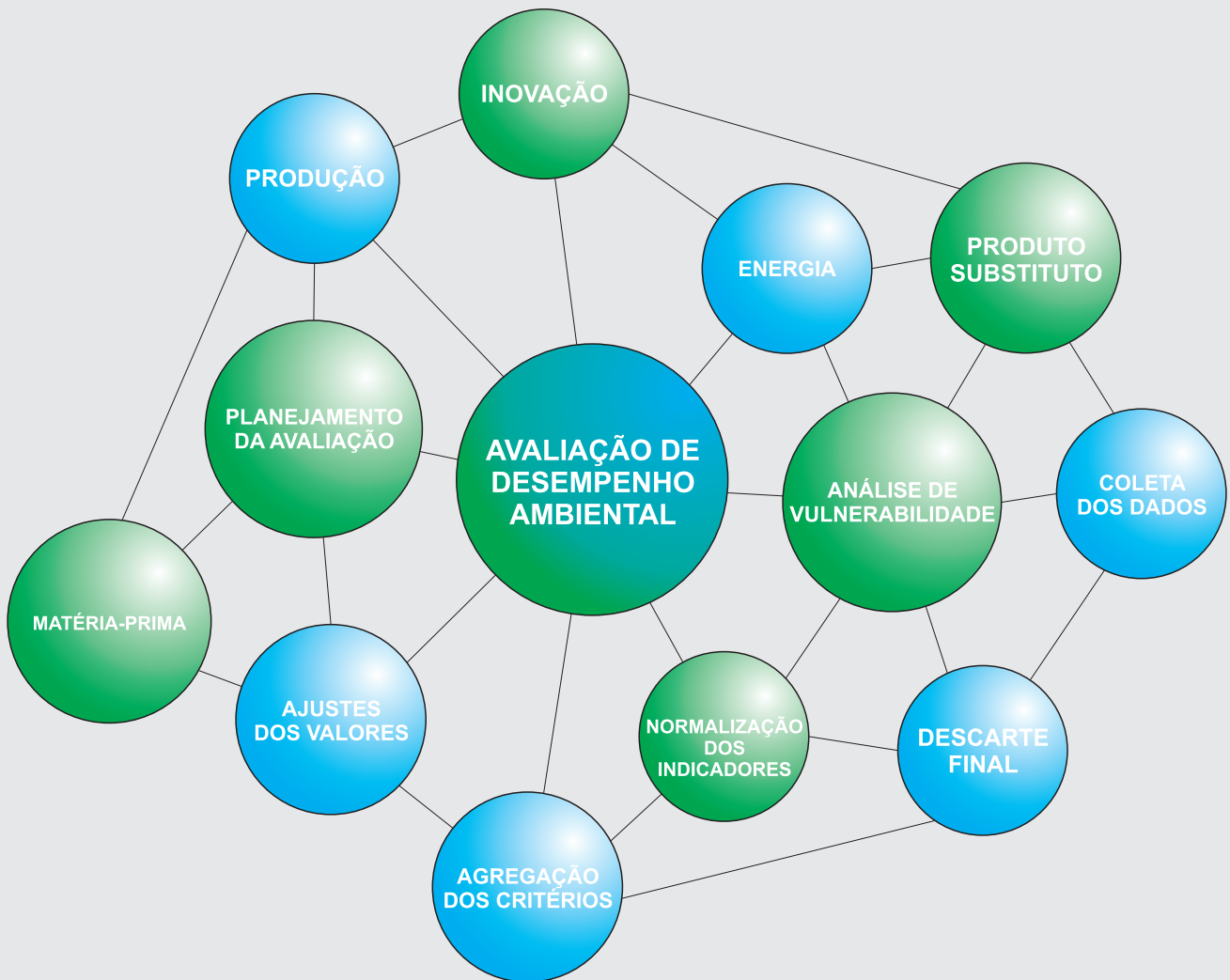


Análise da Vulnerabilidade Ambiental



ISSN 1677-1915
Setembro, 2010

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroindústria Tropical
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 127

Análise da Vulnerabilidade Ambiental

*Maria Cléa Brito de Figueirêdo
Vicente de P. P. B. Vieira
Suetônio Mota
Morsyleide de Freitas Rosa
Samuel Miranda*

Embrapa Agroindústria Tropical
Fortaleza, CE
2010

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agroindústria Tropical

Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Pici
CEP 60511-110 Fortaleza, CE
Caixa Postal 3761
Fone: (85) 3391-7100
Fax: (85) 3391-7109
Home page: www.cnpat.embrapa.br
E-mail: vendas@cnpat.embrapa.br

Comitê de Publicações da Embrapa Agroindústria Tropical

Presidente: *Antonio Teixeira Cavalcanti Júnior*
Secretário-Executivo: *Marco Aurélio da Rocha Melo*
Membros: *Diva Correia, Marlon Vagner Valentim Martins, Arthur Cláudio Rodrigues de Souza, Ana Cristina Portugal Pinto de Carvalho, Adriano Lincoln Albuquerque Mattos e Carlos Farley Herbster Moura.*

Supervisão editorial: *Marco Aurélio da Rocha Melo*
Revisão de texto: *Ana Fátima Costa Pinto*
Normalização bibliográfica: *Rita de Cassia Costa Cid*
Editoração eletrônica: *Arilo Nobre de Oliveira*

1ª edição

1ª impressão (2010)

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Agroindústria Tropical

Análise da vulnerabilidade ambiental / Maria Cléa Brito de Figueiredo...
[et al.]. - Fortaleza : Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

47 p.; 29,7 cm. – (Documentos / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 1677-1915, 127).

1. Meio ambiente. 2. Planejamento ambiental. I. Figueiredo, Maria Cléa Brito de. II. Vieira, Vicente de P. P. B. III. Mota, Suetônio. IV. Rosa, Morsyleide de Freitas Mota. V. Miranda, Samuel. VI. Série.

CDD 363.7

© Embrapa 2010

Autores

Maria Cléa Brito de Figueirêdo

Analista de sistemas, D. Sc. em Saneamento Ambiental, pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical, Rua Dra. Sara Mesquita, 2270, Pici, CEP 60511-110, Fortaleza, CE, clea@cnpat.embrapa.br

Vicente de P. P. B. Vieira

Engenheiro Civil, D. Sc., professor da Universidade Federal do Ceará (UFC) na área de análise de risco e indicadores ambientais, Av. Mister Hull, 2977, Campus do Pici, CEP 60356-000 Fortaleza, CE.

Suetônio Mota

Engenheiro sanitaria, D. Sc., professor da Universidade Federal do Ceará (UFC) na área de impactos ambientais e reúso de efluentes, Av. Mister Hull, 2977, Campus do Pici, CEP 60356-000 Fortaleza, CE.

Morsyleide de Freitas Rosa

Engenheira Química, D. Sc. em Processos Químicos e Biológicos, pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical na área de Gestão Ambiental.

Samuel Miranda

Geógrafo, Universidade Federal do Ceará (UFC).

Apresentação

A análise de vulnerabilidade ambiental permite avaliar a fragilidade de sistemas ambientais frente a determinadas pressões. Essa informação é útil no planejamento ambiental, possibilitando identificar regiões onde a degradação ambiental resultante de uma dada ação tem potencial de causar maior impacto e desenvolver programas visando à redução das fontes de pressão.

Compromissada com o desenvolvimento de soluções tecnológicas que contribuam para a sustentabilidade do agronegócio nas diferentes regiões brasileiras, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) vem contribuindo ativamente com o desenvolvimento de métodos de avaliação ambiental de regiões, de propriedades agroindustriais e de tecnologias. A Embrapa Agroindústria Tropical também participa dessa iniciativa, apresentando neste documento uma revisão sobre o tema vulnerabilidade ambiental e o método Vulneragri de análise da vulnerabilidade ambiental de bacias hidrográficas.

O método foi desenvolvido para servir de suporte à etapa de transferência de tecnologias. Em estudos sobre possíveis impactos ambientais da adoção de inovações tecnológicas em diferentes regiões, a análise de vulnerabilidade permite identificar locais onde esses impactos podem ser maiores ou menores. Permite ainda subsidiar equipes de PD&I com informações sobre o meio ambiente onde a tecnologia será adotada, para que a inovação faça uso de insumos disponíveis na região, gere resíduos capazes de serem corretamente dispostos ou assimilados no meio ambiente ou agregue outras tecnologias para tratar os resíduos.

Vitor Hugo de Oliveira

Chefe-Geral da Embrapa Agroindústria Tropical

Sumário

Introdução	9
Revisão Sobre o Tema Vulnerabilidade	9
Conceitos de vulnerabilidade	9
Sistema ambiental	11
Questões ambientais relacionadas à agroindústria	12
Método de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Bacias Hidrográficas às Pressões Oriundas de Atividades Agroindustriais (Vulneragri)	15
Conceito de vulnerabilidade	15
Sistema ambiental	15
Objetivo e usuários do método	15
Sistema de indicadores.....	16
Regra para normalização dos indicadores	18
Regra para agregação dos indicadores em critérios.....	19
Regra para agregação dos critérios no índice final	19
Aplicação do Método Vulneragri.....	20
Análise de vulnerabilidade da bacia Metropolitana (CE)	22
Análise de vulnerabilidade da bacia do Litoral (CE)	24
Análise de vulnerabilidade da bacia do Baixo Mundaú.....	26
Análise de vulnerabilidade da bacia do Parnaíba (CE)	28
Considerações Finais	31
Referências	32
Apêndice A – Descrição dos Indicadores de Vulnerabilidade Ambiental.....	36

Análise da Vulnerabilidade Ambiental

Maria Cléa Brito de Figueirêdo

Vicente de P. P. B. Vieira

Suetônio Mota

Morsyleide de Freitas Rosa

Samuel Miranda

Introdução

Os estudos sobre vulnerabilidade ambiental de sistemas têm crescido nos últimos anos, podendo-se mencionar a análise da vulnerabilidade de regiões à mudança climática (METZGER et al., 2006); regiões montanhosas à degradação ambiental (LI et al., 2006); reservas hídricas subterrâneas à contaminação por agrotóxico e nitrato (BARRETO, 2006); geossistemas a processos morfogenéticos e pedogenéticos (LIMA et al. 2000); regiões às mudanças globais (SCHOTER et al., 2004); áreas próximas a unidades industriais às emissões de poluentes dessas unidades (TIXIER et al., 2005); bacias hidrográficas à degradação ambiental (TRAN et al., 2002; ZIELINSKI, 2002); e ecossistemas à degradação ambiental (VILLA e McLEOD, 2002). Esses estudos utilizam diferentes tipos de indicadores na caracterização da vulnerabilidade de um determinado sistema ambiental (bacia hidrográfica, paisagem, aquífero etc.).

Villa e McLeod (2002) apontam três passos necessários à construção de um método de avaliação da vulnerabilidade ambiental: definição do conceito de vulnerabilidade, escolha do sistema a ser avaliado e escolha e organização dos indicadores ambientais. A necessidade de definir o conceito de vulnerabilidade advém da existência de diversos estudos sobre o tema, com diferentes abordagens de análise. O estudo da vulnerabilidade também requer a delimitação do sistema ambiental em estudo, assim como a identificação dos seus elementos constituintes. A escolha dos indicadores deve estar atrelada ao conceito de vulnerabilidade adotado e ao objetivo da análise.

Este trabalho tem como objetivo inicial analisar diferentes abordagens ao estudo da vulnerabilidade ambiental, mostrando conceitos de vulnerabilidade em uso, sistemas ambientais passíveis de serem utilizados em um estudo de vulnerabilidade e as questões ambientais relativas à agroindústria, que podem ser contempladas em uma análise de vulnerabilidade. Em seguida, é proposto o método Vulneragri para análise da vulnerabilidade de bacias hidrográficas às principais questões ambientais associadas à agroindústria. Esse método é aplicado na análise de quatro bacias hidrográficas localizadas no Nordeste brasileiro.

Revisão sobre o Tema Vulnerabilidade

Conceitos de vulnerabilidade

O significado de vulnerabilidade não é consenso em estudos sobre o tema, dificultando a comparação dos resultados de trabalhos semelhantes. Metzger et al. (2006) e Schoter et al. (2004) relacionaram o conceito ao grau de susceptibilidade de um sistema aos efeitos negativos provenientes de mudanças globais. Nesse estudo, a susceptibilidade está relacionada ao grau de exposição de ecossistemas a mudanças ambientais, à sensibilidade (avaliada a partir de medidas dos impactos ambientais potenciais resultantes da exposição) e à capacidade de resposta da sociedade em adotar ações de ajuste às mudanças.

Li et al. (2006) relacionaram vulnerabilidade a características do meio físico e biótico (declividade, altitude, temperatura, aridez, vegetação, solo), à exposição a fontes de pressão ambiental (densidade populacional, uso da terra) e à ocorrência de impactos ambientais (erosão hídrica) em uma área montanhosa.

Barreto (2006), ao revisar métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, utilizou um método que relaciona esse conceito a características do meio físico que tornam aquíferos mais ou menos sensíveis à contaminação por nitrato e agrotóxico.

Para Lima et al. (2000), a vulnerabilidade de um geossistema é avaliada analisando-se características dos meios físicos (solo, rocha, relevo, clima e recursos hídricos), biótico (tipo de vegetação) e antrópico (uso e ocupação do solo), que tornam o relevo mais ou menos instável ou sujeito a processos erosivos.

Tixier et al. (2005) relacionaram vulnerabilidade ao grau de exposição de pessoas e ambientes naturais a pressões (gases tóxicos, lançamento de efluentes etc.) que partem de uma unidade industrial, considerando características do ambiente (densidade populacional, uso e ocupação do solo).

Tran et al. (2002) relacionaram vulnerabilidade à exposição de uma bacia a pressões (densidade populacional, densidade de rodovias, uso e ocupação do solo) e a impactos ambientais potenciais (poluição por ozônio), em uma análise de 123 bacias hidrográficas nos Estados Unidos, considerando indicadores provenientes de um atlas ecológico.

Zielinski (2002) propôs uma análise de vulnerabilidade pela avaliação da área impermeabilizada de microbacias hidrográficas, relacionando esse conceito a uma característica do meio (pavimentação do solo).

