



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E
SANITÁRIA**

ALLAN TAVARES CARVALHO

**ANÁLISE MULTICRITERIAL DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS DE JOÃO PESSOA APLICANDO O MÉTODO
DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO EM UM SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

**CAMPINA GRANDE
MAIO DE 2011
ALLAN TAVARES CARVALHO**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIAL DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS DE JOÃO PESSOA APLICANDO O MÉTODO
DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO EM UM SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

**Dissertação apresentada ao
Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
e Ambiental da Universidade Federal
de Campina Grande, como parte dos
requisitos necessários para a
obtenção do grau de Mestre.**

**Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária
Orientadoras: Dra. Iana Alexandra Alves Rufino e Dra. Márcia Maria Rios
Ribeiro**

Campina Grande, maio de 2011.

ALLAN TAVARES CARVALHO



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

C331a

Carvalho, Allan Tavares.

Análise Multicriterial dos Recursos Hídricos Subterrâneos de João Pessoa Aplicando Método do Processo Analítico Hierárquico em um Sistema de Informações Geográficas / Allan Tavares Carvalho. — Campina Grande, 2011.

108 f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadoras: Prof^ª. Dr^ª. Iana Alves Rufino e Prof^ª. Dr^ª Márcia Maria Rios Ribeiro.

Referências.

1. Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos. 2. Análise Multicriterial. 3. Processo Analítico Hierárquico. I. Título.

CDU 556.18 (043)

ANÁLISE MULTICRITERIAL DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS DE JOÃO PESSOA APLICANDO O MÉTODO
DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO EM UM SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Aprovada em 31 de Maio de 2011



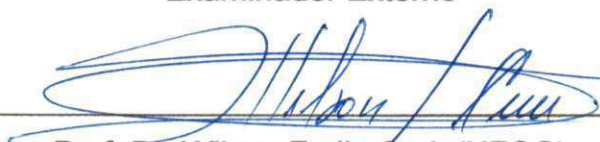
Prof^a. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino (UFCG)
Orientadora



Prof^a. Dra. Marcia Maria Rios Ribeiro (UFCG)
Orientadora



Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida (UFPB)
Examinador Externo



Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi (UFCG)
Examinador Interno

CAMPINA GRANDE
MAIO DE 2011

Em nome dos meus pais, Almir José de Carvalho e Maria Aparecida Tavares Carvalho, pela educação e conscientização transmitida a respeito da preservação e manutenção dos recursos naturais, dedico este trabalho a minha amada filha Maria Luiza Diniz Pedrosa Tavares Carvalho e aos que enxergam estes recursos, principalmente a água, como um direito e uma dádiva para as gerações futuras.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, em especial aos meus primos campinenses pelo incentivo e acolhimento.

À Professora Dayse, por se fazer sempre acessível e aberta ao diálogo desde os primeiros contatos.

Aos amigos da turma do programa de pós-graduação, em especial: Isaias, Rony e Sarah pelos momentos de alegria e angústia compartilhados ao longo desta caminhada.

As Professoras Márcia e Iana, pela orientação nesta pesquisa e pela coerência em suas opiniões.

Ao colega Marcondes, pelo companheirismo e solicitude no enfrentamento de alguns percalços deste trabalho.

Ao mestre Srinivasan, pelo exemplo de excelência e dedicação por aquilo que faz.

À Josete, pelas orientações dentro do programa de mestrado e pelas conversas acaloradas sobre a política paraibana.

A todos que fizeram parte da equipe do Projeto ASUB-PB. Aos funcionários da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, em especial: Aurezinha, pelas conversas inerentes ao programa do mestrado e principalmente por aqueles não inerentes; Vera, pela sua presteza e Ismael, pelos serviços prestados e pela discussões sobre o nosso amado São Paulo FC.

À Universidade Federal de Campina Grande, por me proporcionar a oportunidade de chegar a este patamar profissional através do seu corpo docente de mais alto nível.

À Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba (AESA), pelo dados fornecidos e em especial à Marcello Benigno, pelo incentivo nas primeiras pesquisas voltadas aos recursos hídricos.

À Prefeitura Municipal de João Pessoa, pela disponibilização de dados e materiais para estudo.

À ATECEL, CNPq, CAPES, FINEP e MCT, pelo apoio financeiro e administrativo para realização desta pesquisa.

RESUMO

No âmbito dos recursos hídricos subterrâneos as pesquisas existentes são bem menos numerosas em comparação às das águas superficiais, talvez isto se dê pelo fato dos processos que envolvem a etapa subterrânea do ciclo hidrológico serem mais complexos e de difícil modelagem. A gestão atual dos recursos hídricos subterrâneos em João Pessoa se resume a contabilizar os volumes anuais outorgados, separados por bacias e tipos de uso. Não levando em consideração, por exemplo, influência entre poços, rebaixamento dos níveis hidráulicos ou proximidade com atividades potencialmente poluidoras. Portanto, é importante a aplicação de uma análise multicriterial que possa incorporar uma gama maior de critérios no julgamento de melhores alternativas para a gestão dos recursos hídricos de João Pessoa. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é apresentar uma aplicação do Processo Analítico Hierárquico (PAH) em um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que possibilite a simulação e visualização de cenários, a partir do cruzamento de dados de localização de atividades potencialmente poluidoras, poços de captação de água e das zonas do fluxo subterrâneo. Com esta aplicação foi possível obter como resultados diversos cenários simulados que favorecem a adoção ou exclusão de ações por parte dos órgãos gestores a partir da visualização antecipada dos mesmos.

Palavras-chave: Gestão de recursos hídricos subterrâneos; análise multicriterial; Processo Analítico Hierárquico (PAH).

ABSTRACT

Considering groundwater resources, the existing researches are far less numerous in comparison to surface water ones. It may happen because the processes that involve the groundwater phase of the hydrological cycle are more complex and difficult to model. The current management of groundwater resources in Joao Pessoa, Paraiba, Brazil, comes down itself to account the annual volumes granted, separated by basins and types of use - not taking into consideration, for example, influence among wells, lowering of water table or proximity of potentially polluting activities. Therefore, it is important to be implemented a multicriterial analysis that can incorporate a wider range of criteria in the judging of best alternatives for the management of water resources in Joao Pessoa. This research aims to present an application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) in a software Geographic Information System (GIS), which enables the simulation and visualization of scenarios from the intersection of location data of potentially polluting activities, water extraction from wells and areas of groundwater flow. Considering this application, it was possible obtained several scenarios to support groundwater management decisions.

Keywords: Groundwater management; multicriterial analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. FLUXOGRAMA GERAL DO PAH (SCHMIDT, 1995).	27
FIGURA 2. ESTRUTURA HIERÁRQUICA DE UM NÍVEL DE QUATRO PROBLEMAS DE DECISÃO ESPACIAL (BOROUSHAKI E MALCZEWSKI, 2007), TRADUÇÃO.	30
FIGURA 3. PRINCÍPIO DA COMBINAÇÃO PONDERADA DE CRITÉRIOS REGIONALIZADOS DENTRO DE UM CONJUNTO DE DADOS RASTER.	32
FIGURA 4. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA EXTENSÃO ARCSRIPT AHP 1.1 – DECISION SUPPORT TOOL FOR ARCGIS.....	33
FIGURA 5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (MENESES, 2007).	37
FIGURA 6. FLUXOGRAMA DA MODELAGEM DO FLUXO SUBTERRÂNEO (BATISTA, 2010).	38
FIGURA 7. ETAPAS METODOLÓGICAS.	39
FIGURA 8. FUNÇÃO DE ESCALONAMENTO LINEAR DECRESCENTE. (ROSOT ET AL, 2000), ADAPTADO.	42
FIGURA 9. ZONA DE GERENCIAMENTO PROPOSTA PELO PROJETO ASUB (BATISTA, 2010).	43
FIGURA 10. ÁREAS DO FLUXO SUBTERRÂNEO (BATISTA, 2010), ADAPTADO.	44
FIGURA 11. ESTRUTURA HIERÁRQUICA DE UM NÍVEL DE QUATRO PROBLEMAS DE DECISÃO ESPACIAL (BOROUSHAKI E MALCZEWSKI, 2007), TRADUZIDO.	45
FIGURA 12. ADAPTAÇÃO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA DOS PROBLEMAS DE DECISÃO ESPACIAL.....	46
FIGURA 13. ESTRUTURA CONCEITUAL DO SISTEMA PAH.	47
FIGURA 14. PONDERAÇÕES PARA OS CENÁRIOS DO CRITÉRIO ECOLÓGICO.....	48
FIGURA 15. PONDERAÇÕES PARA OS CENÁRIOS DO CRITÉRIO HIDRÁULICO.	51
FIGURA 16. MODELO CONCEITUAL – CENÁRIO 9.....	56
FIGURA 17. MODELO CONCEITUAL – CENÁRIO 10.....	57
FIGURA 18. MODELO CONCEITUAL – CENÁRIO 11.....	59
FIGURA 19. MODELO CONCEITUAL – CENÁRIO 12.....	60
FIGURA 20. ESPACIALIZAÇÃO DAS ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS.	62
FIGURA 21. DISTANCIAMENTO PADRONIZADO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEIS.	64
FIGURA 22. DISTANCIAMENTO PADRONIZADO DOS LAVA JATOS.....	65
FIGURA 23. DISTANCIAMENTO PADRONIZADO DOS CEMITÉRIOS.	66
FIGURA 24. IRRADIAMENTO DAS DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS DAS FÁBRICAS.	67
FIGURA 25. ÁREAS DO FLUXO SUBTERRÂNEO (BATISTA, 2010), ADAPTADO.....	68
FIGURA 26. DISTANCIAMENTO PADRONIZADO DAS ÁREAS DO FLUXO SUBTERRÂNEO.	69
FIGURA 27. DISTANCIAMENTO PADRONIZADO DOS POÇOS DE CAPTAÇÃO.....	70
FIGURA 28. PAH PARA O CENÁRIO 1.....	72
FIGURA 29. DETALHE DE ÁREAS COM DUAS OU MAIS ATIVIDADES MUITO PRÓXIMAS – CENÁRIO 1.....	73
FIGURA 30. PAH PARA O CENÁRIO 2.....	74
FIGURA 31. DETALHE DE ÁREAS COM DUAS OU MAIS ATIVIDADES MUITO PRÓXIMAS – CENÁRIO 2.....	75
FIGURA 32. PAH PARA O CENÁRIO 3.....	77
FIGURA 33. DETALHE DE ZONA INDUSTRIAL DE JOÃO PESSOA – CENÁRIO 3.....	78
FIGURA 34. PAH PARA O CENÁRIO 4.....	79
FIGURA 35. ÁREA E DESTAQUE DO CENÁRIO 4.....	80
FIGURA 36. LEITURA DO VALOR DO PIXEL DE UM PONTO – CENÁRIO 5.....	81
FIGURA 37. PAH PARA O CENÁRIO 5.....	82
FIGURA 38. LEITURA DO VALOR DO PIXEL DE UM PONTO – CENÁRIO 6.....	83
FIGURA 39. LEITURA DO VALOR DO PIXEL DE UM PONTO – CENÁRIO 6.....	84
FIGURA 40. PAH PARA O CENÁRIO 6.....	85
FIGURA 41. LEITURA DO VALOR DO PIXEL DE UM PONTO – CENÁRIO 7.....	86

