

06470  
CNPMA  
2000  
ex. 2  
FL-06470a

26/03/01

ISSN 1516-4675

terior  
cultura  
cimento

# UM MODELO DIGITAL DE DEGRADAÇÃO HÍDRICA APLICADO AO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL: AGROPÓLO SUBMÉDIO DO RIO SÃO FRANCISCO

**José Iguelmar Miranda**

**Aderaldo de Souza Silva**

**Geraldo Stachetti Rodrigues**

Um modelo digital de  
2000 FL - 06470a



31151-2

**Embrapa**

*Meio Ambiente*



**PROÁGUA**

SEMI-ÁRIDO



**BANCO MUNDIAL**

**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

**Presidente**  
Fernando Henrique Cardoso

**Ministro da Agricultura e do Abastecimento**  
Marcus Vinícius Pratini de Moraes

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa**

**Presidente**  
Alberto Duque Portugal

**Diretores**  
Dante Daniel Giacomelli Scolari  
José Roberto Rodrigues Peres  
Elza Angela Battaglia Brito da Cunha

**Embrapa Meio Ambiente**

**Chefe Geral**  
Bernardo van Raij

**Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento**  
Deise Maria Fontana Capalbo

**Chefe Adjunto Administrativo**  
Vander Roberto Bisinoto

**Área de Comunicação e Negócios**  
Nilce Chaves Gattaz

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Meio Ambiente  
Ministério da Agricultura e do Abastecimento*

*UM MODELO DIGITAL DE DEGRADAÇÃO HÍDRICA  
APLICADO AO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL:  
AGROPÓLO SUBMÉDIO DO RIO SÃO FRANCISCO*

José Iguelmar Miranda  
Aderaldo de Souza Silva  
Geraldo Stachetti Rodrigues

---

## EMBRAPA MEIO AMBIENTE - Boletim de Pesquisa 12

Exemplares dessa publicação podem ser solicitados à:

Embrapa Meio Ambiente  
Rodovia SP 340 - km 127,5 - Tanquinho Velho  
Caixa Postal 69 13820-000, Jaguariúna, SP  
Fone: (19) 3867-8750 Fax: (19) 3867-8740  
[sac@cnpma.embrapa.br](mailto:sac@cnpma.embrapa.br)  
[www.cnpma.embrapa.br](http://www.cnpma.embrapa.br)

**Comitê de Publicações:** Magda Aparecida de Lima, Aldemir Chaim,  
Célia M. M. de S. Silva, Franco Lucchini,  
Júlio F. de Queiroz e Maria Cristina Tordin.

**Revisão:** Maria Cristina Tordin e Maria Amélia de Toledo Leme

**Normatização:** Maria Amélia de Toledo Leme

**Coordenação de produção gráfica:** Maria Cristina Tordin

**Diagramação e capa:** Franco Ferreira de Moraes

**Tiragem:** 500 exemplares

MIRANDA, J. I.; SILVA, A. de S.; RODRIGUES, G. S. Um modelo digital de degradação hídrica aplicado ao diagnóstico ambiental: agropólio submédio do rio São Francisco. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 38p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa, 12).

CDD - 551.48

---

# SUMÁRIO

<i>RESUMO</i> .....	5
<i>ABSTRACT</i> .....	6
<i>INTRODUÇÃO</i> .....	7
<i>OBJETIVO</i> .....	9
<i>MATERIAL E MÉTODOS</i> .....	9
1. <i>MATERIAL</i> .....	9
2. <i>MÉTODOS</i> .....	10
2.1 <i>FONTES PONTUAIS DE POLUIÇÃO</i> .....	10
2.2 <i>CÁLCULO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO</i> .....	11
2.3 <i>CÁLCULO DA DISTÂNCIA INTERFLUVIAL</i> .....	13
2.4 <i>CÁLCULO DO ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO HÍDRICA</i> .....	14
<i>RESULTADOS</i> .....	17
<i>LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS</i> .....	17
<i>FONTES DE POLUIÇÃO</i> .....	17
<i>ÍNDICE DE VEGETAÇÃO</i> .....	18
<i>DISTÂNCIA INTERFLUVIAL</i> .....	19
<i>ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO HÍDRICA</i> .....	19
<i>CONCLUSÃO</i> .....	25
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	27
<i>ANEXOS</i> .....	29

---

---

# UM MODELO DIGITAL DE DEGRADAÇÃO HÍDRICA APLICADO AO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL: AGROPÓLO SUBMÉDIO DO RIO SÃO FRANCISCO<sup>1</sup>

José Iguelmar Miranda  
Aderaldo de Souza Silva  
Geraldo Stachetti Rodrigues

## RESUMO

Existe um crescente interesse pela qualidade da água nas regiões que implementaram projetos de irrigação. Este interesse originou-se das pressões do público consumidor buscando produtos "limpos" (produzidos sem uso de agroquímicos com água de qualidade). A busca desta qualidade não pode estar circunscrita à observação pontual, considerando somente a área do projeto de irrigação. Toda uma região no entorno do projeto tem que ter a qualidade de seus corpos d'água avaliada. O presente trabalho apresenta um modelo digital para caracterização do potencial de degradação hídrica de uma região. O modelo foi implementado num sistema de informações geográficas (SIG) e considerou três variáveis: distância interfluvial, índice de vegetação e fontes pontuais de poluição. O modelo se mostrou útil no intuito de classificar as bacias hidrográficas do agropólo de irrigação segundo um índice de degradação hídrica, índice este que correspondeu às expectativas da realidade presente nos municípios em estudo.

---

<sup>1</sup> Estudo de apoio ao Projeto São Francisco (SRH/GEF/PNUMA/OEA) - Subprojeto 1.4: Desenvolvimento de um sistema de monitoramento da qualidade da água no submédio São Francisco

## ABSTRACT

Water quality has gained an increasing interest in areas with irrigation projects. This is not a fortuity interest, but it comes from consumers concerned in consuming "clean" products (the ones free from chemicals and non-polluted water). The pursuit of such quality cannot be focused in spots. The water quality of all surrounding area of the irrigation project must be evaluated. This research presents a digital model that characterizes the potential of water degradation in a region. The model used a geographical information system (GIS) handling three variables: mean distance among rivers, vegetation index and point source pollution. The model was successful and ranked the watersheds of the irrigation region according to its water degradation index. The index was reliable, since it reflected the actual conditions found in the districts of the irrigated area.

