

# Modelos de vulnerabilidade hidrológica para a bacia hidrográfica do rio Cachoeira (Bahia) utilizando sistemas de informações geográficas

Till Harum<sup>1</sup>  
Pierpaolo Saccon<sup>2</sup>  
Neylor Alves Calasans Rego<sup>3</sup>  
Francisco Carlos Fernandes de Paula<sup>4</sup>  
José Wildes Barbosa dos Santos<sup>5</sup>

## Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de 2 modelos capazes de mapear zonas hidrológicamente vulneráveis a poluição da bacia hidrográfica do rio Cachoeira.

Através da utilização de diversas técnicas de SIG foi possível processar e combinar aspectos físicos e fatores antropogênicos que caracterizam a bacia e que influenciam na vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos quanto à poluição. Os modelos de vulnerabilidade utilizam as seguintes variáveis: cobertura do solo, declividade, solos (condutividade hidráulica), malha hídrica e distribuição urbana. O Modelo 1 (vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais) identificou áreas de muito alta vulnerabilidade localizadas nos centros enquanto o Modelo 2 (vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos) identificou áreas com elevados valores de infiltração combinados com o uso do solo com pastagens como de alta vulnerabilidade.

Palavras-chave: Modelos, SIG, vulnerabilidade hidrológica

## Abstract

HYDROLOGIC VULNERABILITY MODELS FOR THE CACHOEIRA RIVER WATERSHED – BAHIA, BRAZIL – USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS. This work presents the development of two models able to map hydrological zones vulnerable to pollution in the Cachoeira river watershed. Through the use of several GIS techniques it was possible to process and combine physical aspects and anthropogenic factors that characterize the basin and that influence the superficial and underground water resources with respect to pollution. The vulnerability models used the following variables: soil cover, steepness, soils (hydraulic conductivity), hydrological network and urban distribution. The Model 1 (vulnerability of the superficial water resources) identified areas of very high vulnerability located in the urban centers while Model 2 (vulnerability of the underground water resources) identified areas with high infiltration values combined with the the soil with pastures as of high vulnerability.

Key-words: Models, GIS, hydrological vulnerability

## Introdução

A vulnerabilidade dos recursos hídricos se refere tanto às águas superficiais como subterrâneas e inclui aspectos de qualidade de água, poluição, abastecimento e recarga de aquíferos.

O conceito de vulnerabilidade denota ainda incertezas no contexto da poluição das águas superficiais e subterrâneas. Frequentemente, o termo “vulnerabilidade à poluição” é usado com um sentido composto que, talvez, pudesse melhor ser descrito como “risco à poluição”.

Segundo Vrba & Zaporozec (2004), a vulnerabilidade intrínseca não considera as características e comportamento

dos contaminantes, enquanto a vulnerabilidade específica se refere a um determinado contaminante ou classe de contaminantes.

No presente trabalho, o termo “vulnerabilidade hidrológica” significa a maior ou menor susceptibilidade de um recurso hídrico ser afetado por uma carga poluente imposta, dependendo somente de características do meio físico, independente da existência de cargas poluidoras.

Em 2004, o Departamento de Saúde Pública e Meio Ambiente do Estado do Colorado (USA) através da EnecoTech Inc. desenvolveu uma metodologia para

1,2 Joanneum Research, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, Elisabethstrasse 16/II, A – 8010, Graz – Áustria, till.harum@joanneum.at

3,4 Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Rod. Ilhéus-Itabuna, km 16. Ilhéus – BA, CEP 45650-000, neylor@ues.br, depaula@uesc.br;

5 Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, Programa Regional de Pós- Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente(PRODEMA-UESC), Rod. Ilhéus-Itabuna, km 16. Ilhéus – BA, CEP 45650-000, wildesbarbosa@pop.com.br

avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais utilizando os indicadores de área, precipitação, infiltração, tipo de cobertura vegetal e integridade do corpo hídrico de forma a delinear áreas tampão dos corpos hídricos visando minimizar o impacto de cargas poluentes.

