriedades das camadas sobrepostas acima da zona saturada (Fator O), a concentração de fluxo (Fator C) e a precipitação (Fator P).

O método considera as feições cársticas, tais como a presença de dolinas e sumidouros, onde as mesmas desempenham um importante papel na infiltração de potenciais contaminantes em subsuperfície, declividade do terreno e vegeta-

ção, reunidos no "Fator C". O "Fator P" permite considerar através da variabilidade temporal e espacial o transporte de contaminantes para dentro do aquífero (Vias et al., 2006). As características de infiltração (concentrada via sumidouro e/ou dolina) diminuem a proteção natural dada pelas camadas que sobrepõem o aquífero (Fator O), considerando que é na infiltração difusa que se dão os processos de atenuação natural por meio das características físico-químicas do solo. O produto dos fatores C, O, P fornece os índices de vulnerabilidade que são agrupados em cinco classes (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), com valores que variam entre 0 e 15, com vulnerabilidade crescente nessa ordem. Além disso, a metodologia COP estabelece diretrizes detalhadas, tabelas e fórmulas para avaliação da vulnerabilidade e seleciona as variáveis, parâmetros e fatores a serem utilizados (Nossa, 2011). O Quadro 2, mostrado a seguir, apresenta o fluxograma de cálculo do método COP. Ressalta-se que a metodologia se aplica à zona vadosa.

Quadro 2 - Fluxograma para cálculo do método COP



Fonte: Modificado de Vías et al., (2006)

Este trabalho utilizou uma extrapolação da espessura de solo das faixas de valores utilizados para os cálculos do subfator O_s da metodologia original COP. Por meio destes novos valores, foram realizadas simulações com diferentes valores em razão que a principal diferença encontrada entre os dois tipos

de carstes se dá na espessura de solo (Foto 1). Na Foto 1A pode ser observada a pouca espessura, ou quase nenhuma, do carste Mediterrâneo Europeu do sul da Espanha em comparação com o carste tropical úmido da área de estudo (Foto 1B).

Foto 1 - Carste Europeu Mediterrâneo (A) e carste tropical (B)



A metodologia original, mostrada no Quadro 2 para o subfator O_s, destaca a pouca profundidade do solo europeu mediterrâneo observada nas faixas de espessuras entre 0-0,5 m, 0,5-1,0 m e superior a 1,0 m. Dessa maneira, buscou-se avaliar faixas de espessuras mais condizentes à realidade do carste tropical úmido em seu subfator O_s, ou seja, alterando essas

faixas, multiplicando-as por 10, 20, 30 e 40 vezes. Em seguida, utilizando o software Arcgis®, versão 10.3 de propriedade da empresa ESRI, foi avaliado o quanto cada uma dessas novas faixas de espessuras afetam os resultados de proteção da camada protetora do aquífero para a realidade tropical dada por meio do fator O. Para verificação da simulação,

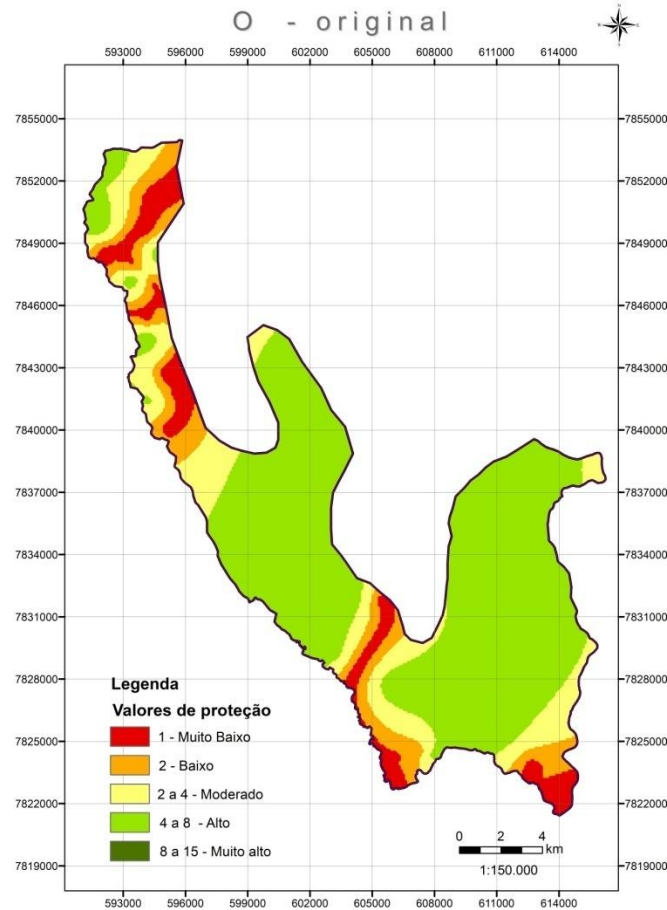
foi elaborado o mapa de $O_{proteção}$, obtido por meio de dados reais de espessuras de solo a partir de análises de perfis construtivos de poços tubulares profundos existentes na área de estudo, onde dados de espessura de solo para a área estudada foram obtidos por interpolação. A análise de textura do solo foi obtida pelo método da pipeta e os testes de infiltração obtidos a carga constante por meio do permeâmetro de