FIGURA 42. PAH PARA O CENÁRIO 7.....	87
FIGURA 43. INTERFACE DO ARCGIS 9.2 COM AS INFORMAÇÕES DO CENÁRIO 8 SOBREPOSTAS.	88
FIGURA 44. PAH PARA O CENÁRIO 8.....	89
FIGURA 45. PAH PARA O CENÁRIO 9.....	91
FIGURA 46. PAH PARA O CENÁRIO 10.	92
FIGURA 47. ÁREA DO CENÁRIO 10 EM DESTAQUE.....	93
FIGURA 48. PAH PARA O CENÁRIO 11.	95
FIGURA 49. ÁREA DO CENÁRIO 11 EM DESTAQUE.....	96
FIGURA 50. PAH PARA O CENÁRIO 12.	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. ESCALA DE IMPORTÂNCIA PARA AS COMPARAÇÕES, ADAPTADO DE SAATY (1977).	26
TABELA 2. ÍNDICES DE INCONSISTÊNCIA ALEATÓRIA (IA). (SAATY, 1977), ADAPTADO.	29
TABELA 3. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 1.....	48
TABELA 4. PARÂMETROS DO CENÁRIO 1.....	49
TABELA 5. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 2.....	49
TABELA 6. PARÂMETROS DO CENÁRIO 2 (ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS).....	49
TABELA 7. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 3 (ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS).	50
TABELA 8. PARÂMETROS DO CENÁRIO 3 (ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS).....	50
TABELA 9. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 4 (ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS).	50
TABELA 10. PARÂMETROS DO CENÁRIO 4 (ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS).	51
TABELA 11. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 5 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	52
TABELA 12. PARÂMETROS DO CENÁRIO 5 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).....	52
TABELA 13. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 6 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	53
TABELA 14. PARÂMETROS DO CENÁRIO 6 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).....	53
TABELA 15. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 7 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	54
TABELA 16. PARÂMETROS DO CENÁRIO 7 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).....	54
TABELA 17. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 8 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	55
TABELA 18. PARÂMETROS DO CENÁRIO 8 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).....	55
TABELA 19. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 9 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	56
TABELA 20. PARÂMETROS DO CENÁRIO 9.	56
TABELA 21. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 10 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	57
TABELA 22. PARÂMETROS DO CENÁRIO 10	57
TABELA 23. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 11 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	58
TABELA 24. PARÂMETROS DO CENÁRIO 11.	58
TABELA 25. MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 12 (SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS).	59
TABELA 26. PARÂMETROS DO CENÁRIO 12.	59
TABELA 27. QUANTIFICAÇÃO DAS ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	17
2.1 GERAL.....	17
2.2 ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	18
3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	20
3.3 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO – SAD	23
3.3.1 Métodos multicriteriais	24
3.3.1.1 Método PAH	25
3.4 PAH EM UM AMBIENTE SIG.....	30
3.5 A EXTENSÃO ARCSRIPT AHP 1.1 – DECISION SUPPORT TOOL FOR ARCGIS	32
3.6 ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS	33
3.6.1 Postos de Combustíveis	34
3.6.2 Cemitérios	35
3.6.3 Postos de lavagem de veículos	35
3.6.4 Fábricas	36
4. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1 MATERIAIS.....	37
4.1.1 Área de estudo	37
4.1.2 Dados de entrada e sistemas computacionais	38
4.2 METODOLOGIA.....	39
4.2.1 Pré-processamento	39
4.2.1.1 Aquisição e conversão dos dados.....	40
4.2.2 Mapeamento dos subcritérios ecológicos	40
4.2.3 Subcritérios ecológicos: definição e justificativa de escolha	40
4.2.3.1 Análise de proximidade – geração dos mapas de distância das	41
4.2.4 Mapeamento dos subcritérios hidráulicos	42
4.2.4.1 Geração dos mapas de distância dos poços de captação	42
4.2.4.2 Geração dos mapas de distância das áreas do fluxo subterrâneo	42
4.2.5 Aplicação do PAH – Gerando as Matrizes de Decisão	44
4.2.5.1 Aplicação PAH – critério ecológico	47
4.2.5.2 Aplicação PAH – critério hidráulico	51
4.2.5.3 Aplicação PAH – critério ecológico x critério hidráulico	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 MAPEAMENTO DOS SUBCRITÉRIOS ECOLÓGICOS	61
5.2 PADRONIZAÇÃO DO DISTANCIAMENTO DAS ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS	63
5.3 PADRONIZAÇÃO DO DISTANCIAMENTO DOS SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS	68
5.4 APLICAÇÃO PAH – CRITÉRIO ECOLÓGICO.....	71
5.4.1 Cenário 1	71
5.4.2 Cenário 2	71

5.4.3	Cenário 3	76
5.4.4	Cenário 4	76
5.5	APLICAÇÃO PAH – CRITÉRIOS HIDRÁULICOS	81
5.5.1	Cenário 5	81
5.5.2	Cenário 6	83
5.5.3	Cenário 7	86
5.5.4	Cenário 8	88
5.6	APLICAÇÃO PAH – CRITÉRIO ECOLÓGICO X CRITÉRIO HIDRÁULICO	90
5.6.1	Cenário 9	90
5.6.2	Cenário 10	90
5.6.3	Cenário 11	94
5.6.4	Cenário 12	94
6.	CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES	98
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais no Brasil são considerados abundantes em relação à realidade da maioria dos países ao redor do planeta, principalmente no tocante ao volume hídrico *per capita* que, em 2007, chegava a 43.027 m³ por ano extremamente superior a média mundial de 8.209 m³ por ano (FAO, 2007). Ocorre que esta riqueza hídrica é mascarada por uma distribuição acentuadamente desigual, basta lembrar que 75% de toda água potável disponível no país encontra-se na região norte que abriga apenas 5% da população.

Se não bastasse o controle e gestão deste recurso, por se tratar de elemento imprescindível à manutenção da vida, as disparidades existentes ratificam todos os esforços voltados para a manutenção e gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil.

A gestão das águas subterrâneas é parte fundamental dentro deste contexto, mas segundo relatório do Projeto ASUB - Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas (2010), as pesquisas e práticas de gestão tem-se desenvolvido, no Brasil e em outros países, de forma mais lenta em relação à gestão das águas superficiais.

Tanto as águas subterrâneas quanto as superficiais são partes de um mesmo ciclo e, portanto, também devem ser indissociáveis do ponto de vista da gestão. Entretanto, é perceptível o maior desenvolvimento de metodologias relativas ao estabelecimento dos instrumentos de gestão visando o disciplinamento da fase superficial do ciclo hidrológico. Talvez isso ocorra devido ao fato das interações físicas que compõem o processo hidrológico subterrâneo serem mais complexas e estarem menos visíveis.

A Política Nacional de Recursos Hídricos estabelecida pela Lei Nº 9.433/1997 traça as diretrizes gerais para a gestão dos recursos hídricos como um todo e define seus instrumentos. Já no âmbito mais específico dos recursos hídricos subterrâneos, a Resolução Nº 15/2001 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece diretrizes gerais para a gestão. A partir daí, as pesquisas e estudos dos mecanismos hidrológicos subterrâneos intensificaram-se, principalmente por Instituições acadêmicas e governamentais. A Lei Nº 9.433/1997 ainda traz - como ferramentas que

servirão para a execução da meta fundamental da PNRH, que é a do uso integrado e sustentável - os chamados instrumentos da PNRH. O *Plano de Recursos Hídricos*, o *Enquadramento dos Corpos de Água*, a *Outorga dos direitos de uso de água*, a *Cobrança pelo uso da água bruta* e o *Sistema de Informações Sobre Recursos Hídricos* atuam em conjunto buscando o planejamento e disciplinamento estratégico dos usos, controle e sustentabilidade econômica e ambiental do Sistema de Recursos Hídricos.

As dificuldades encontradas para a aplicação desses instrumentos são enormes, tanto do ponto de vista dos usuários entenderem esse modelo de gestão e se enxergarem como agentes ativos deste processo, quanto dos órgãos em traçar metodologias operacionais de aplicação da política.

Tendo em vista as dificuldades que permeiam a aplicação da PNRH e da implementação de novas tecnologias que gerem resultados que auxiliem na gestão dos recursos hídricos, este trabalho visa, dentre outros objetivos, aplicar uma metodologia de análise multicriterial, através do Processo Analítico Hierárquico (PAH), dentro de um Ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para sinalizar o uso da ferramenta como um importante recurso no auxílio à geração de resultados ponderados e espacializados. Esta junção permite a visualização prévia de cenários diversos dentro da gestão dos recursos hídricos.

2. OBJETIVO

2.1 GERAL

- Aplicar uma metodologia de análise multicriterial - PAH, através do uso do Módulo *ArcScript AHP1.1 – Decision Support Tool*, dentro de um Ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para sinalizar o uso da ferramenta como um importante recurso no auxílio à geração de resultados ponderados e espacializados no âmbito dos recursos hídricos subterrâneos do município de João Pessoa.