Beekman et al. (2003) avaliando a vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais devido a mudanças ambientais na África do Sul utilizou parâmetros fisiográficos (clima, ecossistemas, hidrologia e hidrogeologia), socioeconômicos (demografia e economia) e de manejo (legislação e institucionalidade) na montagem do modelo, sendo atribuído valores a cada indicador e pesos a cada um dos parâmetros para o mapeamento da vulnerabilidade que foi avaliada para diferentes cenários.

Joni (1998) utilizou a seguinte fórmula para o cálculo da vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais em Louisiana (USA):

$$\text{Vulnerabilidade} = (\text{SI} * 0.1) + (\text{NFFD} * 0.4) + (\text{AFFD} * 0.25) + (\text{AFGT} * 0.25)$$

Onde:

SI = Integridade estrutural;

NFFD = Fatores naturais;

AFFD = Fatores antropogênicos;

AFGT = Fatores antropogênicos derivados de visitas de campo.

Os Fatores Naturais foram divididos em comprimento dos cursos d'água (30%) e escoamento superficial (70%). Neste parâmetro foram consideradas a precipitação (25%), a declividade (25%), a cobertura do solo (25%) e a permeabilidade do solo (25%). Para cada indicador foram atribuídos valores de 1 a 10 de acordo com seu efeito negativo na vulnerabilidade. Dentre os Fatores Antropogênicos, foram considerados o comprimento das estradas, das estradas de ferro e tubulações, densidade de fossas sépticas e poços de óleo e gás. Os Fatores Antropogênicos derivados de visitas de campo envolveram a avaliação do risco de poluição de fontes pontuais e a distância dos cursos de água.

De acordo com Voigt et al. (2004) os métodos correntes de mapeamento da vulnerabilidade de águas subterrâneas foram revisados por diversos autores e classificados em 5 grupos, sendo que os métodos paramétricos foram identificados como sendo os mais utilizados atualmente, tais como o DRASTIC (Aller et al., 1987) e o GOD (Foster, 1987).

O modelo DRASTIC (Aller et al., 1987) tem sido amplamente utilizado em vários países devido a facilidade de obtenção dos dados de entrada requeridos. O modelo é baseado em 7 fatores que correspondem a 7 diferentes mapas de cobertura da área a ser estudada e que são: a profundidade do lençol freático (peso 5), características de recarga (peso 4), características do aquífero (peso 3), características do solo (peso 2), topografia (peso 1),

características zona de água capilar (peso 5) e condutividade hidráulica (peso 3). Cada um desses fatores é mapeado e classificado em diferentes escalas de acordo com o seu potencial de poluição, sendo então atribuídos valores que variam de 1 a 10. A vulnerabilidade é calculada como sendo a média ponderada desses fatores.

Lobo Ferreira & Oliveira (2004), estudando a vulnerabilidade de um sistema de aquíferos em Portugal, compararam os resultados obtidos pela utilização de seis modelos paramétricos de vulnerabilidade (GOD, DRASTIC, AVI, EPPNA e SINTACS), e concluíram que os resultados dos modelos DRASTIC, EPPNA e SINTACS foram bastante similares, seguidos pelo modelo GOD e finalmente pelo modelo AVI.

Thapinta et al. (2002) utilizou o SIG para avaliar a vulnerabilidade de águas subterrâneas à poluição por pesticidas em uma área localizada no centro da Tailândia. Os fatores utilizados na avaliação da vulnerabilidade foram: textura do solo, declividade, uso do solo, profundidade dos poços e precipitação. Esses fatores foram reclassificados a uma escala comum e uma média ponderada foi calculada de forma a acessar a vulnerabilidade. Os pesos dados aos diversos fatores levaram em consideração a concentração de pesticidas em 90 poços localizados na área de estudo. A profundidade dos poços foi o fator mais significativo no estudo. Diversos mapas de vulnerabilidade da água subterrânea foram elaborados para diferentes pesticidas sendo que as áreas exploradas pela agricultura com poços rasos foram as que apresentaram os maiores valores de vulnerabilidade.