Guelph.

4. RESULTADOS

Primeiramente foi elaborado o mapa de $O_{pontuação}$ do método original, apresentado na Figura 3.

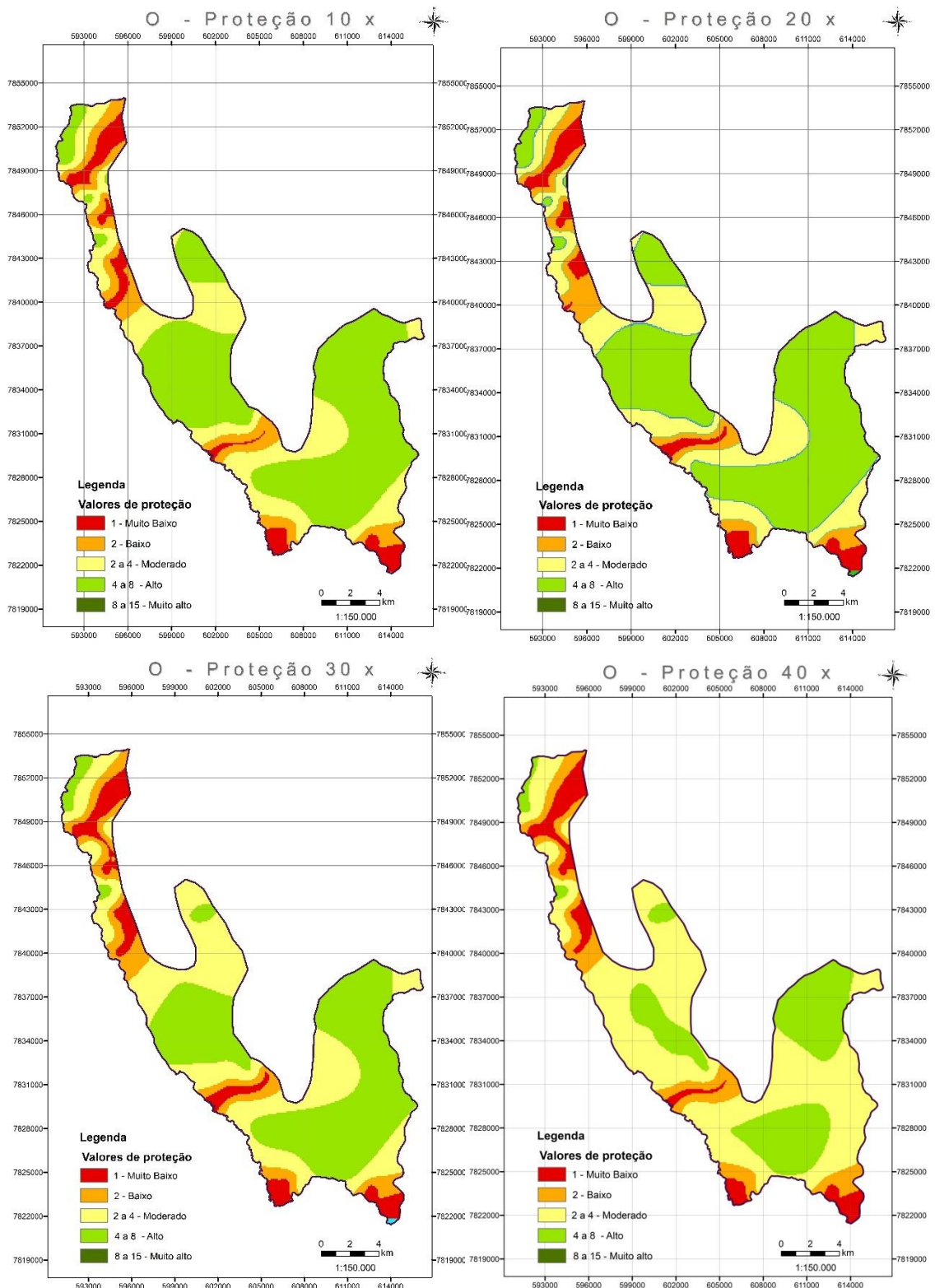
Figura 3 - Proteção $O_{pontuação}$ Original



Vale à pena ressaltar que o carste mediterrâneo europeu apresenta espessuras de solo, em sua grande maioria, abaixo de 1,0 m, completamente diferente do encontrado na área de estudo. Consequentemente, espessuras superiores a 1,0 m e textura >30% de argila apresentaram resultado de fator de proteção alto aplicando a metodologia original, conforme esperado para o carste tropical coberto da área de estudo.