2.2 ESPECÍFICOS

- Identificar as áreas críticas passíveis de contaminação por meio das atividades potencialmente poluidoras;
- Relacionar as características de uso de solo e suas influências na qualidade das águas subterrâneas;
- Estabelecer os critérios envolvidos na análise hierárquica observando fatores que interferem no volume e qualidade das águas;
- Promover o zoneamento da região estudada através do apontamento das áreas menos ou mais favoráveis à concessão de outorgas de uso de águas subterrâneas;
- Apresentar os resultados da análise hierárquica de todos os critérios que compõem o sistema proposto neste trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A gestão das águas, aplicadas na maioria dos países, atualmente tem como cerne a administração do recurso envolvendo sua localização e mensuração objetivando resolver as questões de escassez, e ainda buscando a otimização dos recursos hídricos em benefício da sociedade (SETTI, 2001).

Vale lembrar que o conceito atual daquilo que seja benéfico à sociedade passa pelo conceito de desenvolvimento sustentável e, portanto, a garantia da manutenção do ciclo hidrológico para todos os seres vivos.

Segundo Schubart (2000) a gestão de recursos hídricos tem como objetivo assegurar o suprimento de água em quantidade e qualidade para atender às necessidades da sociedade e conduzir de forma sistêmica, as interações entre as intervenções humanas e o meio natural.

A eficiência na gestão de águas deve ser bem estruturada fazendo parte de sua composição básica uma política que trace as diretrizes gerais, um modelo de gerenciamento que fica a cargo da organização legal e institucional e por fim, um sistema de gerenciamento compondo os instrumentos para o preparo e a execução do planejamento do uso, controle e proteção das águas (SETTI, 2001).

No Brasil, o instrumento jurídico que trata do gerenciamento das águas é a Lei N° 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, que institui a Política e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Por introduzir mecanismos que possibilitam a existência de um sistema administrativo participativo, pautado na democracia, a referida Lei apresenta desafios para sua implementação. Porém, tais desafios se constituem numa oportunidade de caminhar no sentido da construção de um estilo de desenvolvimento sustentável para o Brasil (LANNA, 2000).

A Lei N° 9.433/1997 estabelece cinco instrumentos essenciais à boa gestão do uso da água: o plano nacional de recursos hídricos, a outorga de direito de uso, a cobrança, o enquadramento dos corpos de água em classes de uso e o sistema de informações sobre recursos hídricos.

Na prática a outorga e a cobrança são importantes instrumentos de controle do uso dos recursos hídricos, uma vez que permitem ao usuário o direito de consumo de uma determinada vazão ou volume de água, de fonte específica, para certo fim, por um período definido em condições inalienáveis. Ocorre que no Brasil não existe uma fiscalização frequente e correta das vazões ou volumes outorgados.

Outro importante instrumento constituído na Lei Nº 9.433/1997 é o Plano Nacional de Recursos Hídricos. Logo em seu art. 1º, o dispositivo legal enumera os fundamentos da PNRH, afirmando que a água é um recurso natural limitado, de domínio público, dotado de valor econômico e criando o conceito de bacia hidrográfica como unidade territorial para a implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SNGREH). Além disso, o Plano prevê a gestão descentralizada e participativa (LEMOS, 2009).

A dotação de valor econômico à água é um importante elemento de conscientização da necessidade de racionalizar seu uso, uma vez sendo recurso natural limitado, buscando estimular com a cobrança pelo uso do recurso, uma alteração de comportamento dos usuários tanto no consumo quanto no descarte desse recurso natural (DAL BELLO, 2003). Esta diretriz do PNRH dá suporte para importante instrumento desta Política Nacional que é a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, instituída pelo art. 5º, IV e instrumentalizado pelos arts. 19 a 22 da Lei Nº 9.433/1997.

O terceiro fundamento da PNRH dá caráter elementar à água na manutenção da vida, quando afirma que em situações de escassez, o uso prioritário das águas é o consumo humano e a dessedentação de animais em detrimento de quais quer outros usos. Desta forma, as outorgas de uso de água que desrespeitem tal inciso serão declaradas nulas (CAUBET, 2004).

A Política Nacional de Recursos Hídricos não adota a estrutura constitucional de repartição de competências – União, Estado e Município – sendo a bacia hidrográfica a unidade territorial para a implementação da PNRH, e cada bacia é gerenciada por um Comitê, composto por integrantes da União, dos Estados e do Distrito Federal, cujos territórios se situem nas respectivas áreas de atuação, e por fim, de entidades civis de recursos hídricos

com atuação comprovada na bacia, que tem a participação ainda do conselho e do órgão gestor (Lei Nº 9.433/97, art. 39).

A interação entre todos os membros integrantes citados caracteriza uma gestão participativa e descentralizada. A intenção é que, por meio da consensualidade, sejam adotadas medidas mais legítimas e mais fáceis de serem implementadas em cada bacia hidrográfica.

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A gestão de recursos hídricos subterrâneos tem por objetivo a preservação e a otimização do uso, não só pela ampliação da oferta, mas principalmente pela solução dos problemas relativos ao abastecimento das águas oriundas de aquíferos.

Na Resolução Nº 15/2001 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) dentre outras considerações, diz que as águas superficiais, subterrâneas e meteóricas são partes integrantes e indissociáveis do ciclo hidrológico e ainda em seu art. 2º determina que na formulação de diretrizes para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos deverá ser considerada a interdependência das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas, ou seja, independentemente do compartimento em que as águas estejam presentes, tudo faz parte de um único sistema, ou ciclo hidrológico.

Já no art. 3º da mesma Resolução, foram estabelecidas diretrizes que garantam a gestão integrada das águas por meios dos instrumentos da PNRH. As diretrizes em observância são:

I - Nos Planos de Recursos Hídricos deverão constar, no mínimo, os dados e informações necessários ao gerenciamento integrado das águas, em atendimento ao art. 7º da Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997;

II - O enquadramento dos corpos de água subterrânea em classes dar-se-á segundo as características hidrogeológicas dos aquíferos e os seus respectivos usos preponderantes, a serem especificamente definidos;

III - Nas outorgas de direito de uso de águas subterrâneas deverão ser considerados critérios que assegurem a gestão integrada das águas, visando evitar o comprometimento qualitativo e quantitativo dos aquíferos e dos corpos de água superficiais a eles interligados;

IV - A cobrança pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos deverá obedecer a critérios estabelecidos em legislação específica;

V - Os Sistemas de Informações de Recursos Hídricos no âmbito federal, estadual e do Distrito Federal deverão conter, organizar e disponibilizar os dados e informações necessários ao gerenciamento integrado das águas.

Observa-se que em três dos cinco instrumentos há uma preocupação e enfoque em se conceber tanto o sistema hidrológico quanto o sistema de gerenciamento, ambos de forma integrada.

Para um efetivo gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, é fundamental conhecer os parâmetros hidrogeológicos que caracterizam os sistemas aquíferos de determinada região.

Faz-se necessário também a compreensão da dinâmica de uso e cobertura da terra para que medidas que visem à eliminação ou mitigação de impactos negativos sejam tomadas com base em critérios científicos, capazes de garantir a sustentabilidade atual e futura dos sistemas aquíferos (GONÇALVES, 2007).

Os principais parâmetros necessários à outorga dos recursos hídricos subterrâneos podem ser determinados em função do potencial dos sistemas aquíferos, da disponibilidade regional desses sistemas e da demanda dos usuários da água.

Segundo Almeida *et al*, (2006) os parâmetros a serem considerados para que seja estabelecido o potencial dos sistemas aquíferos, devem ser:

- Geologia – constitui o principal componente para a compreensão sobre as características dos aquíferos, sua distribuição espacial, extensão lateral, áreas de recarga e exutório, camadas confinantes e bases impermeáveis, fornecem informações quanto à litologia, estratigrafia, tectônica e estruturação, sedimentologia e geoquímica;

- Geomorfologia – representa o padrão de relevo que predomina em cada compartimento morfológico. É caracterizado pelo tipo de rocha, pendente regional e estruturas e pode ser modificado por processos de erosão, transporte, sedimentação, intemperismo, oscilação de nível freático, entre outros;

- Clima – elementos climáticos como a temperatura do ar, a precipitação pluvial, a insolação e a evaporação, exercem grande influência na

quantificação dos recursos hídricos disponíveis, pois estão diretamente relacionados ao ciclo hídrico e, portanto, são determinantes de excedentes ou déficits hídricos;

- Solo – constitui a camada natural mais externa da superfície da terra e é por ela onde se iniciam os processos de recarga dos aquíferos. O estudo do funcionamento hídrico dos solos é fundamental para o entendimento dos processos de circulação hídrica subterrânea tendo em vista as três funções primordiais que os solos desempenham: função filtro, função reguladora e função recarga.

No estudo do funcionamento hídrico do solo além da identificação do tipo de aquífero, que pode ser livre ou confinado, é necessário compreender suas características físicas. Algumas dessas características são básicas e essenciais para o entendimento da dinâmica hidrogeológica como porosidade, condutividade hidráulica e transmissividade (VENÂNCIO, 2009).

A porosidade, que é a relação entre o volume de poros ou vazios e o volume total de certo material (TEIXEIRA *et al*, 2000), pode ter a sua origem relacionada a formação de rochas ou sedimentos, sendo caracterizada nas rochas sedimentar e pelos espaços entre os grãos ou planos de estratificação, sendo nesse caso, denominada de porosidade primária. Pode estar relacionada também aos eventos tectônicos que deformam as rochas, criando fraturas e fissuras e nesse caso, é denominada de porosidade secundária, ocorrendo principalmente nas rochas cristalinas (CETESB, 2011).

A condutividade hidráulica (K), expressa em cm/s, refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico e depende tanto das características do meio (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas), quanto da viscosidade do fluido. Essa propriedade é utilizada também para estimar a velocidade de deslocamento da água e das plumas de contaminação, pela seguinte fórmula $V = K \times i$, onde i é o gradiente hidráulico, ou seja, a diferença de carga hidráulica entre dois pontos distantes horizontalmente. Em comparação com a topografia de um terreno, "i" seria a declividade.

A transmissividade (T), dada em m^2/s , corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Pode conceituá-la como a taxa de escoamento da água através de

uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário (CETESB, 2011).

3.3 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO – SAD

O SAD faz parte do conjunto de sistemas de informações que regem empresas em todo o mundo. O que o diferencia dos demais sistemas de informação é que ele é direcionado ao planejamento tático, ajudando a resolver problemas organizacionais rotineiros e auxiliando no gerenciamento dos dados específicos. Surgiu do desafio de um mercado competitivo que tem exigido a cada dia mais eficiência em relação à localização e gerenciamento de dados para a tomada de decisão.