Villa e McLeod (2002), por sua vez, relacionaram a vulnerabilidade a processos intrínsecos que ocorrem em um sistema, decorrente do seu grau de conservação (característica biótica do meio) e resiliência ou capacidade de recuperação após um dano, e a processos extrínsecos, relacionados à exposição a pressões ambientais atuais e futuras.

Observa-se que o conceito de vulnerabilidade se refere a determinadas questões, problemas ou impactos ambientais (mudança climática, erosão etc.). Segundo Gallopin (2006), é importante definir quais perturbações serão objeto do estudo, uma vez que um sistema pode ser vulnerável a um tipo de problema, enquanto a outros não.

Também, observa-se que esse conceito está atrelado a outros, como exposição a pressões, impacto ambiental (real ou potencial), sensibilidade do sistema ecológico, capacidade adaptativa da sociedade, resiliência e susceptibilidade à ocorrência de efeitos negativos (envolve exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa). Embora em alguns trabalhos tenham sido realizadas medidas de impacto real em estudos de vulnerabilidade, Gallopin (2006) avaliou que esse termo é usualmente compreendido como a susceptibilidade de um sistema a um dano potencial ou transformação, quando sujeito a uma perturbação ou pressão ambiental, ao invés de medida de um dano real.

De acordo com Adger (2006), as definições de vulnerabilidade, usualmente, atrelam esse conceito a um ou mais dos seguintes fatores: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa ou de resposta do sistema. O estudo desses fatores permite a avaliação da maior ou menor vulnerabilidade de um sistema a determinadas questões ambientais. A exposição significa o grau, duração ou extensão em que o sistema está em contato com perturbações. A sensibilidade está relacionada à extensão ou ao grau em que um sistema pode absorver as pressões sem sofrer alterações no longo prazo. A capacidade adaptativa é a habilidade do sistema de se ajustar a um dano ocorrido, fazer uso de recursos ou oportunidades ou responder a mudanças ambientais que venham a ocorrer. Nesse contexto, um sistema é mais vulnerável quanto maiores as pressões, maior a sensibilidade do meio e menor sua capacidade adaptativa.

Analisando a literatura sobre vulnerabilidade, Gallopin (2006) avalia que as definições de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa assumem diferentes significados, devendo-se esclarecer o que se entende por esses termos em avaliações de vulnerabilidade. Exemplificando, em estudos de vulnerabilidade à mudanças climáticas e globais (METZGER et al., 2006; SCHOTER et al., 2004), a capacidade adaptativa é compreendida como a existência de ações sociais, econômicas e ambientais que permitem à sociedade melhor se adaptar às possíveis mudanças ambientais. Entretanto, o termo "capacidade adaptativa" também é utilizado para denotar a resiliência de um ecossistema, ou sua capacidade de manter a estabilidade ecológica

frente a pressões externas. Segundo Villa e McLeod (2002), a definição de indicadores de resiliência é complexa devido à escassez de pesquisas que forneçam indicativos de resiliência, nos diversos tipos de ecossistemas, a determinados fatores de pressão.

Percebe-se, então, que estudos usualmente consideram pelo menos um dos fatores: exposição de um sistema à perturbações, sensibilidade do meio e capacidade adaptativa, sendo necessário o pronto esclarecimento desses conceitos em análises de vulnerabilidade.

Sistema ambiental

Chorley e Kennedy (1971) citado por Christofolletti (1999), definem sistema como “um conjunto estruturado de objetos e atributos que consistem de componentes ou variáveis que assumem relações discerníveis uns com os outros e operam conjuntamente como um todo complexo, de acordo com determinado padrão”. Por essa definição, percebe-se a presença de uma hierarquia de sistemas que se inter-relacionam em uma ordem superior de complexidade. Em razão das muitas variáveis e relações existentes na perspectiva sistêmica, Christofolletti (1999) pondera sobre a necessidade de conciliar a perspectiva reducionista com a sistêmica na análise ambiental, devendo-se estabelecer a hierarquia entre os componentes do sistema, a definição de variáveis que melhor descrevem o funcionamento de cada subsistema, mas sem perder a visão da complexidade do todo.

De acordo com Christofolletti (1999), podem-se citar os seguintes sistemas ambientais:

- Ecossistema, compreendido como qualquer unidade que inclui a totalidade de organismos em uma área interagindo com o meio ambiente físico. A definição da área de um ecossistema procura manter a homogeneidade da comunidade biológica, podendo assumir diversas escalas de grandeza espacial, embora os estudos usualmente utilizem a escala local. Exemplos: rios, lagos, corredores ecológicos, manchas de vegetação com fisionomias homogêneas.
- Geossistema: correspondendo a uma paisagem delimitada pelas características morfológicas e geológicas, dentre outras, de uma determinada região, em níveis espaciais decrescentes. Exemplos: planícies, planaltos, serras, depressão sertaneja.
- Bacia hidrográfica: corresponde a uma área drenada por um rio ou conjunto de rios, delimitada por divisores de água. Bacias podem ser hierarquizadas pela subdivisão de uma bacia maior em sub-bacias, cujas águas contribuem para a formação do rio principal. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 1, de 23/01/1986, estabelece que a bacia hidrográfica deve ser considerada como área de estudo em avaliações de impacto ambiental, uma vez que as pressões exercidas por atividades humanas repercutem diretamente sobre a qualidade das águas, do solo, da vegetação e de vida de populações residentes em bacias hidrográficas.

Chorley e Kennedy (1971) citado por Christofolletti (1999), propuseram uma classificação dos estudos de sistemas ambientais em quatro tipos principais, de acordo com o enfoque de interesse:

- Estudos de sistemas morfológicos são compostos pela associação das propriedades físicas dos sistemas, sendo delimitados por formas geométricas. São utilizados em estudos morfológicos, estabelecendo-se indicadores relacionados com a forma e com os elementos físicos que o compõem. Quando as bacias hidrográficas são estudadas sob o ponto de vista morfológico, utilizam-se usualmente indicadores relacionados à morfometria das redes de canais e à topografia. Quando um geossistema é analisado sob um aspecto morfológico, usualmente é descrito por indicadores topográficos.
- Estudos de sistemas processos-respostas combinam sistemas morfológicos a processos ambientais, indicando a resposta de uma área a um determinado processo ou ação modificadora da dinâmica ambiental. O objetivo dos estudos nesses sistemas é identificar as relações entre determinadas ações e modificações provocadas na forma ou estrutura de um sistema morfológico. Esse tipo de análise é utilizado em estudos de avaliação de impacto ambiental. Também é adequado à avaliações de vulnerabilidade

ambiental, uma vez que essas avaliações consideram as respostas potenciais dos fatores ambientais (naturais e antrópicos) ou sua sensibilidade às pressões exercidas. Assim, um exemplo de estudo para essa tipologia é a avaliação da vulnerabilidade de uma bacia hidrográfica às perturbações antrópicas que conduzem à degradação do solo e da água.

- Estudos de sistemas em sequência ou encadeados são compostos por uma cadeia de processos (subsistemas) que se inter-relacionam pela transferência de matéria e energia. A ênfase desses sistemas incide na caracterização dos fluxos de matéria e energia e nas transformações ocorridas em cada subsistema. Exemplos desse tipo de estudo são avaliações de fluxos de matéria ou energia em sistemas ecológicos formados por produtores, consumidores e decompositores, ou em sistemas industriais formados por cadeias de produção primária, secundária e terciária.
- Estudos de sistemas controlados são aqueles que apresentam a atuação humana sobre os sistemas de processos-resposta. Busca-se avaliar como o homem pode intervir em processos ambientais, de tal forma a realizar alterações ou respostas no ambiente. Um exemplo de estudo nessa linha é a introdução de espécies exóticas em um ecossistema lacustre, avaliando-se seu impacto na cadeia alimentar.

De acordo com Christofolletti (1999), os sistemas ambientais podem ainda ser estudados seguindo duas abordagens distintas: a ecológica e a geográfica. A abordagem ecológica estuda os ecossistemas, com o foco nas características e inter-relações dos organismos vivos em diferentes habitats, podendo-se analisar o fluxo de energia, de nutrientes, a produtividade, a dinâmica de populações, a biodiversidade, a estabilidade dinâmica de ecossistemas e as sucessões ecológicas ao longo do tempo.

A abordagem geográfica analisa o espaço geográfico caracterizado pelo relacionamento de fatores abióticos, bióticos e antrópicos, estando o ser humano incluído nas inter-relações e fluxos de matéria e energia. Nessa abordagem, estuda-se a estrutura e a dinâmica ambiental em um espaço que pode ser visualizado e distinguido em fotos aéreas ou imagens de satélite pelas variações no relevo, vegetação, hidrografia e tipo de solo. O clima e a geologia integram a análise, embora não possam ser visualmente discernidos. As ações humanas modificadoras e restauradoras do ambiente também devem ser contempladas. Em avaliações de impacto ambiental ou de planejamento regional, incluindo-se planejamento de bacias hidrográficas, utiliza-se esse tipo de abordagem.

Pode-se concluir que, em estudos de vulnerabilidade ambiental, a bacia hidrográfica é um sistema adequado à análise ambiental, já sendo utilizada em estudos de impacto ambiental. Esses estudos são do tipo “processos-resposta”, sendo adequada à abordagem geográfica. Deve-se, assim, definir os processos ambientais de interesse. Em uma análise da vulnerabilidade de um sistema à degradação ambiental decorrente de pressões oriundas de tecnologias agroindustriais, os processos de interesse são aqueles resultantes dessas pressões. Esses processos levam à ocorrência de impactos ambientais capazes de reduzir a qualidade ambiental e devem orientar a escolha dos indicadores de vulnerabilidade.

Questões ambientais relacionadas à agroindústria

Inovações agroindustriais têm o potencial de prevenir, reduzir ou aumentar os problemas ambientais na região onde são inseridas. Esses problemas ou questões ambientais são os tipicamente atribuídos às atividades agroindustriais. Muitos trabalhos foram desenvolvidos nas últimas décadas sobre as questões ambientais associadas às atividades agroindustriais. Algumas dessas questões são de escala global, como mudança climática e aumento das pressões sobre os recursos não renováveis, não sendo originadas por inovações que atuam em um determinado ambiente e dessa forma não interferindo diretamente na vulnerabilidade de uma determinada região, mas na dinâmica global. Outras são de escala local, como emissão de material particulado, ruído e odor, não afetando uma região, mas as pessoas residentes nas imediações da fonte geradora desses impactos. As demais questões afetam a dinâmica ambiental regional e estão apresentadas na Tabela 1. A descrição detalhada de cada questão ambiental apresentada encontra-se em Figueirêdo (2008).

Tabela 1. Resumos das pressões, fatores do meio físico e biótico e respostas sociais associados às questões ambientais da agroindústria.

Questão ambiental	Pressões principais	Fatores do meio físico e biótico relacionados às questões	Respostas sociais que mitigam as questões ambientais	Referências
Perda da biodiversidade	<ul style="list-style-type: none"> - Desmatamento - Introdução de espécies transgênicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas endêmicas, com espécies ameaçadas de extinção 	<ul style="list-style-type: none"> - Criação de áreas de conservação - Cobertura vegetal em Áreas de Preservação Permanente (APP) - Conservação das áreas de reserva florestal em áreas agrícolas - Recuperação de áreas degradadas - Adoção de níveis de biossegurança compatíveis com classe de risco de organismos transgênicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Brasil (2002a, 2002b) - Santos e Câmara (2002) - Townsend et al. (2006) - Pessoa et al. (2006)
Erosão	<ul style="list-style-type: none"> - Desmatamento e exposição prolongada do solo às intempéries do clima 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosividade da chuva - Erodibilidade do solo - Declividade do terreno - Tipo de cobertura vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de técnicas de conservação do solo - Reflorestamento - Preservação das reservas legais e APPs 	<ul style="list-style-type: none"> - Anjos e Van Raij (2004) - Primavesi (1984) - Silva et al. (2003) - Silva (2000, 2001) - Crepani et al. (2004)
Compactação	<ul style="list-style-type: none"> - Preparo do solo - Tráfego de máquinas, animais e pessoas 	<ul style="list-style-type: none"> - Textura do solo - Umidade do solo - Teor de matéria orgânica - Intensidade da chuva 	<ul style="list-style-type: none"> - Restrição das áreas com circulação de máquinas - Adubação orgânica - Rotação de culturas 	<ul style="list-style-type: none"> - Primavesi (1984) - Seixas (1988) - Richart et al. (2005)
Salinização e sodificação do solo	<ul style="list-style-type: none"> - Salinidade da água de irrigação - Prática de irrigação inadequada 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo: drenagem, profundidade - Clima: aridez - Nível do lençol freático 	<ul style="list-style-type: none"> - Controle da drenagem na irrigação 	<ul style="list-style-type: none"> - Gheyi et al. (1997) - Ghey (2000) - Primavesi (1984) - Anjos e Van Raij (2004)
Acidificação	<ul style="list-style-type: none"> - Uso excessivo de adubação NPK - Chuva ácida 	<ul style="list-style-type: none"> - Acidez natural do solo 	<ul style="list-style-type: none"> - Calagem - Controle no uso de fertilizantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Primavesi (1984) - Anjos e Van Raij (2004)
Contaminação ambiental por agrotóxico	<ul style="list-style-type: none"> - Uso frequente de agrotóxicos - Toxicidade do agrotóxico 	<ul style="list-style-type: none"> - Teor de matéria orgânica do solo - Erodibilidade do solo - Textura do solo - Pluviometria - Profundidade do lençol freático 	<ul style="list-style-type: none"> - Controle biológico de pragas - Certificação no campo (PIF e orgânica) - Implantação de centrais de coleta de embalagens vazias de agrotóxicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Andrei (1999) - Ehlers (1999) - Pessoa et al. (2004) - Rodrigues (2003)

(Continua...)

Tabela 1. (Continuação).