A identificação de áreas hidrologicamente vulneráveis à poluição é de grande importância para mitigação de riscos, desenvolvimento de políticas públicas, planos de manejo e programas educacionais que visem a proteção dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica.

## Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Cachoeira (BHRC) encontra-se situada no sul da Bahia, entre as coordenadas 14° 42' / 15° 20' S e 39° 01' / 40° 09' WGr. Apresenta área de drenagem de 4334,46 km<sup>2</sup>, abrangendo doze municípios: Firmino Alves, Floresta Azul, Jussari, Itajú do Colônia, Ibicaraí, Itapé, Itabuna, Ilhéus, Lomanto Júnior, Santa Cruz da Vitória, Itororó e Itapetinga. A população total da BHRC é de aproximadamente 600.000 habitantes. Está limitada ao norte pelas bacias dos rios de Contas e Almada; ao sul, pelas bacias dos rios Pardo e Una; a oeste, pela bacia do rio Pardo; e a leste pelo oceano Atlântico. Pertence à Região Administrativa da Água RAA – XI : Bacias do Leste (Figura 1).

Essa bacia origina-se nas nascentes do rio Colônia, numa altitude de 800 m, na Serra da Ouricana (município

de Itororó) e atinge o seu patamar mais baixo na superfície litorânea do município de Ilhéus. O rio Colônia, após estender-se por 100 km, banhando os municípios de Itororó, Itapetinga e Itajú do Colônia, tem sua confluência com o rio Salgado no município de Itapé, passando então a receber o nome de rio Cachoeira. O rio Salgado tem sua nascente no município de Firmino Alves e possui um curso de 64 km cruzando os municípios de Santa Cruz da Vitória, Floresta Azul, Ibicaraí e Itapé. O rio Cachoeira, após percorrer 50 km nos municípios de Itapé, Itabuna e Ilhéus, tem a sua foz no local conhecido como Coroa Grande (município de Ilhéus) onde confunde as suas águas com as dos rios Santana e Fundão (Figura 2).

A bacia do rio Cachoeira desempenha papel importante nessa região, pois engloba duas importantes cidades do sul da Bahia, Ilhéus e Itabuna. Tem em seus meios físicos, bióticos e antrópicos repercussão em toda a região e no Estado através de capacidades instaladas e potenciais, na agropecuária, indústria, turismo, comércio, entre outras.

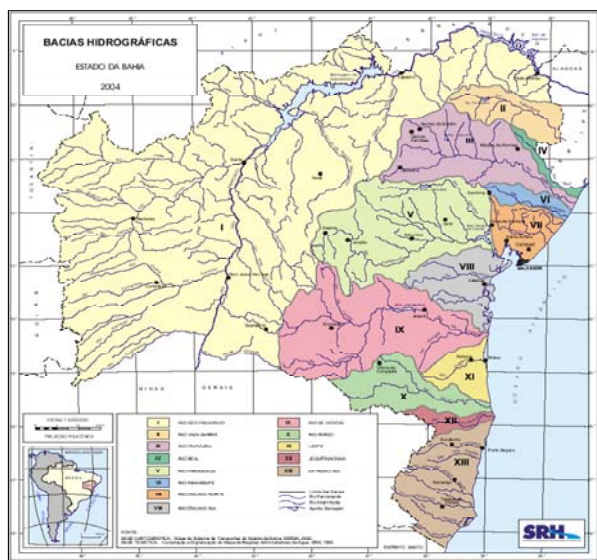


Figura 1. Bacias hidrográficas da Bahia. Fonte: SRH – 2004.

