

Simulação da movimentação de agrotóxicos no solo com o uso de geotecnologias, como instrumento para avaliação do potencial de risco de contaminação de águas subterrâneas na Amazônia Oriental

Lilianne Maia Lima¹
Orlando dos Santos Watrin²
Maria Conceição Young Pessoa³
Anderson Soares Pereira³
Danielle do Socorro Nunes Campinas¹
Ricardo de Oliveira Figueiredo²
Francisco Ribeiro da Costa⁴

¹Bolsista CT-HIDRO - CNPq/ Embrapa Amazônia Oriental - EMBRAPA/ CPATU
Caixa Postal 48 - 66095-100 - Belém - PA, Brasil
lilianne@cpatu.embrapa.br; daniellecampinas@yahoo.com.br

²Embrapa Amazônia Oriental - EMBRAPA/ CPATU
Caixa Postal 48 - 66095-100 - Belém - PA, Brasil
{watrin, ricardo}@cpatu.embrapa.br

³Embrapa Meio Ambiente - EMBRAPA/ CNPMA
Caixa Postal 69 - 13820-000 - Jaguariúna - SP, Brasil
{young, anderson}@cnpma.embrapa.br

⁴Universidade Federal do Pará - UFPA/ LAIT
Caixa Postal 479 - 66075-110 - Belém - PA, Brasil
frc@ufpa.br

Abstract. Pesticides use represents a great environmental risk with high economic cost. The objective of this study is to investigate groundwater contamination risk in a small watershed in northeastern Pará State, Brazil, coupling remote sensing, GIS techniques, and simulations. We have confirmed a high risk exposure to contamination by Dimethoate in 67.76 ha, which represents 1.67% of the total watershed area. According to these analyses, Dimethoate has the potential to reach 12.96 m depth in the soil. The groundwater in the study area has a high risk of exposure to contamination by this pesticide, as the water table depth ranges from 1.5 to 13.0 meters. The shallow water table together with soil and geological characteristics increases the potential risk of contamination of groundwater.

Palavras-chave: hydrological simulation, hydric resources, watershed, simulação hidrológica, recursos hídricos, microbacia hidrográfica.

1. Introdução

A microrregião Bragantina, localizada no nordeste do Estado do Pará, constitui uma das mais antigas áreas de colonização da Amazônia, processo este que se desenvolveu com maior intensidade com a construção da estrada de ferro Belém-Bragança, no final do século XIX. A paisagem é dominada por áreas de vegetação secundária resultantes da agricultura tradicional, praticada com relativa intensidade e com observância de períodos de pousio relativamente curtos (Watrin *et al.*, 1998). Nesse contexto, o cenário da agricultura familiar no Nordeste Paraense, além das lavouras de subsistência e das áreas de pastagem, tem como variante importante o desenvolvimento de cultivos semi-perenes industriais, notadamente maracujá e pimenta-do-reino, com aplicação de agrotóxicos (Kanashiro e Denich, 1998).

A utilização de agrotóxicos representa um risco ambiental de grande magnitude e com elevados custos econômicos. Segundo Nemeth-Konda *et al.*, (2002), além de contaminar o ar,

o solo, as águas superficiais e subterrâneas, causam problemas à saúde do homem, seja através da exposição direta (manuseio dos produtos) ou exposição indireta (resíduos em alimentos e água). Dessa forma, tais fatos comprometem o uso múltiplo das águas pelas comunidades humanas da região afetada.

Modelos matemáticos e simulação do movimento de agrotóxicos são ferramentas utilizadas para avaliar o risco de contaminação dos solos e dos recursos hídricos em microbacias hidrográficas. A partir destas ferramentas, considerando aspectos de solo, cultura e clima, seria possível especificar os tipos de agrotóxicos que poderiam ser usados nas lavouras, inclusive estimar a taxa e o momento mais conveniente para aplicação dos mesmos, de modo a maximizar a proteção à cultura e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Um conjunto fundamental de ferramentas para o monitoramento de processos ambientais compreende os dados fornecidos pelo sensoriamento remoto, a administração de dados espaciais armazenados em sistemas de informação geográfica e a capacidade sinérgica destas tecnologias para a derivação de novas informações interpretativas a partir de modelos. Assim, considerando a funcionalidade e capacidade de análise destas ferramentas, a ênfase atual passou a centrar na construção de modelos de representação de sistemas espaciais, como aqueles discutidos no âmbito hidrológico por Gomes *et al.* (2002) e Pessoa *et al.* (2003).