Questão ambiental	Pressões principais	Fatores do meio físico e biótico relacionados às questões	Respostas sociais que mitigam as questões ambientais	Referências
Contaminação ambiental por resíduos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> - Quantidade e destino inadequado do lixo - Periculosidade do lixo 	<ul style="list-style-type: none"> - Declividade do terreno do aterro/lixão - Distância do aterro/lixão de corpos d'água - Tipo de solo do aterro/lixão 	<ul style="list-style-type: none"> - Investimento público em saneamento básico - Reciclagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Braga et al. (2002) - Castilhos Junior (2003) - D'Almeida e Vilhena (2000)
Desertificação	<ul style="list-style-type: none"> - Mudanças climáticas - Degradação do solo - Desmatamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Clima: aridez - Erodibilidade do solo - Salinidade do solo 	<ul style="list-style-type: none"> - Conservação ambiental - Recuperação de áreas degradadas - Redução da pobreza 	<ul style="list-style-type: none"> - UNESCO (1997) - IICA (2006) - Accioly e Oliveira (2004)
Escassez hídrica	<ul style="list-style-type: none"> - Intensidade de uso - Desperdício 	<ul style="list-style-type: none"> - Clima: aridez - Cobertura vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> - Programas de conservação da água - Investimentos na construção de reservatórios e perfuração de poços - Uso de técnicas eficientes de irrigação 	<ul style="list-style-type: none"> - Tundisi (2003) - Vieira (2000) - Rebouças (2002a, 2002b)
Poliuição das águas	<ul style="list-style-type: none"> - Efluentes ricos em nutrientes - Uso intensivo de agroquímicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Vazão dos rios - Clima: aridez 	<ul style="list-style-type: none"> - Saneamento básico - Redução no uso de agroquímicos e fertilizantes sintéticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Von Sperling (1995) - Vieira (2000)
Mudança climática	<ul style="list-style-type: none"> - Emissão de gases de efeito estufa 	<ul style="list-style-type: none"> - Clima: aridez 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de fontes renováveis de energia (biomassa, solar, eólica, hídrica) - Aproveitamento de resíduos orgânico na geração de produtos e energia - Compostagem de resíduos orgânicos - Redução das áreas de arroz inundado 	<ul style="list-style-type: none"> - International... (1996, 2007a, 2007b)
Depleção de fontes não renováveis de matéria e energia	<ul style="list-style-type: none"> - Exploração e consumo elevado das reservas minerais, fontes de materiais e energia 	<ul style="list-style-type: none"> - Reservas minerais naturais 	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição de matérias-primas e fontes de energia minerais por recursos renováveis, sempre que possível; - Reciclagem e reuso de produtos minerais. 	<ul style="list-style-type: none"> - DULLEY (2004) - IIED e WBCSD (2002) - Brentrup et al. (2004) - Midio e Martins (2000) - Giannetti e Almeida (2006) - Sonnemann et al. (2004)
Contaminação de alimentos pelo uso de aditivos	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de aditivos não reconhecidos como seguros em alimentos (não GRAS) 	<ul style="list-style-type: none"> - Tolerância humana aos diversos tipos de substâncias químicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução do uso de aditivos com baixo limite máximo permitido 	<ul style="list-style-type: none"> - Midio e Martins (2000) - Soares e Gonçalves (2008) - FAO e WHO (2008)

Método de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Bacias Hidrográficas às Pressões Oriundas de Atividades Agroindustriais (Vulneragri)

Conceito de Vulnerabilidade

A análise de vulnerabilidade proposta considera a vulnerabilidade de um sistema à degradação ambiental proveniente de pressões associadas à adoção de inovações ou atividades agroindustriais. O termo degradação ambiental se refere às questões ambientais relacionadas à atividade agroindustrial, já mencionadas. Para inserção da vulnerabilidade ambiental na análise de desempenho ambiental de uma inovação, adotou-se um conceito de vulnerabilidade baseado em Adger (2006).

Entende-se por vulnerabilidade ambiental a susceptibilidade de um sistema à degradação ambiental, considerando-se:

- A exposição do sistema às pressões ambientais típicas de atividades agroindustriais, avaliada por indicadores que mostram a pressão antropogênica exercida no sistema.
- A sensibilidade do sistema às pressões exercidas, avaliada pelo uso de indicadores que mostram as características do meio físico e biótico próprias de uma região (tipo de solo, clima, vegetação etc.) que já ocorrem antes de qualquer perturbação e que interagem com as pressões.
- A capacidade de resposta do meio, avaliada pela adoção de ações de conservação ou preservação ambiental que mitigam ou reduzem os possíveis efeitos das pressões exercidas.

Quanto maior a exposição a pressões, maior a sensibilidade e menor a capacidade de resposta de um sistema, tanto maior a sua vulnerabilidade ambiental.

Sistema Ambiental

O espaço delimitado por uma bacia hidrográfica foi utilizado como o sistema ambiental de análise da vulnerabilidade às pressões exercidas pelas inovações tecnológicas. Bacias hidrográficas já são objeto de estudo em avaliações de impactos ambientais baseadas na Resolução CONAMA Nº 1, de 1986. As bacias hidrográficas objeto de estudo são aquelas classificadas como estaduais e delimitadas pelas agências estaduais gestoras de recursos hídricos e pela Agência Nacional de Águas (ANA), para todos os estados brasileiros. Nessas bacias já existe uma base de dados sobre aspectos relacionados aos recursos hídricos.

Objetivo e Usuários do Método

O objetivo da análise em questão é a avaliação da vulnerabilidade de um sistema à degradação ambiental proveniente de pressões associadas à adoção de inovações agroindustriais. O termo degradação ambiental refere-se às seguintes questões ambientais: perda da biodiversidade, erosão, compactação, salinização e sodificação do solo, acidificação do solo, contaminação ambiental por agrotóxicos e por resíduos sólidos, desertificação, escassez hídrica e poluição hídrica.

O tomador de decisão e usuário do sistema de avaliação proposto é a equipe de PD&I que se beneficia da análise de vulnerabilidade dos diferentes ambientes receptores de uma tecnologia, ao propor e difundir inovações agroindustriais.

Sistema de Indicadores

A análise de vulnerabilidade de uma bacia hidrográfica é realizada por um conjunto de 17 indicadores, organizados em três critérios, gerando um índice que expressa a vulnerabilidade de uma bacia (Figura 2).

De acordo com o conceito de vulnerabilidade adotado, os critérios utilizados são: exposição de um sistema a pressões, sua sensibilidade e capacidade adaptativa. Os indicadores de exposição (Atividade agropecuária, Atividade industrial, Geração de lixo per capita, Geração de esgoto per capita e Demanda hídrica per capita), sensibilidade (Áreas prioritárias para conservação, Aptidão agrícola, Intensidade pluviométrica, Qualidade da água de irrigação e Aridez do clima) e capacidade de resposta (Área em unidade de conservação, Conservação do solo, Acesso à água tratada, Acesso à coleta e ao destino adequado do lixo, Acesso a esgotamento sanitário, Disponibilidade hídrica per capita e Índice de Desenvolvimento Humano-Municipal – IDH-M) foram escolhidos, considerando-se as questões ambientais mencionadas. Também, foi considerada a disponibilidade de bases de dados nacionais de livre acesso, como as do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e da ANA.

A descrição de cada indicador proposto por critério, com o método de cálculo e de normalização utilizado, a justificativa da sua escolha e a base de dados onde as informações podem ser coletadas é apresentado no Apêndice A.

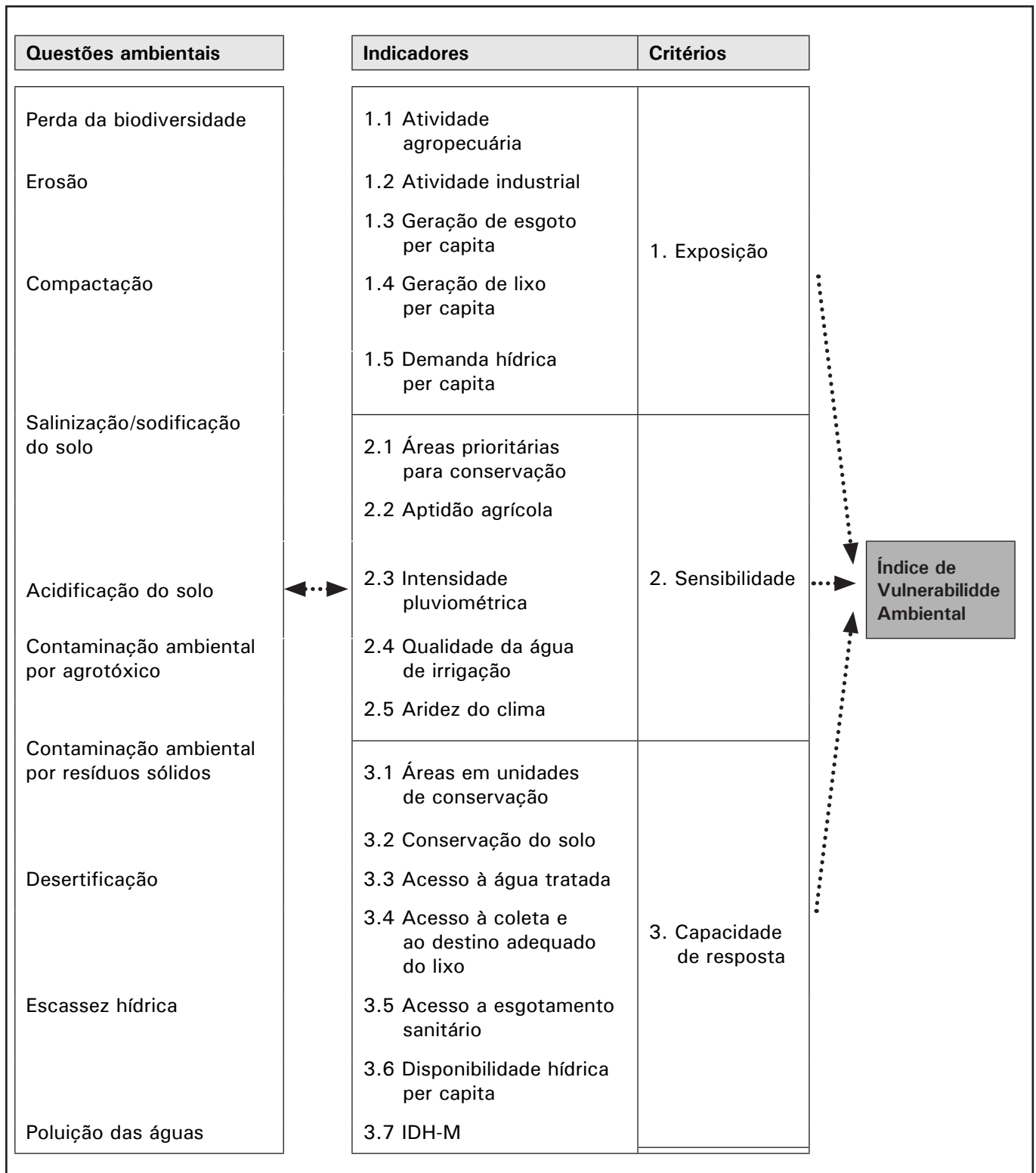


Figura 2. Estrutura de organização dos indicadores utilizados no método Vulneragri.

Regra para Normalização dos Indicadores

Cada indicador de vulnerabilidade é normalizado, utilizando-se uma transformação linear, em uma escala que varia de 1 a 2 (Tabela 2). A normalização dos indicadores nessa escala única é necessária para que valores em diferentes unidades de medida possam ser agregados.

Tabela 2. Níveis de vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	Valor
Muito baixa	1 – 1,2
Baixa	1,2 – 1,4
Média	1,4 – 1,6
Alta	1,6 – 1,8
Muito alta	1,8 – 2

São utilizados dois tipos de normalização: um para indicadores quantitativos e outro para indicadores qualitativos. Indicadores quantitativos podem ser de dois tipos:

– “Quanto maior seu valor, maior a vulnerabilidade ambiental da bacia”. Os indicadores relacionados ao critério “exposição” e os indicadores “Intensidade pluviométrica” e “Qualidade da água de irrigação (salinidade)”, relacionados ao critério “sensibilidade”, são desse tipo. A Equação 1a é utilizada para normalização desse tipo de indicadores.

$$Valor_i = \left(\frac{Indicador_i - Valor_{min}}{Valor_{max} - Valor_{min}} \right) + 1 \quad (1a)$$

– “Quanto menor seu valor, maior a vulnerabilidade ambiental da bacia”. Os indicadores relacionados ao critério “capacidade de resposta”, com exceção de “áreas em unidades de conservação” que é qualitativo, integram esse tipo. A Equação 1b é utilizada para normalização desse tipo de indicadores.

$$Valor_i = \left(\frac{Valor_{max} - Indicador_i}{Valor_{max} - Valor_{min}} \right) + 1 \quad (1b)$$

Onde,

i = um indicador dentre os utilizados no método (Figura 2);

$indicador_i$ = valor original assumido por um $indicador_i$ de vulnerabilidade;

$Valor_{max}$ = valor máximo possível de ser alcançado pelo $indicador_i$ de vulnerabilidade;

$Valor_{min}$ = valor mínimo possível de ser alcançado pelo $indicador_i$ de vulnerabilidade;

$Valor_i$ = valor normalizado do $indicador_i$.

Para os indicadores qualitativos, é atribuído um valor de vulnerabilidade na escala de 1 a 2 para cada uma das possíveis respostas apresentadas pelo indicador, conforme a compreensão do que representa a maior ou menor vulnerabilidade. Os indicadores qualitativos do método são “áreas prioritárias para conservação”, “aptidão agrícola”, “qualidade da água de irrigação (sodicidade)”, “aridez do clima” e “áreas em unidades de conservação”.

Os indicadores em uma bacia hidrográfica, usualmente, apresentam valores diferentes em diferentes municípios ou áreas da bacia. Optou-se por considerar as variações dos valores de um dado indicador no cálculo da vulnerabilidade final desse indicador, utilizando-se a Equação 2, que pondera o percentual ocupado por cada área de uma bacia, pelo valor de vulnerabilidade atribuído àquela área.

$$Vulnerabilidade_Indicador_i = \sum_{j=1}^n Valor_j * peso_j \quad (2)$$

Onde,

j = uma das áreas que integram a bacia hidrográfica em estudo (ex: área de um município, de uma classe climática ou de um grupo de aptidão agrícola);

$Valor_j$ = valor normalizado da vulnerabilidade de um *indicador_i* em uma área j da bacia;

$peso_j$ = percentual ocupado por uma área j na bacia ao qual é atribuído um valor para um *indicador_i* de vulnerabilidade;

$Vulnerabilidade_Indicador_i$ = valor final da vulnerabilidade de um *indicador_i* na bacia.