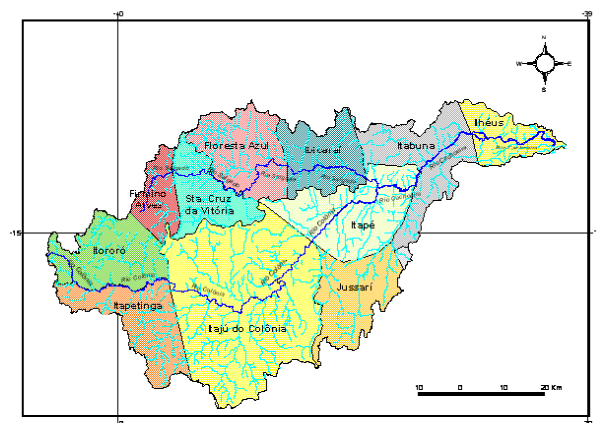


Figura 2. Bacia hidrográfica do rio Cachoeira. Fonte: Banco de Dados NBH.

## Material e métodos

Para a determinação dos modelos de vulnerabilidade foram utilizadas as variáveis: cobertura do solo, declividade, solos, malha hídrica e distribuição urbana. Os mapas de declividade, solos e malha hídrica foram elaborados no sistema ARCVIEW no âmbito do Programa de Recuperação das Bacias Hidrográficas dos Rios Cachoeira e Almada em 2001.

Foram desenvolvidos dois modelos: vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais (Modelo 1) e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos (Modelo 2).

A análise da declividade foi feita através do processamento do DTM (modelo digital de elevação do terreno) baseado numa grade de 50X50 m; Os tipos de solos da bacia do rio Cachoeira foram classificados em nove unidades, sendo que os valores de condutividade hidráulica (K) encontram-se entre  $2,2 \times 10^{-8}$  e  $5,7 \times 10^{-7}$  m/s (BAHIA, 2001); Foram definidas três zonas de exposição ao longo dos rios. Primeiramente toda a malha hídrica da bacia hidrográfica foi dividida em dois grupos: o primeiro inclui os rios principais (Cachoeira, Salgado e Colônia) e o segundo compreendendo todos os outros rios restantes. Através da aplicação da função “buffer” no SIG, foram definidas três zonas com distâncias de 200, 400 e 800 m a partir do centro dos rios do primeiro grupo. Para os rios enquadrados no segundo grupo foram estabelecidas as distâncias de 100, 200 e 300 m. O mapa de cobertura do solo foi elaborado no JOANNEUM RESEARCH INSTITUTE no âmbito do Projeto ECOMAN utilizando-se imagem do satélite Landsat 7 de 2001. A variável distribuição urbana foi a última a ser inserida no modelo e foi definida como a união de áreas antropizadas e áreas urbanas do mapa do uso do solo. Devido ao fato de ser a variável com o potencial mais elevado no que se refere à vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais quanto a poluição, foi a que recebeu o maior peso no modelo. Entretanto, essas áreas não são completamente pavimentadas e impermeáveis, sendo que nesse sentido a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas torna-se muita elevada.

Através do estabelecimento de valores que variaram de 1 a 10 referentes aos impactos das variáveis na vulnerabilidade dos recursos hídricos, foi possível o mapeamento de zonas hidrologicamente vulneráveis da bacia hidrográfica do rio Cachoeira.

## Resultados e discussão

Em relação à cobertura do solo, através do uso de uma classificação não-supervisionada foi possível reconhecer e separar os tipos representativos de cobertura do solo que caracterizavam a bacia. A classificação da imagem foi desenvolvida no sentido de separar os tipos de cobertura do

solo que apresentaram maiores impactos na vulnerabilidade dos recursos hídricos quanto à poluição. Os valores diferenciados associados às classes identificadas podem ser observados no Quadro 1, de acordo com o grau de impacto causado a vulnerabilidade e considerando que o impacto relativo desta variável é o mesmo tanto no que refere a vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais quanto à vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Quadro 1 – Cobertura do solo e valores associados aos Modelos 1 e 2

Valores	
Cobertura do Solo	Modelos 1 e 2
Floresta	1
Pastagem com Árvores Esparsas	4
Pastagem	6
Estradas	8
Áreas Urbanas	10

A Figura 3 mostra o mapa de cobertura do solo com os respectivos valores para os Modelos 1 e 2.

