ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Análise da vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático e da taxa de infiltração do solo da bacia do rio Almada e área costeira adjacente – BA

Gustavo Barreto Franco[1], Demetrius David da Silva[2], Eduardo Antonio Gomes Marques[3], César da Silva Chagas[4], Ronaldo Lima Gomes[5]

[1]Professor Adjunto da Universidade do Estado da Bahia – UNEB, Jacobina (BA), Brasil. E-mail: gustavopraia@yahoo.com.br
[2]Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa (MG), Brasil. E-mail: demetrius@ufv.br
[3]Professor Associado da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa (MG), Brasil. E-mail: emarques@ufv.br
[4]Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. E-mail: chagas.rj@gmail.com
[5]Professor Titular da Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, Ilhéus (BA). E-mail: rlgomes@uesc.br

_____ Artigo recebido em 06/01/2015 e aceito em 28/12/2015

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo a identificação de áreas vulneráveis à contaminação do aquífero freático da Bacia do Rio Almada e área costeira adjacente, Bahia - Brasil. Para tanto, foi realizada a caracterização da área de estudo, com base em dados primários e pré-existentes; bem como da taxa de infiltração e da característica física do solo. O mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático foi obtido a partir da integração das características climática, declividade, profundidade do nível freático, solo e uso e ocupação do solo, por meio de álgebra de mapas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) na escala de 1:100.000, classificado em cinco graus de vulnerabilidade, assim identificados: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Os resultados apontaram que as áreas com maior vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático situam-se, principalmente, na região costeira, nos locais relacionados aos solos arenosos, baixa declividade e nível freático raso. Os 15 pontos de amostragem de solo permitiram caracterizá-lo como de textura arenosa com elevados teores de areia (fina + grossa) - acima de 90% da composição granulométrica e valores de taxa de infiltração entre 0,00005 e 0,00075 cm/s. As informações levantadas e analisadas constituem produtos que poderão subsidiar tomadas de decisões, priorizando ações que venham a minimizar os danos ambientais como forma de resguardar a qualidade ambiental, orientar o manejo do solo e a recuperação ambiental.

Palavras-chave: uso e ocupação do solo; sistema de informação geográfica; planejamento ambiental.

Vulnerability analysis to contamination of the water aquifer and soil infiltration rate of Almada basin of the river and the adjacent coastal area

ABSTRACT

Analysis of vulnerability to phreatic aquifer contamination and infiltration rate of the soil of Almada River Watershed and adjacent coast – BA. This research aimed to identify areas vulnerable to phreatic aquifer contamination Almada River Watershed and adjacent coastal area, Bahia - Brazil. Therefore, it was performed to characterize the study area, based on the primary and preexisting; well as the permeation rate and physical characteristics of the soil. The map of vulnerability to phreatic aquifer contamination was obtained from the integration of climate characteristics, slope, water table depth, and soil use and occupation of land by means of map algebra environment in Geographic Information System (GIS) on the scale of 1:100,000, classified into five degrees of vulnerability, thus identified: very low, low, medium, high and very high. The results showed that areas with greater vulnerability to phreatic aquifer contamination are located mainly in the coastal region, in areas related to sandy soils, low slopes and shallow groundwater. The 15 points allowed soil sampling characterize it as sandy with large amounts of sand (fine + coarse) - over 90% of the particle size distribution and infiltration rate values between 0.00005 and 0.00075 cm/s. The information gathered and analyzed are products that can support decision making, prioritizing actions that will minimize environmental damage as a way of protecting environmental quality, direct soil management and environmental remediation.

Keywords: land use and occupation; geographic information system; environmental planning.

Introdução

Os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica apresentam características físico-químicas próprias, as quais refletem as características do meio físico e as atividades de uso do solo. Logo, a água, por ser o ponto de convergência de um complexo sistema ambiental, está sujeita a diversas fontes de contaminação, sendo elas: percolação de efluentes sanitários e de chorume de lixões; agrotóxicos; lagoas de rejeito de mineração; disposições inadequadas de resíduos industriais; necrochorume etc.

A dinâmica da água no solo é um processo contínuo que controla o movimento dos elementos químicos que intervêm nos processos de formação dos solos, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na qualidade da água (Maciel Netto et al. 2000). O movimento dos elementos químicos é dependente das características físico-hídricas do solo e influenciado pelas características ambientais.

A vulnerabilidade dos aquíferos freáticos à contaminação tem se tornado um problema preocupante, visto que são considerados reservatórios estratégicos para a humanidade, e de difícil e onerosa remediação.

O planejamento criterioso é determinante para equacionar as relações de causa-efeito geradas pelas diversas atividades desenvolvidas em uma bacia hidrográfica, já que é dentro de sua área que se manifestam os conflitos decorrentes das interações dos aspectos naturais e humanos, e que irão refletir, por exemplo, na qualidade da água, dada pela sua sensibilidade aos impactos. Deste modo, as bacias conferem um importante campo para estudos de modelagem ambiental, uma vez que seu estado de equilíbrio pode ser facilmente modificado, resultando em consequências que podem ser irreversíveis, dependendo do grau do impacto e da vulnerabilidade da área.

Assim, a combinação de técnicas de avaliação, a definição de atributos ambientais e seus respectivos pesos, as tecnologias de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica com a participação de especialistas no processo de decisão podem oferecer um instrumento integrado, visando dar suporte e aperfeiçoar a determinação de áreas vulneráveis à contaminação do aquífero freático, tornando-se uma ferramenta importante para identificação de áreas críticas à interferência de contaminantes, bem como subsidiar políticas públicas de uso e ocupação do solo.

A Bacia Hidrográfica do Rio Almada (BHRA) e a área costeira adjacente apresentam alterações das suas condições naturais, dentre as quais se destacam: poluição dos mananciais hídricos; degradação dos solos e da cobertura vegetal; execução de obras de engenharia; e atividades agropecuárias. Estas modificações merecem atenção, em função da possibilidade de causarem o comprometimento da qualidade ambiental, uma vez que esta bacia é a principal fonte hídrica para o abastecimento público das cidades de Almadina, Barro Preto, Coaraci, Itabuna, Itajuípe e Uruçuca; e, constituída de belezas cênicas naturais, como por exemplo a Lagoa Encantada, remanescentes florestais de mata atlântica, sítios arqueológicos e paleontológicos.

A área de estudo está inserida na região cacaueira do Estado da Bahia, local em que as formações florestais de mata atlântica foram mais conservadas, devido ao modelo agrícola utilizado, ou seja, cabruca. A adoção deste modelo fez com que, ao longo de mais de duzentos anos, se conservasse importantes fragmentos de floresta, fauna, solo, além dos recursos hídricos. Porém, desde a década de 1990, o cultivo do cacau sofre uma crise, que tem como causa a baixa dos preços no mercado internacional e o intenso ataque de uma praga conhecida como vassoura de bruxa, que devastou grande parte da lavoura cacaueira. Devido a essa crise, houve o abandono da monocultura e uma intensa derrubada de árvores, seja para a exploração comercial da madeira, seja para a implantação de pecuária extensiva.