Sob a necessidade de ter informações sempre atuais, de forma rápida, e acompanhamento de atividades da empresa, os empresários aderiram a esse sistema, sabendo que este seria favorável às atividades, sem contar com as concorrências externas que estavam na frente em relação à tecnologia (PORTAL DA ADMINISTRAÇÃO, 2010).

Alguns autores como Finlay (1994), definem o SAD de um modo geral como “um sistema computacional que auxilia o processo de tomada de decisão”. Já Turban (1995), define mais especificamente como “um interativo, flexível e adaptável sistema de informação, especialmente desenvolvido para apoiar à solução de um problema gerencial não estruturado para aperfeiçoar a tomada de decisão. Utiliza dados, provê uma interface amigável e permite ao tomador de decisão ter sua própria percepção”. As principais características dos SAD são:

- Possibilidade de desenvolvimento rápido, com a participação ativa do usuário em todo o processo;
- Individualização e orientação para a pessoa que toma as decisões, com flexibilidade de adaptação ao estilo pessoal de tomada de decisão do usuário (MITTRA, 1986);
- Real pertinência ao processo de tomada de decisão, ajudando o usuário a decidir através de subsídios relevantes;

- Manipulação intuitiva e interativa, ou seja, facilidade para que o usuário o entenda, use e modifique de forma interativa (AWAD, 1988).

3.3.1 Métodos multicriteriais

O início das pesquisas envolvendo análise multicriterial começa no final do século XIX com o trabalho de Pareto (1896), observando um problema de agregação de critérios dentro de um critério simples e apontando o conceito de eficiência entre duas alternativas de decisão.

As pesquisas seguem principalmente no âmbito teórico até que estas ganham força no campo operacional quando passa a ser utilizada como ferramenta de tomada de decisão no cenário militar inglês e norte americano durante a segunda grande guerra. (GOICOECJEA *et al*, 1982; HILLIER e LIEBERMAN, 1988; MAYS e TUNG, 1992). A partir daí, o cenário ganha uma variedade de ferramentas que passam a ser desenvolvidas e aplicadas em diferentes áreas do conhecimento.

Segundo Ramirez (2007) os métodos de análise multicriterial caracterizam-se por uma grande diversidade metodológica e podem ser reunidos em três grandes grupos:

- Técnicas de utilidade multiatributo;
- Técnicas de ordenamento e hierarquias e;
- Técnicas de programação matemática.

Os dois primeiros necessitam da discretização dos dados, ou seja, as alternativas devem ser finitas e explicitamente conhecidas. Das técnicas discretas fazem parte: o Método de Utilidade Multiatributo (MAUT), o ELECTRE, o PROMETHEE e o Processo Analítico Hierárquico (PAH). Nas técnicas de programação matemática o MACBETH é um exemplo. Para esta técnica as alternativas são infinitas e baseiam-se no modelo de otimização multicriterial.

3.3.1.1 Método PAH

Os problemas de decisão espacial multicriterial normalmente envolvem um conjunto de alternativas viáveis de decisão, onde este é avaliado com base em vários critérios conflitantes. Desta forma, para este trabalho utilizou-se um modelo multicriterial inspirado no Processo Analítico Hierárquico (PAH) que permite a simulação de diversos cenários a partir de uma metodologia simples e intuitiva.

O PAH foi desenvolvido por Thomas L. Saaty em 1977 no intuito de promover a superação das limitações cognitivas dos tomadores de decisão (ABREU *et al*, 2000). Ele é aplicado para sistematizar uma ampla gama de problemas de decisão nos contextos: econômico, político, social e ambiental, devido a sua simplicidade, robustez e capacidade de avaliar fatores qualitativos e quantitativos, sejam eles, tangíveis ou intangíveis (BARBAROSOGLU e PINHAS, 1995; SHIAU *et al*, 2002).

Conseqüentemente, é um dos métodos mais conhecidos e utilizados mundialmente (JANSEN, SHIMIZU, JANSEN, 2004; PARANHOS e YARASCA, 2009). Uma das aplicações do PAH é junto á problemas ambientais, especialmente aqueles relacionados a recursos hídricos, Gartner (2001) destaca: planejamento de bacias hidrográficas, ponderação dos critérios de avaliação de desempenho de um sistema de irrigação, avaliação de impactos ambientais de projetos hídricos e planejamento de estratégias energéticas.

O PAH baseia-se na capacidade humana de usar a informação e a experiência para estimar magnitudes relativas com a realização de comparações par a par (*pairwise comparisons*) (TOMA e ASHARIF, 2003).

Trata-se de uma abordagem flexível que utiliza a lógica aliada à intuição, com a finalidade de obter julgamentos através de consenso (SCHMIDT, 1995). Seu uso é indicado para problemas que envolvem a priorização de soluções potenciais por meio da avaliação de um conjunto de critérios (ASAHI, TURO e SHNEIDERMAN, 1994; FINNIE e WITTIG, 1999; KIM, 1999).

O PAH proposto por Saaty (1977) é baseado no modelo de ponderação aditiva onde todos os critérios que são considerados relevantes para a decisão são comparados par a par gerando uma medida que expressa a preferência relativa entre os critérios. Desta forma, os valores numéricos que expressam

uma ponderação de importância relativa (preferência) de um contra o outro devem ser atribuídos a cada um deles.

Saaty (1977) e Saaty & Vargas (1991) sugeriram uma escala de comparação composta por valores que variam de 1 a 9 para descrever a intensidade de importância que obedece a seguinte lógica: Um valor de 1 manifesta “igual” importância e um valor de 9 manifesta a “importância extrema” para um dado fator em detrimento a outro fator. (Tabela 1).

Tabela 1: Escala de importância para as comparações, adaptado de Saaty (1977).

Intensidade de importância	Descrição
1	Importância igual
3	Importância moderada
5	Importância forte ou essencial
7	Importância muito forte
9	Extrema importância
2, 4, 6, 8	Valores intermediários
Recíprocos	Valores de comparação inversa

Este é um método quantitativo de comparação analítica que permite a representação hierárquica dos elementos de um problema. A escolha de uma alternativa é feita pela comparação de pares de alternativas, em relação ao seu desempenho a um dado critério. Esta comparação como já foi dito, tradicionalmente utiliza a escala criada por Saaty (1977), que está representada na Tabela 1. Por exemplo, na comparação entre dois critérios, C1 e C2, se o critério C1 é extremamente mais importante que o critério C2, isto é, C1 tem valor 9 em relação a C2, então o valor do critério C2 é 1/9 comparado ao critério C1. Desta forma, o mesmo procedimento é levado a efeito ao nível das alternativas. Assim, para cada valor comparativo dado, a recíproca é concedida para a relação oposta.

Vieira (2004) diz que após as comparações par a par um vetor de prioridades, o chamado ‘peso normalizado’ é calculado para cada critério, considerando a média geométrica de cada linha da matriz dividida pela soma das médias geométricas de todos os critérios e, em seguida, este mesmo processo é realizado ao nível das alternativas, comparando-as entre si para determinar sua importância relativa de acordo com cada critério, ou seja, determinar a pontuação normalizada de cada alternativa.

A identificação da alternativa preferida é obtida da seguinte forma: para cada alternativa multiplica-se a pontuação normalizada pelo vetor de prioridade de cada critério, em seguida a soma destes produtos é a pontuação total da alternativa que terá como a "ideal" a que apresentar a maior pontuação total.

O modo básico do processo do PAH envolve basicamente 5 etapas, Hierarquia; Preferências; Vetor de pesos; Consistência; Valoração (SCHMIDT, 1995). A estruturação dessas etapas é apresentada na Figura 1.

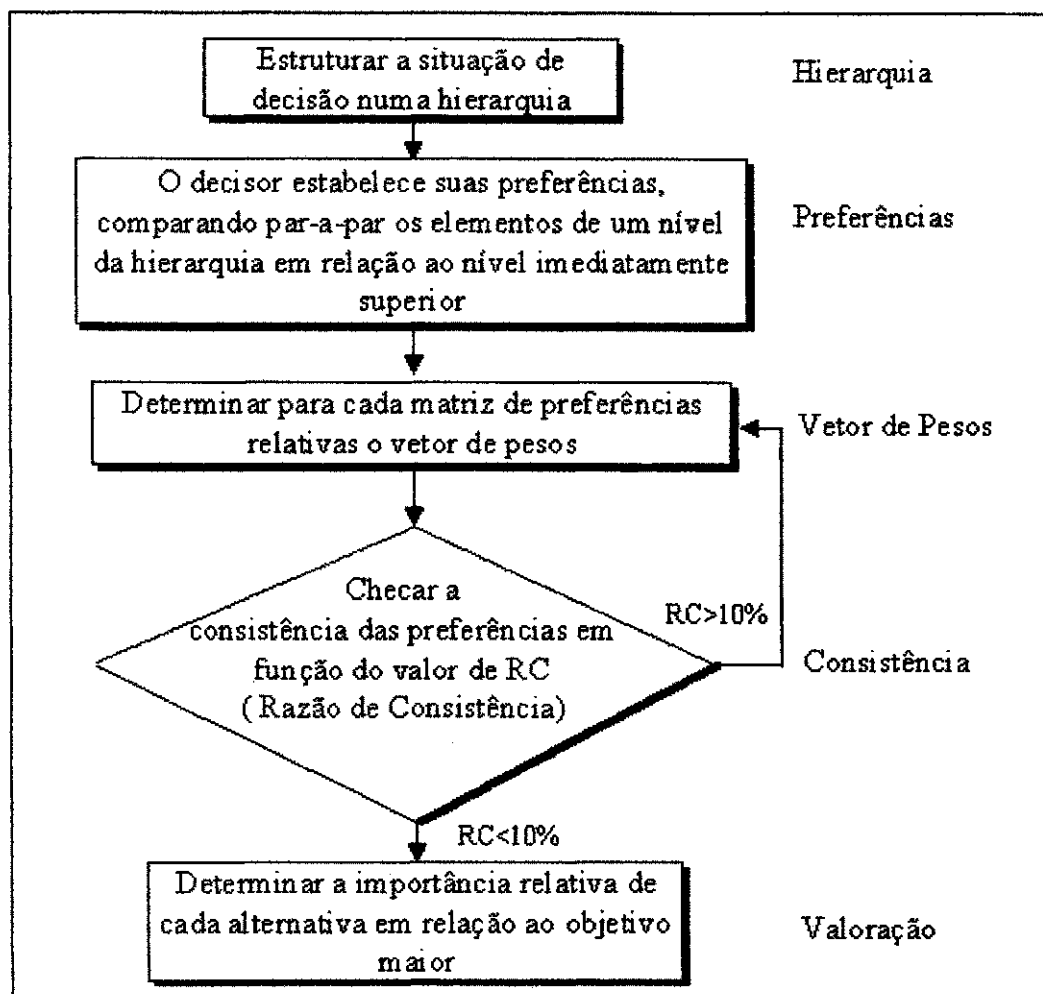


Figura 1. Fluxograma geral do PAH (SCHMIDT, 1995).