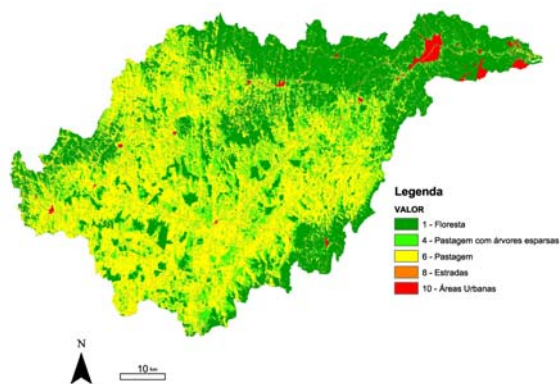


Figura 3. Mapa de cobertura do solo.

Em relação à declividade os valores associados as diferentes classes referentes ao impacto desta variável nos Modelos de vulnerabilidade são mostrados na Tabela 2, considerando que áreas com declives mais acentuados favorecem o escoamento superficial aumentando a vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais e que em áreas mais planas a acumulação de água favorece a infiltração e contaminação da água subterrânea. As Figuras 4 e 5 mostram os mapas de declividades com os valores estabelecidos para os Modelos 1 e 2 respectivamente.

Tabela 2 – Declividade do terreno e pesos associados aos Modelos 1 e 2.

Valores		
Declividade (graus)	Modelo 1	Modelo 2
$\leq 1$	1	10
$> 1 \text{ e } \leq 2$	3	8
$> 2 \text{ e } \leq 5$	6	6
$> 5 \text{ e } \leq 10$	8	3
$> 10$	10	1

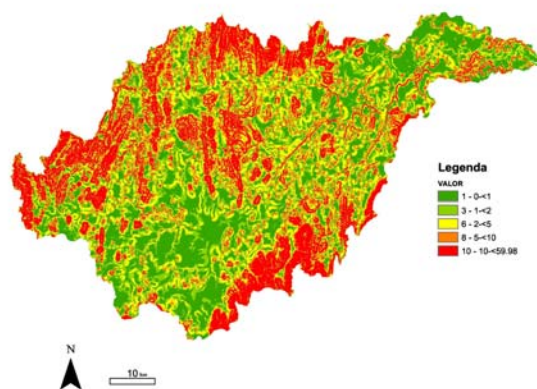


Figura 4 – Mapa de declividade – Modelo 1.

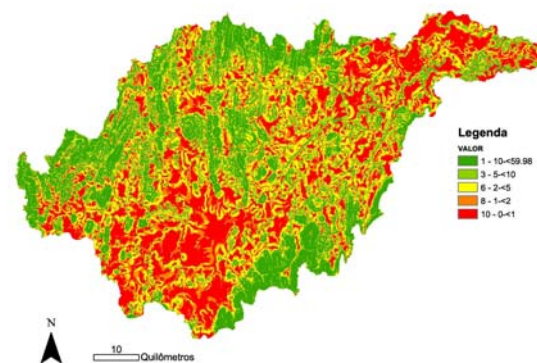


Figura 5– Mapa de declividade – Modelo 2.

Os tipos de solos da bacia do rio Cachoeira foram classificados em nove unidades, sendo que os valores de condutividade hidráulica ( $K$ ) encontram-se entre  $2,2 \times 10^{-8}$  e  $5,7 \times 10^{-7}$  m/s (BAHIA, 2001). Os valores de  $K$  foram agrupados em 3 classes e posteriormente associados os respectivos índices, considerando que maiores valores de  $K$  significam maiores taxas de infiltração e conseqüentemente menor vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais a poluição favorecendo, entretanto maiores impactos nas águas subterrâneas.