Regra para Agregação dos Indicadores em Critérios

Os indicadores de vulnerabilidade são agregados, inicialmente, nos critérios exposição, sensibilidade e capacidade de resposta, de forma linear, pela média ponderada dos indicadores pertencentes a cada categoria (Equação 3). Considera-se que cada indicador tenha o mesmo peso na composição do critério ao qual pertença.

$$Critério_c = \sum_{i=1}^n peso_i * Vulnerabilidade_Indicador_i \quad (3)$$

Onde,

c = critério em análise. Assume valores 1 (exposição), 2 (sensibilidade) ou 3 (capacidade de resposta);

$peso_i$ = peso do *indicador_i* no *critério_c*;

$Vulnerabilidade_Indicador_i$ = valor normalizado do *indicador_i* de vulnerabilidade ambiental em uma bacia;

$Critério_c$ = valor de vulnerabilidade do critério c (exposição, sensibilidade ou capacidade de resposta).

Regra para Agregação dos Critérios no Índice Final

O índice final de vulnerabilidade é composto pela média ponderada dos valores atribuídos aos critérios (Equação 4) pelo peso de cada um. Considera-se que cada critério tenha o mesmo peso na avaliação, uma vez que são igualmente importantes no estudo da vulnerabilidade de um sistema à degradação ambiental.

$$IVA = \sum_{i=1}^3 peso_c * Critério_c \quad (4)$$

Onde,

$peso_c$ = peso do critério na formação do índice;

$Critério_c$ = valores do *critério_c* (1-exposição, 2-sensibilidade e 3-capacidade de resposta);

IVA = índice de vulnerabilidade ambiental de uma bacia.

Aplicação do Método Vulneragri

O método Vulneragri foi aplicado no estudo de quatro bacias hidrográficas: Metropolitana (CE), Litoral (CE), Baixo Mundaú (AL) e Parnaíba (CE). A Figura 3 mostra a localização das bacias no Nordeste brasileiro.



Figura 3. Localização das bacias hidrográficas em estudo no Nordeste brasileiro.

As informações necessárias à valoração dos indicadores de vulnerabilidade foram obtidas das bases de dados nacionais relacionadas na Tabela 3.

Tabela 3. Fontes de informação dos indicadores de vulnerabilidade ambiental.

Informação	Fonte
Perímetro das bacias hidrográficas nacionais	Base de dados da Agência Nacional de Águas – ANA (AGÊNCIA..., 2006)
Atividade agropecuária	Censo Agropecuário (IBGE, 1996) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Atividade industrial	Cadastro Central de Empresas (IBGE, 2005)
Geração de lixo per capita	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Geração de esgoto per capita	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Demanda hídrica per capita	Base de dados da Agência Nacional de Águas – ANA (AGÊNCIA..., 2006), Consolidação da Política e dos Programas de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (CEARÁ, 2004) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Áreas prioritárias para conservação	Mapa de Áreas Prioritárias para Conservação (BRASIL, 2006)
Aptidão agrícola	Estudos de Aptidão Agrícola – Ceará e Alagoas (MA, 1979)
Intensidade pluviométrica	Dados pluviométricos diários de postos de monitoramento da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME (FUNDAÇÃO..., 2008) e Rede Hidroclimática do Nordeste (SUDENE, 2008)
Qualidade da água de irrigação	Dados georreferenciados de monitoramento da qualidade da água no Ceará (COMPANHIA..., 2008) e em Alagoas (AGÊNCIA..., 2007)
Aridez do clima	Mapa de Áreas Susceptíveis à Desertificação no Semiárido (BRASIL, 2004)
Unidade de conservação	Mapa de Áreas Protegidas (IBGE, 2008) e Unidades de Conservação no Ceará (CEARÁ, 2008)
Conservação do solo	Perfil dos Municípios Brasileiros (IBGE, 2002)
Acesso a coleta e destino do lixo	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Acesso rede de abastecimento de água	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Acesso a esgotamento sanitário	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
Disponibilidade Hídrica per capita	Base de dados da Agência Nacional de Águas – ANA (AGÊNCIA..., 2006), Consolidação da Política e dos Programas de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (CEARÁ, 2004) e Censo Demográfico (IBGE, 2000b)
IDH-M	Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (PROGRAMA..., 2003)

Análise de Vulnerabilidade da Bacia Metropolitana

A bacia Metropolitana ocupa uma área de 15.053,46 km² (AGÊNCIA..., 2006) no Estado do Ceará e abriga uma população de 3.361.532 habitantes (IBGE, 2000b), sendo a sexta bacia mais populosa do Brasil. Nela estão inseridos 41 municípios, 32 dos quais com sede na bacia. Os principais rios da bacia Metropolitana são Cocó, Coaçu, Pirangi, Ceará, Maranguape, São Gonçalo, Pacoti e Choró, formando um conjunto independente de sub-bacias que foram agrupadas para fins de planejamento estadual dos recursos hídricos (CEARÁ, 2004).

O IVA da bacia Metropolitana é de 1,57 (Tabela 4), valor considerado médio na escala de 1 a 2 utilizada (Tabela 1). Os critérios que mais contribuíram para esse resultado foram a sensibilidade e a capacidade de resposta da população local.

No que se refere ao critério “exposição”, os indicadores que apresentaram maior vulnerabilidade foram “geração de lixo e de esgoto per capita”. A geração de lixo per capita é, em média, 2,03 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, com os municípios de Choró (13,81 kg.hab⁻¹.dia⁻¹) e Ocara (7,15 kg.hab⁻¹.dia⁻¹) apresentando a maior geração. Essa geração é alta quando comparada aos maiores valores encontrados para os municípios brasileiros que é de 1,5 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ (SISTEMA..., 2006).

A geração de esgoto per capita é em média 102 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, valor acima do valor máximo encontrado para os municípios brasileiros que é de 100 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, de acordo com o Sistema (2005). Dos oito municípios com informação sobre volume de esgoto coletado e população atendida na bacia, Aquiraz e Aracoiaba apresentaram maior geração de esgoto per capita, com 317,83 e 270,77 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, respectivamente.

A alta (1,61) sensibilidade da bacia deve-se principalmente aos indicadores “intensidade pluviométrica”, “aridez do clima” e “aptidão agrícola”. Foram encontradas intensidades pluviométricas que variam entre 306,75 e 518,24 mm/mês para o período de 1974 a 2007, valores próximos a intensidade máxima considerada que é de 525 mm/mês. O percentual da área onde predomina o clima semi-árido é de 40,21% (6.053,46 km²) da bacia. As classes de aptidão 5 e 6, mais vulneráveis à ocupação agrícola, ocupam 8.369 km² (56,99% da área da bacia).

A baixa capacidade de resposta, com conseqüente alta vulnerabilidade desse critério (1,73), deve-se, principalmente, a pouca disponibilidade hídrica per capita, ao baixo percentual de áreas em unidades protegidas e ao baixo acesso da população a esgotamento sanitário (Tabela 4). A disponibilidade hídrica per capita é crítica na bacia, que disponibiliza 165 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, valor bem inferior a média nacional (33.376 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, de acordo com valores da (AGÊNCIA..., 2005). Também, uma área pequena, inferior a 2% da bacia (215,76 km²), encontra-se protegida em unidades de conservação. O acesso da população a esgotamento sanitário (rede geral e fossa séptica) abrange, em média, 22,51% da população (756.660 hab), com maior acesso no Município de Itaitinga (80,36%) e menor, em Chorozinho (0,12%).

Tabela 4. Análise de vulnerabilidade da bacia Metropolitana.

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
1. Exposição	1.1 Atividade agropecuária	% (percentual da área da bacia com agropecuária)	37,57%	1,33	1,35	1,57
	1.2 Atividade industrial	empregados.km ² (total de pessoal ocupado nas indústrias extrativas e de transformação por km ²)	21,46	1,09		
	1.3 Geração de esgoto per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	102,14	1,48		
	1.4 Geração de lixo per capita	kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	2,03	1,78		
	1.5 Demanda hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	122,34	1,06		
2. Sensibilidade	2.1 Áreas prioritárias para conservação	% da área em cada classe de prioridade na bacia	1 - Extremamente alta: 18,62%; 2 - Muito alta: 16,24%; 3 - Alta: 2,17%; Insuficientemente conhecida: 9,88%; Área não considerada prioritária: 53,08%	1,47	1,61	
	2.2 Aptidão agrícola	% da área em cada grupo de aptidão agrícola	Grupo 1: 0%; Grupo 2: 15,96%; Grupo 3: 18,98%; Grupo 4: 8,07%; Grupo 5: 48,93%; Grupo 6: 8,06%	1,63		
	2.3 Intensidade pluviométrica	mm/mês	408,632	1,80		
	2.4 Qualidade da água de irrigação	Salinidade: CE (dS/m); Sodicidade: CE (dS/m) e RAS	CE: 0,69 dS/m; RAS: 3,14	1,54		
	2.5 Aridez do clima	% da área por classe climática	Áreas semiáridas: 40,21%; Áreas subúmidas secas: 33,67%; Áreas do entorno de regiões semiáridas: 26,12%; Áreas úmidas ou subúmidas: 0%	1,63		

(Continua...)

Tabela 4. (Continuação).

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
3. Capacidade de Resposta	3.1 Áreas em unidades de conservação	% da área da bacia em cada categoria de unidade de conservação	Proteção integral: 0,15%; Uso sustentável: 1,28%; Sem proteção: 98,57%	1,99	1,73	
	3.2 Conservação do solo	% do número de ações de conservação do solo praticadas (ações: combate ou controle da salinização do solo, combate e/ou controle a processos erosivos, fiscalização ou controle do uso de fertilizantes e agrotóxicos, incentivo à promoção e práticas de agricultura orgânica e recuperação de áreas degradadas)	19%	1,78		
	3.3 Acesso à rede de abastecimento de água	Acesso: % da população com abastecimento de água; Tratamento: % do volume coletado que é tratado	Acesso: 33,16%; Tratamento: 81,90%	1,57		
	3.4 Acesso à coleta e ao destino adequado do lixo	Acesso: % da população com acesso à coleta de lixo; Tratamento: % do lixo coletado que é adequadamente disposto	Acesso: 45,19%; Tratamento: 34,38%	1,65		
	3.5 Acesso a esgotamento sanitário	% da população com acesso a esgotamento sanitário	22,51%	1,80		
	3.6 Disponibilidade hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	165,39	2,00		
	3.7 IDH-M		0,650	1,34		

Análise de Vulnerabilidade da Bacia do Litoral (CE)

A bacia do Litoral ocupa uma área de 8.718,29 km² no Estado do Ceará, abrigando uma população de 285.957 habitantes. Estão nos limites da bacia, as sedes de nove municípios.

Essa bacia apresenta IVA de 1,55 (Tabela 5), valor considerado médio na escala de 1 a 2 utilizada. A alta (1,78) vulnerabilidade do critério “capacidade de resposta” da população local foi o que mais contribuiu para esse resultado.

O critério exposição obteve índice de vulnerabilidade baixo (1,29), devido à baixa atividade industrial e demanda hídrica per capita na bacia. Entretanto, merece destaque a alta geração de lixo per capita, que é, em média, 4,49 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ (IBGE, 2000a), valor considerado alto quando comparado com a situação nacional. De acordo com informações sobre a geração de lixo per capita para algumas sedes municipais brasileiras do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (SISTEMA, 2006), a geração de lixo per capita varia entre 0,1 (valor mínimo) e 1,5 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ (valor máximo). Os municípios de Tururu e Mirafima apresentaram a maior geração, 15,84 e 6,59 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, respectivamente.

A bacia apresenta sensibilidade média (1,59) às pressões exercidas pela população local. A elevada intensidade pluviométrica (em média 439,838 mm/mês) e a aridez do clima (23,62% da área com clima semiárido e 76,13%, com clima subúmido seco) foram determinantes na pontuação desse critério.

A baixa capacidade de resposta da população local frente às pressões ambientais se deve, principalmente, à escassez de áreas protegidas em unidades de conservação e a pequena disponibilidade hídrica. A bacia do Litoral apresenta 99,75% da sua área sem proteção em unidades de conservação. A disponibilidade hídrica é de 88,23 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, valor baixo quando se considera que a média nacional é de 33.376 m³.hab⁻¹.ano⁻¹ (AGÊNCIA..., 2005).

Tabela 5. Análise de vulnerabilidade da bacia do Litoral.

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
1. Exposição	1.1 Atividade agropecuária	% (percentual da área da bacia com agropecuária)	35,80%	1,32	1,29	1,55
	1.2 Atividade industrial	empregados.km ² (total de pessoal ocupado nas indústrias extrativas e de transformação por km ²)	2,02	1,01		
	1.3 Geração de esgoto per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	19,56	1,13		
	1.4 Geração de lixo per capita	kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	4,49	1,97		
	1.5 Demanda hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	41,36	1,01		
2. Sensibilidade	2.1 Áreas prioritárias para conservação	% da área em cada classe de prioridade na bacia	1 - Extremamente alta: 1,45%; 2 - Muito alta: 18,24%; 3 - Alta: 6,09%; Insuficientemente conhecida: 25,28%; Área não considerada prioritária: 48,94%	1,40	1,59	
	2.2 Aptidão agrícola	% da área em cada grupo de aptidão agrícola	Grupo 1: 0%; Grupo 2: 33,77%; Grupo 3: 8,29%; Grupo 4: 1,76%; Grupo 5: 46,29%; Grupo 6: 9,89%	1,58		
	2.3 Intensidade pluviométrica	mm/mês	439,838	1,80		
	2.4 Qualidade da água de irrigação	Salinidade: CE (dS/m); Sodicidade: CE (dS/m) e RAS	CE: 0,38 dS/m; RAS: 2,52	1,50		
	2.5 Aridez do clima	% da área por classe climática	Áreas semiáridas: 23,62%; Áreas subúmidas secas: 76,13%; Áreas do entorno de regiões semiáridas: 0,25%; Áreas úmidas ou subúmidas: 0%	1,63		

(Continua...)

Tabela 5. (Continuação).