Na área costeira está prevista a implantação de um porto, aeroporto e ferrovia, com objetivo de criar um corredor de exportação e um terminal para a ferrovia que irá trazer minério de ferro, níquel e urânio e grãos do oeste e centro-oeste da Bahia, para a exportação para países da Ásia. Os depósitos arenosos da zona costeira, local que abrigará a construção das obras, têm como característica a presença do nível freático próximo à superfície e a alta permeabilidade.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é identificar as áreas vulneráveis à contaminação do aquífero freático da Bacia do Rio Almada e área costeira adjacente (Bahia), a fim de subsidiar tomadas de decisões das entidades competentes, visando à manutenção da qualidade ambiental e a redução de vulnerabilidade quanto a possíveis contaminações por metais-traço, águas residuárias

efluentes domésticos e industriais e defensivos agrícolas.

Material e Métodos

Objeto de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Almada (BHRA) e área costeira adjacente, localizados no Estado da Bahia, é parte integrante da Bacia do Atlântico Leste (SRH, 1996), abrange 1.637 km² e está localizada na região Sul do Estado da Bahia, limitada a norte e a oeste com a Bacia do rio de Contas, a sul com a Bacia do rio Cachoeira e a leste com o Oceano Atlântico. Engloba áreas dos municípios de Almadina, Coaraci, Ibicaraí, Barro Preto, Itajuípe, Itabuna, Ilhéus e Uruçuca, como mostra a Figura 1.

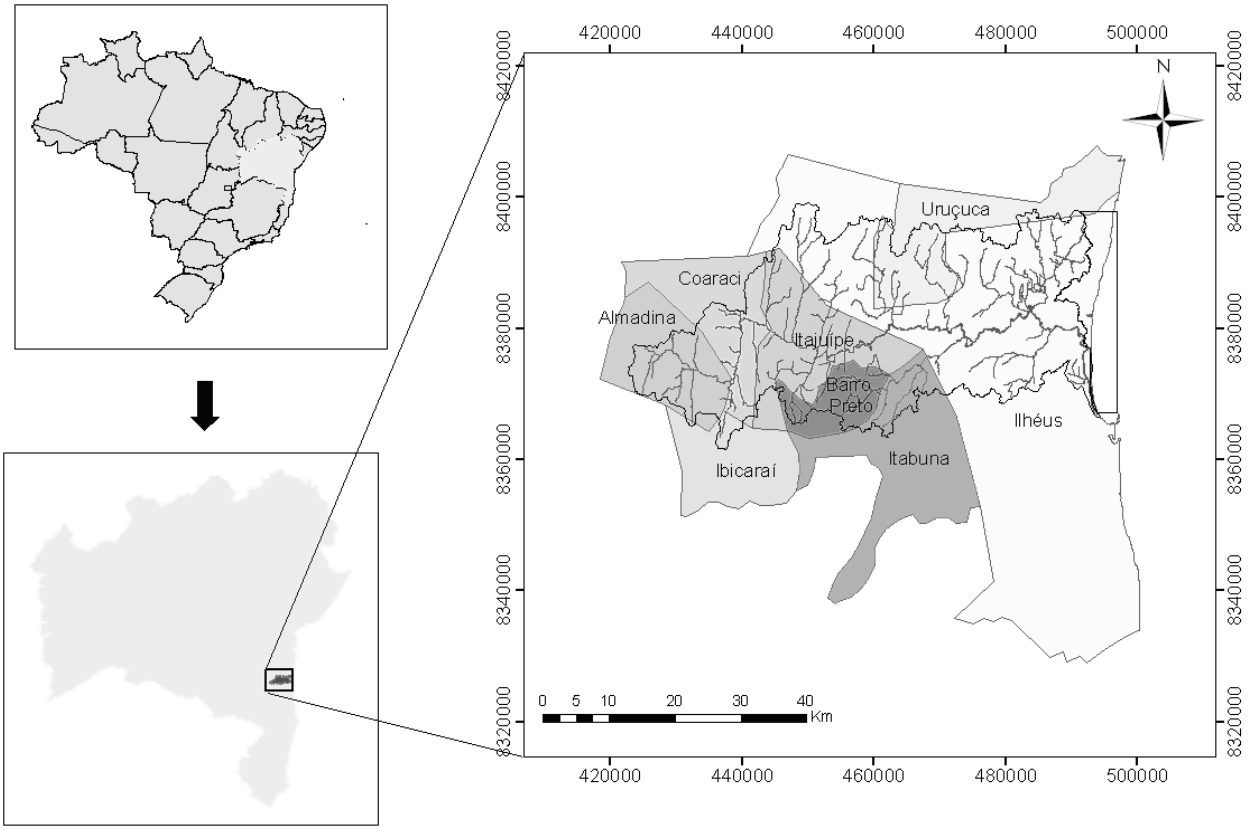

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Almada e área costeira adjacente, na Região Sul da Bahia - Brasil.

Compilação e tratamento de dados secundários

Antes do início da produção dos mapas temáticos, foi realizada a consolidação da base cartográfica da área da bacia, de modo a possibilitar o conhecimento das condições de suporte de trabalho. Em função dos trabalhos de cobertura planialtimétrica existentes, os trabalhos de cartografia foram desenvolvidos na escala 1:100.000, com a utilização e adaptação dos dados das folhas topográficas do IBGE SD.24-Y-B-VI (Itabuna-2143) (IBGE, 1965a), SD.24-Y-B-V (Ibicaraí-2142) (IBGE, 1965b) e SD.24-Y-B-III (Ubaitaba-2099) (IBGE, 1965c).

Os arquivos disponíveis das folhas topográficas do IBGE encontravam-se em formato DGN, que não permite o desenvolvimento das atividades previstas, tendo sido, dessa forma, convertidos para formato shapefile (.shp), através do software ArcGis Desktop 9.3, utilizado em todos os procedimentos envolvidos na manipulação da base cartográfica da pesquisa.

O limite da área de estudo utilizado na pesquisa foi definido a partir da manipulação da imagem TOPODATA, resultante da extração de planos de informações dos dados SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de resolução de 90m, em que foram utilizadas técnicas de geoestatística para o tratamento de dados topográficos, promovendo ganho de qualidade e de resolução para 30m (Valeriano 2008). Este limite, definido em ambiente SIG, remete a um cenário mais preciso, visto que o procedimento empregado baseia-se na interpretação conjunta e automática do relevo, por meio dos divisores topográficos presentes em escala 1.100.000; e a partir da direção de fluxo em direção a um ponto exutório (ponto de um curso d'água onde se dá todo o escoamento superficial gerado no interior da bacia) inserido manualmente na foz do rio

principal. Assim, a partir desse ponto gerou-se uma delimitação da rede de drenagem baseada no relevo de toda a bacia.