Considerando essas premissas, o objetivo deste trabalho consiste em gerar, a partir de simulação, informações relativas à exposição ao risco de contaminação das águas subterrâneas em microbacia hidrográfica no nordeste do Estado do Pará, com o subsídio de produtos e técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

A área de estudo corresponde a microbacia hidrográfica do igarapé Cumaru, tributário do rio Marapanim, no município de Igarapé-Açu, nordeste do Estado do Pará (**Figura 1**). Ocupando uma área de 4.052,79 ha, a microbacia do igarapé Cumaru encontra-se situada entre as latitudes 01°10'40" e 01°16'06" S, e as longitudes 47°31'34" e 47°35'15" WGr., a cerca de 12 km da sede do município, e a 100 km a nordeste da cidade de Belém.

Com base nas características litoestratigráficas dos sedimentos que ocorrem na área de estudo, obtidas através das descrições dos perfis de poços a trado manual, foi possível correlacioná-los com a unidade geológica regional 'Pós-Barreiras'. Essa unidade sedimentar local, a exemplo da regional, guarda uma unidade de aquífero, também denominada de Pós-Barreiras (Lima, 2003). Tal aquífero é constituído, predominantemente, por sedimentos arenosos quaternários, areno-siltosos e com algumas intercalações de lentes argilosas com distribuição em toda área, possuindo uma espessura estimada de 12 metros (Leão, 2003).

Dados referentes à variação do nível estático em área do igarapé Cumaru, obtidas entre 2000 e 2001 indicam que no período seco o nível do aquífero livre varia de 1,62 a 7,32 metros, enquanto no período chuvoso varia de 1,24 a 3,52 metros (Leão, 2003). Assim, em decorrência dos baixos níveis do aquífero livre e da composição predominantemente arenosa dos solos, evidencia-se a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas desta microbacia, principalmente em relação à contaminação pelos pesticidas utilizados nas áreas agrícolas.

2.2. Sistematização de Dados Geográficos

O tratamento e análise do conjunto de dados e informações georreferenciadas da área de estudo foram conduzidas nos programas Spring 4.2 (INPE/ DPI, 2002) e Arcview 3.2 (ESRI, 2000). Visando o levantamento do uso da terra, foi selecionada imagem digital TM/ Landsat, órbita/ ponto 223/ 061, bandas TM 3, 4 e 5, referente a data de 16/07/2003. Para o

mapeamento dos solos, além das referidas imagens TM/ Landsat, foram também empregadas imagens SRTM, adotando-se os espaçamentos de 10 metros entre as curvas de nível.

Como base cartográfica foram utilizadas base de imagens Landsat compactadas já georreferenciadas por processo de alta precisão (MrSID) e base planialtimétrica compilada a partir do uso de dados digitais disponibilizados pelo IBGE, na escala de 1:100.000, contendo entre outros elementos, a rede de drenagem e a malha viária existente para a área de estudo.