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
3. Capacidade de Resposta	3.1 Áreas em unidades de conservação	% da área da bacia em cada categoria de unidade de conservação	Proteção integral: 0%; Uso sustentável: 0,25%; Sem proteção: 99,75%	2,00	1,78	
	3.2 Conservação do solo	% do número de ações de conservação do solo praticadas (ações: combate ou controle da salinização do solo, combate e/ou controle a processos erosivos, fiscalização ou controle do uso de fertilizantes e agrotóxicos, incentivo à promoção e práticas de agricultura orgânica e recuperação de áreas degradadas)	8,9%	1,88		
	3.3 Acesso à rede de abastecimento de água	Acesso: % da população com abastecimento de água; Tratamento: % do volume coletado que é tratado	Acesso: 35,83%; Tratamento: 93,71%	1,58		
	3.4 Acesso à coleta e ao destino adequado do lixo	Acesso: % da população com acesso à coleta de lixo; Tratamento: % do lixo coletado que é adequadamente disposto	Acesso: 28,89%; Tratamento: 60,91%	1,68		
	3.5 Acesso a esgotamento sanitário	% da população com acesso a esgotamento sanitário	5,21%	1,93		
	3.6 Disponibilidade hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	88,23	2,00		
	3.7 IDH-M		0,623	1,38		

Análise de Vulnerabilidade da Bacia do Baixo Mundaú

A bacia do Baixo Mundaú ocupa uma área de 13.039,28 km² (AGÊNCIA..., 2006) dos Estados de Pernambuco e Alagoas, sendo a maior área pertencente a Alagoas. Essa bacia abriga uma população de 1.850.065 habitantes (IBGE, 2000b), abrigando as sedes de 53 municípios.

O IVA da bacia do Baixo Mundaú é de 1,52 (Tabela 6), na escala de análise utilizada (varia de 1 a 2), valor considerado médio. A capacidade de resposta baixa nessa bacia é o critério que mais contribui para esse valor.

A bacia do Baixo Mundaú está exposta a pressões ambientais advindas principalmente da elevada atividade agropecuária, que ocupa 61,42% da área da bacia. A geração de lixo per capita também é elevada (1,35 kg.hab⁻¹.dia⁻¹), considerando que segundo levantamento do (SISTEMA..., 2006), essa geração é de 1,5 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, nos municípios com maior geração, e de 0,1 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, nos de menor geração. A demanda hídrica per capita de 908,5 m³.hab⁻¹.ano⁻¹ é outro fator de pressão, considerando que esse indicador varia entre 30 (valor mínimo) e 1.500 m³.hab⁻¹.ano⁻¹ (valor máximo), de acordo com valores observados por Rebouças (2002a) para os estados brasileiros.

A bacia apresenta vulnerabilidade baixa de 1,34 no critério "sensibilidade". O indicador com maior vulnerabilidade nesse critério é a "intensidade pluviométrica", variando entre 289 e 1.047 mm/mês (valor médio de 460,6 mm/mês), no período de 1963 a 1973, considerando dados de 12 postos de monitoramento (SUDENE, 2008). Segundo classificação utilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CREPANI et al., 2004), intensidades pluviométricas no Brasil superiores a 525 mm/mês são consideradas elevadas.

A capacidade de resposta da população é baixa na bacia, devido, principalmente, à pequena área protegida em unidades de conservação (98,6% da área sem proteção) e à baixa disponibilidade hídrica per capita ($575,8 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, de acordo com (AGÊNCIA..., 2006). Merece destaque também o baixo acesso da população a sistemas de esgotamento sanitário (19,97% da população com acesso).

Tabela 6. Análise de vulnerabilidade do Baixo Mundaú.

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
1. Exposição	1.1 Atividade agropecuária	% (percentual da área da bacia com agropecuária)	61,42%	1,65	1,48	1,52
	1.2 Atividade industrial	empregados.km ² (total de pessoal ocupado nas indústrias extrativas e de transformação por km ²)	0,11	1,00		
	1.3 Geração de esgoto per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	118,21	1,42		
	1.4 Geração de lixo per capita	kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	1,35	1,71		
	1.5 Demanda hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	908,49	1,60		
2. Sensibilidade	2.1 Áreas prioritárias para conservação	% da área em cada classe de prioridade na bacia	1 - Extremamente alta: 19,61%; 2 - Muito alta: 2,24%; 3 - Alta: 1,67%; Insuficientemente conhecida: 14,27%; Área não considerada prioritária: 62,21%	1,41	1,34	
	2.2 Aptidão agrícola	% da área em cada grupo de aptidão agrícola	Grupo 1: 1,73%; Grupo 2: 80,64%; Grupo 3: 3,82%; Grupo 4: 4,61%; Grupo 5: 7,54%; Grupo 6: 1,66%	1,28		
	2.3 Intensidade pluviométrica	mm/mês	460,650	1,78		
	2.4 Qualidade da água de irrigação	Salinidade: CE (dS/m); Sodicidade: CE (dS/m) e RAS	CE: 0,495 dS/m	1,14		
	2.5 Aridez do clima	% da área por classe climática	Áreas semiáridas: 1,92%; Áreas subúmidas secas: 8,36%; Áreas do entorno de regiões semiáridas: 14,26%; Áreas úmidas ou subúmidas: 75,46%	1,12		

(Continua...)

Tabela 6. (Continuação).

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
3. Capacidade de Resposta	3.1 Áreas em unidades de conservação	% da área da bacia em cada categoria de unidade de conservação	Proteção integral: 0,67%; Uso sustentável: 0,74%; Sem proteção: 98,59%	1,99	1,74	
	3.2 Conservação do solo	% do número de ações de conservação do solo praticadas (ações: combate ou controle da salinização do solo, combate e/ou controle a processos erosivos, fiscalização ou controle do uso de fertilizantes e agrotóxicos, incentivo à promoção e práticas de agricultura orgânica e recuperação de áreas degradadas)	7%	1,92		
	3.3 Acesso à rede de abastecimento de água	Acesso: % da população com abastecimento de água; Tratamento: % do volume coletado que é tratado	Acesso: 51,41%; Tratamento: 57,30%	1,45		
	3.4 Acesso à coleta e ao destino adequado do lixo	Acesso: % da população com acesso à coleta de lixo; Tratamento: % do lixo coletado que é adequadamente disposto	Acesso: 56,57%; Tratamento: 6%	1,66		
	3.5 Acesso a esgotamento sanitário	% da população com acesso a esgotamento sanitário	19,97%	1,79		
	3.6 Disponibilidade hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	575,81	1,99		
	3.7 IDH-M		0,596	1,40		

Análise de Vulnerabilidade da Bacia do Parnaíba

A bacia do Parnaíba integra as bacias dos rios Poti e Longa, que abrangem os estados do Ceará e do Piauí, sendo considerada a porção contida no Estado do Ceará delimitada pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (CEARÁ, 2004). A bacia ocupa uma área de 16.806,43 km² (AGÊNCIA..., 2006) e possui 329.103 habitantes (IBGE, 2000b), abrigando as sedes municipais de 13 municípios.

Essa bacia apresenta IVA mediano de 1,55, na escala adotada de 1 a 2 (Tabela 7). Contribuem para esse valor de vulnerabilidade, a alta sensibilidade e a baixa capacidade de resposta da bacia às pressões ambientais.

O critério "exposição" apresenta índice de vulnerabilidade baixo (1,24), devido as baixas pressões exercidas pelas atividades agropecuária e industrial e baixa demanda hídrica per capita encontrada na bacia. Destaca-se, entretanto, a alta geração de lixo per capita que nessa bacia é em média 2,92 kg.hab⁻¹.dia⁻¹. Nos municípios de Ubajara e Carnaubal essa geração chegou a 8,2 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ e 5 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, respectivamente.

A sensibilidade da bacia às pressões ambientais é alta (1,68). Ela decorre da alta intensidade pluviométrica (em média 468,839 mm/mês) e aridez do clima, com 77,26% da área da bacia em região semi-árida.

A capacidade de resposta da poluição às pressões ambientais é baixa, implicando em um índice de vulnerabilidade alto, de 1,73. Destacam-se nesse critério os indicadores “áreas em unidades de conservação” e “disponibilidade hídrica per capita”. A bacia do Parnaíba possui pequenas áreas protegidas em unidades de conservação, com 99,31% da sua área sem proteção. A disponibilidade hídrica per capita, de 621,90 m³.hab⁻¹.ano⁻¹, é pequena, considerando a média nacional (AGÊNCIA..., 2005).

Tabela 7. Análise de vulnerabilidade da bacia do Parnaíba.

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental		
				Indicador	Critério	IVA
1. Exposição	1.1 Atividade agropecuária	% (percentual da área da bacia com agropecuária)	2,87%	1,06	1,24	1,55
	1.2 Atividade industrial	empregados.km ² (total de pessoal ocupado nas indústrias extrativas e de transformação por km ²)	0,10	1,00		
	1.3 Geração de esgoto per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	22,50	1,19		
	1.4 Geração de lixo per capita	kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	2,92	1,90		
	1.5 Demanda hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	120,45	1,06		
2. Sensibilidade	2.1 Áreas prioritárias para conservação	% da área em cada classe de prioridade na bacia	1 - Extremamente alta: 25,62%; 2 - Muito alta: 12,83%; 3 - Alta: 0%; Insuficientemente conhecida: 21,19%; Área não considerada prioritária: 40,36%	1,52	1,68	
	2.2 Aptidão agrícola	% da área em cada grupo de aptidão agrícola	Grupo 1: 0%; Grupo 2: 18,74%; Grupo 3: 11,90%; Grupo 4: 0%; Grupo 5: 43,78%; Grupo 6: 25,59%	1,69		
	2.3 Intensidade pluviométrica	mm/mês	468,839	1,87		
	2.4 Qualidade da água de irrigação	Salinidade: CE (dS/m); Sodicidade: CE (dS/m) e RAS	CE: 0,47 dS/m; RAS: 2,69	1,61		
	2.5 Aridez do clima	% da área por classe climática	Áreas semiáridas: 77,26%; Áreas subúmidas secas: 7,71%; Áreas do entorno de regiões semiáridas: 15,03%; Áreas úmidas ou subúmidas: 0%	1,72		

(Continua...)

Tabela 7. (Continuação).

Critério	Indicadores	Unidade de medida	Valor médio do indicador	Vulnerabilidade ambiental	
				Indicador	Critério IVA
3. Capacidade de Resposta	3.1 Áreas em unidades de conservação	% da área da bacia em cada categoria de unidade de conservação	Proteção integral: 0,37%; Uso sustentável: 0,31%; Sem proteção: 99,31%	1,99	1,73
	3.2 Conservação do solo	% do número de ações de conservação do solo praticadas (ações: combate ou controle da salinização do solo, combate e/ou controle a processos erosivos, fiscalização ou controle do uso de fertilizantes e agrotóxicos, incentivo à promoção e práticas de agricultura orgânica e recuperação de áreas degradadas)	11%	1,89	
	3.3 Acesso à rede de abastecimento de água	Acesso: % da população com abastecimento de água; Tratamento: % do volume coletado que é tratado	Acesso: 37,43%; Tratamento: 91,65%	1,41	
	3.4 Acesso à coleta e ao destino adequado do lixo	Acesso: % da população com acesso à coleta de lixo; Tratamento: % do lixo coletado que é adequadamente disposto	Acesso: 26,09%; Tratamento: 84,96%	1,58	
	3.5 Acesso a esgotamento sanitário	% da população com acesso a esgotamento sanitário	5,99%	1,86	
	3.6 Disponibilidade hídrica per capita	m ³ .hab ⁻¹ .ano ⁻¹	621,90	1,99	
	3.7 IDH-M		0,624	1,36	

Considerações Finais

Em uma avaliação de vulnerabilidade é preciso definir o que se entende por este termo, o objetivo da análise, o escopo do sistema ambiental a ser avaliado, os processos ou questões ambientais que serão foco da análise e a sistemática de estruturação de indicadores. Embora haja muitas interpretações sobre vulnerabilidade e variados tipos de sistemas ambientais aos quais uma análise pode ser aplicada, propõe-se para os estudos ambientais de inovações agroindustriais, que a vulnerabilidade seja avaliada em uma bacia hidrográfica, considerando-se a exposição de um sistema a pressões antropogênicas, a sensibilidade do meio físico e biótico às pressões exercidas e a capacidade de resposta do sistema frente à ocorrência de um processo de degradação ambiental. Processos de degradação do solo, das águas superficiais e/ou da biota interagem em uma bacia hidrográfica modificando a qualidade de vida das pessoas residentes nesse sistema, sendo a bacia o escopo de avaliações de impacto ambiental pressuposto pela legislação brasileira. A compreensão dos fatores que já exercem pressão sobre uma bacia, de sua sensibilidade e da sua capacidade de resposta pode contribuir com o desenvolvimento de tecnologias agroindustriais menos impactantes para esses ambientes em que estão ou estarão inseridas, por apontar fatores de pressão da tecnologia que deveriam ser minimizados ou evitados.

O método de avaliação da vulnerabilidade de bacias à degradação ambiental proposto (Vulneragri) utiliza indicadores agrupados em critérios e no índice final (IVA). Esse índice é calculado a partir de indicadores que requerem informações disponíveis em bases de dados brasileiras de livre acesso, como IBGE e ANA. O método não pretende avaliar a real ocorrência de degradação ambiental em uma bacia, mas sua susceptibilidade ou potencial de degradação relacionada a determinadas questões ambientais de interesse da agroindústria.

Com a aplicação do método a quatro bacias hidrográficas localizadas no Nordeste brasileiro, observou-se que os IVAs dessas bacias são similares, provavelmente pelo fato de se localizarem na mesma região, onde algumas características do meio são comuns, como ocorrência de secas e de solos de baixa aptidão agrícola, as pressões humanas medianas e a baixa capacidade de resposta social frente aos problemas ambientais em estudo. Assim, é importante a aplicação do método em bacias de outras regiões brasileiras para melhor compreensão do nível de sensibilidade do método e realização de ajustes nas regras para normalização e agregação dos indicadores propostos no método.

Referências

ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. Indicadores de processos de desertificação. In: ROMEIRO, A. R. (Org.). **Avaliação e contabilização de impactos ambientais**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2004. p. 123-142.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cadernos de recursos hídricos**: disponibilidades e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 11 abr. 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Base de dados das bacias hidrográficas brasileiras**. Brasília, DF, 2006. 1 CD-ROM.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Dados de condutividade elétrica de postos de monitoramento localizados na Bacia do Mundaú, 2007**. Brasília, DF, 2006. Planilha eletrônica Excel.

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, p. 268-281, 2006.