A aquisição de imagem de satélite atendeu aos requisitos de baixa cobertura de nuvens (menor que 20%), resolução compatível com a escala de trabalho (1:100.000) e de data mais recente possível. Nesse sentido foram feitas pesquisas no site do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, tendo em vista a obtenção de imagens LANDSAT 5 sensor TM (Tematic Mapper), resolução espacial de 30m. Dentre as imagens consultadas apenas a do ano de 2006 (Figura 2) apresentou qualidade para ser trabalhada, em função da baixa cobertura de nuvens.

Observações em imagens de satélite para consolidação das áreas de fundo de vales e baixadas litorâneas, principalmente, e trabalhos de campo foram realizados com o objetivo de validação das unidades mapeadas.

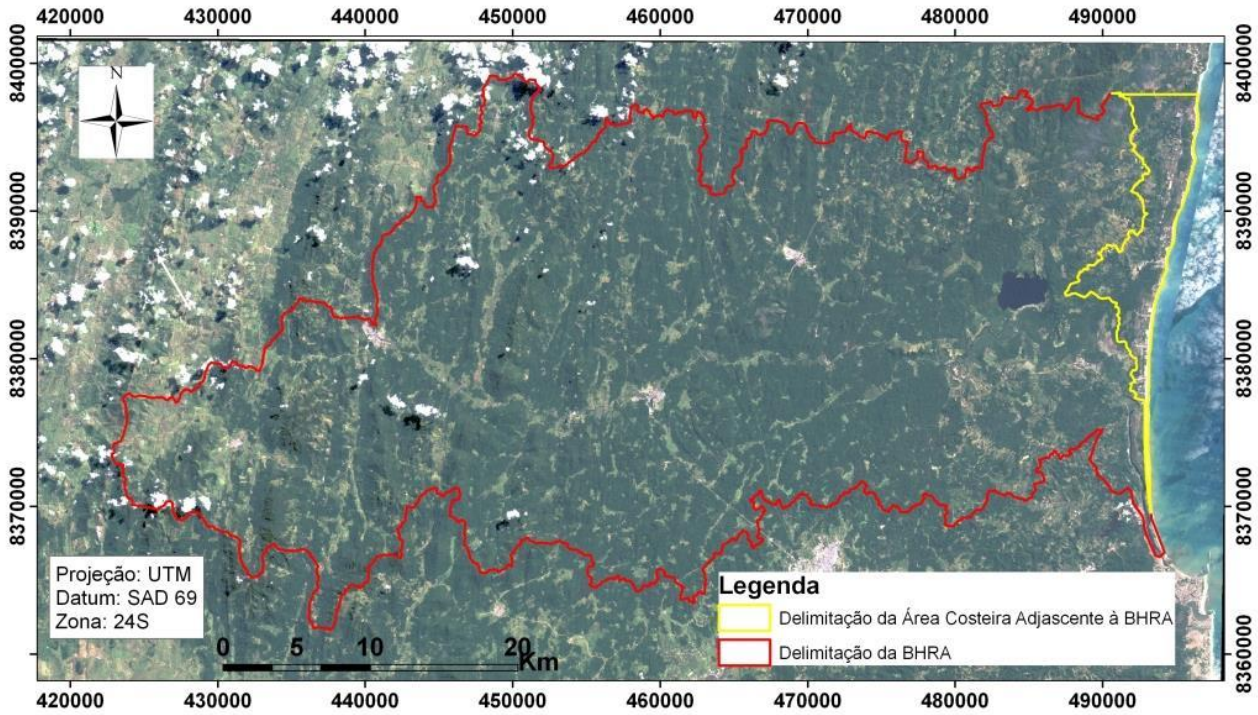

Figura 2. Cobertura de imagem de satélite LANDSAT 5TM na BHRA e área costeira adjacente.

A elaboração do mapa de substrato rochoso baseou-se, inicialmente, no levantamento da documentação existente referente à geologia da região através do Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – Folha SD.24-Y-B-VI (Arcanjo et al. 1997) e do Mapa Geológico do Estado da Bahia (Barbosa & Dominguez 1996).

Tanto o mapa de substrato rochoso da BHRA como o mapa de clima foram realizados na escala de 1:100.000, sendo que o último foi digitalizado do trabalho de Roeder (1975).

Para geração do mapa de declividade utilizaram-se os dados do TOPODATA com resolução de 30 m da folha 14_405_SN e, para isso, utilizou-se a opção slope do Spatial Analyst do ArcGis Desktop 9.3. Com base nessa imagem foram extraídas as classes de declividade, em porcentagem.

O mapa de solo foi resultado do trabalho de Franco (2010), realizado na escala de 1:100.000.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir de imagem do sensor TM do LANDSAT 5, 2006, cenas 215/70 e 216/70, utilizando o método de classificação supervisionada a partir da retirada de amostras espectrais da imagem no ambiente do software Erdas 9.2.

O processo de classificação da imagem foi realizado a partir da composição das sete bandas espectrais atmosfericamente corrigidas, utilizando o nível de cores RGB 3,4,5. Utilizou-se o método de classificação supervisionada a partir da retirada de amostras espectrais da imagem. No ambiente do software Erdas, utilizaram-se os módulos, Signature Editor e Aol Tool do ERDAS imagine

9.2. O Signature Editor é o ambiente no qual são organizadas as amostras a serem coletadas na imagem enquanto que o Aol Tool é a caixa de ferramenta utilizada para delimitação e coleta dos polígonos representantes dos pontos de amostragem na imagem. A amostra representativa de cada uma das diferentes tipologias de uso e ocupação do solo refere-se a uma determinada quantidade de pixels coletada na imagem e que serve de parâmetro para classificação. Dessa forma é possível captar a informação existente na amostra e expandir a sua ocorrência por toda a imagem.

Vale ressaltar que o reconhecimento das amostras espectrais da imagem contou ainda com o conhecimento das áreas nas visitas a campo, bem como das características levantadas na caracterização da área de estudo, e, por fim, da sua validação em campo.

Os resultados das imagens classificadas foram organizados no ArcGis Desktop 9.3, utilizando a técnica de área mínima mapeável, que permite eliminar pequenas áreas dos mapas, melhorar o aspecto visual e realizar os ajustes de compatibilização cartográfica.

Em relação ao mapa de profundidade do nível freático, foi elaborado de acordo com a metodologia proposta por Zuquette & Gandolfi (2004), com visita a campo e determinação da profundidade do nível freático baseando-se na posição do relevo e espessura do solo a partir do mapa de substrato rochoso.