## INTRODUÇÃO

Neves et al. (1999) apresentam um diagnóstico ambiental do agropólo qualificando as potenciais fontes pontuais de poluição das águas, ordenando-as com base em coeficientes de carga poluidora potencial. O diagnóstico almejou ações relacionadas à seleção de áreas vulneráveis e de riscos potenciais aos impactos ambientais negativos na qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

A metodologia daquele trabalho consistiu em identificar as fontes potenciais de poluição das águas realizando um levantamento de campo nos municípios da região de Petrolina (PE)/Juazeiro (BA) (anexo 1). Cada um dos estabelecimentos foi localizado no mapa municipal ou georeferenciado via sistema de posicionamento global (GPS), para posicionamento no mapa de fontes de poluição do agropólo. A partir desse posicionamento foi possível identificar o corpo d'água receptor dos efluentes e distribuir geograficamente os estabelecimentos nas diferentes bacias hidrográficas do agropólo (Neves et al., 1999). O uso de um sistema de georeferenciamento para as fontes potencializa as facilidades que um sistema de informações geográficas (SIG) pode oferecer para manipular esta informação juntamente com outras, produzindo novas informações relevantes ao problema de manejo adequado das águas.

O presente trabalho apresenta um *modelo digital* sobre o estado da degradação hídrica no agropólo gerado com um SIG considerando três variáveis: as fontes pontuais de poluição, o índice de vegetação e a distância interfluvial. O resultado do modelo digital é um mapa que apresenta índices, resultado da combinação das variáveis citadas, representando o que se convencionou chamar de *índice de degradação hídrica*. Este mapa fornece uma visão espacial de toda a área da região em uma extensão de 53 mil km<sup>2</sup>. Ele se mostra útil para os tomadores de decisão analisarem a situação de cada bacia quanto à degradação

hídrica. Com o mapa, a identificação espacial das bacias hidrográficas a serem monitoradas se torna um exercício mais confiável, em razão de se ter uma visão não somente focal, mas ampla da área de trabalho.

Esse diagnóstico contribui na qualificação e localização das bacias hidrográficas da região em termos das fontes pontuais de poluição e sua relação com a rede hidrográfica e índice de vegetação, apresentando um índice sobre a qualidade das águas no agroecossistema. Desta maneira, o futuro monitoramento e definição de ações visando a um uso adequado que preserve a qualidade das águas se torna mais criterioso.

A dinâmica de crescimento do pólo agroindustrial aliada à significativas transformações na agricultura do agropólo e à expansão da produção agrícola vem sendo realizada principalmente às custas de projetos de irrigação às margens do rio São Francisco, demandando, portanto, cuidados redobrados quanto à qualidade das águas. Qualidade que deve ser observada não só quando alimentando o sistema de irrigação, para produzir frutas de qualidade, mas também quando devolvendo esta água para outros usos. Todos estes fatores justificaram o estudo e desenvolvimento de um modelo digital que configurasse a situação dos recursos hídricos da região de forma a abranger toda a área e não somente pontos isolados.

## *OBJETIVO*

O modelo digital como parte do diagnóstico ambiental do agropólo pretende qualificar as bacias hidrográficas da área de acordo com índices de degradação hídrica. Esse diagnóstico atenderá, pelo menos, dois objetivos imediatos. Primeiro, subsidiar ações relacionadas à seleção de áreas vulneráveis e de riscos potenciais aos impactos ambientais negativos na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Segundo, contribuir na escolha de áreas a serem monitoradas.

## *MATERIAL E MÉTODOS*

### *1. MATERIAL*

Foram utilizadas quatro imagens digitais inteiras (185 x 185 km) do satélite LANDSAT, nas bandas 3, 4 e 5. Estas imagens dão cobertura total à área do agropólo e adjacências. As coordenadas do sistema de referência (WRS) destas imagens e respectivas datas de passagem são: 217/066 (09.08.1998), 217/067 (09.08.1998), 218/067 (19.10.1998) e 218/068 (13.06.1998). As diferentes datas são resultados da busca de imagens com menor índice de cobertura de nuvens, portanto mais úteis para interpretação. Além das imagens de satélite foram usadas cartas topográficas já adquiridas no formato digital, cedidas pela CODEVASF.

Três programas de computador foram usados: CartaLinx (Clark Labs, 1998) para digitalização e entrada de dados geográficos em geral, IDRISI for Windows versão 2.010 (Clark University, 1998) como programa de SIG para a geração do modelo digital e AUTOCAD 14 para a saída de dados.

## **2. MÉTODOS**

A geração do modelo digital de degradação hídrica foi realizada em três etapas: 1) geração de um plano de informação contendo valores numéricos correspondentes à freqüência das fontes pontuais de poluição; 2) geração de um plano de informação contendo os valores dos índices de vegetação; 3) geração de um plano de informação com o cálculo da distância interfluvial da rede de drenagem contendo o valor médio por sub-bacia do agropólo. A região do Submédio São Francisco foi subdividido em quarenta e quatro bacias hidrográficas. Todos os cálculos dos planos de informação foram realizados considerando cada uma das bacias. A escala de trabalho no agroecossistema foi de 1:250.000. Outra observação relevante é que as imagens de satélite foram georeferenciadas.

### **2.1 Fontes pontuais de poluição**

A primeira etapa usou o resultado do diagnóstico realizado por Neves et al. (1999). Conforme consta naquele diagnóstico, as fontes pontuais de poluição foram identificadas geograficamente através de GPS ou pelas coordenadas geográficas da prefeitura da cidade quando a fonte era o esgoto. Estes pontos (estabelecimentos ou pontos de poluição) foram digitalizados em um mapa base do agropólo com o uso de uma mesa digitalizadora. Ao serem digitalizados, os estabelecimentos receberam uma identificação (reduzido, médio, elevado) de acordo com Neves et al. (1999).

O estabelecimento é qualificado quanto ao seu impacto sobre a qualidade das águas pelo somatório dos valores atribuídos a cada parâmetro. Para efeito de composição do mapa de fontes de impacto sobre a qualidade das águas, cada estabelecimento será expresso por um símbolo que o qualifique no município, de acordo com a escala de impacto definida pelos valores dos parâmetros. Sendo o valor máximo atribuível a um estabelecimento por essa valoração igual a seis (6), optou-se por estabelecer a qualificação em mapa como de estabelecimentos

com impactos reduzidos (índice de impacto de 0 a 1,9), moderados (2 a 3,9), ou elevados (4 a 6).