As simulações realizadas tiveram o objetivo de avaliar diferentes faixas de espessuras de solo encontradas no subfator O_s e relacioná-los a solos altamente intemperizados, como por exemplo os latossolos da área de estudo com teor de argila superior a 30%, similarmente à realidade do carste encoberto estudado, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Proteção $O_{\text{pontuação}}$ para diferentes espessuras



A simulação mostrou que a partir da extrapolação/multiplicação por 10 de cada faixa de espessura do subfator O_s , percebe-se modificação da proteção alta para proteção moderada, que se mantiveram sem grandes modificações quando repetido o processo com o valor de 20 vezes. As maiores diferenças apresentadas são para os valores de 30 e 40 vezes, onde se observou uma modificação mais acentuada da proteção alta para a moderada. Excetuando as áreas onde há a

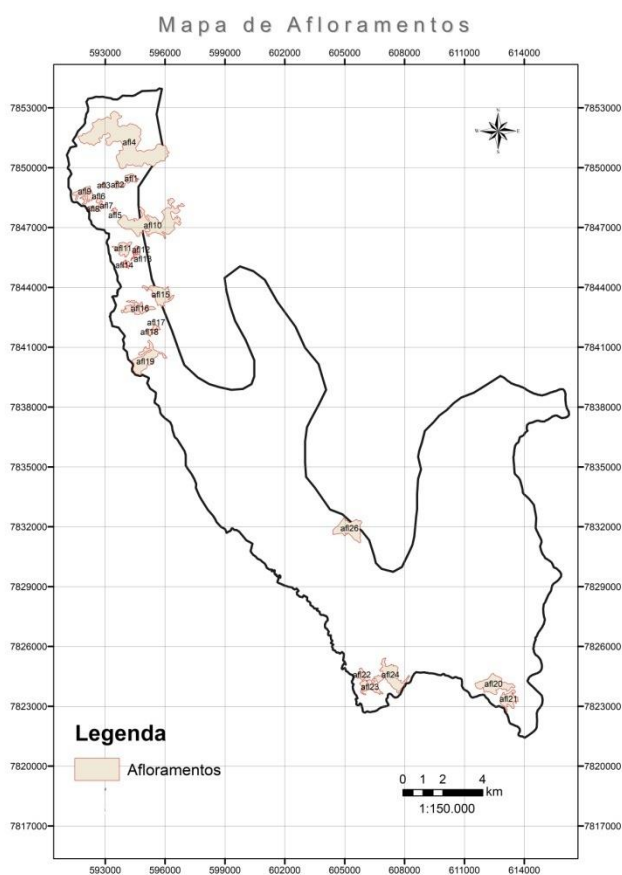
ocorrência de afloramentos, ou seja, cobertura de solo zero, proporcionando proteção baixa. Essa modificação é explicada pelo fato de que o método, com seus valores originais de faixas de espessuras de solo ($>1,0$ m; $0,5-1,0$ m e $<0,5$ m), realça que para o carste europeu o subfator O_s possui pouca ou quase nenhuma expressividade, fator esse observado pelo fato da existência do valor de O_s igual a zero. Para o carste europeu mediterrâneo, a atenuação se dá expressivamente

pelo subfator O_L , haja vista que espessuras de solo acima de 1,0 m são incomuns de serem encontradas. Portanto, a atenuação de potenciais contaminantes é dada mais expressivamente por fatores litológicos e estruturais da zona vadosa. Essa observação é inversa no carste tropical úmido, onde o subfator O_s é mais importante para os processos de atenuação natural que o subfator O_L , tendo em vista que na metodologia não há l_y igual a zero (não existência de rocha na zona vadosa), mas existe O_s igual a zero (não existência de solo na zona vadosa). O subfator O_L no carste tropical da área estudada só faz diferença para espessuras de calcário acima de 250,0 m na zona vadosa (o valor dado pela metodologia passa de 1 para 2 até 1.000,0 m de espessura de calcário), o que é incompatível a espessura estimada por estudos geológicos realizados na área por Cabral (1994) que confere 200,0 m de

espessura de calcário para a Formação Sete Lagoas. Essa observação de espessura de solo tão discrepante encontrada no carste tropical úmido em comparação ao carste europeu mediterrâneo motivou, a partir das espessuras reais observadas na área de estudo por meio dos dados dos poços, a modificação dessas faixas com valores de 10, 20, 30 e 40 vezes. Aponta-se que esses valores alteram as faixas de valores de O_s que abrangem as diferentes espessuras encontradas na área de estudo.