2.3 Elaboração do mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático

Na avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático da BHRA e da área costeira adjacente foram utilizadas informações provenientes das características do clima, da declividade, do solo, do uso e ocupação do solo e de profundidade do nível freático, considerando o grau de vulnerabilidade de cada um destes atributos. A adoção destas variáveis é uma adaptação da metodologia proposta por Zuquette & Gandolfi (2004).

Inicialmente, estabeleceu-se a hierarquização das classes dos atributos de cada plano de informação de acordo com o seu grau de vulnerabilidade. A cada classe foi atribuído um índice numérico, como mostra a Tabela 1, sendo este valor diretamente proporcional ao nível de influência, ou seja, quanto maior o índice, menor o grau de proteção.

Tabela 1. Graus de Vulnerabilidade.

Classe	Valor de Vulnerabilidade
Muito Baixo	1
Baixo	2
Médio	3
Alto	4
Muito Alto	5

O mapa de vulnerabilidade à contaminação (Figura 3) foi obtido a partir de cruzamento dos atributos de clima, declividade, solo, uso e ocupação do solo e profundidade do nível freático, conforme mostra a equação abaixo:

VCLF = ([C]+[D]+[S]+[UO]+[PNF])/5

Em que:
VCLF: vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático
C: clima
D: declividade
S: solo
UO: uso e ocupação do solo
PNF: profundidade do nível freático

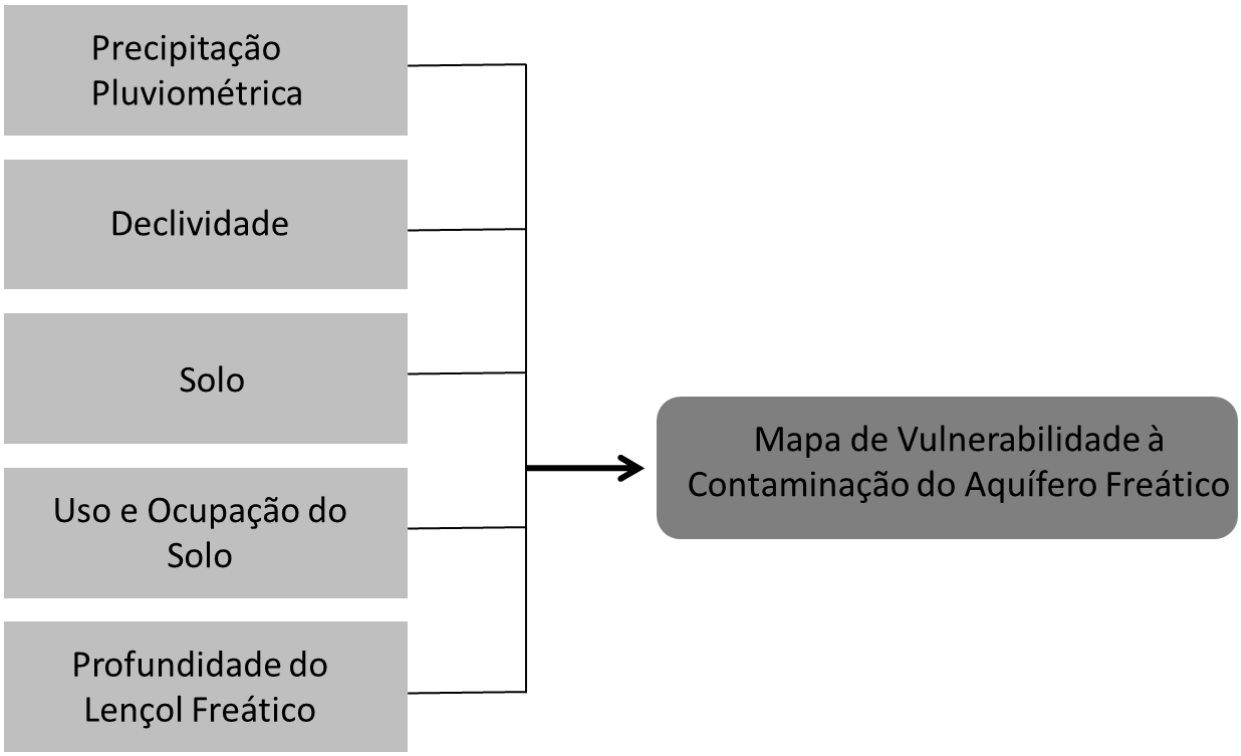

Figura 3. Fluxograma da metodologia para geração do mapa de vulnerabilidade à contaminação.

Tendo em vista que os graus de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático foram calculados pelo somatório dos valores atribuídos a cada grau de vulnerabilidade de um determinado atributo selecionado, e que valores dos atributos hierarquizados não são necessariamente números inteiros, tornou-se necessário agrupar os valores obtidos em intervalos de cinco graus de vulnerabilidade, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Intervalos dos Graus de Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Freático.

Classe	Valor de Vulnerabilidade
Muito Baixo	1 – ≤1,5
Baixo	1,5 – ≤2,5
Médio	2,5 – ≤3,5
Alto	3,5 – ≤4,5
Muito Alto	4,5 – 5

Ressalta-se que neste trabalho, foi verificada a coerência dos resultados de vulnerabilidade com as observações de campo, ou seja, para validação das considerações realizadas.

Para a geração do mapa, escala 1:100.000, procedeu-se o desenvolvimento de rotinas para a conversão de dados vetoriais em formato matricial (raster), com tamanho de célula de 30m, e posteriormente foi utilizada a opção raster calculator do ArcGIS Desktop 9.3 para o desenvolvimento das operações de álgebra de mapas.

Precipitação pluviométrica

Face à variação pluviométrica verificada na área de estudo, em que se observam três diferentes domínios pluviométricos, levou-se em consideração esta variável para a análise da vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático. Foram estabelecidos níveis hierárquicos (Tabela 3) de acordo com a maior ou menor intensidade do efeito pluviométrico sobre os processos morfodinâmicos (Crepani *et al*. 2004). Com isso, os comportamentos pluviométricos obedeceram a uma hierarquização de ordem crescente quanto à capacidade de interferência na estabilidade do ambiente.

Tabela 3. Graus de Vulnerabilidade para o atributo precipitação pluviométrica.

Classes Climáticas	Valor de Vulnerabilidade
Aw	2
Am	2,3
Af	2,5

Aw: clima tropical com estação seca de inverno; Am: clima de monção; Af: clima tropical úmido

Declividade

Para se estabelecer as classes de declividade foram utilizados intervalos mostrados na Tabela 4, já consagrados nos estudos de capacidade de uso/aptidão agrícola associados aos valores já conhecidos de limites críticos da Embrapa (2006). A declividade do terreno apresenta-se como um importante fator a ser analisado na vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, pois a infiltração pode ser maior quanto menor a declividade, ou seja, relevos com superfícies planas tendem a apresentar melhores condições de infiltração da água.