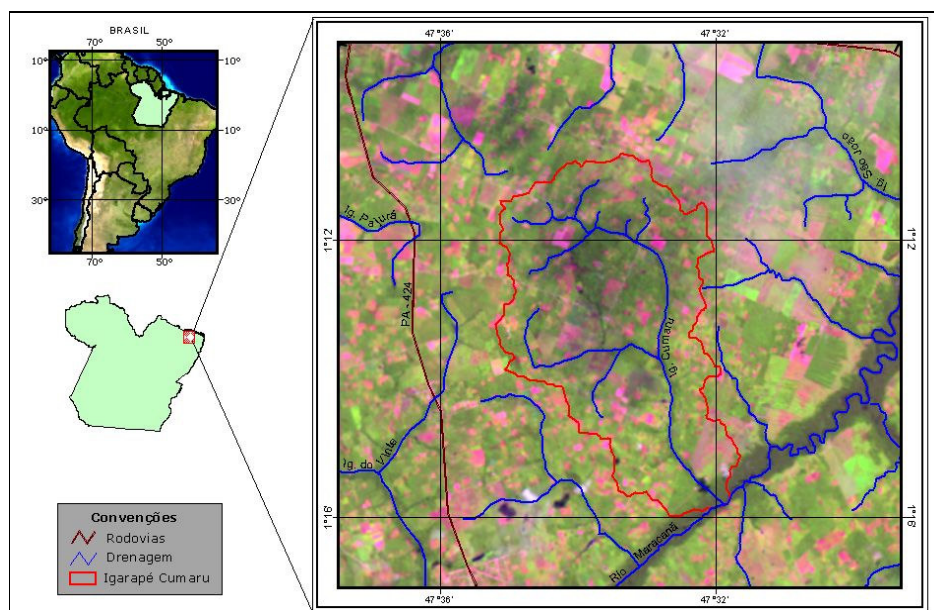


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

2.3. Levantamentos Semi-Detalhados de Solos e de Uso da Terra

O levantamento dos solos foi realizado a partir de interpretação visual das imagens selecionadas, considerando os atributos espectrais e espaciais apresentados pelas feições de interesse. Com a inserção desta informação no sistema, foram gerados mapas que foram posteriormente avaliados no campo, de modo a aferir a definição da legenda temática e a delimitação das unidades de mapeamento. Nesta ocasião, foram realizadas amostragens em condições topográficas e litológicas representativas (Embrapa, 1989), visando à análise das características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas das classes de solos existentes, além da sua distribuição e classificação no sistema vigente (Embrapa, 1999).

As informações relativas ao uso da terra na área de estudo foram obtidas a partir da classificação supervisionada por regiões, conforme a abordagem descrita por Watrin *et al.* (2001). Tal análise teve apoio do trabalho de campo, permitindo assim correlacionar as feições espectrais presentes nas imagens com padrões de cobertura vegetal e uso da terra observados no campo.

Ressalta-se ainda que a quantificação de áreas das classes de uso da terra e de solos definidas para a microbacia de estudo, foi realizada considerando a função medida de classes.

2.4. Nível de Profundidade da Águas Subterrâneas

Para conhecimento do nível subterrâneo foram perfurados poços de observação (piezômetros) em pontos estratégicos da microbacia, além disso, foram cadastrados e selecionados poços amazonas já existentes na área. Dessa forma, foi realizado durante um ano o monitoramento mensal do nível da água dos poços em 30 piezômetros e 30 poços amazonas.

Os locais dos poços foram georreferenciados com o emprego de um GPS e importados para o sistema considerando um rótulo específico, de modo que o nível médio da água subterrânea para cada um deles pode ser espacializado. A geração do mapa de profundidade do nível d'água para a microbacia de interesse, foi então realizado considerando a utilização dos programas Surfer 8.0 e Arcview 3.2.

2.5. Simulação da Movimentação Vertical de Agrotóxicos

O movimento de agrotóxicos no perfil do solo foi acompanhado através do simulador CMLS-94 (Nofziger e Hornsby, 1994), que é uma ferramenta de manejo e apoio para tomada de decisão na aplicação de produtos químicos aos solos. O modelo estima a posição da concentração pico de agrotóxicos, quando eles se movem através de um solo, em resposta ao movimento descendente da água. O simulador permite ainda estimar a quantidade relativa de cada agrotóxico que ainda permanece no solo em qualquer instante de tempo, dentro do período estipulado para a simulação.

Os dados necessários para a utilização do simulador são: climáticos (temperaturas máxima e mínima, pluviosidade, infiltração e evapotranspiração), agrotóxicos (coeficientes de distribuição e meia-vida), solo (valores percentuais de carbono orgânico, densidade aparente, capacidade de campo, ponto de murcha e saturação), coeficientes culturais, e recomendações de doses dos agrotóxicos. Dentre os agrotóxicos usados pelos agricultores na área de estudo, selecionou-se para simulação neste trabalho o Dimetoato, devido ao seu grande potencial de lixiviação, podendo assim, contaminar as águas subterrâneas (Lima, 2003). Vale salientar que tal simulação foi realizada apenas para os três solos predominantes na microbacia.

2.6. Exposição ao Risco de Contaminação

O mapa com o cenário da exposição da área ao risco de contaminação das águas subterrâneas pelo Dimetoato foi obtido pelo cruzamento de informações contidas nos mapas de solos, uso da terra e profundidade da água subterrânea, além daquelas informações obtidas pelas simulações do movimento do agrotóxico nos solos.