Os resultados verificados na Figura 4 demonstram que o método original supervaloriza os valores de $O_{proteção}$ elevando sua classe de proteção. O valor $O_s=0$ é dado somente onde há afloramento de rocha (Figura 5).

Figura 5 - Localização de afloramentos (espessura de solo igual a zero na área de estudo)



Na área de estudo predomina um carste encoberto com espessas camadas de solo, bem como de material inconsolidado argiloso, preenchendo descontinuidades até a profundidade de 100,0 m, conforme observado por Pessoa (2005) no sul da área, onde ele evidencia toda essa camada de material argiloso, assentada diretamente sobre os calcários da Formação

Sete Lagoas. Essa característica da zona vadosa tem como consequência que o fator $O_{proteção}$ para a área é representado pelo subfator O_s , uma vez que, as espessuras de calcário não ultrapassam 250,0 m conforme apresentado no Tabela 1.

Tabela 1 - Espessuras de rocha na zona vadosa encontradas na área de estudo

Identificação do Afloramento	Espessura de Calcário na Zona Vadosa (m)
afl1	14,01
afl2	4,66
afl3	2,81
afl4	45,35
afl5	7,95
afl6	5,14
afl7	5,65
afl8	7,05
afl9	6,60
afl10	19,99
afl11	26,28
afl12	33,66
afl13	40,01
afl14	52,79
afl15	83,61
afl16	13,90
afl17	23,11
afl18	22,71
afl19	15,60
afl20	34,42
afl21	26,09
afl22	9,14
afl23	8,89
afl24	2,00
afl26	12,22

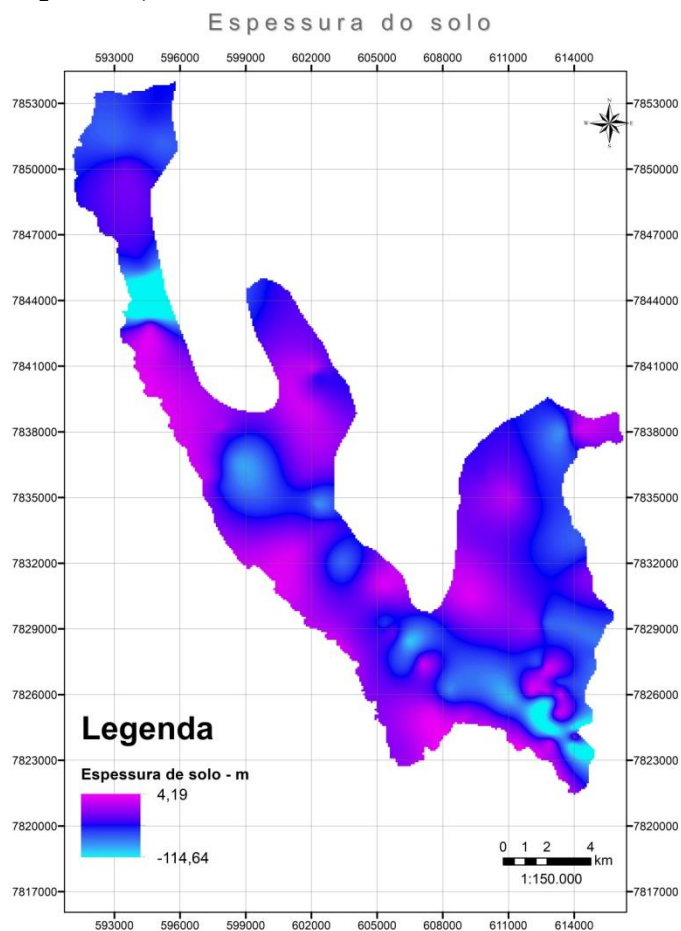
Outro fato importante a salientar é que, mesmo onde não há afloramento, como o carste é encoberto, o fator de carstificação pode se tornar irrelevante, pelo fato que as descontinuidades em profundidade podem estar preenchidas com argila, comportando dessa forma como material da zona de alteração nos processos de infiltração de potenciais contaminantes, conforme observado por Pessoa (2005).