Em cada bacia hidrográfica foi contado o número de pontos de poluição de cada um dos tipos acima. Após esta contagem, um valor, denominado FP, foi calculado para a área da bacia através da seguinte transformação linear ponderada:

$$FP = 1*R + 2*M + 3*E, \quad FP \in Z \quad [1]$$

significando que o número de fontes reduzidas (R) encontradas era multiplicado pelo menor peso (1), o número de fontes moderadas (M) era multiplicado por um peso 2 e o número de fontes de poluição consideradas elevadas (E) era multiplicado pelo maior peso (3). Esta rotina foi realizada para todas as bacias hidrográficas que contavam com algum tipo de fonte de poluição na sua abrangência geográfica. Bacias com ausência de fontes de poluição recebiam valor zero.

## 2.2 Cálculo do índice de vegetação

O índice de vegetação (IV) é um tipo de transformação no espaço espectral multidimensional de imagens de satélite. Entre estas transformações se encontra a razão multiespectral, das quais uma muito utilizada denomina-se índice de vegetação (Schowengerdt, 1997). O índice de vegetação é uma medida clássica da concentração de biomassa em uma área. Ele é derivado da reflectância medida nos intervalos do espectro eletromagnético correspondentes ao vermelho e infravermelho próximo. No satélite LANDSAT TM estas faixas do espectro compreendem respectivamente as bandas 3, correspondente ao intervalo 0,63 a 0,69 micrômetros e 4, correspondente ao intervalo 0,76 a 0,90 micrômetros (Lillesand & Kiefer, 1994). O índice é calculado de acordo com a equação 2:

$$IV = \frac{(Banda\ 4 - Banda\ 3)}{(Banda\ 4 + Banda\ 3)} \quad (IV \in \mathbb{R}) \quad [2]$$

A literatura denomina este índice como *Índice de Vegetação com Diferença Normalizada* (IVDN) (Schowengerdt, 1997; Jensen, 1996; Lillesand & Kiefer, 1994). Existem outros, geralmente dirigidos para condições específicas. Por exemplo, índice de vegetação para estimar quantitativamente índice de área foliar, porcentagem de cobertura de solo, população de planta e outros parâmetros. Perry & Lautenschlager (1984) compararam 48 diferentes fórmulas para calcular índices de vegetação e entre suas conclusões duas são dignas de nota: 1) "Saber o valor de um índice é equivalente a saber o valor de outro índice – os índices são entretanto equivalentes para a tomada de decisão". 2) "A maioria das fórmulas se resume a uma entre duas categorias básicas: aquelas que usam razão ou aquelas que usam diferenças para explorar as características espectrais de solo e vegetação". Conforme a equação 2, neste trabalho, optou-se pela fórmula de razão entre canais.

Os valores encontrados para o IV calculado pela equação 2 variam no intervalo –1 a 1. A exemplo do que aconteceu com o plano de informação, fontes de poluição (FP), cada bacia hidrográfica recebeu um valor de *índice de vegetação*. Deve-se considerar que este cálculo só foi realizado após a imagem de satélite ser corrigida geograficamente, de maneira que o plano cartográfico das bacias e a imagem de satélite da mesma área coincidam. As imagens de satélite em sua forma original não estão associadas com nenhum sistema de referência geográfico e apresentam uma distorção devido ao movimento de rotação da terra.

Imagens digitais estão sujeitas a dois tipos de erros: radiométricos e geométricos. Erros geométricos dizem respeito a distorções que ocorrem com as imagens digitais. Estes erros foram corrigidos, conforme explicado. Os erros radiométricos resultam de duas fontes: 1) atenuação atmosférica causada por espalhamento ou absorção na atmosfera e 2) atenuação topográfica (Jensen, 1996). Estas correções não são essenciais para o propósito do uso das imagens digitais feito por este trabalho. Os sinais do solo, água e vegetação eram suficientemente

diferentes uns dos outros e não foram afetados por ruídos atmosféricos (erros radiométricos) que tornassem impraticável o uso das imagens.

A remoção de efeitos atmosféricos necessita de aferições específicas do local de estudo para a calibração de dados. Desta maneira, os coeficientes adquiridos estão restritos geográfica e temporalmente. Além do mais, estes métodos requerem muito tempo e recursos que não se justificavam no escopo do projeto. O uso de imagens com datas diferentes não justificava também uma correção radiométrica. Primeiro porque as imagens usadas são todas de 1998, sendo 2 de agosto, uma de outubro e uma de junho. Segundo, porque usa-se o mesmo sensor – TM5 – para todas as imagens. A correção de imagens com múltiplas datas só deve acontecer quando o objetivo for estudar mudanças temporais, onde imagens de anos diferentes são usadas. Nestes casos, até os sensores podem ter mudado, justificando o uso de regressão para ajuste das imagens.

As correções radiométricas relativas à topografia só se justificam quando a área de trabalho sofrer grandes efeitos de sombreamento que afetem o valor do brilho das células da imagem. Além do mais, é difícil remover os efeitos topográficos completamente. A região em que o trabalho foi realizado não está sujeita a áreas montanhosas.

### **2.3 Cálculo da distância interfluvial**

O modelo de distâncias interfluviais possibilita que seja extraído um índice digital que informa sobre a freqüência de rios a partir da distância euclidiana média entre todos os canais fluviais de uma bacia hidrográfica (Ferreira, 1997; Ferreira, 1998).

O cálculo da distância interfluvial (DI) é realizado utilizando-se como base o mapa da rede hidrográfica, sobre o qual é aplicada uma função de análise de distâncias disponível em sistemas de informação geográfica. Desta forma, cada rio é comparado aos demais rios da bacia, no sentido de se obter a distância entre eles, em um raio de 360 graus.

Como resultado, tem-se um mapa de múltiplas distâncias entre rios. As áreas com menores valores de DI identificam setores de alta freqüência de rios por unidade de área. As áreas com maiores valores de DI identificam setores com baixa freqüência fluvial.

O valor médio de DI é calculado por bacia hidrográfica, possibilitando a comparação entre valores de diversas bacias. Desta maneira, identifica-se aquelas mais suscetíveis a impactos nos recursos hídricos.