3. Resultados e Discussão

De maneira geral, os solos das áreas de estudo são caracterizados por apresentarem-se quimicamente pobres (baixa saturação de bases trocáveis e alta saturação de alumínio permutável) e boas propriedades físicas (profundos e bem drenados). As classes de solo apresentam alta relação com as condições do relevo e da litologia das diversas formações geológicas. As classes de solos mapeados para a área de estudo foram em ordem decrescente de importância: Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média; Latossolo Amarelo Distrófico típico, textura média; Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura média/argilosa; Gleissolo Háptico; e Argissolo Amarelo Distrófico concrecionário, textura média/argilosa (**Figura 2**). Devido a maior representatividade, apenas as três primeiras classes de solos foram consideradas para a realização da simulação da movimentação de agrotóxicos.

Na **Figura 3** é apresentado o mapa de uso da terra para a área de estudo e a correspondente quantificação de áreas para as classes mapeadas. O inexpressivo remanescente florestal (Floresta Densa) ocupa menos de 6% da área total, sendo restrito a matas ciliares de várzea e igapó, empobrecidas por diversos processos de utilização. Bem mais marcante na paisagem, as classes relativas à vegetação secundária ocupam juntas 59,43% do total mapeado, sendo encontradas conforme Watrin *et al.* (1998), em vários estágios de sucessão, com estrutura e densidade variáveis. Dentre as classes ligadas ao sistema produtivo, as áreas de pastagem assumem papel de destaque (21,89% do total), sendo mais representativas as áreas de Pasto Sujo (13,54% do total). As áreas agrícolas, associadas às classes Cultura

Agrícola e Área sob Preparo, embora ocupem uma porção muito modesta da microbacia (5,39% do total), correspondem a atividade econômica de maior importância em âmbito dos produtores familiares locais, sendo preocupante o uso intensivo de agrotóxicos nas culturas do maracujá e da pimenta-do-reino, haja vista o alto potencial de lixiviação dos mesmos.

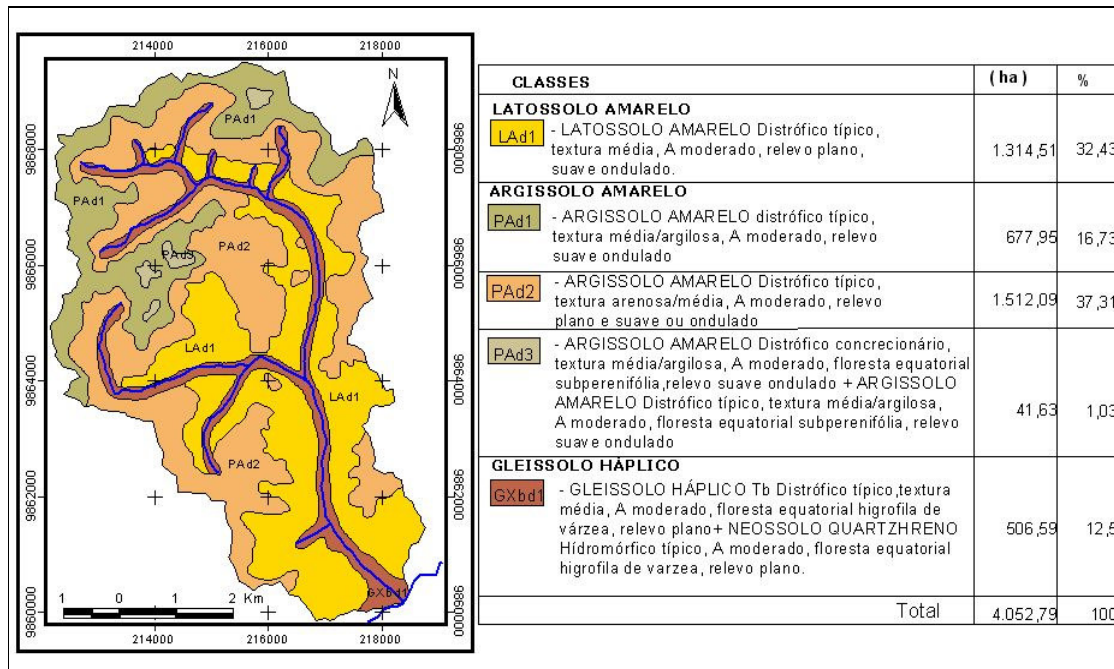


Figura 2 - Mapa de solos da microbacia do Igarapé Cumaru, Igarapé-Açu, PA.