Os resultados dos testes de infiltração apresentaram condutividades hidráulicas para Latossolo e Cambissolo de 10^{-3} e 10^{-

4 cm.s⁻¹, respectivamente, Argissolo de 10^{-3} cm.s⁻¹ e Gleissolo de 10^{-5} cm.s⁻¹.

As espessuras de solo analisadas a partir de perfis construtivos de poços tubulares profundos podem ser verificadas na Figura 6. O sinal negativo de espessura de solo na legenda da figura indica que os dados de espessuras foram tomados a partir da superfície topográfica, e para que o *software* possa “entender” que solo existe da superfície para baixo, os valores foram multiplicados por -1 no processo de interpolação.

Figura 6 – Espessuras de solo encontradas na área de estudo

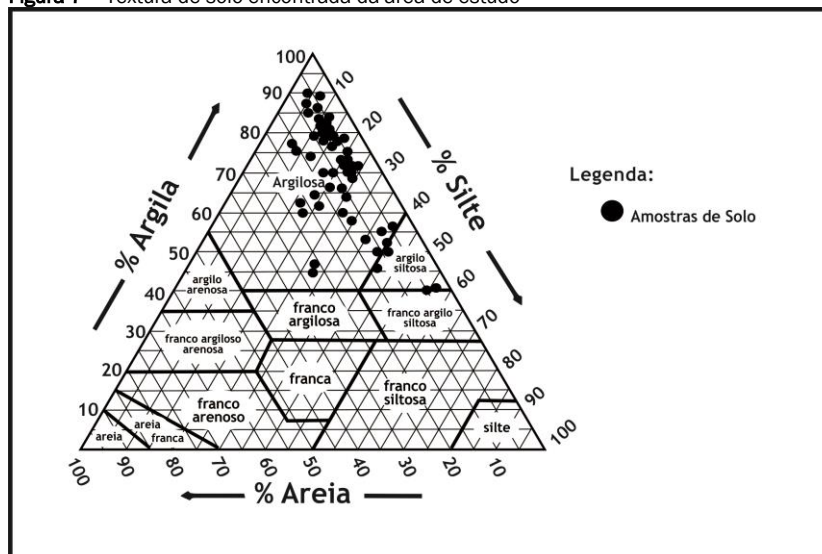


As espessuras encontradas na área de estudo, conforme apresentado na Figura 6, são majoritariamente superiores a 1,0 m. Isto corrobora uma proteção alta do aquífero para uma textura superior a 30% de argila, como é proposto pela metodologia original que leva em consideração as características de pouca espessura (<1,0 m) ou quase nula

para os solos que recobrem o carste mediterrâneo europeu do sul da Espanha.

O resultado da textura dos diferentes tipos de solos encontrados na área de estudo pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Textura de solo encontrada da área de estudo



Os resultados apresentaram textura muito argilosa para todas as amostras de solo, bastante superior a 30% de argila. Portanto, o par textura e espessura na avaliação do subfator O_s da metodologia original apresentará valores altos de proteção.

Levando em consideração as características reais de espessura, condutividade hidráulica e textura encontradas na

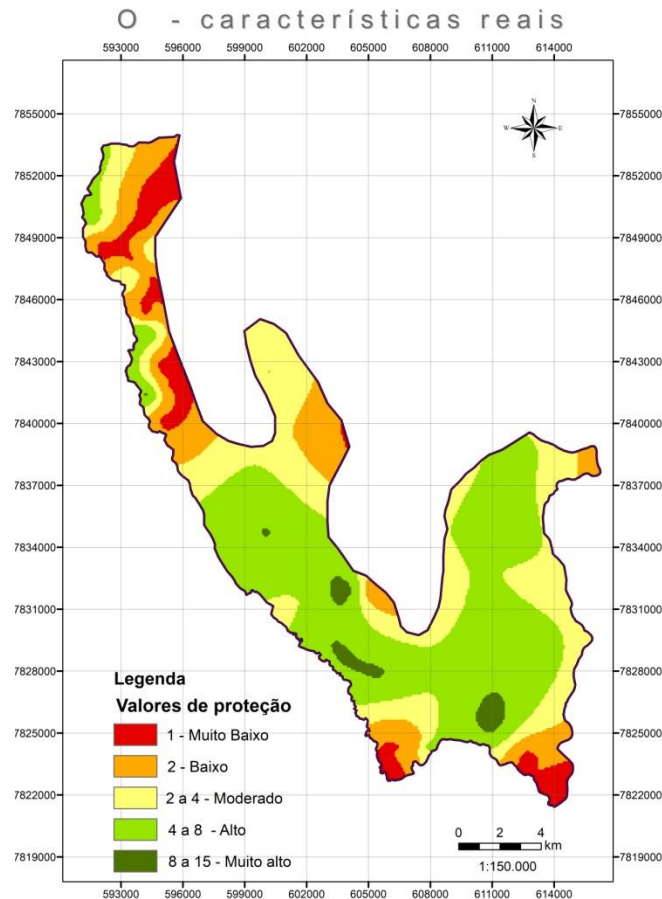
área de estudo (Tabela 2), foi elaborado o mapa $O_{proteção}$ para validação dos resultados encontrados na simulação realizada com os diferentes valores que multiplicaram as faixas de espessura para o subfator O_s (Figura 8).