Tabela 4. Graus de Vulnerabilidade para o atributo declividade.

Classes de Declividade (%)	Valor de Vulnerabilidade
≥45	1
20 - <45	2
8 – ≤20	3
3 – ≤8	4
≤3	5

Solo

A vulnerabilidade dos solos à contaminação do nível freático é função das suas características, tais como textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, consistência e profundidade.

Para os Gleissolos e Organossolos, caracterizados por serem jovens e pouco desenvolvidos, com horizonte A assentado diretamente sobre o horizonte C ou diretamente sobre a rocha mãe (não possuem horizonte B), com baixa permeabilidade, adotou-se o valor 1 (Tabela 5).

Tabela 5. Graus de Vulnerabilidade para o atributo solo*

Classes de solo	Valor de Vulnerabilidade
Latossolos	1
Argissolos	2
Cambissolos	3
Luvissolos	3,5
Espodossolo / neossolos	4
Gleissolos / organossolos	5

*Para cálculo da média ponderada dos casos que possuem 2 associações de solos adotou-se o seguinte critério: 60% valor de vulnerabilidade + 40% valor de vulnerabilidade = valor de vulnerabilidade final; para casos com 3 associações: 50% valor de vulnerabilidade + 30% valor de vulnerabilidade + 20% valor de vulnerabilidade = valor de vulnerabilidade final.

Aos Luvissolos e Argissolos, caracterizados pela diferença textural entre os horizontes A e B, tendo como consequência a baixa condição de infiltração, foram atribuídos valores de vulnerabilidade de 2 e 3, respectivamente.

Os Cambissolos da área de estudo, apresentam características latossólicas no horizonte diagnóstico, com estrutura granular bem desenvolvida, bem drenados. A estes solos foi atribuído valor de vulnerabilidade igual a 4.

O grau de vulnerabilidade 4,5 foi associado aos Latossolos, os quais são solos maduros, bem desenvolvidos, profundos e possuem boas propriedades físicas (permeáveis, porosos, friáveis e de baixa plasticidade).

Os Espodossolos Ferrihumilúvicos e Neossolos Quartzarênicos são os que apresentam as melhores condições de infiltração (valor 5), por serem excessivamente drenados e profundos, constituídos de material sedimentar areno-quartzoso não consolidado.

Uso e ocupação do solo

Para estabelecer os graus de vulnerabilidade para os diferentes tipos de uso e ocupação do solo levou-se em consideração o papel da vegetação como manto protetor da paisagem. Desta forma quanto mais densa é a cobertura vegetal maior é a capacidade de infiltração da água. Por outro lado, a falta de cobertura florestal densa contribui para redução da capacidade de infiltração e maior escoamento superficial da água.

Na Tabela 6 apresentam-se os valores de vulnerabilidade atribuídos a cada tipo de uso e ocupação do solo.

Tabela 6. Graus de Vulnerabilidade para o atributo uso e ocupação

Classes de Uso e Ocupação	Valor de Vulnerabilidade
Área Urbana	1
Solo Exposto	1,5
Áreas Úmidas	2
Pastagem e Cultivo de Subsistência	3
Restinga	3
Cabruca	4
Floresta de Mata Atlântica	5

Desta maneira, de acordo com os critérios estabelecidos, foram adotados os valores mais baixos, entre 1 e 1,5 para os terrenos que apresentam baixa capacidade de infiltração, sendo eles Áreas Urbanas e Solo Exposto, respectivamente. As Áreas Úmidas obtiveram valor 2, em razão da presença do nível freático superficial.

As áreas de Pastagem/Cultivo de Subsistência e de Restinga, considerando a baixa densidade de cobertura, possuem condições desfavoráveis à infiltração, ambas receberam peso 3.

A formação vegetal constituída de Cabruca obteve valor 4, seguida da Floresta de Mata Atlântica que apresenta melhor condição de infiltração (valor 5).

Profundidade do nível freático

De acordo com Nishiyama (1998), a profundidade do nível da água pode ser estimada pela constatação da presença de solos hidromórficos e/ou orgânicos, pela presença de elementos aluvionares atuais, contato entre litologias de elevada permeabilidade sobrejacente a uma outra de baixa permeabilidade, presença de litologias de baixa permeabilidade em situação aflorante ou mesmo recobertas por camadas inconsolidadas.

Em face do exposto, foi utilizado o mapa de substrato rochoso e visita a campo, levando em consideração a existências de áreas úmidas; a presença de nascentes, rede de drenagem, formas de relevo e o tipo e profundidade do solo, para definição das classes de profundidade do nível de água, a saber: 0 a 2 metros; 2 a 5 metros; 5 a 10 metros; 10 a 20 metros; maior do que 20 metros, utilizadas neste trabalho, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7. Graus de Vulnerabilidade para o atributo Profundidade do Nível Freático.

Classes de Profundidade (m)	Valor de Vulnerabilidade
≥20	1
10 - <20	2
5 – ≤10	3
2 – ≤5	4
≤2	5

Fonte: Adaptado de Nishiyama (1998).

Caracterização da taxa de infiltração e da característica física do solo

A taxa de infiltração foi determinada in situ pelo método do infiltrômetro de anel, que consiste em dois anéis, sendo o menor com diâmetro de 25 cm e o maior de 50 cm, ambos com 30 cm de altura. Os anéis foram instalados de forma concêntrica, na vertical, e enterrados 15 cm no solo, com auxílio de marreta (Figura 4). A importância do anel externo é evitar que a água do anel interno infiltre lateralmente, para tanto, o nível da água no compartimento externo deve-se manter mais elevado que no compartimento interno, de acordo com Bernardo (1982).

Figura 4. Cravação dos anéis concêntricos.

Colocou-se água, ao mesmo tempo, nos dois anéis, e com uma régua graduada acompanhou-se a infiltração vertical no cilindro interno, com intervalos regulares de tempo de 1 minuto (Figura

5). O estabelecimento deste intervalo se deu pelas características dos solos analisados (solos arenosos), em que o tempo de infiltração da água é rápido. O término de cada ensaio foi estabelecido em função do alcance da chamada taxa de infiltração estável do solo, ou seja, quando a taxa de infiltração, observada no anel interno, tornou-se constante com o tempo (BERTRAND, 1965; BRANDÃO et al., 2006).

Figura 5. Medição do tempo de infiltração da água no solo.

Tabela 8. Localização dos pontos de amostragem dos ensaios de taxa de infiltração na área de estudo.