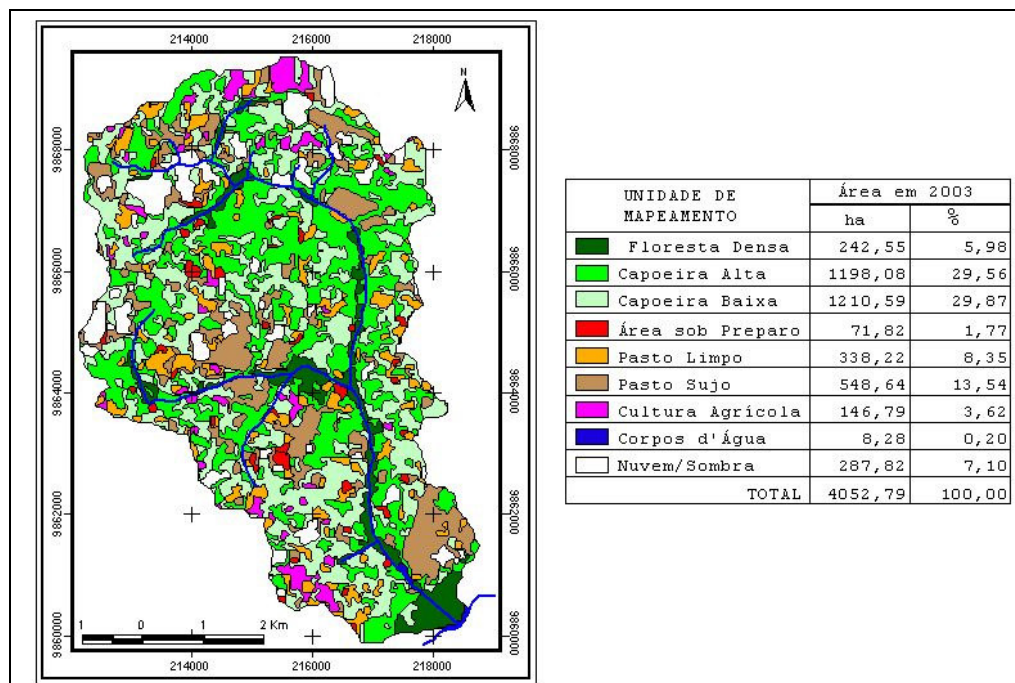


Figura 3 - Mapa de uso da terra para a microbacia do Igarapé Cumaru, Igarapé-Açu, PA.

Na **Tabela 1** são apresentadas a quantidade e a profundidade atingida pelo Dimetoato nos principais solos da área de estudo, durante diferentes períodos de simulação. Com base nos resultados obtidos observa-se que o produto de interesse atingiu, em todos os solos avaliados, profundidade superior a quatro metros nos primeiros 50 dias de simulação, enquanto a quantidade do produto presente no solo foi sempre igual a $4,7 \times 10^{-3} \text{ kg.ha}^{-1}$.

Nos 100 primeiros dias, a quantidade de produto presente no solo foi de $3,3 \times 10^{-5} \text{ kg.ha}^{-1}$, com potencial para atingir profundidades de no mínimo 9,98 m em Argissolo Amarelo distrófico, textura arenosa, e no máximo 12,96 m em Latossolo Amarelo Distrófico típico. A partir do primeiro ano de simulação as concentrações do produto presente no solo são desprezíveis.

Tabela 1 - Simulação da movimentação vertical do produto Dimetoato em diferentes solos e períodos, para a microbacia do igarapé Cumaru, Igarapé-Açu, PA.

CLASSE DE SOLO	PROFUNDIDADE (m)			QUANTIDADE (kg/ha)		
	50 dias	100 dias	1º ano	50 dias	100 dias	1º ano
AGADAG	4,88	12,02	17,59	$4,7 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-16}$
AGADAR	4,22	9,98	14,42	$4,7 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-16}$
LATADS	5,39	12,96	18,98	$4,7 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-16}$

Onde: AGADAG = Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura média/argilosa; AGADAR = Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média; e LATADS = Latossolo Amarelo Distrófico típico, textura média.

Na área da microbacia do igarapé Cumaru o nível do lençol subterrâneo varia de 1,5 a 13 metros de profundidade, obedecendo à variação topográfica do terreno (**Figura 4**), ou seja, existe uma relação positiva entre a altitude das cotas e o nível das águas subterrâneas. O baixo nível do lençol freático associado às características litológicas da microbacia, onde há predominância de sedimentos arenosos, ocasiona aumento no potencial de risco de contaminação das águas subterrâneas pelo Dimetoato.