O mapa com as características de espessuras reais da área de estudo, mostra uma proteção predominantemente moderada.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizados para elaboração do $O_{proteção}$.

Espessura (m)	Textura (% argila)	K (cm.s ⁻¹)
21,08	84,20	1,40x10 ⁻³
2,98	72,30	1,40x10 ⁻³
36,57	79,20	1,53x10 ⁻³
26,58	83,00	1,40x10 ⁻³
21,22	75,70	6,29x10 ⁻⁴
20,19	71,40	1,40x10 ⁻³
86,66	88,20	1,40x10 ⁻³
0,52	76,00	1,16x10 ⁻³
6,57	67,10	1,40x10 ⁻³
41,23	72,00	1,40x10 ⁻³
26,19	66,20	1,16x10 ⁻³
36,12	86,80	1,40x10 ⁻³
17,09	75,40	1,40x10 ⁻³
35,38	54,50	2,76x10 ⁻⁴
24,96	79,50	1,40x10 ⁻³
36,80	50,90	2,77x10 ⁻⁴
41,70	88,70	1,40x10 ⁻³
0,52	77,60	1,40x10 ⁻³
12,97	45,60	6,34x10 ⁻⁵
6,45	75,60	1,40x10 ⁻³
28,21	79,20	1,40x10 ⁻³
9,37	64,00	1,40x10 ⁻³
32,70	85,90	1,40x10 ⁻³

Figura 8 – $O_{proteção}$ com as características reais encontradas na área de estudo



4. DISCUSSÃO

Na metodologia original, toda espessura de solo acima de 1,0 m e teor de argila >30% tem o valor $O_s=5$, válido para solos europeus mediterrâneos. Porém, a realidade tropical úmida da área de estudo é diferente, haja vista que as espessuras são bastante variadas com predominância de serem >1,0 m. Quando se modifica as faixas de espessuras pelos fatores multiplicadores 10, 20, 30 e 40, as faixas de análise são alteradas, diminuindo os valores calculados de O_s . Espessuras $\leq 1,01$ m e textura >30% de argila assumem valores de 5, 4 e 3 para O_s . As espessuras >1,0 m assumirão sempre o valor 5 não importando quão espesso seja, se é 1,01 m ou 100,0 m! Comparando as espessuras de solo encontradas na área de estudo, 91,3% apresentariam valor $O_s=5$ e 8,7%, valor $O_s=4$. Conforme discutido, o valor de $O_{proteção}$ na área de estudo é dado pelo valor de O_s e não de O_s+O_L , portanto $O_{proteção} = 5$ ou 4, ou classes alta ou moderada. Quando se multiplicou as faixas de espessura por 10, 20, 30 e 40, alterou-se os valores encontrados para O_s , porém a textura que confere valores mais elevados é a argilosa, que na área de estudo nunca é inferior a 30%. Portanto sempre estarão entre os valores 5,4 e 3, exceto onde não há solo (afloramentos). Desta maneira, comprovou-se que as faixas de espessuras da metodologia original não se adequam à realidade da área de estudo.

Os resultados da simulação apontaram para estudos mais aprofundados na zona vadosa e das interações que ocorrerem na camada de solo, porque é nessa camada em que ocorrem os principais fenômenos de atenuação natural de potenciais

contaminantes que afetam de sobremaneira a vulnerabilidade.