#### 2.4 Cálculo do índice de degradação hídrica

As três variáveis espacializadas em planos de informação (fontes de poluição – FP, índice de vegetação – IV, distância interfluvial – DI) foram utilizadas para calcular o índice de degradação hídrica para cada bacia hidrográfica. O cálculo do índice, proposto pelo modelo digital, foi obtido através de uma transformação não linear entre o plano de informação FP e os planos de informações IV e DI de acordo com a equação 3:

$$IDH = FP * \frac{1}{IV * DI * 100} \quad (IDH \in \mathbb{R}) \quad [3]$$

O cálculo do índice pelo modelo digital é interpretado da seguinte forma. O índice foi concebido de tal maneira que apresenta uma proporcionalidade direta com os valores de FP e indireta com IV e DI. Isto significa dizer que regiões com altos valores de FP tendem também a apresentar altos valores de IDH. Altos valores de FP significam o mesmo que áreas com alta concentração de fontes poluentes, de acordo com a equação 1. Assim, as regiões onde a freqüência de fontes de poluição é maior ou mais densa, apresentam maiores chances de uma *degradação hídrica* maior na qualidade das águas.

Por outro lado, a equação 3 explica que se a área da bacia apresentar altos valores para o produto do índice de vegetação e distância interfluvial, o valor de IDH tende a ser

menor. Esta relação inversamente proporcional faz sentido desde que onde existir uma vegetação densa (produzindo um alto índice de vegetação – equação 2) a ação de filtros naturais – vegetação – tende a amenizar a degradação hídrica da área. O mesmo raciocínio aplica-se para as áreas onde a rede de drenagem é mais densa. O resultado é que um volume maior de corpos d'água diluirá com mais facilidade a carga poluidora que está recebendo. Neste caso, a *degradação hídrica* será menor.

Outra situação ocorre quando o produto do índice de vegetação e distância interfluvial apresenta baixos valores. Neste caso, o IDH será alto. O modelo digital apresenta a seguinte explicação: com baixa concentração de vegetação (produzindo um baixo índice de vegetação – equação 2), o solo fica mais exposto à ação erosiva, com carreamento maior de matéria sólida para os corpos d'água. O outro fator se refere a uma rede de drenagem menos densa. O resultado é que um volume menor de corpos d'água diluirá com mais dificuldades a carga poluidora que está recebendo. Portanto, o índice de degradação hídrica tende a ser maior. As duas interpretações da proporcionalidade direta e indireta da equação 3 tendem a validar a concepção teórica do modelo digital.



## RESULTADOS

### Localização das bacias hidrográficas

Para se realizar as seguintes análises foi gerado um mapa (anexo 2) contendo a localização das bacias hidrográficas. Consultar este mapa para uma eventual localização de bacias hidrográficas.

### Fontes de poluição

O anexo 3 apresenta o mapa com a distribuição espacial da freqüência de fontes de poluição pontual entre as bacias hidrográficas do agropólo. Nove bacias apresentaram fontes pontuais de poluição. Três (1, 4 e 15) foram classificadas com um índice de freqüência de fontes poluidoras muito baixo (4), sendo duas ao norte do agropólo (1 e 4) e uma na área centro – sul (15). Na região central foram classificadas duas bacias (10 e 13) como de baixa freqüência (6) e duas (14 e 26) como de média freqüência (7). Na região norte do agropólo uma (3) foi classificada como alta (8,0) e outra (12) como muita alta (12). Todas as outras tiveram freqüência zero de fontes de poluição.

O anexo 7 mostra a matriz de impacto para os parâmetros considerados no modelo digital e outros não usados diretamente no modelo das quarenta e quatro bacias hidrográficas. As bacias com valores positivos em ordem decrescente são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Bacias hidrográficas com valores de fontes de poluição maior que zero.

Bacia hidrográfica	R	M	E	FP
12	1	4	1	12
3	2	3	0	8
14	2	1	1	7
26	7	0	0	7
10	3	0	1	6
13	6	0	0	6
1	4	0	0	4
4	4	0	0	4
15	0	2	0	4

Conforme a tabela 1, a bacia que apresentou o maior índice de fontes de poluição (FP) é a 12. Nesta bacia existe uma fonte de poluição considerada elevada (E), 4 fontes de poluição reduzidas (R) e 1 fonte moderada (M). A bacia classificada em segundo lugar é a 3, com um índice de fonte de poluição igual a 8. As diferenças de índice de freqüência de FP nas bacias hidrográficas não são muito sensíveis. Observar que apenas três bacias (12, 14 e 10) apresentaram fontes de poluição consideradas elevadas. As moderadas aparecem em maior número (4), nas bacias 12, 3, 14 e 15. Finalmente, as fontes reduzidas só não foram contabilizadas na bacia 15.

### Índice de vegetação

Pela leitura da legenda do mapa com os índices de vegetação do agropólo (anexo 4), a região apresentou, na sua totalidade, baixos índices. Este fato é explicado pelo fato do agropólo estar situado numa região semi-árida. Conforme a legenda, nenhuma bacia hidrográfica atingiu um patamar positivo. Todos os valores ficaram abaixo de -0,0001. Isto significa pouca presença de vegetação na área. Os valores encontrados para cada bacia foram normalizados para valores positivos variando de 0 a 100, através da relação  $-1/100 \cdot IV$ .

O mapa com os índices de vegetação tende a mostrar quase que uma polaridade concernente aos índices entre as regiões sul e norte do agropólo. Pode-se perceber que as bacias hidrográficas com maiores índices de vegetação ou maior presença de biomassa, encontram-se na parte norte, enquanto as bacias com valores de muito baixo a médio alto, encontram-se na parte sul do agropólo. Nota-se que as de Sobradinho, que apresentaram índices muito altos, bem como as bacias que ficam nos municípios de Petrolina e Juazeiro, possuem a maioria dos projetos de irrigação da região.

Percorrendo a segunda coluna da Matriz de Impacto (anexo 7) – índice de vegetação (IV) – pode-se perceber os baixos valores normalizados para os índices de vegetação do agropólo, todos negativos.

### Distância interfluvial

O mapa de distância interfluvial (DI) (anexo 5) das bacias hidrográficas mostra uma baixa freqüência de presença de rios. Valores de DI elevados refletem uma baixa freqüência de fontes de águas superficiais (rios e nascentes), enquanto DI baixos significam maior densidade de rios por km<sup>2</sup>. Como o agropólo caracteriza-se mais pelo primeiro caso, os recursos hídricos estão mais expostos à ação das fontes poluidoras.

