

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E DA INTRUSÃO SALINA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PINDARÉ-MA UTILIZANDO O MÉTODO DRASTIC E GALDIT

Ediléa Dutra Pereira¹, Tiago Martins², M. J. Henriques³, João Paulo Lobo Ferreira⁴, Erik Querner⁵

¹Universidade Federal do Maranhão – Departamento de Geociências, Av. dos Portugêses, S/N, 65085-580, Brasil, Maranhão, edileap@gmail.com

^{2,3,4} Laboratório Nacional Engenharia Hidráulica Civil – LNEC, Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA), lferreira@lnec.pt

⁵ Universidade Wageningen – Instituto Alterra, Wageningen UR
erik.querner @ wur.nl

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto CIAS (Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas Portugal - Brasil), em parceria com o programa CAPES-WAGENINGEN - DRI / CGCI - Nº 023/2008. Teve como objetivo principal caracterizar a vulnerabilidade à contaminação da água do aquífero Itapecuru e vulnerabilidade atual à intrusão salina na área de influência da maré na Bacia Hidrográfica do Rio Pindaré.

A bacia hidrográfica do Rio Pindaré apresenta uma área de 42.246 km² e padrão dendrítico com ordenação dos canais de 5ª ordem, exorréica com rios que desembocam em estuários com vastos manguezais. O modelo hidrogeológico da bacia caracteriza-se pela presença do aquífero Itapecuru de caráter semi-confinado, relacionado aos sedimentos cretáceos da Formação Itapecuru. Para avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero foi aplicado o método DRASTIC conforme Aller *et al.* (1987) e para a vulnerabilidade atual à intrusão da cunha salina o método GALDIT segundo Chachadi e Lobo Ferreira (2001). O método DRASTIC utiliza os parâmetros geológicos, hidrogeológicos, morfológicos e tipos de solos que permite caracterizar o meio subterrâneo e avaliar suas especificidades frente ao risco à contaminação natural ou antropogênica. A baixa vulnerabilidade calculada neste trabalho (102-119) situa-se no curso médio a superior da bacia onde encontram-se os altos topográficos da Serra do Tiracambu e os interflúvios da sub-bacia do Rio Buriticupu e Zutia onde ocorre a presença da Cobertura Dentrítica - Laterítica e da Formação Itapecuru. A vulnerabilidade intermediária (120-159) situa-se na porção inferior a média onde se encontram uma vasta planície flúvio-marinha do Golfão Maranhense formada pelos sedimentos Quaternários das várzeas do Rio Pindaré e Lagos de Penalva, Monção e Cajari. A alta vulnerabilidade (160-179) restringe-se a porção superior e inferior da bacia na área da nascente principal e próximo a foz. A aplicação do método GALDIT permitiu avaliar as zonas que encontram-se sob influência da maré na bacia, restringindo-se estas à planície flúvio-marinha do Golfão Maranhense que preliminarmente indicaram uma vulnerabilidade média a intrusão salina próximo aos rios e vulnerabilidade baixa a partir de 500 metros do Rio Pindaré. Essas informações sobre a vulnerabilidade do sistema aquífero são de relevância para utilização no planejamento regional e local das áreas das bacias hidrográficas do Rio Pindaré, considerando-as como unidade de planejamento para uso sustentável.

Palavras-chaves – Rio Pindaré, vulnerabilidade de aquífero, método DRASTIC e GALDIT

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do Rio Pindaré apresenta uma área de 42.246 km² e se insere na área de transição climática do semi-árido nordestino e tropical úmido amazônico, sendo considerado como um clima tropical chuvoso, com estação seca de inverno, tipo Aw, conforme a classificação de Köppen (Strahler, 1960). A

normal média anual das chuvas na região da bacia para o período de 1961-1990 foi de 1.831,4 mm, com temperatura média anual de 27°C e umidade relativa do ar média anual de 82% (INPE, 2010).