Ponto	Localização	Coordenadas Geográficas (UTM)	
		E	N
P1	Lagoa Encantada	484802	8383718
P2	Estrada da Lagoa Encantada - I	490738	8380362
P3	Vila Juerana	492063	8378544
P4	Praia de Sambaituba	488502	8380120
P5	Estrada Sambaituba-Uruçuca	486844	8379414
P6	Praia de São Domingos - I	493054	8371320
P7	Praia de Mar e Sol	492643	8378033
P8	Praia do Jóia do Atlântico	493044	8381685
P9	Praia de Barramares	493373	8383608
P10	Praia de Ponta do Ramo	495723	8392054
P11	Praia do Sargi - I	496048	8394822
P12	Estrada da Lagoa Encantada - II	490992	8380165
P13	Praia de São Domingos - II	492966	8373684
P14	Praia de Mamoã	494503	8387704
P15	Praia do Sargi - II	496199	8396930

Foram determinados 15 pontos de amostragem, após a elaboração do mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, nas áreas classificadas como de grau alto. Priorizou-se a seleção de pontos de fácil acessibilidade e próximos à fonte de água, pois este tipo de ensaio em ambiente arenoso (área em que o grau de vulnerabilidade foi classificado como alto) requer muita quantidade de água.

Na Tabela 8 apresenta-se a localização dos pontos de amostragem em coordenadas UTM

(Datum SIRGAS), que foram obtidas durante campanha de campo, com GPSMAP® 60CSx da marca Garmin. A figura 6 ilustra a localização dos pontos.

Também foram coletadas amostras de solo para determinação da granulometria (areia grossa, areia fina, silte e argila) de acordo com a metodologia da Santos et al. (2005), para interpretação das taxas de infiltração.

a)

b)

c)

d)

e)

f)

Figura 6. Pontos de amostragem selecionados na área de estudo: a) P1; b) P2; c) P4; d) P5; e) P6; f) P11.

Resultados e Discussão

Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Freático

A análise da vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático estabeleceu-se a partir do cruzamento dos mapas de vulnerabilidade dos atributos: clima, declividade, solo, uso e ocupação do solo e profundidade do nível freático. A Figura 7 apresenta o Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Freático. As classes de vulnerabilidade encontradas para a área de estudo foram: muito baixa, baixa, média e alta.

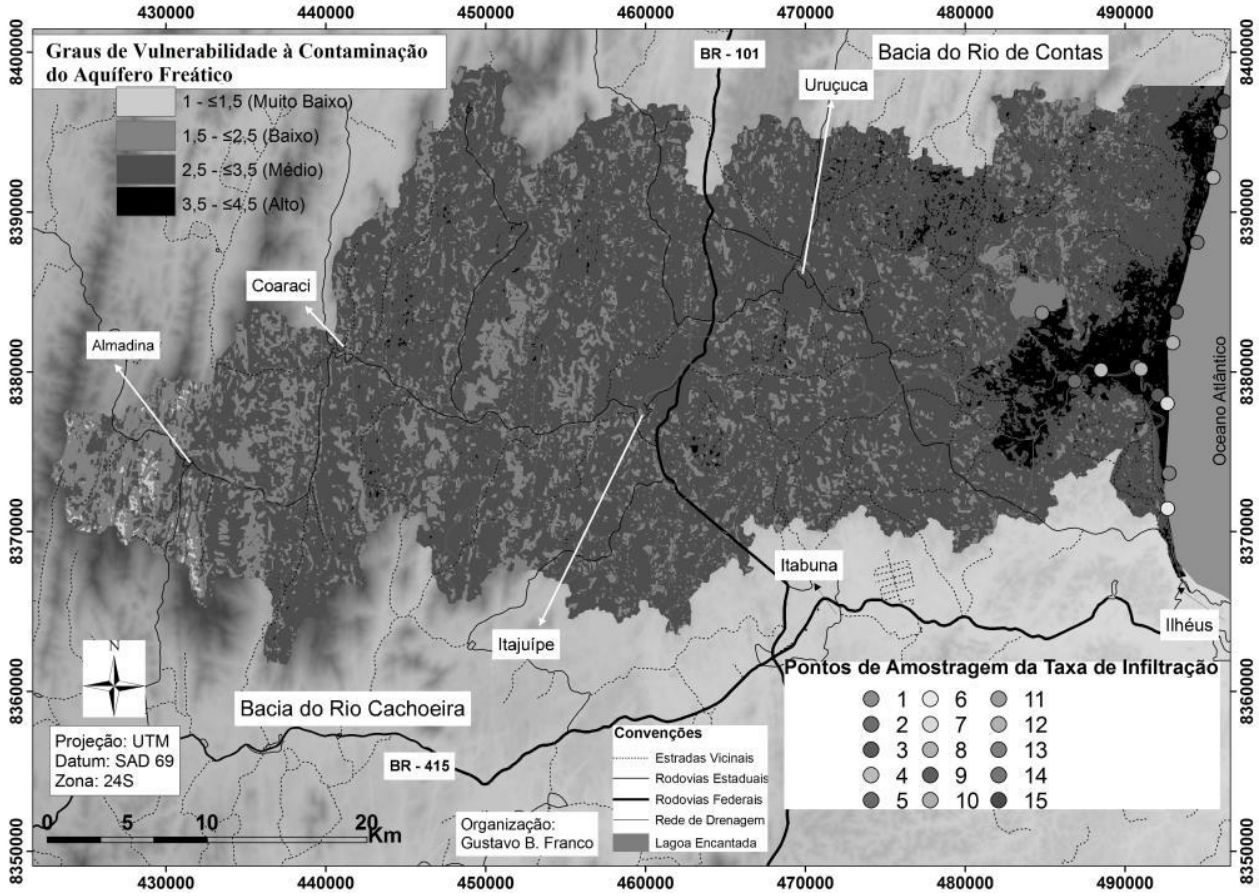

Figura 7. Distribuição dos graus de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático da BHRA e área costeira adjacente, e localização dos pontos de amostragem da taxa de infiltração.

De acordo com a Tabela 9, 18,2% da área de estudo insere-se nas classes de vulnerabilidade à contaminação muito baixa e baixa, o que corresponde a 298,2 km², já a vulnerabilidade à contaminação média abrange 75,7% da área total, o que corresponde a 1239,3 km². Esta classe distribui-se, principalmente, na parte central da área de estudo. O efeito da cobertura vegetal teve uma grande influência na determinação desta classe, uma vez que 62,3% da área de estudo é constituída de Cabruca e Floresta de Mata Atlântica que apresentam melhores condições de infiltração, ou seja, maior vulnerabilidade.