O primeiro passo no processo PAH é decompor o problema de decisão em uma hierarquia que consiste dos elementos mais importantes do problema de decisão. No desenvolvimento de uma hierarquia, o nível mais alto é o objetivo final de decisão. A hierarquia então desce do objetivo geral atingindo os elementos mais específicos do problema até um nível de atributos. (SAATY, 1977).

Em seguida as comparações pareadas são executadas gerando as matrizes de preferências. No processo seguinte cada matriz de preferência tem seus pesos normalizados. Após esta etapa, pode-se esperar que qualquer juízo humano seja, em certa medida, imperfeito (ou inconsistente).

Portanto, seria útil ter uma medida de inconsistência associada com a comparação de pares de matrizes. Para medir o grau de coerência, podemos calcular o índice de consistência (IC) a partir da Equação 1.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - p}{p-1} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

λ_{\max} = maior valor próprio que pode ser obtido (maior autovetor);

p = número de elementos da matriz

Além disso, podemos calcular a relação de consistência (CR) em inglês, ou (RC) em português, utilizando a Equação 2.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

IA = Índice Aleatório

Pode ser mostrado que o IA depende do número de elementos que estão sendo comparados (Tabela 2). A razão de consistência (RC) é projetada de tal maneira que, se $RC < 0,10$ então a razão indica um nível razoável de consistência na comparação de pares, se, no entanto, $RC > 0,10$, então os valores da relação são indicativos de decisões inconsistentes. Nesses casos,

deve-se reconsiderar e rever os valores originais nas matrizes de comparação de pares. Saaty (1977) especifica que uma matriz de ordem 2 deve apresentar um RC nulo, matrizes de ordem 3 o RC deve ser menor que 0,05, matrizes de ordem 4 este valor deve ser menor que 0,09, e matrizes de ordem maior que 4 uma inconsistência igual ou menor que 0,10 é aceitável.

Ressalta-se que o RC serve apenas como um fator de alerta (JANSEN, 1984). Uma vez que não se deve orientar o julgamento dos critérios de tal forma que forcem o enquadramento da matriz aos valores previamente estabelecidos de RC, pois o julgamento deve estar muito mais comprometido com a representação da realidade do que com o rigor matemático.

Ainda é importante destacar que o PAH não permite a adição de um critério antes não considerado na análise (JENSEN, 1984), (BELTON, 2002), e (GOMES, 2004). Assim, caso, novos critérios, ou subcritérios sejam adicionados ou retirados se torna necessário desenvolver novamente as matrizes de comparação, e assim, todo o método.

Tabela 2. Índices de Inconsistência aleatória (IA). (SAATY, 1977), adaptado.

Número de critérios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

O PAH tem sido aplicado em várias áreas do conhecimento, já que possui grande potencial de aliar julgamentos quantitativos à informação científica. Recebendo atenção em pesquisas na área ambiental

Na área de recursos hídricos, Lima (2006) aplicou o Método Analítico Hierárquico para facilitar o processo de escolha de alternativas de políticas, programas e projetos relacionados à gestão de recursos hídricos e, mais especificamente, ao uso múltiplo de reservatórios. No trabalho de Lima (2006) foi realizado um estudo de caso, tendo como objeto o uso múltiplo do reservatório ribeirão João Leite, em Goiás. Nele foram exploradas as preocupações dos principais atores envolvidos e efetuou-se a avaliação das opções sob diferentes perspectivas.

Zufo *et al*, (2002) realizaram a comparação entre cinco diferentes métodos multicriteriais a partir do planejamento para a reabilitação, expansão e conservação do sistema produtor de água potável. Os métodos utilizados foram ELECTREE II, PROMETHEE II, Programação por Compromisso, Teoria dos Jogos Cooperativos, o Método Analítico Hierárquico.

3.4 PAH EM UM AMBIENTE SIG.

Em uma análise multicriterial realizada em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), as alternativas estão representadas nas bases de dados, cada camada contém valores atribuídos às alternativas, e cada alternativa (por exemplo, célula ou polígono) está relacionada aos maiores elementos de nível.

De forma clássica, a estrutura do PAH em um ambiente SIG é representada por uma hierarquia de quatro níveis formada por meta, objetivos, atributos e alternativas (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2007) (Figura 2).

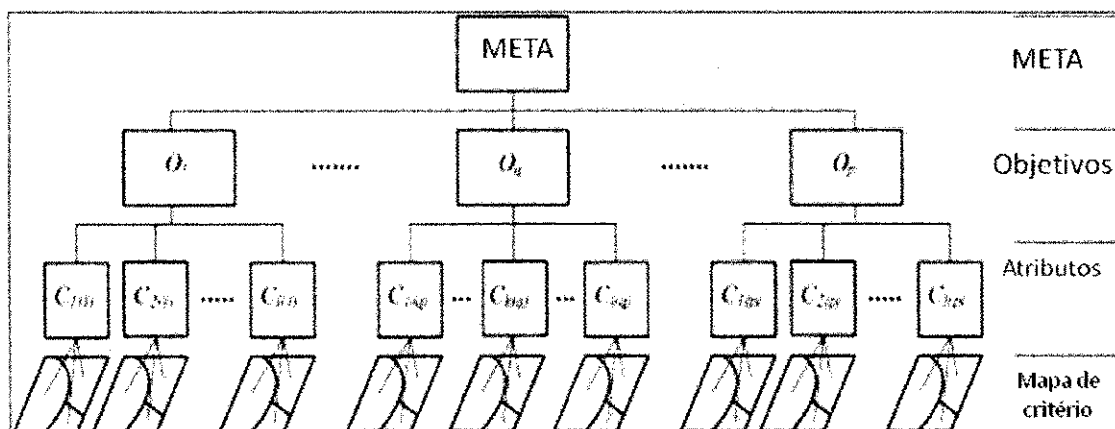


Figura 2. Estrutura hierárquica de um nível de quatro problemas de decisão espacial (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2007), tradução.

Uma vez que os sistemas de informações sobre recursos hídricos no âmbito federal, estadual e do Distrito Federal deverão conter, organizar e disponibilizar os dados e informações necessários ao gerenciamento integrado das águas, então esta necessidade demanda o desenvolvimento de pesquisas, métodos e tecnologias voltadas para o levantamento e gerenciamento de informações relacionadas aos recursos hídricos. Desta forma, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem sido empregados visando este objetivo.

Dentro do ambiente de SIG, o PAH tem sido empregado de três maneiras distintas. A primeira delas emprega o PAH para obter os pesos de importância associados a camadas do mapa de critério para em seguida serem agregados às camadas do mapa de uma forma similar aos métodos de combinação ponderada. Esta abordagem é de particular importância para problemas de decisão espacial com um grande número de alternativas que tornem impossível completar as comparações de pares de alternativas (EASTMAN *et al*, 1993; MARINONI, 2004). A segunda aplica o método para combinar a prioridade para todos os níveis da estrutura hierárquica, incluindo o nível que representam as alternativas, vale lembrar que para este caso, o número de alternativas deve ser reduzido (JANKOWISKI e RICHARD, 1994). E por fim, a terceira maneira trabalha o PAH associado à quantificadores fuzzy linguísticos. Esta associação potencializa as alternativas geradas onde as pequenas modificações de cenário devem ser consideradas.

No PAH dois fatores importantes devem ser considerados, o primeiro é que o PAH em um ambiente de SIG funciona como uma calculadora de mapas, que executa operações algébricas nas diversas camadas de informação, o segundo fator, é que a álgebra de mapas em um ambiente de SIG só será executada tendo como dados de entrada apenas os de natureza *raster* inteiros.

O termo “álgebra de mapas” foi cunhado por Tomlin (1990), para indicar o conjunto de procedimentos de análise espacial em Geoprocessamento que produz novos dados, a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas. Barbosa (1997) traduz este conceito sobre álgebra de mapas dizendo que:

Esta visão concebe a análise espacial como um conjunto de operações matemáticas sobre mapas, em analogia aos ambientes de álgebra e estatística tradicional. Os mapas são tratados como variáveis individuais, e as funções definidas sobre estas variáveis são aplicadas de forma homogênea a todos os pontos do mapa.

A álgebra de mapas compõe uma linguagem especializada para realizar operações que tem tanto um sentido matemático quanto cartográfico e espacial.

3.5 A EXTENSÃO ARCSCRIPT AHP 1.1 – DECISION SUPPORT TOOL FOR ARCGIS

Softwares de SIG atualmente já possuem módulos para executar operações baseadas em métodos multicriteriais, como é o caso do software Idrisi, outros necessitam de uma implementação de um módulo ou extensão para executarem tais procedimentos, como é o caso do software ArcGIS. A questão de a funcionalidade ter de ser ou não implementada no software não influencia nos resultados obtidos (MARINONI, 2004).

A extensão *Arcscript AHP 1.1 – Decision Support Tool For Arcgis* foi desenvolvida por Marinoni em 2004. Esta extensão realiza uma determinação do peso dos critérios de acordo com o PAH a partir da entrada de dados *raster* inteiros e definidos dentro do mesmo intervalo de *pixels*, do contrário, o somatório das ponderações aditivas não poderia ser realizado (Ver Figura 3).