A Tabela 3 mostra os valores atribuídos à condutividade hidráulica dos solos para os Modelos 1 e 2 e as Figuras 6 e 7 o mapeamento referente aos dois modelos.

Tabela 3 – Condutividade hidráulica e pesos associados aos Modelos 1 e 2.

Valores		
Condutividade Hidráulica (m/s)	Modelo 1	Modelo 2
2,8 a $5,7 \times 10^{-7}$	1	6
$6,4 \times 10^{-8}$	5	5
2,2 a $2,5 \times 10^{-8}$	6	1



Figura 6. Mapa da condutividade hidráulica – Modelo 1.

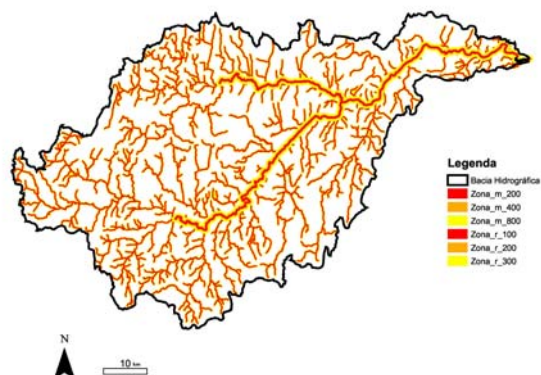


Figura 8 – Zoneamento do sistema hídrico superficial.

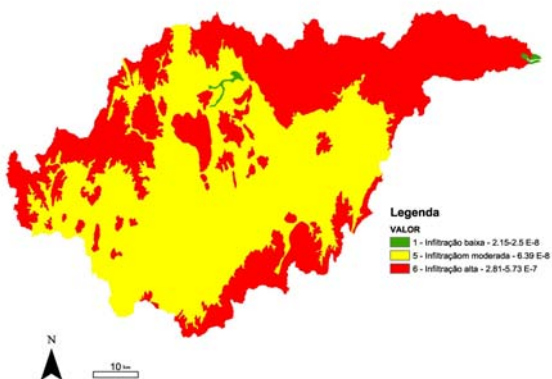


Figura 7. Mapa da condutividade hidráulica – Modelo 2.

Em relação à malha hídrica a menor distância do centro dos rios está associada a uma maior vulnerabilidade para os dois grupos pré-estabelecidos em ambos os modelos, conforme Tabela 4 e Figura 8.

Tabela 4 – Valores atribuídos às áreas próximas aos rios.

Rios	Distância do Centro (m)	Valor
Grupo 1	200	4
	400	3
	800	2
Grupo 2	100	4
	200	3
	300	2

A distribuição urbana foi definida como a união de áreas antropizadas e áreas urbanas do mapa do uso do solo. Devido ao fato de ser a variável com o potencial mais elevado no que se refere à vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais quanto à poluição, foi a que recebeu o maior valor (10). Como essas áreas não são completamente pavimentadas e impermeáveis, a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas também é muito elevada. Os pesos atribuídos a essa variável no Modelo 2 são os mesmos adotados no Modelo 1. A Figura 9 mostra a distribuição urbana na bacia do rio Cachoeira.

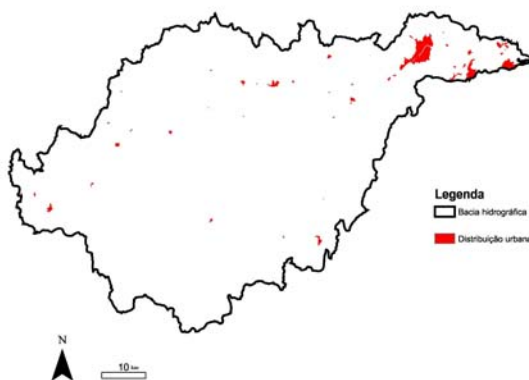


Figura 9 – Distribuição urbana.