O restante da área, equivalentente a 6,1%, se enquadra na classe de vulnerabilidade à contaminação alta, sendo esta a terceira classe mais representativa, correspondendo a 100,5 Km². Concentra-se na porção leste da área de estudo (região litorânea), associado à bacia sedimentar e aos depósitos quaternários da planície costeira.

Tabela 9. Distribuição espacial em km² das classes de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático e suas respectivas porcentagens.

Graus de Vulnerabilidade à Contaminação	Área (Km²)	Porcentagem (%)
Muito Baixa	4,4	0,3
Baixa	292,8	17,9
Média	1239,3	75,7
Alta	100,5	6,1

A baixa declividade, nível freático raso e os solos arenosos (Espodossolos e Neossolos) foram determinantes para a classificação de vulnerabilidade à contaminação do aquífero

freático como alta, representando a área que tem a melhor conjugação de possibilidades para que a água permaneça e se infiltre no perfil de solo. Destaca-se na zona costeira a presença dos ecossistemas mais sensíveis da região, sujeitos às inundações.

Vale ressaltar que o alto valor percentual (81,8%) correspondente à classe média e alta deve-se, principalmente, ao fato de que:

- 66,8% da área de estudo está localizada em declives menores que 20%, considerados de média a alta vulnerabilidade.
- a vulnerabilidade média a muito alta da profundidade do aquífero freático correspondente a 13,9% da área total.
- 94,5% do uso e ocupação do solo enquadram-se como de média a alta vulnerabilidade.
- os solos de vulnerabilidade média a muito alta que cobrem cerca de 91%.
- o uso e ocupação do solo de média a muito alta vulnerabilidade que representam 94,5% da área.

O atributo clima influenciou na redução do grau de vulnerabilidade, uma vez que foi classificado como de vulnerabilidade baixa, devido à baixa diferenciação entre os índices pluviométricos que definem os três domínios que a área está submetida.

Considerando as informações obtidas a partir espacialização dos dados em SIG (geração do mapa temático) pôde-se averiguar a localização dos graus de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, desta forma tem-se uma ferramenta importante que pode servir de suporte na preservação dos lençóis freático da BHRA e área costeira adjacente, bem como no planejamento do uso e ocupação do solo. Tem importância prática no sentido de buscar os melhores locais para instalação de fontes potenciais de poluição, tais como, aterros sanitários, distritos industriais, postos de combustível, lava a jato, bem como outras atividades que podem contaminar o aquífero freático.

O desenvolvimento deste estudo em ambiente SIG, com base nos atributos selecionados torna-se uma alternativa viável para aplicação em bacias hidrográficas, ou seja, em grandes áreas, por ser de acesso fácil e de obtenção rápida para a definição das áreas de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, em contraposição ao desenvolvimento tradicional de determinação, o qual necessita de uma grande quantidade de pontos de amostragem nos tipos de solo versus usos do solo, para que se obtenha a sua representação espacial. A apresentação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático na forma de mapa temático permite a leitura e entendimento por pessoas de variados níveis e áreas de formação.

Tendo em vista, que grandes áreas, em geral, possuem maior variabilidade de suas características ambientais (ex.: solo e do uso e ocupação), há a necessidade de realização de uma grande quantidade de ensaios de infiltração de maneira a poder compor uma amostra representativa de sua variabilidade. O que se observa é que estudo dessa natureza tem sido realizado apenas em áreas restritas, em especial, destinadas a comparar a taxa de infiltração da água sob usos distintos (ex.: pastagem e mata), justamente em função da necessidade de realização de um número muito elevado de ensaios, o que dificulta consideravelmente a realização em uma pesquisa.

Tal fato é destacado por Brito et al. (2006), cujo autores enfatizam que a maior parte dos estudos que abordam ensaios de infiltração são pontuais, o que necessita uma grande quantidade de pontos analisados para que se obtenha a sua representação espacial. Como procedimento alternativo, nos últimos anos começa a desenvolver estudos que buscam avaliar a distribuição espacial da infiltração com base em atributos ambientais.

Embora as classes dentro dos planos de informação possam responder de forma individual, suas características quanto à capacidade de infiltração está ligada a integração dos elementos da paisagem e se constitui em uma interessante forma de análise na distribuição espacial das condições de infiltração.

Taxa de Infiltração e Características Físicas do Solo

A partir da identificação das áreas de grau de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, realizaram-se ensaios de caracterização física do solo e de infiltração, uma vez que nestas áreas o potencial de vulnerabilidade à contaminação é maior. Destaca-se que na região identificada desenvolvem-se atividades industriais e urbanas e há especulação para construção de um complexo trimodal (porto, aeroporto e ferrovia).

As áreas classificadas com grau de vulnerabilidade alta estão localizadas, principalmente, nas ocorrências de rochas não consolidadas, como os sedimentos terciários e quaternários da região costeira (Figura 8), com

presença de aluvião e nível de água variando de raso a subaflorante. As próprias características do meio ambiente desta área possuem potencial natural à contaminação e, Pereira (2001) e Gomes (2002) relatam que o nível freático nesta área, na sua maioria, tem profundidade inferior à 1 (um) metro.

De acordo com a Tabela 10, os 15 pontos de amostragem possuem textura arenosa com elevados teores de areia (fina + grossa) - acima de 90% da composição granulométrica.

Figura 8. Ambiente de depósito arenoso – Praia de São Domingo, Ilhéus.

Tabela 10. Taxa de infiltração e características físicas do solo.

Pontos	Taxa de Infiltração (cm/s)	Areia Grossa (g/kg)	Areia Fina (g/kg)	Silte (g/kg)	Argila (g/kg)	Textura
1	0,00017	893	27	14	66	arenosa
2	0,00017	906	75	5	14	arenosa
3	0,00011	628	340	2	30	arenosa
4	0,00016	944	26	2	28	arenosa
5	0,00017	741	168	37	54	arenosa
6	0,00005	525	444	7	24	arenosa
7	0,00033	571	413	0	16	arenosa
8	0,00042	700	278	0	22	arenosa
9	0,00033	710	269	3	18	arenosa
10	0,00033	576	400	4	20	arenosa
11	0,00033	530	447	3	20	arenosa
12	0,00075	907	69	2	22	arenosa
13	0,00033	672	305	1	22	arenosa
14	0,00025	659	325	0	16	arenosa
15	0,00033	576	400	2	22	arenosa

A taxa de infiltração variou entre 0,00005 (ponto 6) e 0,00075 cm/s (ponto 12), com valor médio de 0,00028 cm/s. De acordo com Terzaghi et al. (1996), os solos analisados são enquadrados como de textura areia grossa (Tabela 11) e de alta permeabilidade (Tabela 12).

Tabela 11. Valores típicos de taxa de infiltração de solos.