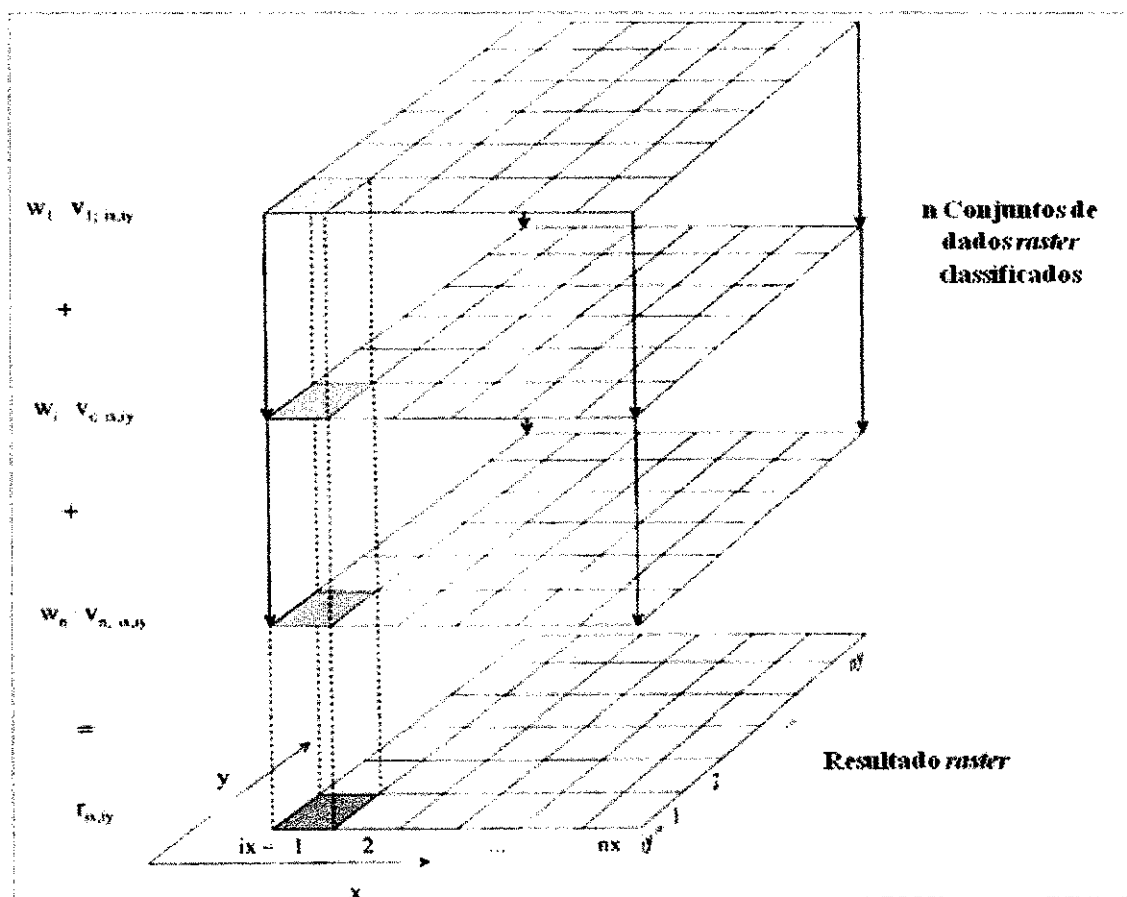


Figura 3. Princípio da combinação ponderada de critérios regionalizados dentro de um conjunto de dados *raster*.

Esta extensão constitui-se como uma ferramenta poderosa para a criação de mapas de aptidão como o ordenamento do território, mapeamento de risco, dentre outros.

Permite a comparação de até 20 critérios e necessita da extensão *ArcGIS Spatial Analyst* para usar essa extensão PAH. A Figura 4. Apresenta um resumo das características gerais da extensão.

<u>Tipos de Problema decisão</u>	<u>Especificar Peso Critério</u>	<u>Raster ESRI Geodatabase</u>
<u>Avaliação alternativa</u>	<u>Métodos e técnicas implementadas</u>	<u>Raster Dataset</u>
<u>Selecione ou alocar</u>	<u>Processo Analítico Hierárquico</u>	<u>Descrição dos componentes do sistema</u>
<u>Avaliação da adequação</u>	<u>Extensão análise</u>	<u>Extensão ArcGIS Spatial Analyst é necessário para usar essa extensão AHP.</u>
<u>Área de Conhecimento de modelagem de domínio</u>	<u>Todos (Usuário Extensão)</u>	<u>Software Obrigatório</u>
<u>Modelagem de decisão</u>	<u>Análise Definido</u>	<u>ArcGIS</u>
<u>Adequação do habitat</u>	<u>Tipo de dados de entrada</u>	<u>Download disponível online</u>
<u>Alocação de Uso da Terra</u>	<u>Dataset espacial</u>	<u>Sim</u>
<u>Fases de planejamento e decisão de processo / Passos Servido</u>	<u>Formato dos dados de entrada</u>	<u>Custo</u>
<u>Análise de condição e</u>	<u>ESRI Geodatabase</u>	<u>Livre</u>
<u>Avaliação</u>	<u>Raster ESRI Geodatabase</u>	<u>Componentes de sistemas funcionais</u>
<u>Especificação dos Critérios de Avaliação</u>	<u>Raster Dataset</u>	<u>Integração GIS Analysis</u>
<u>Priorização das Alternativas</u>	<u>Tipo de dados de saída</u>	<u>Integração GIS Display</u>
	<u>Image Map</u>	
	<u>Formato dos dados de saída</u>	

Figura 4. Características gerais da extensão Arcscript AHP 1.1 – Decision Support Tool For ArcGIS

3.6 ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS

Dentro de uma área urbanizada como o município de João Pessoa, são diversos os processos humanos que podem acarretar prejuízos para o ambiente e, mais precisamente, para a qualidade das águas subterrâneas. Existe uma infinidade de possíveis poluidores hidrogeológicos e que, devido a este número ser elevado, torna-se difícil a identificação, mensuração, ou

ponderação dos danos provocados por todos eles. Existem algumas que quase sempre estão presentes em cidades de médio e grande porte como postos de combustíveis, lava jatos, cemitérios e fábricas.

3.6.1 Postos de Combustíveis

A contaminação de águas subterrâneas por vazamentos em postos de combustíveis é uma preocupação crescente no Brasil (SUGIMOTO, 2004). As indústrias de petróleo lidam diariamente com problemas decorrentes de vazamentos, derrames e acidentes durante a exploração, refino, transporte e operações de armazenamento do petróleo e seus derivados (CORSEUIL, 1997).

A Resolução CONAMA Nº 273/2000, que dispõe sobre a caracterização, instalação e operacionalização dos postos de armazenamento, distribuição e revenda de combustíveis diz, em seu artigo 5º, inciso I, letras “c” e “e” que, para a emissão da Licença Prévia e de Instalação por parte do órgão ambiental competente, é necessário dentre outros documentos o croqui de localização do empreendimento indicando a situação do terreno em relação ao corpo receptor e cursos d’água; e a caracterização hidrogeológica com definição do sentido do fluxo das águas subterrâneas, indicação das áreas de recarga, localização dos poços de captação destinados ao abastecimento público ou privado registrados nos órgãos competentes até a data de emissão do documento, no raio de 100 m, considerando as possíveis interferências das atividades com corpos d’águas superficiais e subterrâneos.

No Brasil existem aproximadamente 35 mil postos de combustíveis (ANP, 2007), sendo que a maioria foi construída na década de 70. Com uma média de vida útil de 25 anos para tanques subterrâneos, supõe-se que eles já estejam comprometidos. No ano de 2007 o consumo de álcool, gasolina e diesel foi de 9, 24 e 41 milhões de m³, respectivamente (ANP, 2008). A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) mantém um cadastro de áreas contaminadas no Estado de São Paulo. Os dados são preocupantes, ainda mais que desde o final de 2008 o órgão ambiental vem intensificando as fiscalizações e constatando que dos 78% do número de áreas contaminadas no Estado de São Paulo decorrem de problemas provocados por

instalações irregulares de estabelecimentos que possuem tanques subterrâneos de combustíveis.

Deste ponto é possível inferir que a cidade de João Pessoa possua uma realidade semelhante, uma vez que, o padrão de construção dos tanques de armazenamento, não difere significativamente do padrão de São Paulo. A contaminação por meio desta atividade ocorre principalmente devido a corrosão dos tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis.

3.6.2 Cemitérios

Considerando a necessidade de regulamentação dos aspectos essenciais relativos ao processo de licenciamento ambiental de cemitérios observado na Resolução CONAMA nº 335, de 3 de abril de 2003, os cemitérios constituem uma atividade potencialmente poluidora, devido ao risco de contaminação do solo e do lençol freático próximos ao local.

Esta contaminação se dá com a percolação do necrochorume – neologismo que designa líquido liberado pelos cadáveres em putrefação, através do solo e podendo chegar até os rios subterrâneos.

A contaminação pode atingir o aquífero, que também pode conter micro-organismos patogênicos que transportados pelas chuvas, infiltram no solo podendo chegar aos lençóis freáticos. Trata-se de uma solução aquosa rica em sais minerais e substâncias orgânicas desagradáveis, de cor castanho-acinzentada, viscosa, de cheiro forte e grau variado de patogenicidade. Este líquido tóxico é constituído de 60% de água, 30% de sais minerais e 10% de substâncias orgânicas (SILVA, 1998).

3.6.3 Postos de lavagem de veículos

Esta atividade, também conhecida como lava jato, possivelmente contamina os solos e águas subterrâneas do mesmo modo que os postos de combustíveis, mas de uma forma mais moderada.

Esta atividade trabalha geralmente na limpeza, remoção e troca dos lubrificantes derivados do petróleo e estes processos nem sempre são feitos de forma correta. Nas lavagens dos veículos a água utilizada, contendo os

resíduos de sujeira, partículas em suspensão, combustível e óleos lubrificantes, geralmente não é armazenada como deveria. Esta água contaminada infiltra no solo podendo comprometer o lençol freático. Nas trocas de óleo pode acontecer da mesma forma.

3.6.4 Fábricas

As fábricas, em geral, constituem um risco à qualidade das águas como um todo independentemente do estágio do ciclo hidrológico. Atividades fabris dos mais diversos seguimentos como, por exemplo, fábricas têxteis, de calçados, produtos de limpeza, e bebidas, podem gerar desequilíbrios e comprometer físico-químico e biologicamente o ciclo hidrológico através das descargas de seus efluentes nos cursos d'água superficiais ou do seu acondicionamento em fossas sépticas.