A bacia do Rio Pindaré com um perímetro de 1.059 km apresenta-se como afluente principal pela margem esquerda do Rio Mearim e em sua área compreende total e parcialmente 33 municípios. Trata-se de uma bacia hidrográfica de dominialidade estadual, com padrão de drenagem dentrítico, de 5ª ordem, exorréica e ligeiramente alongada.

O crescimento populacional e o desenvolvimento socioeconômico nas áreas industriais e agronegócios com a plantação de soja e eucalipto têm se intensificado nas últimas três décadas no Maranhão. O uso intensivo e não planejado do solo tem provocado vários níveis de degradação ambiental, principalmente do solo e dos recursos hídricos.

Para avaliação da vulnerabilidade a contaminação das águas do aquífero Itapecuru na bacia Hidrográfica do Pindaré foi empregado o método DRASTIC que integra parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e de solos que permite caracterizar as especificidades do aquífero quanto a contaminação das águas quando sujeitas a atividades poluentes. Os conhecimentos das características hidrodinâmicas do aquífero e do grau de sua vulnerabilidade são ferramentas indispensáveis ao planejamento territorial como nas construções de estradas, instalações de tanques de combustíveis ou indústrias potencialmente poluentes e outros.

2 Localização da Área

A bacia do Rio Pindaré localiza-se na porção ocidental do Estado do Maranhão (Br) entre as coordenadas Universal Transversa de Mercator – Projeção UTM, fuso 23S; 9340629/9694915 mN e 232096/544227 mE (Figura 1).

O acesso rodoviário principal se faz pela BR-316 e pela BR-222. A estrada de ferro Carajás corta a bacia a partir do município de Santa Inês até Açailândia sendo seu percurso paralelo ao longo do leito principal do Pindaré até Bom Jesus das Selvas.

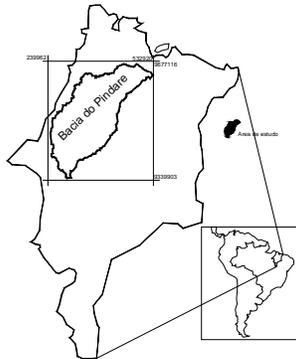


Figura 1 – Mapa de localização da bacia Hidrográfica do Pindaré (MA).

3 Métodos e Materiais

Os métodos para determinação da vulnerabilidade de um aquífero utilizam em geral parâmetros hidrogeológicos e morfológicos do meio físico, por vezes de difícil aquisição. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem de eliminar ou minimizar a subjetividade inerente aos processos de avaliação.

O método DRASTIC foi desenvolvido pela EPA - *Environmental Protection Agency*, conforme Aller et al. (1987), para ser um sistema padronizado utilizado para definir quais áreas devem ser protegidas para garantir a integridade do aquífero em termos de poluição.

Lobo Ferreira e Cabral (1991) propuseram o conceito de vulnerabilidade à poluição de águas como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero.

O método DRASTIC foi desenvolvido a partir dos seguintes pressupostos (Aller et al., 1987):

- o contaminante é introduzido à superfície do terreno;
- o contaminante é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração;
- o contaminante tem a mobilidade da água;
- a área mínima avaliada pelo DRASTIC é de 0,4 km² (100 acres).

O índice DRASTIC corresponde ao somatório ponderado de 7 valores correspondentes aos seguintes parâmetros hidrogeológicos (Aller *et al.*, 1987):

D - Profundidade do Topo do Aquífero,

R - Recarga do Aquífero,

A - Material do Aquífero,

S - Tipo de Solo,

T - Topografia,

I - Influência da Zona Vadosa,

C - Condutividade Hidráulica do Aquífero.

A vulnerabilidade surge assim como um conceito que permite integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e da sua especificidade (Figura 1). Cada um dos sete parâmetros DRASTIC foi dividido em escalas e em tipos de meio significativos que condicionam o potencial de poluição. A cada uma das divisões atribuiu-se um índice que varia entre 1 e 10 e cujo valor se relaciona directamente com o potencial de poluição.