Textura do Solo	Valor da Taxa de Infiltração (cm/s)
Cascalho	$\geq 10^{-2}$
Areia Grossa	10^{-2} a $\leq 10^{-5}$
Areia Fina	10^{-5} a $\leq 10^{-6}$

Silte	10^{-6} a $\leq 10^{-8}$
Argila	$< 10^{-8}$

Fonte: Adaptado de Terzaghi et al. (1996).

Brandão et al. (2006) relatam que os solos de textura arenosa (Figura 9) possuem, em geral, maior quantidade de macroporos do que os de textura fina (argilosa), apresentando maior taxa de infiltração. Tal fato corrobora os resultados do mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, uma vez que os valores de infiltração mostraram-se elevados nas áreas classificadas como de alta vulnerabilidade, conforme determinado em ambiente de SIG, como descrito por Brandão et al. (2006) e Lepsch (2011).

Tabela 12. Classificação dos solos quanto à taxa de infiltração.

Grau de Permeabilidade	Valor da Taxa de Infiltração (cm/s)
Muito Alto	$\geq 10^{-3}$
Alto	10^{-3} a $\leq 10^{-5}$
Médio	10^{-5} a $\leq 10^{-7}$
Baixo	10^{-7} a $\leq 10^{-9}$
Muito Baixo	$< 10^{-9}$

Fonte: Adaptado de Terzaghi at al. (1996).

a) b)

Figura 9. Posição dos solos de textura arenosa na margem do rio Almada (a) e perfil de solo arenoso - Espodossolo Ferrihumilúvico (b).

Lepsch (2011) descreve que solos arenosos possuem características extremamente negativas do ponto de vista da vulnerabilidade à contaminação, ou seja, alta capacidade de infiltração da água (estrutura em grãos e macroporosidade) e a pouca disponibilidade de cargas devido à carências de argila e matéria orgânica. Neste tipo de solo há uma baixa capacidade de retenção de água e de adsorção em seus colóides das substâncias poluentes. Assim, todo o fluido infiltrante pode sofrer lixiviação rapidamente e atingir o nível freático (que por sua vez é raso na maioria dos solos arenosos da zona costeira), causando contaminação da água e das áreas adjacentes.

Conclusões

Os resultados apontaram que as áreas com maior vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático situam-se, principalmente, na região costeira, relacionados aos solos arenosos, baixa declividade e nível freático raso.

Os resultados dos ensaios de infiltração mostraram elevados valores de taxa de infiltração, entre 0,00005 (ponto 6) e 0,00075 cm/s (ponto 12), caracterizados como de alta permeabilidade.

Os resultados permitem caracterizar a área costeira da bacia do rio Almada como de elevada vulnerabilidade à contaminação do aquífero freático, devendo a ocupação da mesma ser precedida por procedimentos que evitem à contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos por agrotóxicos, adubos, fertilizantes, efluentes industriais etc., que geram compostos nocivos ao meio ambiente.

Sugere-se que o desenvolvimento de atividades com potencial de contaminação deve ser evitado ou criteriosamente planejado nestas áreas de ambiente de solo arenoso.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro (Processo nº 576937/2008-8) e concessão da bolsa de pós-doutorado júnior (Processo nº 510271/2010-3) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e ao Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), pela logística laboratorial e de campo.

Referências

Arcanjo J.B.A., Oliveira J.E., Gomes R.A.A.D., Meneses N.R.F., Teixeira L.R., Souza J.D., Padilha A.V., Delgado I.M., Santos R.A., Melo R.C., Fernandes P.C.A. 1997. Programa del Levantamentos geológicos básicos do Brasil, Itabuna, Folha SD-24-Y-B-VI. Brasília, CPRM 1, 276 p.

Barbosa J.S.F. & Dominguez J.M.L. (eds.) 1996. Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. Salvador, SICM/SGM, 400 p.

Bernardo S. 1982. Manual de irrigação. Viçosa, Imprensa Universitária, 463 p.

Bertrand A.R. 1965. Rate of water intake in the field. In: Black C.A. (Ed.). Methods of soil analysis. American Society of Agronomy 197-209.

Brandão V.S., Cecílio R.A., Pruski, F.F., Silva, D.D. 2006. Infiltração da água no solo. Viçosa, Editoria UFV, 120p.

Brito M.G., Costa C.N., Almeida J.A., Vendas D., Verdial P.H. 2006. Characterization of maximum infiltration using GIS tools. Engineering Geology 85, 14-18.

Crepani E., Medeiros J.S., Palmeira A.F. 2004. Intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo. São José dos Campos, INPE, 92 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, Embrapa, 306 p.

Franco G.B. 2010. Fragilidade ambiental e qualidade da água na Bacia do Rio Almada – Bahia. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 345 p.

Gomes F.H. 2002. Caracterização de solos de manguezais e de restinga no município de Ilhéus-Bahia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 96 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 1965a. Carta Topográfica – Folha SD-24-YB-VI, Itabuna - 2143. Projeto Carta Geral do Brasil, Rio de Janeiro.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 1965b. Carta Topográfica – Folha SD-24-YB-VI - Ibicaraí - 2142. Projeto Carta Geral do Brasil, Rio de Janeiro.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 1965c. Carta Topográfica – Folha SD-24-YB-III - Ubaitaba - 2099. Projeto Carta Geral do Brasil, Rio de Janeiro.

Lepsch I.F. 2011. 19 lições de pedologia. São Paulo, Oficina de Textos, 456p.

Maciel Netto A., Antonino A.C.D., Audry P., Carneiro C.J.G., Dall´Olio A. 2000. Condutividade hidráulica não saturada de um podzólico. amarelo da zona da mata norte de

Pernambuco. Pesquisa Agropecuária Brasileira 35, 1221-1228.

Nishiyama L. 1998. Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análises e avaliações ambientais do meio físico, em escala 1/100.000, aplicados ao município de Uberlândia – MG. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 363.

Pereira A.D.C. 2001. Lagoa Encantada - testemunho de uma Baía Quaternária Ilhéus-Bahia-Brasil. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Universidade do Minho, Portugal, 291p.

Roeder M. 1975. Reconhecimento climatológico. Diagnóstico socioeconômico da região Cacaueira. Rio de Janeiro, IICA/CEPLAC, 89 p.

Santos R.D., Lemos R.C., Santos H.G., Ker J.C., Anjos L.H.C. 2005. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Viçosa, SBCS, 92 p.

Secretaria de Recursos Hídricos - SRH. 1996. Plano diretor de recursos hídricos – Bacias do Leste. Vol. II. SRH, Salvador, 120p.

Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. 1996. Soil mechanics in engineering practice. New York, John Willy e Sons, 512p.

Valeriano M.D. Projeto Topodata. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, 2009.

Zuquette L.V. & Gandolfi N. 2004. Cartografia geotécnica. São Paulo, Oficina de Textos, 190p.