Na **Figura 5** são apresentadas as áreas com potencial de risco de contaminação de águas subterrâneas por Dimetoato (em preto no mapa). Constatou-se maior exposição da área de estudo ao risco de contaminação por Dimetoato em um total de 67,76 ha, o que corresponde a apenas 1,67% da área total da microbacia. Apesar da aparente pouca representatividade das áreas com potencial risco de contaminação das águas subterrâneas por Dimetoato, deve-se atentar para a localização espacial das áreas em questão, por estarem concentradas nas cabeceiras da bacia estudada e nas áreas de recarga do aquífero. Este fato aumenta a potencialidade desta contaminação por Dimetoato se estender via canal fluvial para as partes mais a jusante da bacia do igarapé Cumaru.

4. Conclusões

A metodologia empregada mostrou-se eficiente para indicar o potencial de risco de contaminação de águas subterrâneas por agrotóxicos, sendo assim, um instrumento valioso em âmbito do monitoramento ambiental. Concorreu para o sucesso desta análise, o emprego de produtos e técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, a partir da geração de mapas de solos, uso da terra e profundidade do nível da água subterrânea.

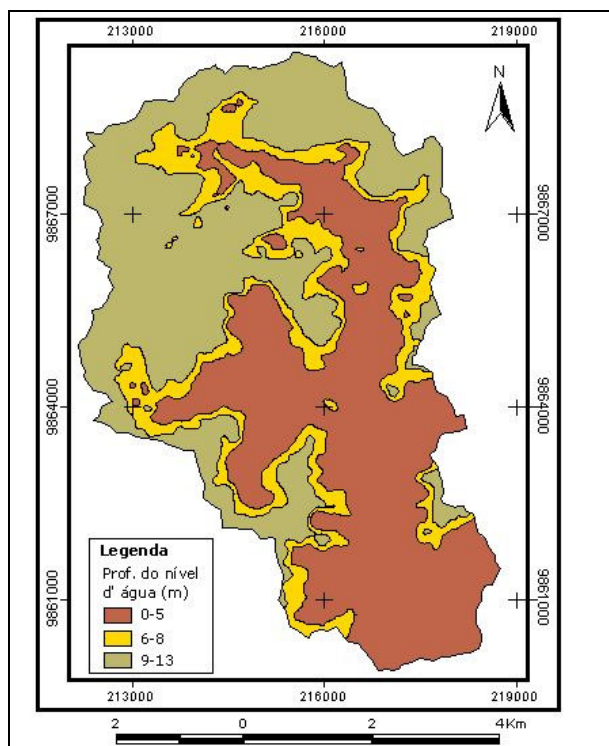


Figura 4- Mapa de profundidade da água subterrânea para a microbacia do Igarapé Cumaru, Igarapé-Açu, PA.

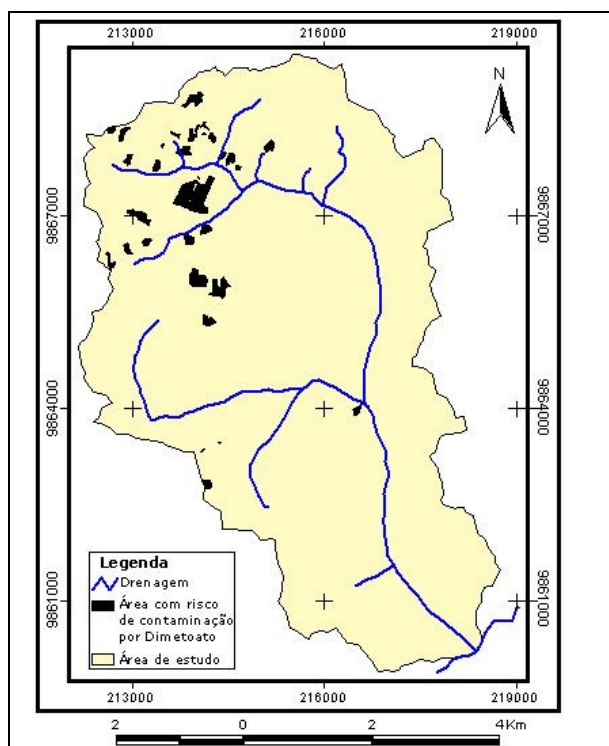


Figura 5 - Mapa do risco potencial de contaminação da água subterrânea por Dimetoato para a microbacia do Igarapé Cumaru, Igarapé-Açu, PA.