O índice de vulnerabilidade DRASTIC obtém-se através da seguinte expressão:

$$DRASTIC = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i$$

onde *i* é o índice atribuído ao elemento em causa e *p* é o seu peso. O peso de cada parâmetro reflecte a sua importância relativa. O peso varia de 1 a 5 da seguinte forma (Quadro 1).

Quadro 1 – Pesos do índice DRASTIC, conforme, Aller *et al.* (1987).

| Parâmetro | D | R | A | S | T | I | C |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|
| Peso | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 3 |

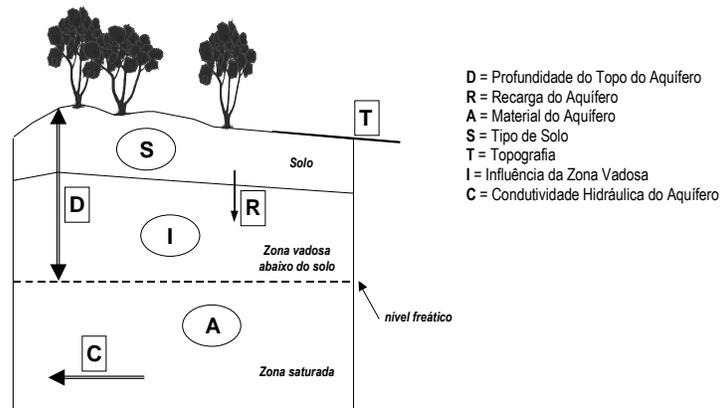


Figura 1 – Parâmetros incorporados no método DRASTIC

O índice DRASTIC final varia entre 23 e 226 quanto mais elevado o índice maior a vulnerabilidade, sendo classificado conforme as classes de vulnerabilidade (Quadro 2).

Quadro 2 – Classe de vulnerabilidade do índice DRASTIC conforme, Aller *et al.* (1987).

| ÍNDICE DRASTIC | VULNERABILIDADE |
|----------------|-----------------|
| > 199 | Muito Alta |
| 199-160 | Alta |
| 120-159 | Intermediária |
| <120 | Baixa |

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Descrição dos Parâmetros DRASTIC para a bacia do Rio Pindaré

- **Parâmetro D - Profundidade do Topo do Aquífero**

A profundidade do topo do aquífero condiciona a espessura de material que um poluente tem que atravessar para atingir o aquífero. No caso do aquífero Itapecuru considerado na área como semi-confinado optou-se pela medição ao topo do aquífero.

Aller *et al.* (1977) consideram os seguintes intervalos de profundidade do topo do aquífero e respectivos índices (Quadro 3).

Para a caracterização da profundidade ao nível freático da bacia do Pindaré utilizou-se dados de 61 poços tubulares da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA e de particulares distribuídos ao longo da bacia do Rio Pindaré. Essas informações permitiram gerar uma malha de interpolação através do método do quadrado das distâncias.

Quadro 3 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro D, conforme, Aller *et al.* (1987).

| D – Profundidade do Topo do Aquífero (m) (Peso - normal: 5; - pesticidas: 5) | Índice |
|---|--------|
| < 1,5 | 10 |
| 1,5 - 4,6 | 9 |
| 4,6 - 9,1 | 7 |
| 9,1 - 15,2 | 5 |
| 15,2 - 22,9 | 3 |
| 22,9 - 30,5 | 2 |
| > 30,5 | 1 |

- **Parâmetro R - Recarga do Aquífero**

A recarga do aquífero condiciona o transporte de um poluente na zona não saturada e a disponibilidade de água para processos de dispersão e diluição tanto na zona vadosa como na zona saturada. De uma maneira geral, quanto maior a recarga, maior será o potencial de poluição de águas subterrâneas. No entanto, um grande volume de recarga favorece a diminuição do potencial de poluição pois possibilita a diluição das substâncias poluentes.