**Avaliação da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Superficiais - Modelo 1:** A vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais à poluição foi calculada através da média aritmética dos valores atribuídos as variáveis descritas anteriormente. A Figura 10 ilustra o procedimento adotado.

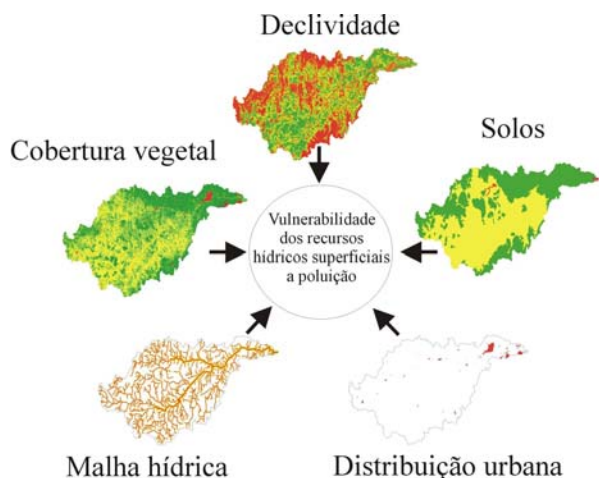


Figura 10. Montagem do modelo de vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais.

Uma primeira avaliação da vulnerabilidade foi desenvolvida através da adição das seguintes variáveis: uso do solo, declividade, tipo de solo e distribuição urbana. O mapa resultante foi reclassificado de forma a reduzir as 21 classes geradas a 5 níveis de vulnerabilidade. A avaliação final contemplou a incorporação no modelo das diferentes zonas da malha hídrica.

#### Recursos Hídricos Subterrâneos – Modelo 2:

A vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos à poluição foi calculada através da média aritmética dos valores das declividades, da cobertura vegetal, dos tipos de solos e da distribuição urbana. A Figura 11 ilustra o procedimento adotado.

O mapa resultante foi reclassificado de forma a reduzir as 23 classes geradas a 5 níveis de vulnerabilidade.

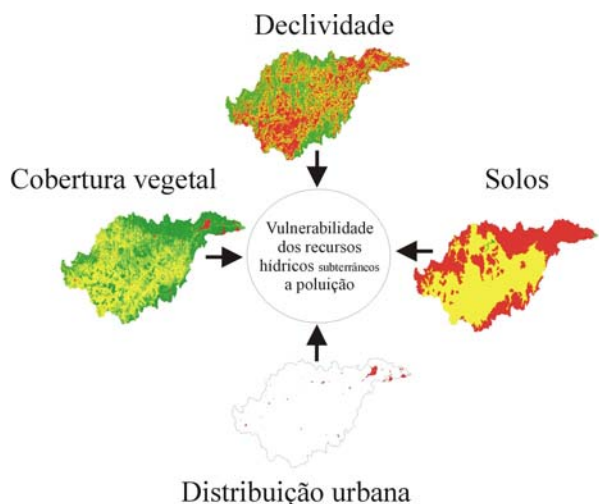


Figura 11. Montagem do modelo de vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

O mapa resultante do Modelo 1 é mostrado na Figura 12 onde somente aproximadamente 1% da área da bacia foi classificada como de muito alta vulnerabilidade localizadas nos centros urbanos. As áreas de alta vulnerabilidade representam aproximadamente 25% e são localizadas próximas aos cursos d'água. As áreas de florestas foram classificadas como sendo de baixa vulnerabilidade e representam 11% da área.