Existem ainda outros importantes focos de contaminação como, por exemplo, fossas de esgotos domésticos e vazamentos na rede pública de esgotamento sanitário, porém, estes são extremamente difíceis de serem identificados e, por conseguinte, inviavelmente espacializáveis.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados estão distribuídos entre a área de estudo para a aplicação da pesquisa; os dados necessários para a montagem da análise; e o ambiente computacional com os softwares usados para a aplicação do sistema.

4.1.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde ao Município de João Pessoa, capital da Paraíba e polarizador das atividades políticas e socioeconômicas do estado. O município está inserido entre as coordenadas 7°14'29" de Latitude Sul / 34°58'36" de Longitude Oeste e 7°03'18" de Latitude Sul / 34°47'36" de Longitude Oeste. Limita-se, ao Norte com o Município de Cabedelo, ao Sul, com o município do Conde, ao Oeste com os Municípios de Bayeux e Santa Rita, e ao Leste com o Oceano Atlântico (Figura 5). Possui uma área de, aproximadamente, 211 km² (João Pessoa, 2008) e uma população de cerca de 723.514 habitantes (IBGE, 2010).

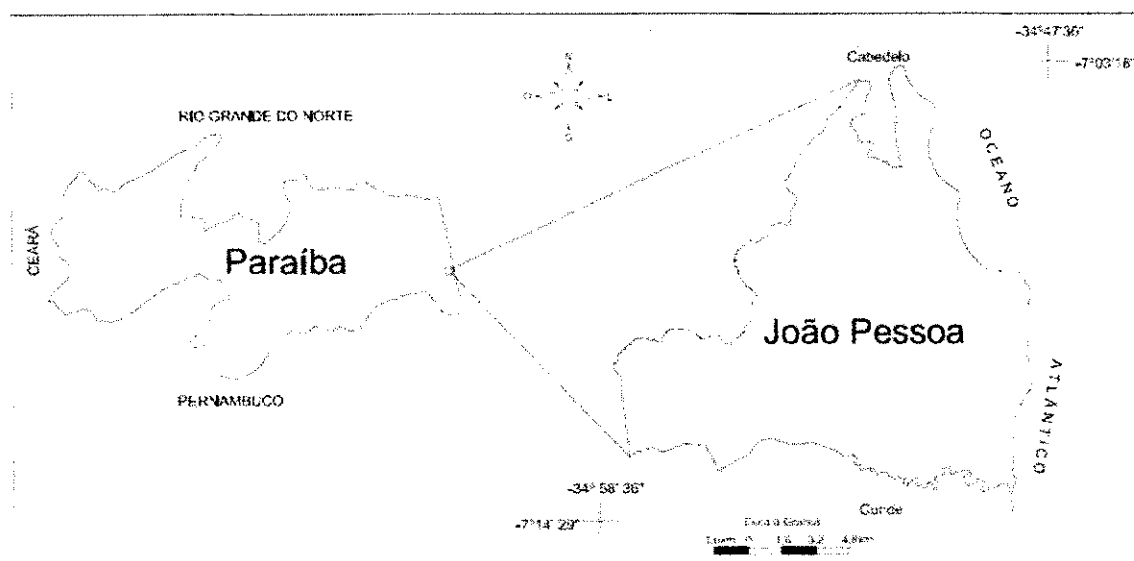


Figura 5. Localização da área de estudo (MENESES, 2007).

4.1.2 Dados de entrada e sistemas computacionais

Os dados sobre as atividades potencialmente poluidoras foram adquiridos pelo sistema de cadastro da Prefeitura Municipal de João Pessoa, com informações atualizadas até 2008. Os dados sobre a disponibilidade hídrica foram adquiridos a partir da página oficial da Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba (AESA) e da pesquisa desenvolvida por Batista (2010).

Para esta aplicação os dados referentes às atividades potencialmente poluidoras restringem-se apenas ao tipo de uso, sua dimensão e sua localização geográfica. Já para a disponibilidade hídrica os dados restringem-se à localização geográfica das áreas de recarga do aquífero e dos poços de captação.

As áreas de recarga do aquífero foram determinadas a partir da modelagem do fluxo subterrâneo proposto por Batista (2010). A Figura 6 mostra o fluxograma da modelagem do fluxo subterrâneo utilizado em seu trabalho.

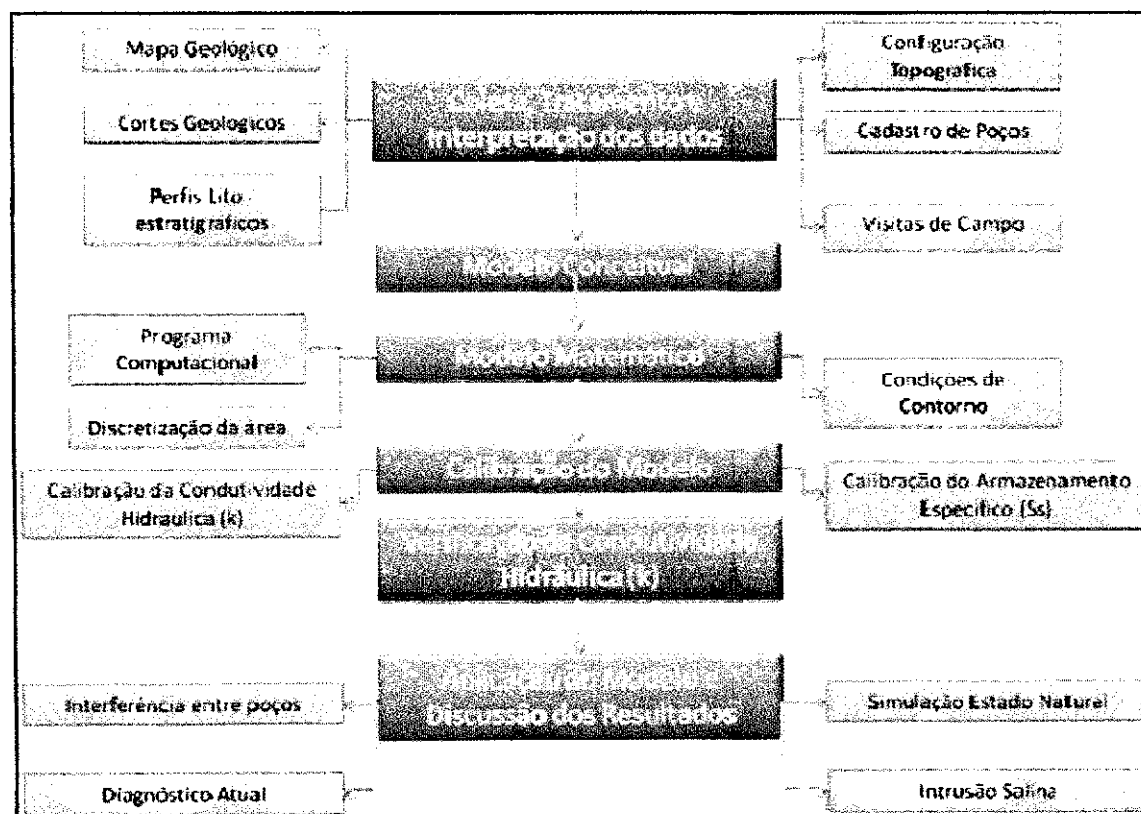


Figura 6. Fluxograma da modelagem do fluxo subterrâneo (BATISTA, 2010).

Os sistemas computacionais utilizados foram os seguintes:

- Processamento, armazenamento e análise espacial;
Software ArcGis 9.2 (ESRI)
- ArcScript AHP 1.1 – Decision Support Tool for ArcGIS.

4.2 METODOLOGIA

As etapas metodológicas para a aplicação da análise multicriterial estão dispostas e representadas na Figura 7.

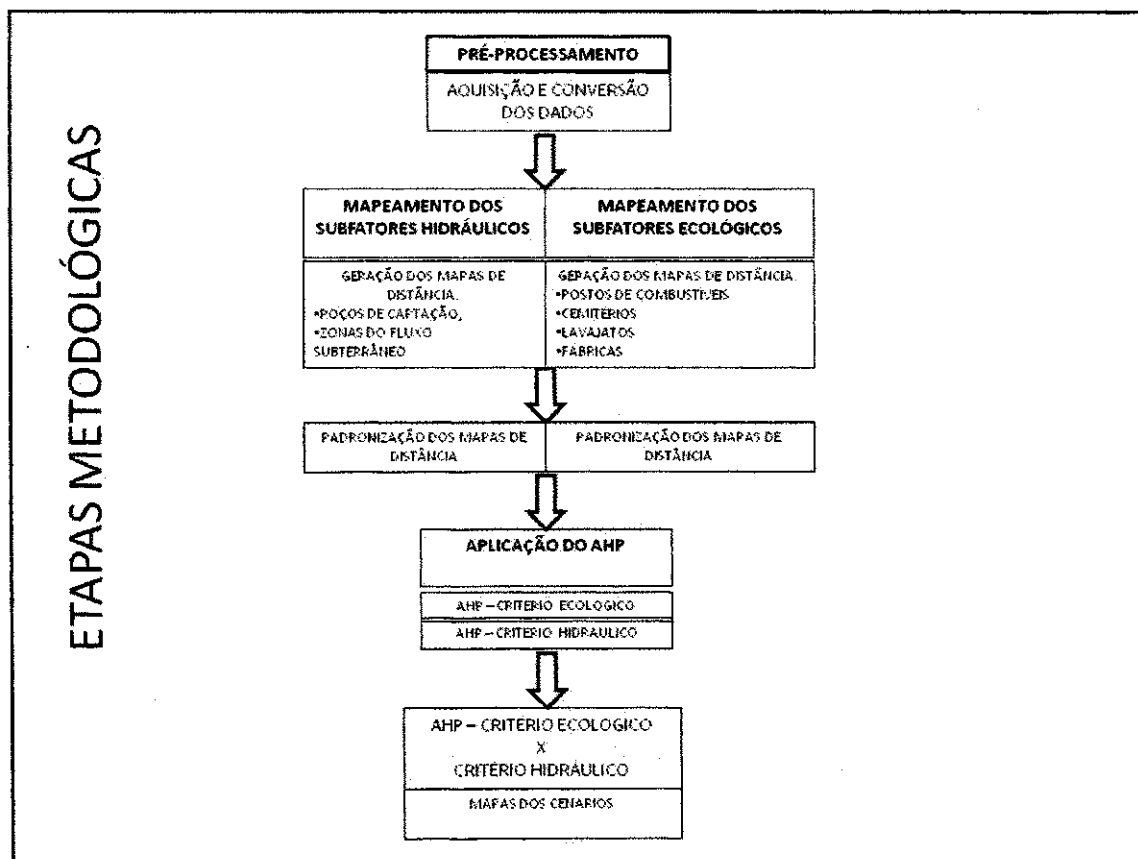


Figura 7. Etapas metodológicas.