Na área da bacia do Rio Pindaré calculou-se a recarga a partir do balanço hídrico do solo utilizando-se o Modelo SIMGRO (Querner, 1988) que forneceu dados de 608 mm/ano para um ano chuvoso com altura anual de 1.491 mm para o ano de 2004 a partir das estações de Açailândia, Santa Inês e Sítio Novo localizadas ao longo da bacia.

Aller *et al.* (1977) consideram os seguintes intervalos de recarga e respectivos índices para o DRASTIC (Quadro 4).

Quadro 4 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro R conforme, Aller *et al.* (1987).

| R - Recarga do Aquífero (mm/ano) (Peso - normal: 4; - pesticidas: 4) | Índice |
|---|---------------|
| < 51 | 1 |
| 51 - 102 | 3 |
| 102 - 178 | 6 |
| 178 - 254 | 8 |
| > 254 | 9 |

- **Parâmetro A - Material do Aquífero**

O material do aquífero refere-se à capacidade do aquífero para atenuar os efeitos dos poluentes. As características hidráulicas do aquífero como a condutividade e o gradiente hidráulico permitem mensurar o fluxo de água subterrânea e o tempo disponível para a ocorrência dos processos de infiltração e atenuação.

Aller *et al.* (1987) consideraram os seguintes materiais do aquífero com importância para a atenuação do potencial de poluição (Quadro 5).

Quadro 5 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro R conforme, Aller *et al.* (1987):

| A - Material do Aquífero (Peso - normal: 3; - pesticidas: 3) | Índice |
|---|---------------|
| Xisto argiloso, argilito | 1-3 (2) |
| Rocha metamórfica/ígnea | 2-5 (3) |
| Rocha metamórfica/ígnea alterada | 3-5 (4) |
| Arenito, calcário e argilito estratificados | 5-9 (6) |
| Arenito maciço | 4-9 (6) |
| Calcário maciço | 4-9 (6) |
| Areia e balastro | 4-9 (8) |
| Basalto | 2-10 (9) |
| Calcário carsificado | 9-10 (10) |

Cada material tem um intervalo de valores, apresentando-se entre parênteses o índice típico a atribuir. A escolha do índice a atribuir deve basear-se em informação específica sobre o material do aquífero. Se esta informação não existir, deve-se utilizar o índice típico.

Na área da bacia hidrográfica do Pindaré foram individualizadas três unidades estratigráficas: A Formação Itapecuru; Cobertura Detrítica e/ou Laterítica e os Depósitos da Cobertura Sedimentar do Pindaré, Grajaú e regiões dos Lagos, conforme DNPM (1986), Colares (2002), Souza (2002) e Colares *et al.* (2003).

A Formação Itapecuru de idade Cretácea é formada por um conjunto de arenitos com intercalação de siltitos e folhelhos avermelhados de origem continental predominantemente fluvial e sua espessura com base em furos de sondagens da Petrobras, na área de Santa Inês varia de 400-602 metros (Souza, 2002). Na área da bacia do Pindaré esta Formação geológica é predominante e recobre concordantemente a Formação Corda.

A Cobertura Detrítica e/ou Laterítica é formada por sedimentos arenosos conglomeráticos e grosseiros com estratificação planoparalela contendo subordinadamente sedimentos caulíníticos maciços e lateritos autóctones. Atribui-se idade Terciária Inferior baseada em madeira fóssil (Jupiassú, 1970 *Apud* Colares (2002)). Ocorre em forma de plator descontínuos ou cobrindo pequenos morros com espessura de 2 – 7 metros na área (Colares, 2002). Encontra-se na Serra do Tiracambu e forma os interflúvios das bacias de Buriticupu e Zutiua na porção média a superior da bacia do Pindaré. Nestas áreas as elevações altimétricas são maiores 300-568 metros.

Destaca-se a importância dessa formação para a recarga do Aquífero Itapecuru, pois apresenta lateritas de tamanho variados favorecendo a infiltração e permanência da água em seus estratos por mais tempo de residência, até a

infiltração para os estratos inferiores da Formação Itapecuru que apresenta baixa permeabilidade.