Pelo mapa, pouquíssimas bacias apresentam distância interfluvial muito baixa, o que significaria maior densidade de rios. Este resultado era de se esperar, pois o agropólo está situado na região semi-árida brasileira. Como pode-se perceber no mapa, a grande maioria das bacias pode ser classificada com um índice de DI de médio para muito alto, o que significa a presença de uma rede de drenagem fraca. A maioria das bacias com altos índices de DI (poucos rios) está presente à esquerda do Rio São Francisco, o que corresponde o lado do Estado de Pernambuco. As poucas bacias hidrográficas com baixo índice de DI (muitos rios) estão às margens da represa de Sobradinho, no município de Juazeiro e bem ao extremo norte do agropólo.

### Índice de degradação hídrica

O mapa final do modelo (anexo 6) mostra que a maioria das bacias hidrográficas do agropólo têm índices de degradação hídrica (IDH) igual a zero. Apenas nove bacias apresentaram índices maiores que zero. Uma análise espacial mostra que seis bacias (10, 12, 13, 14, 15 e 26) se encontram na parte central do agropólo, ficando o restante (1, 3 e 4) no extremo norte. Há uma concentração de bacias hidrográficas com potenciais problemas de degradação do lado do Estado de Pernambuco. Apenas uma (26) se encontra do lado da Bahia.

Tabela 2. Bacias hidrográficas com índices de degradação hídrica maior que zero.

Bacia hidrográfica	IDH
12	81,106
13	21,432
1	20,544
15	4,736
26	3,591
14	3,049
10	2,794
4	2,517
3	0,816

A classificação final, segundo o índice de degradação hídrica (Tabela 2), não segue a mesma ordem mostrada na Tabela 1, fontes pontuais de poluição, devido aos diferentes valores dos índices de vegetação e distância interfluvial entre as bacias hidrográficas. A baixa freqüência de fontes pontuais de poluição e mesmo sua ausência na maioria das bacias do agropólo não isentam a região de alcançar altos valores para o índice de degradação em algumas delas. A exceção continua sendo a bacia 12, que concentra a maioria das fontes de poluição pontual do agropólo (Tabela 1). Esta ocorrência, de acordo com a equação 3, contribuiu para que esta mesma bacia recebesse o maior índice de degradação (81,106). A bacia hidrográfica 13, segunda colocada com um  $IDH = 21,432$ , apresenta aproximadamente um quarto do valor da bacia 12. Observar que esta mesma bacia está na sexta posição na Tabela 1.

É interessante fazer uma análise entre as bacias hidrográficas 3 e 13, que mudaram sensivelmente de colocação entre as tabelas 1 e 2, fato que pode ser explicado à luz da equação 3 (do modelo digital). Na Tabela 1 (fontes de poluição) a bacia hidrográfica 3 está em segundo lugar enquanto a 13 está em sexto, obviamente porque na 3 existem mais fontes pontuais de poluição. Porém, quando se considera as outras duas variáveis – índice de vegetação e distância interfluvial – as colocações se alteram (Tabela 2). A 13 passa a ocupar o segundo lugar e a 3 último lugar. Observa-se que a distância interfluvial da bacia hidrográfica 13 (0,038) é mais de dez vezes maior que a da 3

(0.003). Pela explicação do modelo digital (equação 3), isto significa dizer que a quantidade de corpos d'água na 13 é bem menor que na 3, o que criaria maiores possibilidades de poluição dos recursos hídricos. Portanto, o índice de degradação hídrica da bacia hidrográfica 13 tende a ser maior que para a 3, explicando a classificação final.

A distribuição espacial da freqüência de fontes pontuais de poluição (FP) no agropólo é esparsa. Isto aponta para uma presença ainda incipiente de indústrias na região. Do ponto de vista ambiental, isto não deixa de ser um fator positivo. Das duas bacias hidrográficas com valores de FP considerados de alto (3) a muito alto (12), esta última não deságua diretamente no Rio São Francisco. Isto não deixa de ser um fato positivo. Embora se saiba que o destino final do transporte de sedimentos será o São Francisco, existirão atenuantes para este caso.

Oito das bacias com FP estão do lado do Estado de Pernambuco e apenas uma na Bahia. Embora incipiente, isto mostra um desempenho industrial maior do lado pernambucano. Porém, a única bacia hidrográfica com fontes pontuais de poluição do lado baiano apresenta um índice de FP considerado médio. Quer dizer, a carga poluente desta única bacia apresenta riscos moderados para a qualidade da água da região. O agravante desta bacia é que, além de desaguar diretamente no Rio São Francisco, cobre uma grande extensão geográfica, conforme mapa do anexo 3.

O quadro geral de degradação hídrica não é de todo ruim para a região, conforme apresenta o anexo 6. A grande maioria das bacias hidrográficas do agropólo apresenta valores zero e apenas em nove os valores são positivos. Porém, chama a atenção os valores contabilizados para as três primeiras bacias (Tabela 2), com valores expressivos, sendo o valor máximo de 81,106 para a bacia 12 (anexo 7). Olhando o mapa com os IDH (anexo 6), o modelo mostrou que apenas uma (12) das nove bacias, não deságua diretamente no Rio São Francisco. As outras bacias deveriam merecer uma atenção especial por parte dos programas de controle de qualidade de águas. Se os riscos

potenciais de poluição nestas bacias hidrográficas forem grandes, toda a área a jusante vai receber algum tipo de carga negativa.

Das bacias hidrográficas com IDH positivo e que deságuam diretamente no São Francisco, duas delas (4 e 10) têm uma área geográfica proporcionalmente maior se comparadas com as outras, o que significa uma área de captação também grande. Uma está na região central (10) e a outra ao norte (4) do agropólo. Não deixa de ser um fato digno de nota observar que nenhuma bacia às margens da represa de Sobradinho tem IDH maior que zero.

As bacias hidrográficas com os valores mais elevados estão circunscritas aos municípios de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE) porque "os municípios de Petrolina e Juazeiro concentram, segundo a metodologia de classificação utilizada, aproximadamente 42% da carga poluente no agropólo, com destaque para o importante parque industrial, em especial de indústrias alimentícias de Petrolina e, cuja carga poluidora potencial é de reduzida a moderada, por constituir-se principalmente de nutrientes e carga orgânica. A seguir vêm as indústrias químicas/farmacêuticas dos dois municípios, em ambos constando a presença de curtumes, cuja carga poluente potencial é elevada, inclusive passível de conter substâncias orgânicas tóxicas e metais pesados" (Neves et al., 1999).