ANDREI, E. (Org.). **Compêndio dos defensivos agrícolas**: guia prático de produtos fitossanitários para produtos agrícolas. São Paulo: Andrei, 1999. 672 p.

ANJOS, L. H. C.; VAN RAIJ, B. Indicadores de processos de degradação de solos. In: ROMEIRO, A. R. (Org.). **Avaliação e contabilização de impactos ambientais**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2004. p. 87-111.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991.

BARRETO, F. M. S. **Contaminação da água subterrânea por pesticidas e nitrato no Município de Tianguá, Ceará**. 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza.

BRAGA, B; HESPANHOL, I; CONEJO, J. G. L; BARROS, M. T. L; SPENCER, M; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice-Hall, 2002.

BRASIL. Lei Federal Nº 9.985, de 18/07/2000. **Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm>. Acesso em: 2 out. 2008.

BRENTROP, F.; KUSTERS, J.; KUHLMANN, H.; LAMMEL, J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. **European Journal of Agronomy**, v. 20, p. 247-264, 2004.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.). **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES/RiMa, 2003.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará. **Consolidação da política e dos programas de recursos hídricos do Estado do Ceará**. Fortaleza: SRH, 2004.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **Unidades de conservação**. 2008. Disponível em: <<http://www.semace.ce.gov.br/biblioteca/unidades/>>. Acesso em: 02 fev. 2008.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ. **Dados de salinidade e sodicidade em pontos de monitoramento da qualidade da água no Ceará (2006 – 2007)**, 2007. Planilha Eletrônica: Excel.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 1, de 17/02/1986**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res94/res0194.html>>. Acesso em: 12 mar. 2007.

- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 357, de 17/03/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2007.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; PALMEIRA, A. F. **Intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo**. São José dos Campos: Inpe, 2004.
- D'ALMEIDA, L. O.; VILHENA, A. (Coord.). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.
- DULLEY, R. D. Noção de natureza, ambiente, meio ambiente, recursos ambientais e recursos naturais. **Agricultura em São Paulo**, v. 51, n. 2, p. 15-26, 2004.
- EHLERS, E. **Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 1999.
- FAO/WHO. **Codex general standard for food additives (GSFA) online database**. Disponível em: <<http://www.codexalimentarius.net/gsaonline/index.html?lang=en>>. Acesso em: 23 maio 2008.
- FIGUEIRÊDO, M. C. B. **Método de avaliação do desempenho ambiental de inovações tecnológicas agroindustriais, considerando o conceito de ciclo de vida e a vulnerabilidade ambiental: Ambitec-Ciclo de Vida**. Fortaleza: UFC, 2008. 424 fl. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Monitoramento hidroambiental: dados pluviométricos (1974 a 2007)**. Disponível em: <<http://www.funcceme.br/DEPAM/index.htm>>. Acesso em: 11 jan. 2008.
- GALLOPIN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. **Global Environmental Change**, v. 16, n.3, p. 293-303, 2006.
- GHEYI, H. R. Problemas de salinidade na agricultura irrigada. In: OLIVEIRA, T. S.; ASSIS JR., R. N.; ROMERO, R. E.; SILVA, J. R. C. **Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido**. Fortaleza: UFC, 2000. p. 329-346.
- GHEYI, H. R.; QUEIROZ, J. E.; MEDEIROS, J. F. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997.
- GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. **Ecologia industrial: conceitos, ferramentas e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- IBGE. **Censo Agropecuário**, 1996. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 dez. 2007.
- IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2000a. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 dez. 2007.
- IBGE. **Censo Demográfico**, 2000b. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 dez. 2007.
- IBGE. **Pesquisa Perfil dos Municípios Brasileiros – Meio Ambiente: instrumentos de gestão ambiental**, 2002. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/munic_meio_ambiente_2002/index.htm>. Acesso em: 28 fev. 2008.
- IBGE. **Cadastro Nacional de Empresas**, 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12/12/2007.
- IBGE. **Mapa de Áreas Protegidas**, 2008. Disponível em: <<http://www.mapas.ibge.gov.br/uc/Run.htm>>. Acesso em: 12 jan. 2008.
- IICA. **Programa de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos das Secas na América do Sul**, 2006. Disponível em: <<http://www.iicadesertification.org.br>>. Acesso em: 11 abr. 2007.
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Breaking new ground: the report of the Mining, Minerals and Sustainable Development Project**. London: Earthscan, 2002.
- INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual**. Bracknell, 1996.
- INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. **Mudança climática 2007: a base das ciências físicas. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o quarto relatório do IPCC**, 2007a. Disponível em <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 11 jun. 2007.
- INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. **Mudança climática 2007: mitigação da mudança do clima. Contribuição do Grupo de Trabalho III para o quarto relatório do IPCC**, 2007b. Disponível em <<http://www.mct.gov.br/clima>>. Acesso em: 11 jun. 2007.
- LI, A.; WANG, A.; LIANG, S.; ZHOU, W. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS – a case study in the upper reaches of Minjiang River, China. **Ecological Modeling**, v. 192, p. 175–187, 2006.
- LIMA, L. C.; MORAIS, J. O.; SOUZA, M. J. N. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: UNECE, 2000.
- MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. Nova York: John Wiley & Sons, 1999.

- METZGER, M. J.; ROUNSEVELL, M. D. A.; ACOSTA-MICHLIK, L.; LEEMANS, R.; SCHOTER, D. The vulnerability of ecosystems services to land use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 1, p. 69-85, 2006.
- MIDIO, A. F.; MARTINS, D. I. **Toxicologia de alimentos**. São Paulo: Varela, 2000.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Aptidão agrícola das terras do Ceará**. Brasília, DF, 1979.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Projeto de conservação e utilização sustentável da diversidade biológica brasileira: relatório de atividades**. Brasília, DF, 2002a. 73 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade nos biomas brasileiros**. Brasília, DF, 2002b. 404 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapa de Áreas Susceptíveis à Desertificação**. 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=72&idMenu=3812>>. Acesso em: 15 jan. 2008.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapa das Áreas Prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira**. 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=72&idMenu=3812>>. Acesso em: 15 jan. 2008.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. Organization for Cooperation and Development Core set of indicators for sustainable performance reviews. **A synthesis report by the Group on the State of the Environment**. Paris, 1993.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Aggregated environmental indices: review of aggregation methodologies in use**. Paris, 2002a.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Rumo a um desenvolvimento sustentável: indicadores ambientais**. Salvador: Centro de Recursos Ambientais, 2002b. (Série Cadernos de Referência Ambiental, v. 9).
- PESSOA, L. T. G.; CARVALHO, D. D.; PEREIRA JUNIOR, N. Transgênicos e indicadores ambientais. **Engenharia Ambiental**. Espírito Santo do Pinhal, v. 3, n. 2, p. 86-106, 2006.
- PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINE, V. L.; CHAIM, A.; SCRAMIN, S. **Software AGROSCRE – Apoio à Avaliação de Tendências de Transporte de Princípios Ativos de Agrotóxicos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 24p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de pesquisa, 26).
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 1984.
- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil**. 2003. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/atlas/>>. Acesso em: 12 nov. 2007.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação dos solos: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 2002a. p. 01-37.
- REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 2002b. p. 119-151.
- RODRIGUES, G. S. Agrotóxicos e contaminação ambiental no Brasil. In: CAMPANHOLA, C.; BETTIOL, W. (Ed.). **Métodos alternativos de controle fitossanitário**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. p. 217-265.
- SANTOS, T. C. C.; CÂMARA, J. B. D. (Org.). **Geo Brasil 2002**. Brasília, DF: IBAMA, 2002.
- SCHOTER, D.; METZGER, M. J.; CRAMER, W.; LEEMANS, R. Vulnerability assessment – analysing the human-environment system in the face of global environmental change. **ESS Bulletin**, v. 2, n. 2, p. 11-17, 2004.
- SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1988. (IPEF. Circular técnica, 163).
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2003.
- SILVA, J. R. C. Erosão e produtividade do solo no semi-árido. In: OLIVEIRA, T. S.; ASSIS JR., R. N.; ROMERO, R. E.; SILVA, J. R. C. **Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido**. Fortaleza: UFC, 2000. p. 169-213.
- SILVA, J. R. C. **Modelagem da erosão e seu controle nas micro-regiões homogêneas do Ceará com base na Equação Universal de Perdas de solo (1ª aproximação)**. Relatório para o CNPq 2001. Fortaleza: UFC, 2001.

- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2004**. Brasília, DF: MCIDADES.SNSA, 2005. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em: 10 set 2007.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2004**. Brasília, DF: MCIDADES.SNSA, 2006. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em: 10 set 2007.
- SOARES, N. F. F.; GONÇALVES, M. P. J. C. Toxicologia de alimentos. In: BASTOS, M. S. R. (Ed.). **Ferramentas da ciência e tecnologia para a segurança dos alimentos**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical : Banco do Nordeste, 2008. p. 135-174.
- SONNEMANN, G; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. **Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes**. New York: Lewis, 2004.
- SUDENE. **Rede hidroclimática do Nordeste (1963-1973)**. Disponível em: <<http://pageserver-nt.sudene.gov.br/ixpress/pluviometria/plv/index.dml>>. Acesso em: 03 jan. 2008.
- TIXIER, J.; DANDRIEUX, A.; DUSSERE, G.; BUBBICO, R.; MAZAROTTA, B.; SILVETTI, B.; HUBERT, E.; RODRIGUES, N.; SALVI, O. Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project. **Journal of Hazardous Materials**, v. 130, n. 3, p. 251-264, 2005.
- TOWNSEND, C. R; BEGON, M; HARPER, J. L. **Fundamentos em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- TRAN, L. T.; KNIGHT, C. G; O'NEILL R.; SMITH, E. R.; RIITERS, K. H; WICKHAM, J. Environmental assessment: fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the mid-Atlantic region. **Environmental Management**, v. 29, n. 6, p. 845-859, 2002.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI**. São Carlos: Rima: IIE, 2003.
- UNESCO. **Aprendiendo a luchar contra la desertificación**. Paris, 1997.
- VILLA, F.; McLEOD, H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: guidelines and applications. **Environmental management**, v. 29, n. 3, p. 335-348, 2002.
- VIEIRA, V. P. P. B. **A água e o desenvolvimento sustentável no Nordeste**. Brasília, DF: IPEA, 2000.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- ZIELINSKI, J. **Watershed vulnerability analysis**. Center for Watershed Protection. 2002. Disponível em: <<http://www.cwp.org>>. Acesso em: 11 abr. 2006.

Apêndice A

Descrição dos indicadores de vulnerabilidade ambiental

Indicadores relativos ao critério “Exposição”

Atividade agropecuária

Avalia a pressão exercida pela atividade agropecuária em uma bacia. A atividade agropecuária é um fator de pressão importante em uma bacia, uma vez que acarreta o desmatamento com perda da vegetação natural e redução da biodiversidade; contribui para processos erosivos, de salinização e contaminação do solo pelo uso de agrotóxicos; e altera a ciclagem natural de nutrientes, ampliando as ofertas de nitrogênio e fósforo, que podem reduzir a qualidade das águas e contribuir para o aquecimento global (emissões de óxido nitroso).

A atividade agropecuária em um município de uma bacia é calculada com a aplicação da Equação 1, que divide a área de cada município da bacia devotada ao cultivo e pastagens pela área total do município.

$$Atividade_agropecuária_i = \frac{área_agropecuária_i}{área_município_i} * 100 \quad (1)$$

Onde,

$área_agropecuária_i$ = área devotada à atividade agropecuária no município i

$área_município_i$ = área do município i

$Atividade_agropecuária_i$ = percentual da área do município i devotada à atividade agropecuária na bacia

Compreende-se que quanto menor o percentual da área agrícola, menores as pressões ambientais e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que esse indicador varie entre 0% (valor mínimo) e 100% (valor máximo). A área agropastoril de cada município está disponível no Censo Agropecuário de 1996, enquanto a área municipal é obtida no Censo Demográfico (IBGE, 2000b). Considera-se como área agropastoril as seguintes áreas do sistema de uso da terra do IBGE: lavouras permanentes, lavouras temporárias, lavouras temporárias em descanso, pastagens naturais, pastagens plantadas e matas e florestas artificiais.

Atividade industrial

Avalia a pressão exercida pela atividade industrial em uma bacia. A atividade industrial também é um fator de pressão importante em uma bacia, uma vez que gera efluentes sólidos, líquidos e gasosos com potencial de reduzir a qualidade do ar, da água e do solo, além de acarretar o desmatamento com perda da vegetação natural e redução da biodiversidade, no caso da indústria extrativa.

A atividade industrial de um município da bacia é calculada com a aplicação da Equação 2, que considera a relação entre o pessoal ocupado na indústria extrativa e de transformação em um município e a área do município.

$$Atividade_Industrial_i = \frac{pessoal_ocupado_i}{\acute{a}rea_munic\acute{i}pio_i} \quad (2)$$

Onde,

$pessoal_ocupado_i$ = número total de pessoal ocupado nas indústrias extrativas e de transformação no município i

$\acute{a}rea_munic\acute{i}pio_i$ = área do município i

$Atividade_industrial_i$ = número de pessoas ocupadas por unidade de área no município i da bacia

Compreende-se que quanto menor a atividade industrial, menores as pressões ambientais e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que esse indicador varie entre 0 (valor mínimo) e 125 empregados/km² (valor máximo). Os dados sobre pessoal ocupado nas indústrias extrativas e de transformação, por município, estão disponíveis no Cadastro Central de Empresas (IBGE, 2005), enquanto a área municipal é obtida no Censo Demográfico de 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000b).