Autores como Fassbender (1994), Brito Galvão (1996), Brady e Weil (2013) já relataram fenômenos físico-químicos que alteram a estrutura destes solos, afetando de sobremaneira a infiltração de potenciais contaminantes. Estudo realizado por Brito Galvão (1996) em ambiente similar a área de estudo demonstrou que as propriedades físicas do solo são dominadas quase exclusivamente pelas propriedades físicas e químicas dos minerais de argila, com pouca ou quase nenhuma influência de areia e silte. Isso se deve ao fato que solos tropicais altamente intemperizados, como os latossolos da área de estudo com presença exclusiva do argilomineral caulinita em pH ácido, melhoram a estruturação desses solos pelo fenômeno de adsorção de óxidos e hidróxidos na superfície da caulinita, como é evidenciado por Fassbender (1994). Esse fenômeno afeta drasticamente a infiltração, tendo em vista que o produto resultante da interação entre óxidos, hidróxidos e caulinita em pH ácido é chamado por Brady e Weil (2013) de pseudoareias. Brito Galvão (1996) também concluiu em seu estudo que os minerais de óxidos de Fe neste tipo de solo agem mais no melhoramento de formação de agregados do que em processos de cimentação. Isso explica resultados de condutividade hidráulica relativamente elevados encontrados na zona vadosa, quando comparados com os valores de argilas na zona saturada indicados na literatura.

Um aspecto importante a ser destacado é a inexpressividade do subfator O_L para a área de estudo, uma vez que os fatores

de $O_{proteção}$ são dados pelos valores de O_s , onde se nota toda a diferença para a avaliação da vulnerabilidade.

Para espessuras superiores a 1,0 m de solo, não importando quão espesso seja, a metodologia original agrupa todas na classe de maior proteção. Isto afeta significativamente os valores de proteção a realidade da área de estudo, pelo simples fato que espessuras de solo superiores a 1,0 m são “normais” de serem encontradas em áreas de solos muito intemperizados, ao contrário de espessuras menores que 1,0 m.

A metodologia originalmente concebida se demonstrou adequada somente onde não há solo, e foi impossível de detectar espessuras muito superiores a 1,0 m onde a proteção é dada como muito alta, conforme apresentado na Figura 8.

A relação espessura *versus* condutividade hidráulica é uma importante característica quando o objetivo primordial desse tipo de estudo é verificar a real capacidade da camada protetora que recobre o aquífero e promover a mitigação de potenciais contaminantes. Apesar do solo apresentar teores de argila superiores a 30% com espessuras consideráveis, a proteção não foi majoritariamente alta e sim, moderada com algumas áreas sendo apontadas como de proteção baixa a muito baixa. Esse fato se deve a incompatibilidade da metodologia às espessuras e texturas para a região tropical úmida aliada a condutividades hidráulicas relativamente altas encontradas nesse tipo de solo.

5. CONCLUSÕES

A simulação demonstrou que a aplicação da metodologia original na área de estudo traz consigo uma série de inconsistências devido às características distintas do carste encoberto por espessa camada de solo muito intemperizado quando comparado ao carste mediterrâneo europeu de onde a metodologia foi criada.

Para o método original, o subfator litológico (O_L) é mais expressivo que o subfator solo (O_s), quando se observa o oposto para o carste tropical úmido.

O estudo revelou que para sua aplicação o método necessita ser modificado, principalmente no que se refere à espessura de solo. Outros estudos mais aprofundados sobre os fenômenos físico-químicos que alteram de sobremaneira a infiltração também são fundamentais para a modificação da metodologia original bem como estudos mais específicos de mensuração de espessura de solo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa de doutorado e aos pesquisadores do Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga-CEHIUMA, Ana Isabel Marín e Bartolomé Andreo Navarro, pelas horas e paciência despendidas em sanar dúvidas advindas sobre a metodologia COP durante a estância doutoral realizada na Espanha, bem como ao CECAV-ICMBio.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. *Atlas Brasil: abastecimento*

urbano de água: panorama nacional. Brasília, ANA, 2010. 34 p.

ALLER *et al.* United States Environmental Protection Agency. *Drastic: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*, 1987. 35-62.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E. L.; MENIN, D. S.; BRANDI, R. *Histórico, ocorrência e potencial de cavernas no Brasil*. Editora IABS: Brasília, Atlas do Brasil Subterrâneo, 2019.

BAKALOWICZ, M. 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, n. 13, p. 148-160, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>

BERBERT-BORN, M.; SCHOBHENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M. Carste de Lagoa Santa: berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: BERBERT-BORN, M.; SCHOBHENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M. *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil* (SIGEP), p. 415-430, 2002.

BRADY, C. NYLE; WEIL, RAY R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRITO GALVÃO, T. C.; SCHULZE, D. G. Mineralogical properties of a collapsible lateritic soil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, n. 60, p. 169-178, 1996. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000060050x>

CETEC/CPRM. Centro Tecnológico do Estado de Minas Gerais. *Projeto vida-caracterização pedológica: série cartas temáticas*. Belo Horizonte, CETEC/CPRM, 49-103 p.