Os Depósitos da Cobertura Sedimentar do Pindaré, Grajaú e regiões dos Lagos de idade Quaternária são compostos por sedimentos aluviais arenosos finos a médios, silticos e argilosos originários de sistemas fluviais meandantes e lacustres, conforme Colares *et al.* (2003). Esta unidade é a segunda com predominância na área e encontra-se principalmente na porção inferior da bacia do Pindaré ao longo dos leitos dos rios e riachos, planícies de inundação e nos lagos de Viana, Penalva e Cajari.

Melhores detalhes sobre a geologia da área são encontradas nos trabalhos de levantamento geológico básico na escala 1:250.000 a partir do Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB e Programa Grande Carajás nas Folhas Santa Inês, conforme Colares (2002), Açailândia (Villas Boas, 1999), Vitorino Freire (Colares *et al.* 2003), estudos que contemplam total ou parcialmente a área enfocada.

• **Parâmetro S - Tipo de Solo**

O tipo de solo refere-se ao material da zona alterada da superfície terrestre, com uma espessura normalmente inferior a 2 m. O tipo de solo tem um significativo impacto na quantidade de recarga, mas é sobretudo pelo seu potencial atenuador da poluição que é considerado no índice DRASTIC.

As propriedades do solo que condicionam o potencial de poluição são as seguintes:

- espessura do solo;
- textura do solo;
- expansibilidade/contractibilidade do solo;
- teor em matéria orgânica do solo.

Baseados nestas características, Aller *et al.* (1987) definiram 11 tipos diferentes de solos aos quais atribuíram índices entre 1 e 10 (Quadro 6).

Quadro 6 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro S conforme, Aller *et al.* (1987).

| S - Tipo de solo (Peso - normal: 2; - pesticidas: 5) | Índice |
|---|---------------|
| Fino ou ausente | 10 |
| Balastro | 10 |
| Areia | 9 |
| Turfa | 8 |
| Argila agregada e/ou expansível | 7 |
| Franco arenoso | 6 |
| Franco | 5 |
| Franco siltoso | 4 |
| Franco argiloso | 3 |
| "Muck" | 2 |
| Argila não agregada e não expansível | 1 |

Na bacia do Pindaré encontram-se 8 unidades de solo como Plitossolos (PT), Gleissolos (G), Latossolos (LA), Podzólico Vermelho-Amarelo (PVA), Podzólico Vermelho Concrecionário (PVC), Areias Quartzosa (RQ), Aluviais (RY) e Terra Roxa Estruturada (TR) conforme EMBRAPA (1999) e NUGEO (2006 e 2009).

Destaca-se a presença dos Plitossolos e Gleissolos na porção inferior da bacia onde se encontra as amplas planícies, na porção média a presença predominante dos Podzólicos Vermelhos-Amarelados e Latossolos e na porção superior o predomínio dos Latossolos onde se encontra as colinas e os platôs dissecados formados pelas rochas da Formação Itapecuru e as Cobertura Detrítica e/ou Laterítica.

Foi necessário adequar os dados de classe de solo da nomenclatura brasileira de solos EMBRAPA (1996), aos disponíveis pelo Índice DRASTIC, tentando encontrar a melhor aproximação possível (Quadro 7).

Quadro 7 – Comparação dos solos brasileiros com índice DRASTIC.

| Classe de solo brasileiro | Classe de solo DRASTIC | Índice DRASTIC |
|----------------------------|------------------------|----------------|
| Podzólico | Franco arenoso | 6 |
| Latossolo | Franco argiloso | 3 |
| Plintossolo | Franco argiloso | 3 |
| Gleissolo | Franco siltoso | 4 |
| Neossolo (areia quartzosa) | Areia | 9 |
| Neossolo (aluviais) | Areia | 9 |

- **Parâmetro T - Topografia**

A topografia refere-se ao declive do terreno. Este parâmetro condiciona a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante o tempo suficiente para se infiltrar. Influencia ainda o desenvolvimento de solos condicionando, desta forma, o efeito de atenuação do contaminante.