Geração de esgoto per capita

Avalia a intensidade da geração de esgoto nos municípios da bacia, pela relação entre o volume de esgoto coletado em cada município da bacia e a população atendida pela coleta no município (Equação 3). O volume gerado de esgoto per capita é um importante indicador de pressão sobre os recursos hídricos em uma bacia, pois quanto mais elevado esse volume, maior o volume de água necessário para diluição e depuração da matéria orgânica e nutrientes presentes no esgoto. Um elevado volume de esgoto pode acarretar a eutrofização de corpos lânticos, além de comprometer as reservas hídricas para consumo humano, escassas em regiões semi-áridas.

$$Gera\c{c}\tilde{a}o_esgoto_per_capita_i = \frac{volume_coletado_i(m^3/ano)}{popula\c{c}\tilde{a}o_atendida_i(hab)} \quad (3)$$

Onde,

$volume_coletado_i$ = volume total de esgoto coletado no município i da bacia

$popula\c{c}\tilde{a}o_atendida_i$ = população total atendida pelo serviço de coleta de esgoto no município i com sede na bacia

$Gera\c{c}\tilde{a}o_esgoto_per_capita_i$ = volume de esgoto gerado por cada habitante do município i

Compreende-se que quanto menor a geração de esgoto per capita, menores as pressões ambientais e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que esse indicador varie entre 10 (valor mínimo) e 100 m³.hab⁻¹.ano⁻¹ (valor máximo), de acordo com o SNIS que avaliou que mais de 95% da geração de esgoto per capita em 2004 estava entre esses valores (SISTEMA..., 2005). As informações sobre volume de esgoto coletado e população atendida estão disponíveis na Pesquisa de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e no Censo Demográfico (2000b), respectivamente.

Geração de lixo per capita

Avalia a intensidade de geração de lixo em uma bacia, através da relação entre a massa diária coletada de lixo (kg) e a população atendida pela coleta. A massa de lixo gerada é fonte de poluição do ar, da água e do solo. Quanto maior a massa de lixo gerada maiores áreas são necessárias para a correta disposição final em aterros sanitários ou maior número de incineradores. Esse indicador de pressão ambiental é utilizado pela Organization..., (2002a). A geração de lixo per capita em um município com sede na bacia é calculada pela Equação 4.

$$Geração_lixo_i = \frac{lixo_coletado_i (kg/dia)}{população_atendida_i (hab)} \quad (4)$$

Onde,

$lixo_coletado_i$ = quantidade total de lixo coletado por dia em um município i com sede na bacia

$população_atendida_i$ = quantidade de pessoas atendidas pelo serviço de coleta no município i com sede na bacia

$Geração_lixo_i$ = quantidade de lixo coletado por habitante em um município i da bacia

Compreende-se que quanto menor a geração de lixo per capita, menores as pressões ambientais e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que esse indicador varie entre 0,1 (valor mínimo) e 1,5 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ (valor máximo), de acordo com informações sobre a geração de lixo per capita para algumas sedes municipais brasileiras do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (SISTEMA..., 2006). A fonte de informação sobre massa coletada de lixo municipal é a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e sobre população atendida pelo serviço de coleta é o Censo Demográfico (IBGE, 2000b).

Demanda hídrica per capita

Avalia a intensidade de utilização dos recursos hídricos em uma bacia, através da relação entre demanda hídrica global, referente a todos os usos consuntivos (consumo humano, animal, industrial e irrigação) e a população da bacia, estimada pelos municípios com sedes nessa bacia. Uma demanda hídrica elevada pressiona as reservas hídricas, contribuindo para a ocorrência de eventos de escassez.

A demanda hídrica é estimada considerando-se índices de consumo humano per capita por faixa populacional, consumo animal por unidade de equivalente animal (BEDA), consumo industrial por número de empregados e consumo de irrigação pela área irrigada (ANA, 2005). A demanda hídrica per capita é calculada pela Equação 5.

$$Demanda_per_capita = \frac{demanda_municípios_bacia (m^3/ano)}{população_bacia (hab)} \quad (5)$$

Onde,

$demanda_municípios_bacia$ = retirada total de água de todos os usuários da bacia em um ano, obtida pela soma das demandas para todos os usos dos municípios pertencentes à bacia

$população_bacia$ = população total dos municípios com sede na bacia

$Demanda_per_capita$ = demanda hídrica per capita na bacia

Compreende-se que quanto menor a demanda hídrica per capita, menor a pressão exercida sobre as reservas hídricas e menor a vulnerabilidade. Considera-se que esse indicador varie entre 30 (valor mínimo) e 1.500 m³.hab⁻¹.ano⁻¹ (valor máximo), de acordo com valores observados por Rebouças (2002a) para os estados

brasileiros. As fontes de informação sobre demanda hídrica de bacias hidrográficas são os planos de bacias hidrográficas, os planos estaduais de recursos hídricos e a base de dados da Agência Nacional de Água. Esse indicador é utilizado para refletir a pressão sobre os recursos hídricos exercida por países pela OECD (ORGANIZATION..., 2002b).

Indicadores relativos ao critério "Sensibilidade"

Áreas prioritárias para conservação

Avalia a existência de áreas consideradas prioritárias para conservação da biodiversidade na bacia. As áreas são classificadas em cinco classes de prioridade: área não contemplada como prioritária; área insuficientemente conhecida, mas de provável importância; área de alta importância biológica; área de muito alta importância biológica, e; área de extrema importância biológica (BRASIL, 2006). As áreas foram definidas para cada bioma, considerando aspectos relacionados à importância biológica e às pressões antrópicas existentes nas diferentes regiões. Entre os aspectos ecológicos considerados para delimitação das áreas, destacam-se: ocorrência de endemismo, de espécies raras e ameaçadas, de espécies migratórias e de interesse econômico, além de locais de uso cultural ou tradicional (BRASIL, 2002a). Áreas de extrema importância biológica são as mais ricas em termos de biodiversidade e dessa forma, as mais sensíveis, caso degradadas.

Considera-se que quanto maior a área considerada prioritária para conservação em uma bacia, maior a sua vulnerabilidade quanto à degradação. Assim, é atribuído um valor de vulnerabilidade para cada uma das cinco classes de prioridade possíveis de serem encontradas em uma bacia:

- Área não contemplada como prioritária, vulnerabilidade = 1,2
- Área insuficientemente conhecida, mas de provável importância, vulnerabilidade = 1,4
- Área de alta importância biológica, vulnerabilidade = 1,6
- Área de muito alta importância biológica, vulnerabilidade = 1,8
- Área de extrema importância biológica, vulnerabilidade = 2

A fonte de informação sobre áreas prioritárias é o Mapa de Áreas Prioritárias para Conservação (BRASIL, 2006) desenvolvido pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica (PROBIO), do Ministério do Meio Ambiente.

Aptidão agrícola

A aptidão agrícola da terra avalia a potencialidade das classes de solo ao uso agrícola. A análise de aptidão do solo indica solos mais ou menos susceptíveis à erosão, compactação, acidez e salinização, através da consideração de diversos parâmetros, como textura, teor de sais, matéria orgânica e drenagem. Solos de maior aptidão agrícola são aqueles indicados para lavouras, com pouca ou nenhuma limitação de fertilidade, de excesso ou falta de água no solo, de erosão e de mecanização. Esse indicador determina a vulnerabilidade da bacia a terras inaptas para agricultura, ponderando-se a área ocupada por cada classe de solo pelo valor de vulnerabilidade atribuído ao grupo de aptidão agrícola ao qual a classe de solo pertence.

O estudo de aptidão realizado pela Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola – SUPLAN do Ministério da Agricultura em 1979 (BRASIL, 1979) para os diversos estados brasileiros é a base para esse indicador. Esse estudo considera na análise de aptidão agrícola características do solo como: textura, estrutura, acidez, fertilidade, teor de matéria orgânica, drenagem, permeabilidade, quantidade de sais e profundidade do solo. Além dos fatores relacionados às características do solo, também são considerados o clima (definido pela precipitação), o relevo (declividade) e o tipo de vegetação natural da área (floresta, campo, caatinga, cerrado, mangue, praias e dunas) no estudo das limitações de cada classe de solo quanto à deficiência de fertilidade, deficiência de água, excesso de água, susceptibilidade à erosão e impedimentos à mecanização.

A cada classe de solo é atribuído um grupo de aptidão agrícola, pertencendo ao:

- Grupo 1, solos com aptidão boa para lavoura em pelo menos um dos níveis de manejo (baixo, médio e alto)
- Grupo 2, solos com aptidão regular para lavouras em pelo menos um dos níveis de manejo
- Grupo 3, solos com aptidão restrita para lavouras em pelo menos um dos níveis de manejo
- Grupo 4, solos com aptidão boa, regular ou restrita para pastagem plantada
- Grupo 5, solos com aptidão boa, regular ou restrita para silvicultura e ou pastagem natural
- Grupo 6, terras sem aptidão para uso agrícola

A definição dos valores de vulnerabilidade de cada grupo de aptidão agrícola considera que quanto maior o valor do grupo ao qual um solo pertence, maior a sua sensibilidade e vulnerabilidade quanto à atividade agrícola:

- Grupo 1, vulnerabilidade = 1
- Grupo 2, vulnerabilidade = 1,2
- Grupo 3, vulnerabilidade = 1,4
- Grupo 4, vulnerabilidade = 1,6
- Grupo 5, vulnerabilidade = 1,8
- Grupo 6, vulnerabilidade = 2

Intensidade Pluviométrica

Avalia a intensidade das chuvas em uma região, pela relação entre a pluviosidade média anual e a duração do período chuvoso (número de meses de chuva em um ano). A intensidade pluviométrica é um parâmetro importante na avaliação da erosividade da chuva e susceptibilidade de uma área à erosão hídrica pelo escoamento superficial, não tendo sido considerada na avaliação da susceptibilidade à erosão feita no estudo da aptidão agrícola. De acordo com Crepani et al. (2004), uma grande lâmina de água precipitada em um curto intervalo de tempo conduz a uma situação onde a quantidade de água disponível para o escoamento superficial é muito grande, e, portanto, é maior a capacidade de erosão. Assim, quanto maior a intensidade da chuva, maior seu potencial erosivo.

A intensidade da chuva é obtida pela aplicação da Equação 6 em cada posto de monitoramento da pluviometria em uma bacia.

$$Intensidade_pluviométrica_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^n \frac{Pluviosidade_anual_j}{\left(\frac{Dias_com_chuva_j}{30} \right)} \right)}{n} \quad (6)$$

Onde,

i = posto i próximo ou na bacia

j = ano i de monitoramento de uma dado posto i

n = número de anos de observação

$Pluviosidade_anual_j$ = lâmina de água (mm) precipitada em um ano i

$Dias_com_chuva_j$ = número de dias com chuva em um ano i

$Intensidade_pluviométrica_i$ = intensidade pluviométrica da chuva no posto i

Compreende-se que quanto menor a intensidade pluviométrica, menor a sensibilidade do meio à erosão hídrica e à compactação do solo, sendo menor a vulnerabilidade. Considera-se que esse indicador varie entre 50 (valor mínimo) e 525 mm/mês (valor máximo), de acordo com a classificação utilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CREPANI et al., 2004). A área de abrangência de cada posto de monitoramento é delimitada pelo cálculo dos polígonos de Thiessen. Os dados sobre precipitação diária podem ser obtidos junto às instituições que trabalham com meteorologia ou junto à ANA.

Qualidade da água de irrigação

Avalia a qualidade da água disponível para irrigação na bacia, pelos parâmetros salinidade e sodicidade. A vulnerabilidade do solo à água de irrigação é avaliada pelo risco de salinização ou sodificação do solo. O risco de salinização e sodificação do solo é usualmente avaliado pela análise da salinidade e da sodicidade da água de irrigação, conforme Ayers e Westcot (1991).

A salinidade da água de irrigação é avaliada pela condutividade elétrica (CE) (AYERS e WESTCOT, 1991). Compreende-se que quanto menor a CE, menor a sensibilidade do meio à salinização do solo pela água de irrigação, sendo menor a vulnerabilidade quanto à salinidade. Considera-se que a CE varie entre 0,1 (valor mínimo) e 3dS.m^{-1} (valor máximo), de acordo com Ayers e Westcot (1991).

A avaliação da sodicidade combina os valores de CE e razão de adsorção de sódio (RASo), onde para uma mesma RASo o risco de sodicidade será tanto menor quanto maior a CE (AYERS e WESTCOT, 1991). A RASo é obtida de acordo com Ayers e Westcot (1991). O valor normalizado da vulnerabilidade referente à sodicidade, em um dado posto de monitoramento, é obtido pelo uso da Tabela 1. As classes de vulnerabilidade foram definidas de acordo com a classificação de qualidade da água para irrigação quanto a sodicidade, adotada por Ayers e Westcot (1991), que combina valores de CE e RAS na análise do risco de sodicidade da água.

Tabela 1. Classes de vulnerabilidade quanto à sodicidade da água de irrigação.

Razão de Adsorção de Sódio (RASo)	Valor de vulnerabilidade quanto a sodicidade em um posto de monitoramento		
	1 (Baixa)	1,5 (Média)	2 (Muito alta)
	-----Conductividade Elétrica (CE) (dS/m)-----		
0 a 3	> 0,7	0,7 a 0,2	< 0,2
3 a 6	> 1,2	1,2 a 0,3	< 0,3
6 a 12	> 1,9	1,9 a 0,5	< 0,5
12 a 20	> 2,9	2,9 a 1,3	< 1,3
20 a 40	> 5	5 a 2,9	< 2,9

O valor final da vulnerabilidade em cada posto é obtido pelo maior valor de vulnerabilidade obtido para CE e RAS no local.

A área de abrangência de cada posto de monitoramento é delimitada pelo cálculo dos polígonos de Thiessen. A fonte dos dados de CE e RASo são os órgãos estaduais de meio ambiente e gestão das águas. Devem ser utilizados valores médios de séries históricas disponíveis de CE e RASo.

Aridez do clima

Avalia a classe climática média da bacia, por meio da média ponderada das áreas com determinada classe climática pela vulnerabilidade imputada a determinada classe. A aridez do clima contribui para escassez hídrica, concentração de sais no solo, principalmente o irrigado, e para o desenvolvimento de processos de desertificação, quando da retirada da vegetação. É utilizado pela ONU na identificação de áreas de escassez hídrica e na avaliação de áreas susceptíveis à desertificação. O Índice Municipal de Alerta do Ceará, utilizado para identificar regiões críticas quanto à ocorrência de secas, também considera a aridez na sua avaliação.

A definição dos valores de vulnerabilidade de cada classe climática na bacia considera que quanto mais árida é uma região, maior a sua sensibilidade e vulnerabilidade quanto à aridez do clima:

- Áreas não contempladas no mapa, vulnerabilidade = 1
- Áreas de entorno das regiões áridas e semi-áridas, vulnerabilidade = 1,4
- Sub-úmido seco, vulnerabilidade = 1,6
- Semi-árido, vulnerabilidade = 1,8

A fonte de informação sobre aridez no Brasil é o Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-BRASIL (BRASIL, 2004), que contém a lista dos municípios brasileiros de clima semi-árido e sub-úmido seco. Esses dados estão georreferenciados no Mapa de Áreas Susceptíveis à Desertificação no Semi-árido (BRASIL, 2004).