Modelo 1

Classes	Vulnerabilidade	Área (km2)	% da Área
1	Muito Baixa	497,3175	11,47
2	Baixa	1649,0725	38,05
3	Média	1039,4825	23,98
4	Alta	1100,7375	25,40
5	Muito Alta	47,85	1,10
TOTAL		4334,46	100



Figura 12. Mapa de vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais.

O mapa resultante do Modelo 2 (Figura 13) mostra que as regiões com maior declividade foram as que apresentaram mais baixa vulnerabilidade (aproximadamente 18%). Alta vulnerabilidade foi apresentada em áreas com altos valores de infiltração combinados com o uso do solo sendo em pastagens e representou aproximadamente 35% da área.

Modelo 2

Classes	Vulnerabilidade	Área (km2)	% da Área
1	Muito Baixa	804,275	18,56
2	Baixa	1021,0425	23,56
3	Média	1353,51	31,23
4	Alta	1107,7825	35,56
5	Muito Alta	47,85	1,10
TOTAL		4334,46	100

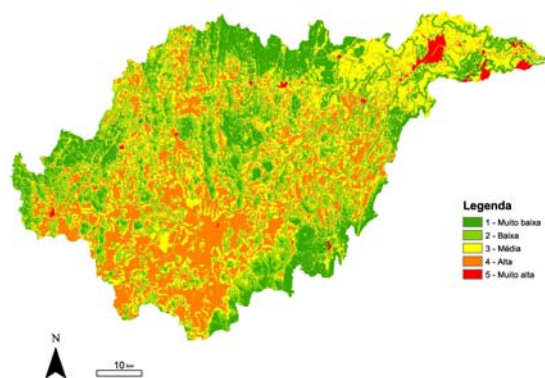


Figura 13. Mapa de vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos

## Referências

- ALLER, L., BENNET, T., LEHER, J.H., PETTY, R.J. & HACKETT, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA 600/2-87-035, 622 pp.
- BAHIA, GOVERNO DO ESTADO. 2001. Superintendência de Recursos Hídricos - Universidade Estadual de Santa Cruz. Caracterização do Meio Físico. Programa de Recuperação das Bacias dos Rios Cachoeira e Almada. Ilhéus: Volume I, Tomo I, 76 pp.
- BEEKMAN, H.E., SAAYMAN, I. & HUGHES, S. 2003. Vulnerability of Water Resources to Environmental Change in Southern Africa. Stellenbosch, South Africa: A report for the Pan African START Secretariat and UNEP.
- ENECOTECH INC. 2004. Source water assessment methodology, for Surface Water Sources and Ground Water Sources Under the Direct Influence of Surface Water.
- [www.cdph.state.co.us/wq/sw/pdfs/SW\\_SWAP%20Assessment%20Methodology\\_v6.pdf](http://www.cdph.state.co.us/wq/sw/pdfs/SW_SWAP%20Assessment%20Methodology_v6.pdf). Data de acesso: 27/05/2006
- FOSTER, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: W. van Duijvanbooden and H.G. van Waegeningh (eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, Delft, The Netherlands: TNO Committee on Hydrological Research.
- JONI, D. 1998. Surface water potential susceptibility analysis risk ranking matrix final susceptibility analysis. Disponível: [www.dep.state.lo.us/evaluation/apps.pdf](http://www.dep.state.lo.us/evaluation/apps.pdf). Data de acesso: 25/05/2006
- LOBO FERREIRA, J.P. & OLIVEIRA, M.M. 2004. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica Internacional* 43(4): 541-550.
- THAPINTA, A. & HUDAK, P.F. 2003. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. *Environment International*. 29(1): 87-93.
- VOIGT, H.J., HEINKELE T., JAHNKE, C. & WOLTEN, R. 2004. Characterization of groundwater vulnerability to fulfill requirements of the water framework directive of the European Union. *Geofísica Internacional* 43(4): 567-574.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. (eds). 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability.
- Heise, Hannover: International Association of Hydrogeologists.