O modelo mostrou que um programa preventivo de melhoria ou preservação da qualidade das águas da região do agropólo deve se concentrar prioritariamente nos municípios citados. Ele mostrou também que três bacias hidrográficas mais ao norte do agropólo devem merecer atenção, pois já apresentam índices de degradação hídrica perceptível. Pelo exposto, o modelo se mostrou útil e correspondeu à realidade que se observa na região.

Uma análise que mostra bem a ação envolvendo a relação entre os três parâmetros do modelo pode ser feita nas duas bacias adjacentes ao norte do agropólo que apresentaram IDH igual (3 e 4). Olhando as mesmas bacias quanto à freqüência de fontes pontuais de poluição (anexo 3), elas se encontram em

classes bem diferentes. A bacia hidrográfica maior (4) está classificada como muito baixa (4) enquanto a menor (3) está classificada na classe alta (8). Era de se esperar que o resultado final apontasse para um IDH também proporcionalmente maior para a bacia menor, classificada com freqüência alta de fontes de poluição. Porém, isto não é o que apresenta o resultado do modelo, conforme o Anexo 6. A explicação é que a ação dos outros dois parâmetros do modelo modificaram a classificação final das bacias. Por exemplo, o segundo parâmetro, índice de vegetação, é praticamente o mesmo entre as duas bacias hidrográficas (anexo 4). Porém o mesmo não se aplica para o terceiro parâmetro, distância interfluvial. Enquanto a bacia maior (4) está na classe de distância muito alta (poucos rios), a menor (3) está na classe baixa (muitos rios). Este fator atenuou ou compensou para uma maior freqüência de fontes pontuais de poluição, conforme explicado pelo modelo. O resultado final é que ambas bacias hidrográficas apresentaram um resultado final semelhante quanto ao IDH.



## *CONCLUSÃO*

O modelo de degradação hídrica cumpriu com o objetivo da pesquisa. Primeiro, gerou subsídios que facilitaram a seleção de áreas vulneráveis e de riscos potenciais aos impactos ambientais negativos na qualidade das águas superficiais. Segundo, a escolha de áreas a serem monitoradas foi precisa. O que se espera é que as futuras ações de pesquisa sobre a qualidade das águas nestas áreas sejam prioritárias. Como a água é um meio de transporte dinâmico, não significa que os problemas de poluição estejam confinados à bacia hidrográfica. Mas a carga poluidora tende a prejudicar tudo o que se encontra a jusante destas áreas. Ao se tomar os devidos cuidados localmente com a água, o benefício se reverterá a toda a extensão onde ela passar.

Pretende-se ampliar o modelo com considerações sobre o uso agrícola das bacias hidrográficas. A justificativa é que o modelo deve considerar fontes difusas de poluição, presentes em áreas com práticas agrícolas. Na análise dos resultados algumas bacias apresentaram  $FP = 0$ . Como  $FP$  entra no modelo como numerador, o índice de degradação hídrica é zero. Teoricamente, estas áreas não estariam sujeitas a problemas de qualidade de suas águas. Contudo, há atividade agrícola nelas. O modelo deve ser aperfeiçoado e agregar estas fontes difusas de poluição na sua definição. Existem duas alternativas: 1) ampliar o presente modelo para incorporar o tipo de manejo agrícola praticado na bacia; 2) desenvolver o modelo de fontes não pontuais em separado e compor os dois mapas finais em um terceiro, com o resultado encontrado pelos dois modelos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

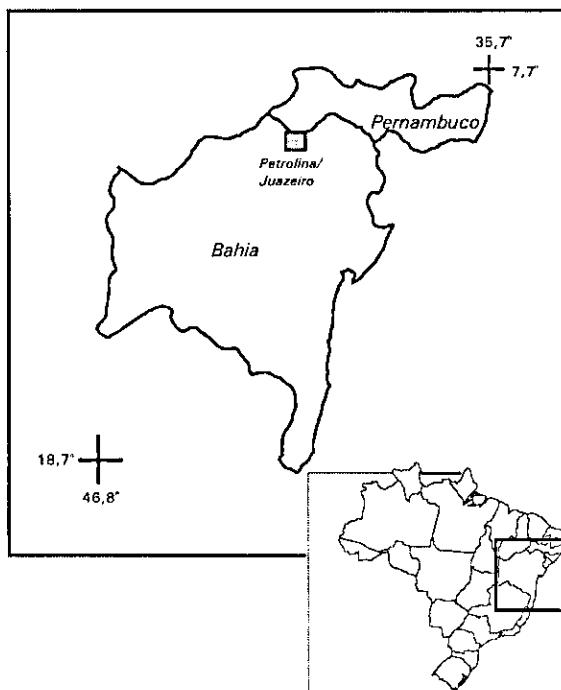
- CLARK LABS. *Cartalinx: the spatial data builder*. Worcester: Clark University, 1998.
- CLARK UNIVERSITY. *Idrisi for Windows: user's manual*. Worcester: Clark University, 1998.
- FERREIRA, M.C. Utilização de modelos digitais de terreno na estimativa de enchentes em bacias hidrográficas: uma avaliação preliminar em escala regional. *Geociências*, v.16, n.1, p.243-256, 1997.
- FERREIRA, M.C. Um modelo digital de distâncias interfluviais para a estimativa da densidade de drenagem através de geoprocessamento. *Geociências*, v.18, n.1, 1998. No prelo.
- JENSEN, J.R. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Upper Sadle River: Prentice Hall, 1996. 316p.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, F.W. *Remote sensing and image interpretation*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750p.
- NEVES, M.C.; RODRIGUES, G.S.; ROSSO, C.R. de; MORICONI, W.; SOUZA, T.de. Diagnóstico ambiental do Hidropólo Minas Gerais: impacto sobre a qualidade das águas – relatório técnico. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 23p. Subprojeto 11.0.99.239.01. Subprojeto em andamento.
- PERRY Jr., C.H.; LAUTENSCHLAGER L.F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v.14, p.169-184, 1984.
- SCHOWENGERDT, R.A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. San Diego: Academic Press, 1997. 522p.