Aller *et al.* (1987) definiram as seguintes cinco classes de declives (Quadro 8):

Quadro 8 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro T conforme, Aller *et al.* (1987).

| T - Topografia (declive em %) (Peso - normal: 1; - pesticidas: 3) | Índice |
|--|--------|
| < 2 | 10 |
| 2-6 | 9 |
| 6-12 | 5 |
| 12-18 | 3 |
| > 18 | 1 |

- **Parâmetro I - Influência da Zona Vadosa**

O tipo de material da zona vadosa condiciona o tempo de contato com o poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos: biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reação química, volatilização e dispersão. A fraturação nesta zona é particularmente importante pois facilita a percolação vertical do poluente até o aquífero.

Aller *et al.* (1987) consideraram os seguintes materiais da zona vadosa com importância para a atenuação do potencial de poluição (Quadro 9).

Quadro 9 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro I, conforme Aller *et al.* (1987).

| I - Influência da Zona Vadosa (Peso - normal: 5; - pesticidas: 4) | Índice |
|--|-----------|
| Camada confinante | 1 |
| Argila/Silte | 2-6 (3) |
| Xisto argiloso, argilito | 2-5 (3) |
| Calcário | 2-7 (6) |
| Arenito | 4-8 (6) |
| Arenito, calcário e argilito estratificados | 4-8 (6) |
| Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila | 4-8 (6) |
| Rocha metamórfica/Ígnea | 2-8 (4) |
| Areia e balastro | 6-9 (8) |
| Basalto | 2-10 (9) |
| Calcário carsificado | 8-10 (10) |

Cada material tem um intervalo de valores, apresentando-se entre parênteses o índice típico a atribuir. A escolha do índice a atribuir deve basear-se em

informação específica sobre o material da zona vadosa. Se esta informação não existir, deve-se utilizar o índice típico.

Atribuiu-se ao material da zona vadosa da Bacia do Pindaré para a Formação Itapecuru, Cobertura Detrítica Laterítica e Sedimentos Quaternários os respectivos índices DRASTIC 7,8 e 6 (Figura 8), considerando sua litologia.

- **Parâmetro C - Condutividade Hidráulica do Aquífero**

Este parâmetro refere-se à capacidade do aquífero para transmitir água, que, conjuntamente com o gradiente hidráulico, controla o fluxo de água subterrânea. A condutividade hidráulica depende da quantidade e conectividade dos espaços vazios dentro do aquífero, que podem ser poros, fraturas, cavidades ou planos de estratificação.

Aller *et al.* (1987) consideraram os seguintes seis intervalos de condutividade hidráulica com importância para a atenuação do potencial de poluição (Quadro 10).

Quadro 10 – Índice de vulnerabilidade do parâmetro C conforme, Aller *et al.* (1987).

| C - Condutividade Hidráulica do Aquífero (m/d) (Peso - normal: 3; - pesticidas: 2) | Índice |
|--|--------|
| < 4,1 | 1 |
| 4,1 - 12,2 | 2 |
| 12,2 - 28,5 | 4 |
| 28,5 - 40,7 | 6 |
| 40,7 - 81,5 | 8 |
| > 81,5 | 10 |

As classes de vulnerabilidade GALDIT a intrusão da cunha salina são definidas em função do índice calculado utilizando a equação Índice GALDIT (Quadro 11), melhores detalhes são encontrados em (Chachadi e Lobo Ferreira, 2007).

$$\text{ÍNDICE GALDIT} = (1 \cdot G + 3 \cdot A + 4 \cdot L + 4 \cdot D + 1 \cdot I + 2 \cdot T) / 15$$

Quadro 11 – Índice de vulnerabilidade GALDIT conforme, (Chachadi e Lobo Ferreira, 2007).