Em geral, o Dimetoato é lixiviado rapidamente e a sua degradação também é rápida, haja vista que antes do final do primeiro ano de simulação a concentração encontrada no solo é muito pequena. Durante a simulação, o Dimetoato atingiu profundidades, que constituem um risco potencial para atingir as reservas de água subterrânea da microbacia de estudo, considerando os níveis locais do lençol freático.

O mapa gerado de exposição ao risco de contaminação da água ao Dimetoato indicou a existência de maior exposição dos lençóis subterrâneos em uma parcela modesta do total da área de estudo. Entretanto, devido à localização espacial das áreas críticas, concentradas nas cabeceiras da bacia e nas zonas de recarga do aquífero, observa-se uma maior fragilidade ambiental.

Os resultados apresentados permitem orientar quanto ao monitoramento ambiental, indicando os pontos mais adequados para a amostragem de água subterrânea, aumentando a eficácia do monitoramento. Além disso, gerou-se conhecimento para a orientação do gerenciamento rural no sentido de embasar a adoção de procedimentos que evitem a contaminação do lençol freático. Entre esses procedimentos, destaca-se a seleção e forma de aplicação de agrotóxicos.

Referências Bibliográficas

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos: 5ª aproximação**. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1999. 412 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Normas e critérios para levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro: Embrapa SNLCS, 1989. 94 p.
- ESRI. **Model builder for ArcView spatial analyst**. Redlands, New York, 2000. 182 p.
- Gomes, M. A. F. **Herbicidas no meio ambiente**: uma abordagem para regiões de alta vulnerabilidade natural. Comitê de Meio Ambiente, Sociedade Brasileira de Ciência de Plantas Daninhas. 2002. [online] Disponível: <http://www.cnpma.embrapa.br/herbicidas/> [Acessado em 25/05/2006].
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Divisão de Processamento de Imagens (INPE/ DPI). **Spring**: Sistema de processamento de informações georreferenciadas. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em: jan. 2002.
- Kanashiro, M.; Denich, M. Possibilidades de utilização e manejo adequado de áreas alteradas e abandonadas na Amazônia Brasileira: estudos dos impactos Ambientais nas florestas e áreas abandonadas nos trópicos- SHIFT. Brasília: MCT/CNPq, 1998.
- Leão, L. M. **Caracterização hidrogeológica em área de agricultura intensiva na microbacia do igarapé Cumaru, nordeste do Pará**. Belém: Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 102p (Dissertação de Mestrado). 2003.
- Lima, L.M. **Avaliação experimental da mobilidade do dimetoato na zona não saturada, em áreas de agricultura intensiva na bacia hidrográfica do igarapé Cumaru, município de Igarapé-Açu (PA)**. (Dissertação de Mestrado). 2003.
- Nemeth-Konda, L.; Füleky, G.; Morovjan, G.; Csokan, P. Sorption behaviour of acetochlor, atrazie, carbendazim, diazinon, imidacloprid and isoproturon on Hungarian agricultural soil. **Chemosphere**. p. 545-552, 2002.
- Nofzier, D. L.; Hornsby, A. G. **CMLS-94: Chemical Movement in layered soils**. Oklahoma: University of Florida, 76 p. (Department of Agronomy – University of Florida) 1994.
- Pessoa, M. C. P.Y.; Gomes, M. A. F.; Neves, M. C.; Cerdeira, A. L.; Souza, M. D. Identificação de áreas de exposição ao risco de contaminação de águas subterrâneas pelos herbicidas atrazina, diuron e tebutiurn. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, 13: 111-122. 2003.
- Watrin, O.S.; Sampaio, S.M.N.; Venturieri, A. Dinâmica da vegetação e do uso da terra no 'Polígono dos Castanhais', Sudeste Paraense, utilizando geotecnologias. **Geografia**, v. 26, n. 3, p. 37-54, dez. 2001.
- Watrin, O.S.; Venturieri, A.; Sampaio, S.M.N. Análise multitemporal do uso da terra e suas interrelações com a cobertura vegetal em comunidades rurais do Nordeste Paraense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9. (SBSR), 11-18 set. 1998, Santos. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1998. CD-Rom.