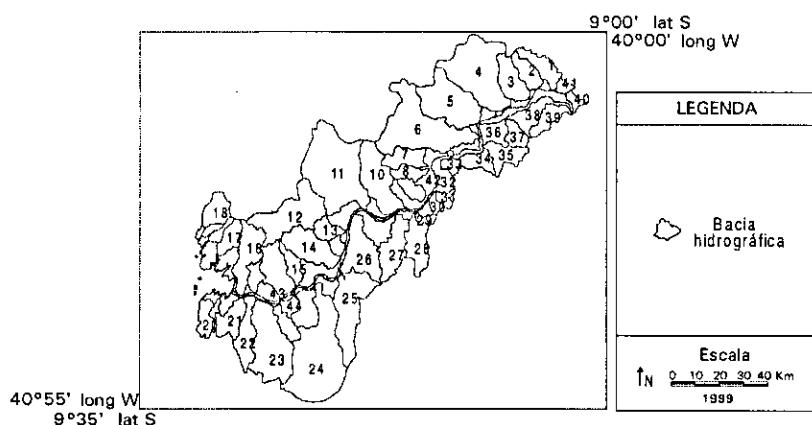
ANEXOS

---



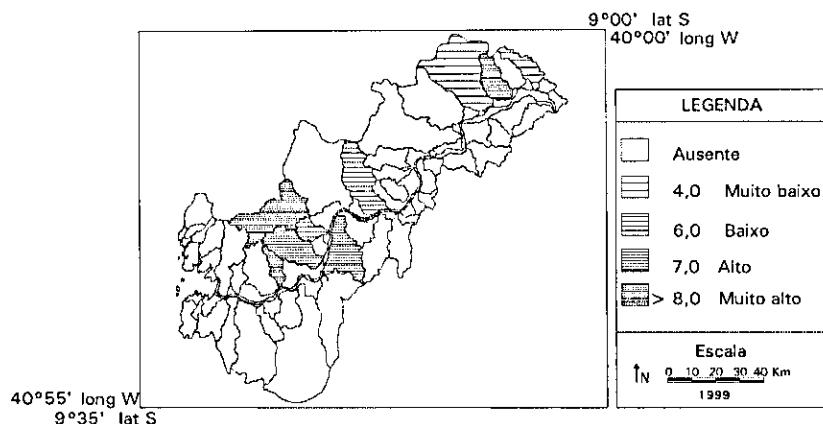


Anexo 1. Localização do agropólo submédio do rio São Francisco.

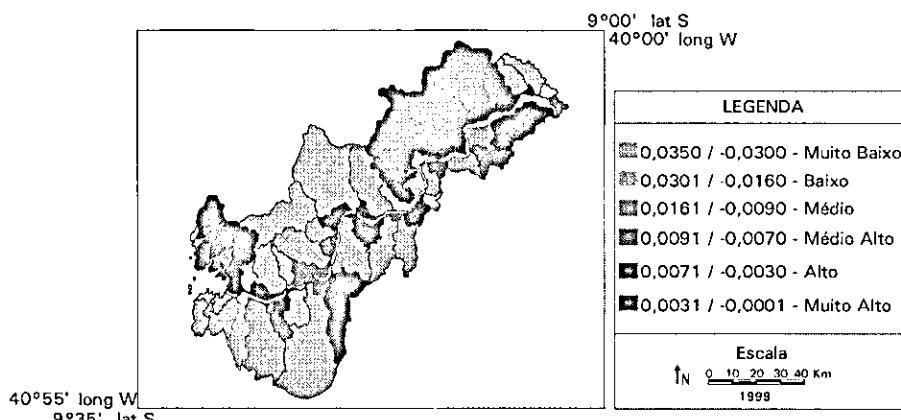


Anexo 2. Distribuição espacial das bacias hidrográficas.



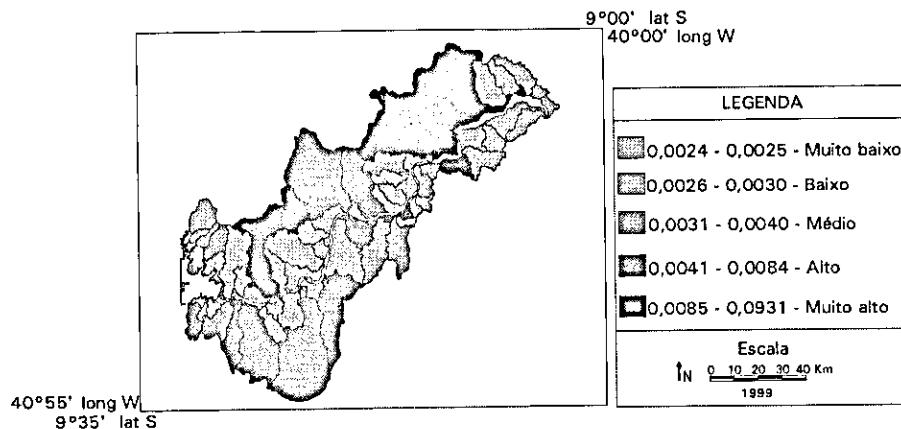


Anexo 3. Classificação das bacias hidrográficas segundo índice de freqüência de fontes poluidoras.

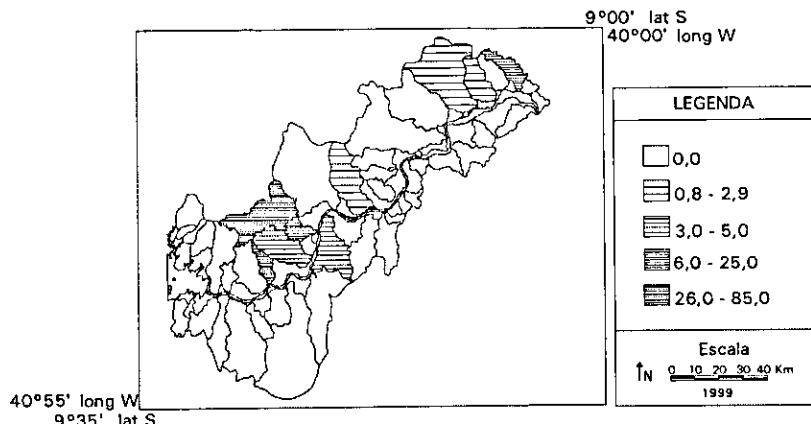


Anexo 4. Classificação das bacias hidrográficas segundo índice de vegetação.





Anexo 5. Classificação das bacias hidrográficas segundo índice de distância interfluviais.



Anexo 6. Classificação das bacias hidrográficas segundo o índice de degradação hídrica.