| Classes de vulnerabilidade | Índice GALDIT |
|----------------------------|---------------|
| elevada | ≥ 7,5 |
| moderada | 5 – 7,5 |
| baixa | 2,5 – 5 |
| muito baixa | ≤ 2,5 |

Avaliação da Vulnerabilidade à contaminação e à intrusão da cunha salina na Bacia Hidrográfica do Rio Pindaré

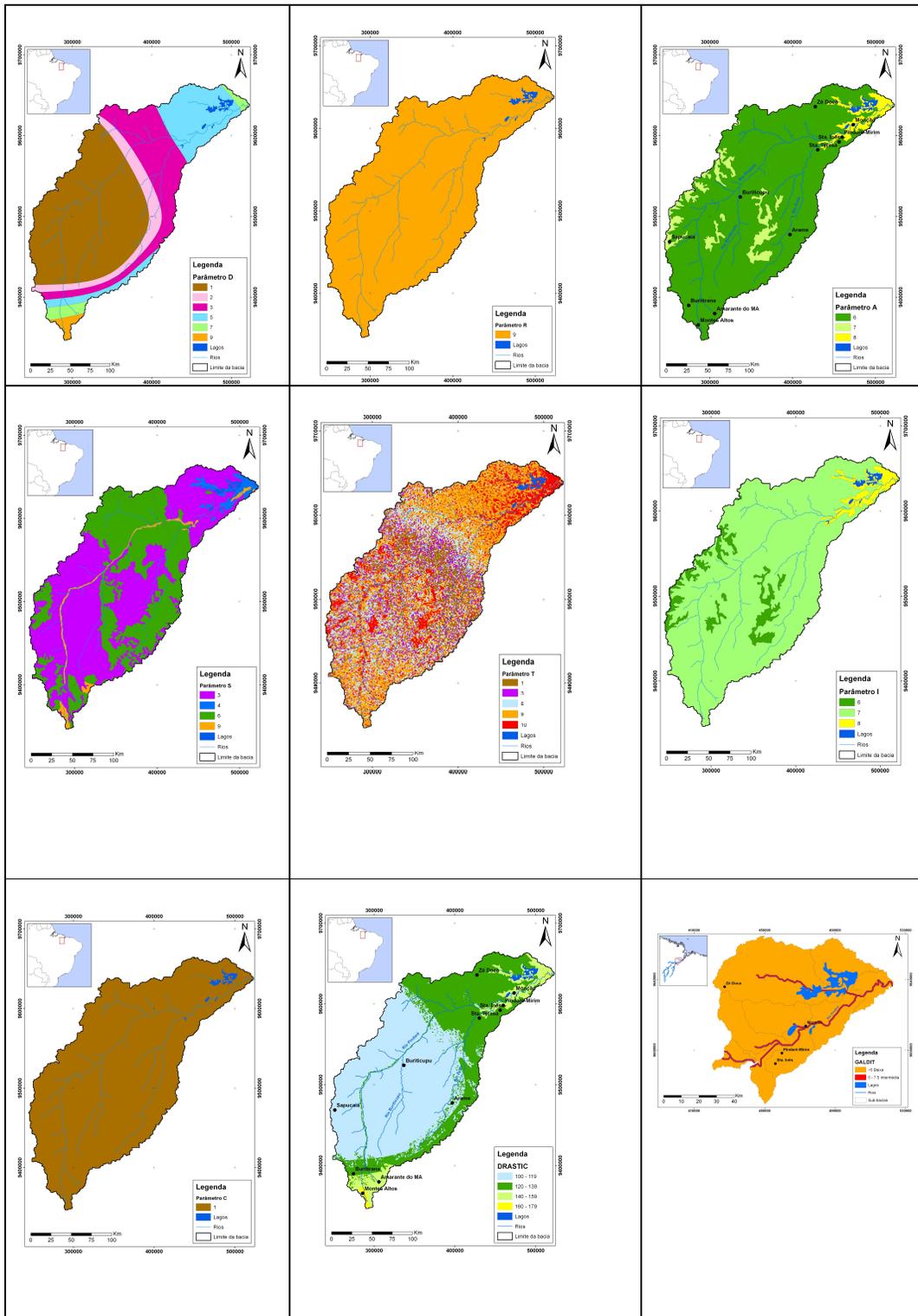
Os mapas da bacia hidrográfica do Rio Pindaré resultantes dos índices DRASTIC e GALDIT são encontrados no Quadro 12. A baixa vulnerabilidade (102-119) verifica-se no curso médio a superior da bacia onde se encontram os altos topográficos da Serra do Tiracambu e os interflúvios da sub-bacia do Rio Buriticupu e Zutia onde ocorre a presença da Cobertura Detrítica - Laterítica e da Formação Itapecuru. A vulnerabilidade intermédia (120-159) situa-se na porção inferior a média onde se encontram uma vasta planície flúvio-marinha do Golfão Maranhense formada pelos sedimentos Quaternários das várzeas do Rio Pindaré e Lagos de Penalva, Monção e Cajari. A vulnerabilidade alta (160-179) restringe-se a porção superior e inferior da bacia na área da nascente principal e próximo a foz.