CABRAL, Jayme Álvaro de Lima. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. *Projeto Vida: Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental*. Belo Horizonte, 23, 1994. 24 p. v.3.

CIVITA, M. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria e pratica [Aquifer vulnerability map to pollution. Theory and application]. *Pitagora*, 13, p. 325, 1994.

FASSBENDER, Hans W.; BORNEMISZA, Elemer. *Química de suelos de América Latina*. 2 ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperación Para La Agricultura. Servicio Editorial IICA, 1994.

GUERRERO, G. Paneque; GOMÉZ, J. L. Mudarra. Morfología, sistemática y cartografía de los suelos de Andalucía Occidental. *Anales de Edafología y Agrobiología*, p. 417-440, 1966.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Rev. ed. John and Wiley and Sons, Ltd: Chichester, 2007, 17p. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>

FOSTER, S.; HIRATA, R. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO-Pan American Health Organization. Lima: Environmental Health Program-HPE, 1998.

FRITZSONS, E.; RIZZI, N.; BITTENCOURT, A. V. L.; MANTOVANI, L. E. *Estudo do impacto da contaminação por nitrogênio numa bacia hidrográfica cárstica*. Boletim Paranaense de Geociências, 49, p. 39-52, 2001. <https://doi.org/10.5380/geo.v49i0.4124>

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. *Methods in Kart Hydrogeology*.

ed. Taylor & Francis, London, 2007, 264p.

GOLDSCHIEDER, N.; KLUTE, M.; STURM, S.; HÖTZL, H. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 46, p. 157-166, 2000.

HERMANN, Gisela et al. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico Do Brasil. *Apa Carste de Lagoa Santa: zoneamento ambiental*. Belo Horizonte, 1998. 2,8 p.

MARTÍNEZ, M.I. *Estratigrafia e tectônica do grupo bambuí no norte do estado de Minas Gerais*. 2007. Belo Horizonte, 26p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

MEGIA, Miguel Villalobos; MUÑOZ, Ana B. Pérez. *Geodiversidad y Patrimonio Geológico de Andalucía: Itinerario Geológico por Andalucía, Guía Didáctica de Campo*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, p. 17-325, 2006.

MENESES, I.C.R.R.C. *Análise geossistêmica na área de proteção ambiental (APA) carste de Lagoa Santa, MG*. 2003. Belo Horizonte, 16, 92p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tratamento da Informação Espacial, Instituto de Ciências Humanas, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

NOSSA, T.C.B. *Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre-Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP*. 2011. Salvador. 82p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.

PESSOA, P.F.P. *Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG*. Belo Horizonte. 86, 310p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-DESA, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

PILÓ, Luís B. Geomorfologia cárstica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 1, n. 1, p. 88-102, 2000. <https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.73>

RODRIGUEZ, J. L. Perez; MARTINEZ, F. Martin. Estudio por espectrografia de infrarrojo de las arcillas de algunos suelos de

Andalucia Occidental. *Anales de Edafología y Agrobiología*, p. 1069-1079, 1966.

SELKER, J. S.; Keller, C. K; McCORD, J. T. 1999. *Vadose zone processes*. Boca Raton, CRC Press LLC, 5p.

SHINZATO, E. O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos. Campo dos Goytacazes. 35p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – Centro de Ciências Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 1998.

STEPHENS, D. B. *Vadose zone hydrology*. Boca Raton, CRC Press Inc., 1996. 2p.

Tripet, J-P. *Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland*. *Acta Carsologica*, 29, p. 164-171, 2000.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer vulnerability index: a GIS – compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, v. 18, n. 1, p. 25-37, 1993. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>

VÍAS, J.M.; AANDREO, B.; PERLES, M.J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, 14, p. 912-925, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>

VÍAS, J.M.; ANDREO, B.; RAVBAR, N.; HOTZL, H. Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management*, v. 91, p. 1500-1510, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.025>

ZHAO, C.; AULER, S. A.; BAKALOWICZ, M.; DREW, D.; GRIGER, F.; HARTMANN, J.; JIANG, G.; MOOSDORF, N.; RICHTS, A.; STEVANOVIC, Z.; VENI, G.; GOLDSCHIEDER, N. The world karst aquifer mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*, 2017. DOI 10.1007/s10040-016-1519-3.

ZWAHLEN, F. et al. *Vulnerability and risking map for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final Report. Brussels: European Commission COST Action 620, Directorate-General Science, Research and Development, 2004.