## Anexo 6. Matriz de impacto para o agropólo submédio do rio São Francisco.

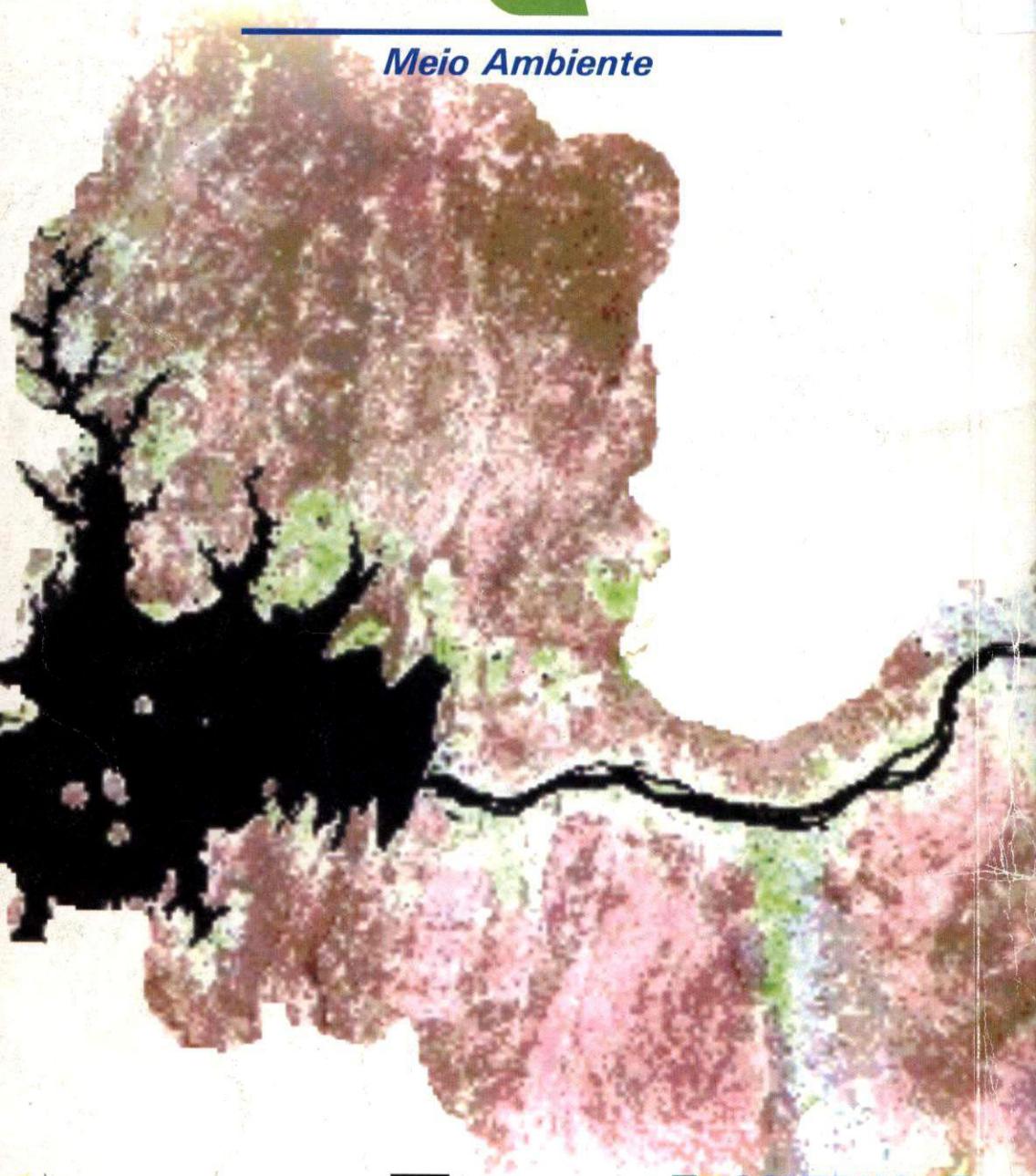
BACIA	IV	DI	Fonte R	Fonte M	Fonte E	FP	IDH
1	0.047	0.002	4	0	0	4	20.544
2	0.299	0.004	0	0	0	0	0.000
3	3.333	0.003	2	3	0	8	0.816
4	7.692	0.048	4	0	0	4	2.517
5	5.000	0.093	0	0	0	0	0.000
6	14.286	0.021	0	0	0	0	0.000
7	11.111	0.003	0	0	0	0	0.000
8	2.632	0.003	0	0	0	0	0.000
9	0.100	0.002	0	0	0	0	0.000
10	1.031	0.005	3	0	1	6	2.794
11	0.543	0.005	0	0	0	0	0.000
12	0.410	0.028	1	4	1	12	81.106
13	1.064	0.038	6	0	0	6	21.432
14	0.826	0.004	2	1	1	7	3.049
15	0.313	0.004	0	2	0	4	4.736
16	5.263	0.003	0	0	0	0	0.000
17	5.556	0.003	0	0	0	0	0.000
18	25.000	0.004	0	0	0	0	0.000
19	100.00	0.002	0	0	0	0	0.000
20	0.490	0.003	0	0	0	0	0.000
21	0.386	0.003	0	0	0	0	0.000
22	0.385	0.005	0	0	0	0	0.000
23	0.685	0.004	0	0	0	0	0.000
24	0.637	0.008	0	0	0	0	0.000
25	1.389	0.004	0	0	0	0	0.000
26	0.741	0.004	7	0	0	7	3.591
27	0.719	0.004	0	0	0	0	0.000
28	1.075	0.003	0	0	0	0	0.000
29	1.515	0.003	0	0	0	0	0.000
30	0.100	0.002	0	0	0	0	0.000
31	0.613	0.003	0	0	0	0	0.000
32	0.840	0.003	0	0	0	0	0.000
33	1.333	0.003	0	0	0	0	0.000
34	0.637	0.008	0	0	0	0	0.000
35	1.389	0.003	0	0	0	0	0.000
36	0.877	0.003	0	0	0	0	0.000
37	0.100	0.002	0	0	0	0	0.000
38	25.000	0.003	0	0	0	0	0.000
39	0.100	0.003	0	0	0	0	0.000
40	0.433	0.003	0	0	0	0	0.000





---

*Meio Ambiente*



**Patrocinador: "Convênio SRH/MMA/Embrapa nº. 475/98".**