O método GALDIT foi aplicado na porção inferior da bacia para avaliar as zonas potenciais sujeitas a intrusão salina, constatou-se que parte da porção inferior do Rio Pindaré compreendida entre sua foz até a cidade de Santa Inês apresentou baixa vulnerabilidade à intrusão da cunha sendo a vulnerabilidade intermédia restrita a área próxima das margens do Rio Pindaré que nesse trecho sofre influência da entrada da maré até aproximadamente a cidade de Monção, caracterizando uma zona flúvio-marinha, não sendo registrada através das razões

das concentrações Cl^-/HCO_3^- da água subterrânea valores indicativos da presença da cunha salina na área.

O conhecimento da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação e a entrada da cunha salina é uma ferramenta relevante para utilização no planejamento regional e local das áreas das bacias hidrográficas, considerando-as como unidade de planejamento para uso sustentável.

Quadro 12 – Mapas gerados pelos parâmetros DRASTIC e GALDIT.



Referências

ALLER, L., BENNET, J.H., LEHR, J.H., PETTY, R.J. e HACKETT, G. (1987) - DRASTIC: a *Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Ada, Oklahoma, EPA/600/2-87/035 (PB87-213914), Junho 1987.

CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. (2001). *Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method*. COASTIN – a coastal policy research newsletter, n.o4, pp. 7-9.

COLARES, J. Q. S. (Org) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB: Santa Inês*, Folha SA-23-Y-D, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2002, 82 p.

COLARES, J. Q. S. et al. (Org) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB: Vitorino Freire*, Folha SB-23-V-B, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2003, 101 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL - DNPM - *Mapa Geológico do Estado do Maranhão*. Brasília: MME / DNPM, escala 1:1.000.000,1986.

EMBRAPA. *Levantamento Exploratório e Reconhecimento de Solos do Estado do Maranhão*, Escala:1.1.000.000.EMBRAPA (UEP)/SUDENE,1999.

LOBO FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. (1991). *Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources*, in the framework of the Meeting of the "European Institute for Water, Groundwater Work Group. Bruxelas.

NUGEO. *Núcleo Geoambiental. Levantamento de solo do Estado do Maranhão*, 2009.

QUERNER, E.P., 1988. *Description of a regional groundwater flow model SIMGRO and some applications*. Agric. Water Man. 14: 209-218.

SOUZA, A.S. et al. (Org) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB: Imperatriz*, Folha SB-23-V-C, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2002, 101 p.

STRAHLER, A. N. *Climate and their classification. Physical geography*, 2 ed., New York: John Wiley, p. 181-193, 1960.

VILLAS BOAS, J.M. (Org) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB: Açailândia*, Folha SB-23-V-A, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM, 1999.