Indicadores relativos ao critério “Capacidade de Resposta”

Áreas em unidades de conservação

Avalia o compromisso dos municípios da bacia com a conservação da biodiversidade, pela delimitação de unidades de conservação, definidas pela legislação federal, estadual e municipal. De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (BRASIL, 2000), as unidades de conservação podem pertencer a duas categorias: de proteção integral e de uso sustentável. O objetivo básico das unidades de “proteção integral” é preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previstos em lei. Essa categoria é composta pelas seguintes unidades de conservação: Estação Ecológica, Reserva Biológica, Parque Nacional, Monumento Natural e Refúgio de Vida Silvestre. As unidades de “uso sustentável” têm como objetivo compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais. Fazem parte dessa categoria as unidades de conservação: Área de Proteção Ambiental, Área de Relevante Interesse Ecológico, Floresta Nacional, Reserva Extrativista, Reserva de Fauna, Reserva de Desenvolvimento Sustentável e Reserva Particular do Patrimônio Natural.

Assim, a proteção da vegetação natural é maior em unidades de “proteção integral” do que em áreas de “uso sustentável”. O percentual da área de um ecossistema que está protegido em unidades de conservação é um indicador de resposta social a problemas de perda de biodiversidade utilizado pela Organization..., (1993). Esse indicador pondera o percentual de cada área de conservação por um peso que representa a vulnerabilidade de cada tipo de área quanto à degradação ambiental.

São considerados três tipos de áreas em uma bacia: área em unidade de conservação de “proteção integral” (ecossistema mais protegido e menos vulnerável), área em unidade de conservação de “uso sustentável” (ecossistema menos protegido e área mais vulnerável) e área sem proteção. Considera-se na definição dos valores de vulnerabilidade, que áreas “sem proteção” representam uma baixa capacidade de resposta e uma alta vulnerabilidade ambiental, áreas de “proteção integral” são menos vulneráveis à perda da biodiversidade e demais questões ambientais advindas dessa perda, como erosão e escassez hídrica, enquanto áreas de “uso sustentável” trazem alguma proteção, refletindo em uma vulnerabilidade média:

- Área de proteção integral, vulnerabilidade = 1,2
- Área de uso sustentável, vulnerabilidade = 1,5
- Área sem proteção, vulnerabilidade = 2

As fontes de informação sobre a área ocupada pelas unidades de conservação federais e sua localização são o IBAMA, o IBGE e as secretarias estaduais de meio ambiente.

Conservação do solo

Avalia o compromisso dos municípios com a conservação do solo, pela prática das seguintes ações: combate ou controle da salinização do solo, combate e/ou controle a processos erosivos, fiscalização ou controle do uso de fertilizantes e agrotóxicos, incentivo à promoção e práticas de agricultura orgânica e recuperação de áreas degradadas. Essas ações repercutem diretamente na qualidade do solo agrícola, com benefícios a todo o ambiente.

Para cada município com sede na bacia, avalia-se seu compromisso com a conservação do solo pela Equação 7, que realiza uma média do número de ações de conservação adotados em um município.

$$\text{Conservação_solo_município}_i = \frac{\text{número_de_ações}}{5} * 100 \quad (7)$$

Onde,

número_de_ações = número de ações de gestão do solo (combate ou controle da salinização do solo, combate e/ou controle a processos erosivos, fiscalização ou controle do uso de fertilizantes e agrotóxicos, incentivo à promoção e práticas de agricultura orgânica e recuperação de áreas degradadas) praticadas por um município *i*

Conservação_solo_município_i = valor da gestão do solo no município *i*, avaliando-se a ocorrência das cinco ações de gestão do solo consideradas

Compreende-se que quanto maior o número de ações de conservação do solo adotadas pelo município, maior a resposta social e menor a vulnerabilidade. Considera-se que esse indicador varie entre 0% (valor mínimo) e 100% (valor máximo). A fonte dessa informação para municípios é a Pesquisa “Perfil dos Municípios Brasileiros” (IBGE, 2002). Essa pesquisa fornece informações em nível municipal. Assim, devem-se definir quais municípios possuem sedes municipais na bacia em estudo.

Acesso à água tratada

Avalia o acesso da população de uma bacia à rede de abastecimento de água e ao tratamento convencional de água. O acesso à água tratada é fundamental à saúde da população, em especial em locais onde as águas encontram-se poluídas pelo lançamento de esgotos e poluição difusa oriunda de atividades agrícolas. Entretanto, um grande acesso à rede de abastecimento de água não garante que o volume coletado recebeu tratamento convencional, necessário em bacias cujos rios são classificados como Classe 2 pela Resolução CONAMA 357, de 17/03/2005 (rios sem classificação são considerados Classe 2 por essa resolução). Dessa forma, é necessário considerar o volume de água que recebe tratamento convencional. O tratamento convencional reduz a quantidade de sólidos suspensos e a contaminação bacteriológica encontrada em águas receptoras de dejetos humanos e animais, minimizando a pressão exercida pela geração de esgoto pela população dos municípios de uma bacia. O acesso à água e a seu tratamento adequado é um indicador de desenvolvimento sustentável utilizado pelo IBGE e pela Comissão para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

O acesso à rede de abastecimento de água é avaliado pela relação entre o total de pessoas com acesso a um sistema de abastecimento e o total da população de um município (Equação 8). O acesso ao tratamento convencional de água avalia o fornecimento de tratamento convencional, pela relação entre o volume diário de água distribuída e o volume total de água que recebe tratamento convencional (tratamento envolvendo no mínimo floculação, decantação, filtração e desinfecção) em um município da bacia (Equação 9).

$$Acesso_abastecimento_i = \frac{população_acesso_água_i(hab)}{população_município_i(hab)} * 100 \quad (8)$$

Onde,

população_acesso_água_i = total de habitantes com acesso à rede de abastecimento de água no município *i* com sede na bacia

população_município_i = total da população no município *i* da bacia

Acesso_abastecimento_i = percentual da população com acesso à rede de abastecimento de água no município *i*

$$Tratamento_convencional_i = \frac{volume_água_tratada_i(m^3/dia)}{volume_água_distribuída_i(m^3/dia)} * 100 \quad (9)$$

Onde,

volume_água_tratada_i = volume total de água que recebe tratamento convencional no município *i* com sede na bacia

volume_água_distribuída_i = volume total de água distribuída pela rede de abastecimento no município *i* com sede na bacia

Tratamento_convencional_i = percentual da água distribuída pela rede de abastecimento que recebe tratamento convencional no município *i*

A definição das classes de vulnerabilidade considerou que quanto maior o acesso à rede de abastecimento de água e ao tratamento convencional da água distribuída, maior a resposta social à problemática do saneamento básico e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que tanto o percentual de acesso à rede de água, como o percentual de acesso ao tratamento convencional da água variem entre 0% (valor mínimo) e 100% (valor máximo). A vulnerabilidade final de cada município com sede na bacia, quanto à problemática da água, é dada pela média aritmética das vulnerabilidades de acesso à rede de água e ao tratamento convencional da água. As informações utilizadas estão disponíveis na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a) e no Censo Demográfico (IBGE, 2000b).

Acesso à coleta e ao destino adequado do lixo

Avalia o acesso da população da bacia à coleta e ao destino adequado do lixo coletado. Resíduos não coletados ou coletados e encaminhados a locais inadequados acarretam problemas de saúde pública, além de contaminação ambiental. O acesso e o destino adequado do lixo são indicadores de desenvolvimento sustentável utilizados pelo IBGE e pela Comissão para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

O acesso à coleta do lixo, que avalia o percentual da população com acesso à coleta de lixo em um município da bacia, é calculado utilizando-se a Equação 10, enquanto o acesso ao destino adequado do lixo, que avalia o percentual do lixo coletado com destino adequado, é calculado pela Equação 11.

$$Destino_lixo_i = \frac{quantidade_destino_adequado_i}{quantidade_lixo_coletado_i} \quad (10)$$

Onde,

$população_atendida_i$ = população atendida pela coleta de lixo no município i com sede na bacia

$população_município_i$ = população total do município i com sede na bacia

$Acesso_lixo_i$ = percentual da população com acesso à coleta de lixo no município

$$Destino_lixo_i = \frac{quantidade_destino_adequado_i (t/dia)}{quantidade_lixo_coletado_i (t/dia)} * 100 \quad (11)$$

Onde,

$quantidade_destino_adequado_i$ = quantidade de lixo destinado a aterros, estações de triagem, reciclagem, compostagem e incineração no município i , com sede na bacia

$quantidade_lixo_coletado_i$ = quantidade total de lixo coletado no município i

$Destino_lixo_i$ = percentual do lixo coletado que possui destino adequado no município i

A definição das classes de vulnerabilidade considerou que quanto maior o acesso à coleta e ao destino adequado do lixo, maior a resposta social à problemática dos resíduos sólidos e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que tanto o percentual de acesso à coleta de lixo, como o percentual de acesso ao destino adequado do lixo variem entre 0% (valor mínimo) e 100% (valor máximo). A vulnerabilidade final de cada município com sede na bacia quanto à problemática do lixo é dada pela média aritmética das vulnerabilidades de acesso e destino do lixo. As fontes de informação para esse índice são o Censo Demográfico (IBGE, 2000b) e a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000a).

3.5 Acesso a esgotamento sanitário

Avalia o acesso à rede coletora de esgoto (rede coletora pública e fossa séptica) na bacia. O acesso à coleta de esgoto mostra uma resposta efetiva da sociedade para melhoria das condições de saneamento básico e redução da carga poluidora nos corpos hídricos. Apesar de um grande acesso à coleta de esgoto não significar que o volume coletado foi devidamente tratado, são escassas as informações sobre o volume de esgoto coletado e sobre o tratamento sanitário recebido na maioria dos municípios brasileiros. O acesso a esgotamento sanitário é um indicador utilizado pela Comissão para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

O acesso a esgotamento sanitário em um município da bacia é avaliado pelo uso da Equação 12, que avalia o percentual da população com acesso a rede de esgotamento.

$$Acesso_esgotamento_i = \frac{população_esgoto_coletado_i(hab)}{população_município_i(hab)} * 100 \quad (12)$$

Onde,

$população_esgoto_coletado_i$ = total de habitantes com acesso à coleta de esgoto pela rede pública ou fossa séptica no município i com sede na bacia

$população_município_i$ = total da população no município i

$Acesso_esgotamento_i$ = percentual da população com acesso à coleta de esgoto no município i .

Para a definição das classes de vulnerabilidade, considera-se que quanto maior o acesso a esgotamento sanitário, maior a resposta social à problemática dos efluentes líquidos e menor a vulnerabilidade da bacia. Considera-se que o percentual de acesso a esgotamento sanitário varie entre 0% (valor mínimo) e 100% (valor máximo). As informações relativas à população atendida por serviços de coleta e à população total de municípios encontram-se disponíveis na base de dados do IBGE, na pesquisa Censo Demográfico (IBGE, 2000b).

Disponibilidade hídrica per capita

Avalia a disponibilidade ou a oferta de água para a população, resultante de investimentos no armazenamento e acesso às reservas hídricas. A disponibilidade hídrica per capita expressa uma resposta do planejamento hídrico às necessidades de consumo em uma bacia.

A disponibilidade hídrica per capita é medida através da divisão da vazão média anual pela população total de uma bacia (Equação 13).

$$\text{Disponibilidade_hídrica} = \frac{\text{Vazão_média (m}^3\text{/ano)}}{\text{população_bacia(hab)}} \quad (13)$$

Onde,

Vazão_média = vazão regularizada anual com no mínimo 90% de garantia, em rios perenizados, ou a vazão com 95% de permanência, em rios perenes

População_bacia = população total da bacia

Disponibilidade_hídrica = disponibilidade de água na bacia per capita

Compreende-se que quanto menor a disponibilidade hídrica per capita, menor a capacidade de resposta quanto à oferta hídrica e maior a vulnerabilidade. Considera-se que esse indicador varie entre 0 (valor mínimo) e 100.000 m³.hab⁻¹.ano⁻¹ (valor máximo), de acordo com valores adotados pela ANA para avaliação das disponibilidades hídricas nas bacias hidrográficas brasileiras (AGÊNCIA..., 2005). As informações sobre disponibilidade hídrica podem ser obtidas nos planos de bacias, nos planos estaduais de recursos hídricos, assim como na base de dados da ANA.

IDH-M

Avalia o nível de desenvolvimento humano dos municípios com sede na bacia. A pobreza, aqui representada por um baixo IDH-M, inibe ações sociais relativas ao controle, minimização e recuperação do meio ambiente. Uma maior longevidade, renda e nível educacional possibilitam a uma dada comunidade melhor atuar frente às questões socioambientais que a circundam.

O IDH-M de cada município com sede na bacia é obtido pela média aritmética de três indicadores: educação (taxa de alfabetização de pessoas acima de 4 anos de idade, com peso 2; a taxa bruta de frequência à escola, com peso 1); saúde (esperança de vida ao nascer); e renda (renda municipal per capita). O IDH-M varia entre 0 e 1.

Considera-se que quanto maior o IDH-M, melhor a capacidade de resposta das pessoas que habitam na bacia frente aos problemas ambientais e menor sua vulnerabilidade ambiental. Como o IDH-M é um valor normalizado, mas varia inversamente à vulnerabilidade (quanto maior seu valor, menor a vulnerabilidade), utiliza-se o valor complementar do IDH-M (Equação 14) no cálculo da vulnerabilidade de cada município, sendo acrescido ainda o valor "1", para que a escala seja a utilizada nesse trabalho, de 1 a 2, e não de 0 a 1, como é a escala original do IDH-M.

$$\text{Valor}_i = (1 - \text{IDH} - M_i) + 1 \quad (14)$$

Onde,

IDH-M_i = valor encontrado para o IDH-M de um município i com sede na bacia

Valor_i = Valor da vulnerabilidade do município i , quanto ao IDH-M

O IDH-M foi desenvolvido e é utilizado pelo Programa das Nações para o Desenvolvimento (PNUD). Os dados de IDH-M estão disponíveis, para todos os municípios brasileiros, no Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (PROGRAMA..., 2003).



Agroindústria Tropical