4.2.1 Pré-processamento

Nesta etapa os dados foram tratados e adequados às necessidades de formato e conteúdo para tornarem-se aplicáveis a análise.

4.2.1.1 Aquisição e conversão dos dados

Todos os dados foram adquiridos em formato *shapefile*, sendo a maioria deles obtidos em órgãos oficiais - como a prefeitura de João Pessoa, e ainda, outros extraídos do trabalho de Batista (2010). Sendo assim, todos os dados tiveram que ser convertidos para o formato *raster*, uma vez que este é o tipo de formato exigido para que possam ser realizadas as operações envolvendo as camadas de informação.

4.2.2 Mapeamento dos subcritérios ecológicos

Todos os subcritérios utilizados, que compõem o critério ecológico, foram adquiridos através do banco de dados da prefeitura municipal de João Pessoa (2008). Com base nestes dados os subcritérios, postos de combustíveis, lava jatos, cemitérios e fábricas, foram espacializados em um ambiente SIG e separados em camadas de informação.

4.2.3 Subcritérios ecológicos: definição e justificativa de escolha.

Nesta pesquisa foram selecionadas algumas atividades potencialmente poluidoras que, além de estarem presentes no município estudado e serem muito comuns em quase todas as cidades de médio e grande porte, também são aquelas que frequentemente oferecem maior risco de contaminação ao lençol freático, são elas:

- Postos de combustíveis;
- Cemitérios;
- Postos de lavagem de veículos;
- Fábricas.

4.2.3.1 Análise de proximidade – geração dos mapas de distância das atividades potencialmente poluidoras.

Para cada uma das atividades, anteriormente citadas, foi criado um mapa de distância, para o qual para cada polígono foi produzido o irradiação da distância euclidiana até o seu vizinho mais próximo, num conjunto de polígonos que representavam a mesma camada de informação pré-especificada (ROSOT et al, 2000).

Tomando por exemplo hipotético três postos de combustíveis, A, B e C com as seguintes relações de distância: posto A está a 100 metros do posto B e a 300 metros do posto C e, adotando a escala de tons de cinza (entre o branco e o preto), analiticamente o irradiação da distância do posto A ao posto B substituirá o valor de 100 metros pela indicação de uma tonalidade mais próxima do branco (cinza claro), enquanto que o irradiação do posto A ao posto C substituirá o valor de 300 metros pela indicação de uma tonalidade mais próxima do preto (cinza escuro).

Realizado o processo do cálculo do distanciamento euclidiano dos subcritérios envolvidos, uma padronização foi estabelecida para que os mapas de distância estivessem em mesma escala e intervalos correspondentes a um *byte*. Para tanto, foi utilizada uma equação linear simples ($Y=aX+b$), definindo que quanto menor a distância entre os subcritérios menor seria o valor do nível de cinza. Assim os mapas de distância foram padronizados numa escala contínua de distanciamento, onde 0 representa as menores distâncias e 255 as maiores, mantendo-se uma função de adequação linear crescente. Ou seja, esse irradiação é realizado para converter analiticamente a distância física entre dois polígonos de mesma natureza para uma escala de tons de cinza.

Sendo assim, ficou estabelecido que quanto mais próximos fossem os polígonos uns dos outros, maior seria o seu potencial de degradação. Por fim, os mapas de distância foram padronizados numa escala contínua de vulnerabilidade – 0 (mais vulnerável) e 255 (menos vulnerável). (Figura 8).

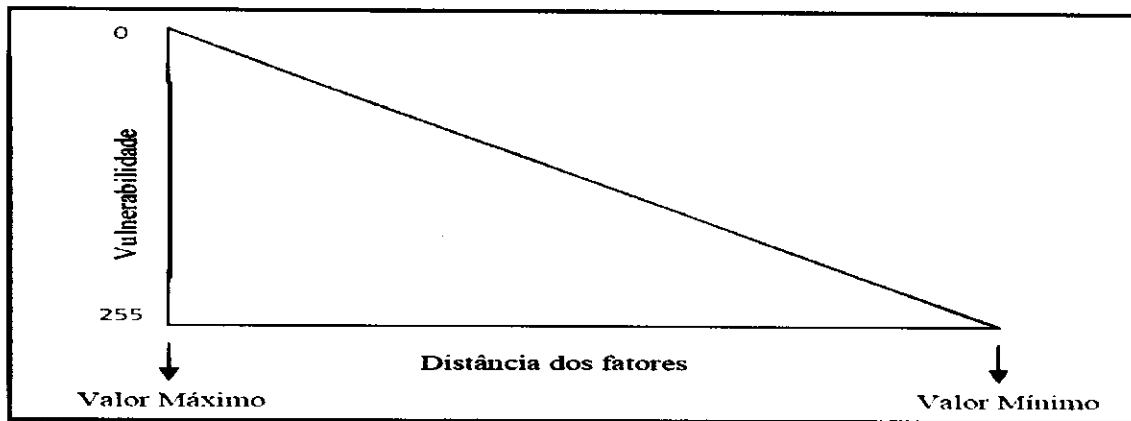


Figura 8. Função de escalonamento linear decrescente. (ROSOT *et al*, 2000), adaptado.

4.2.4 Mapeamento dos subcritérios hidráulicos

Nesta etapa foram adquiridos e espacializados os subcritérios que compõem o critério hidráulico.

4.2.4.1 Geração dos mapas de distância dos poços de captação

A geração destes mapas se deu seguindo procedimento igual ao dos mapas de distância das atividades potencialmente poluidoras, já anteriormente citados.

4.2.4.2 Geração dos mapas de distância das áreas do fluxo subterrâneo

Batista (2010) em seus estudos sobre a região da bacia sedimentar do baixo curso do rio Paraíba, da qual o Município de João Pessoa está inserido, calibrou e modelou o fluxo subterrâneo de uma área que pertence a esta bacia tomando primordialmente como base as características de condutividade hidráulica.

A área modelada corresponde a uma das zonas de gerenciamento propostas pelo PROJETO ASUB (2010). Esta área é individualizada pela falha de Cabedelo a oeste, pelo oceano Atlântico ao norte e a leste e pelo divisor de bacia do rio Gramame ao sul, como mostra a Figura 9.

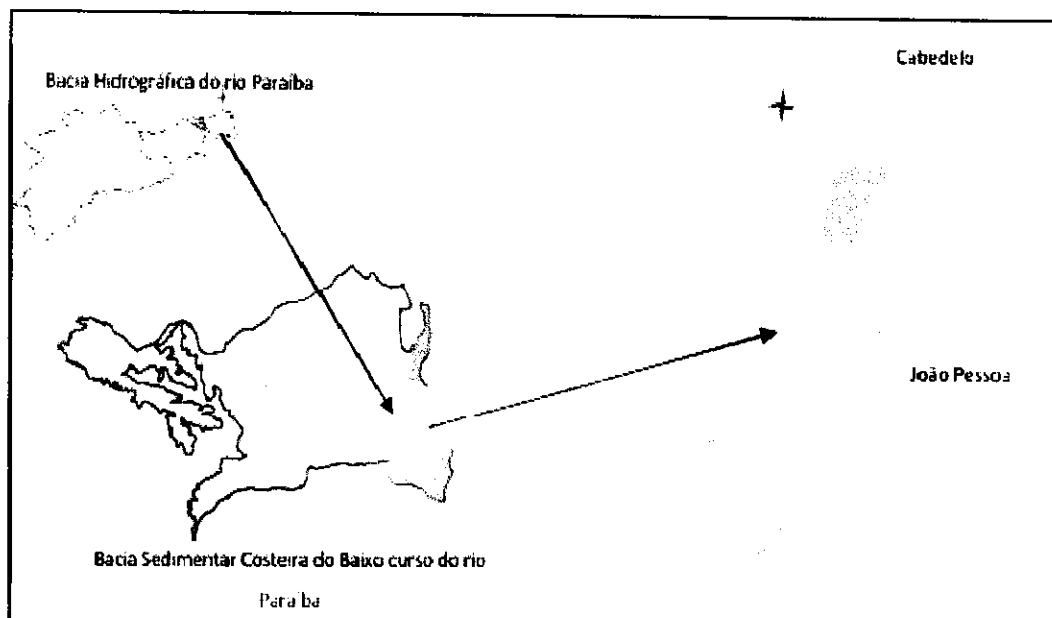


Figura 9. Zona de gerenciamento proposta pelo PROJETO ASUB (BATISTA, 2010).

A condutividade hidráulica, por não se apresentar de forma homogênea na área modelada, necessitou da aplicação de dois métodos para delimitação de áreas de mesma condutividade hidráulica, (i) método das iso-condutividades e (ii) método considerando a presença da formação Beberibe completa (BATISTA, 2010).

Estas áreas de mesma condutividade hidráulica correspondem às quatro áreas do fluxo subterrâneo utilizados neste trabalho. As mesmas ainda podem ser organizadas em dois grupos, sendo a área 1 e a área 2 responsáveis pela entrada do sistema (áreas de recarga do aquífero, ou seja, estas duas áreas são de extrema importância para a manutenção do sistema) e a área 3 e área 4, seguindo o fluxo subterrâneo horizontal, caracterizam-se como as áreas de descarga do sistema (ver Figura 10). Para estas quatro áreas também foram calculadas as distâncias euclidianas e, posteriormente, suas respectivas padronizações foram estabelecidas seguindo a mesma metodologia apresentada no item 4.2.3.1.

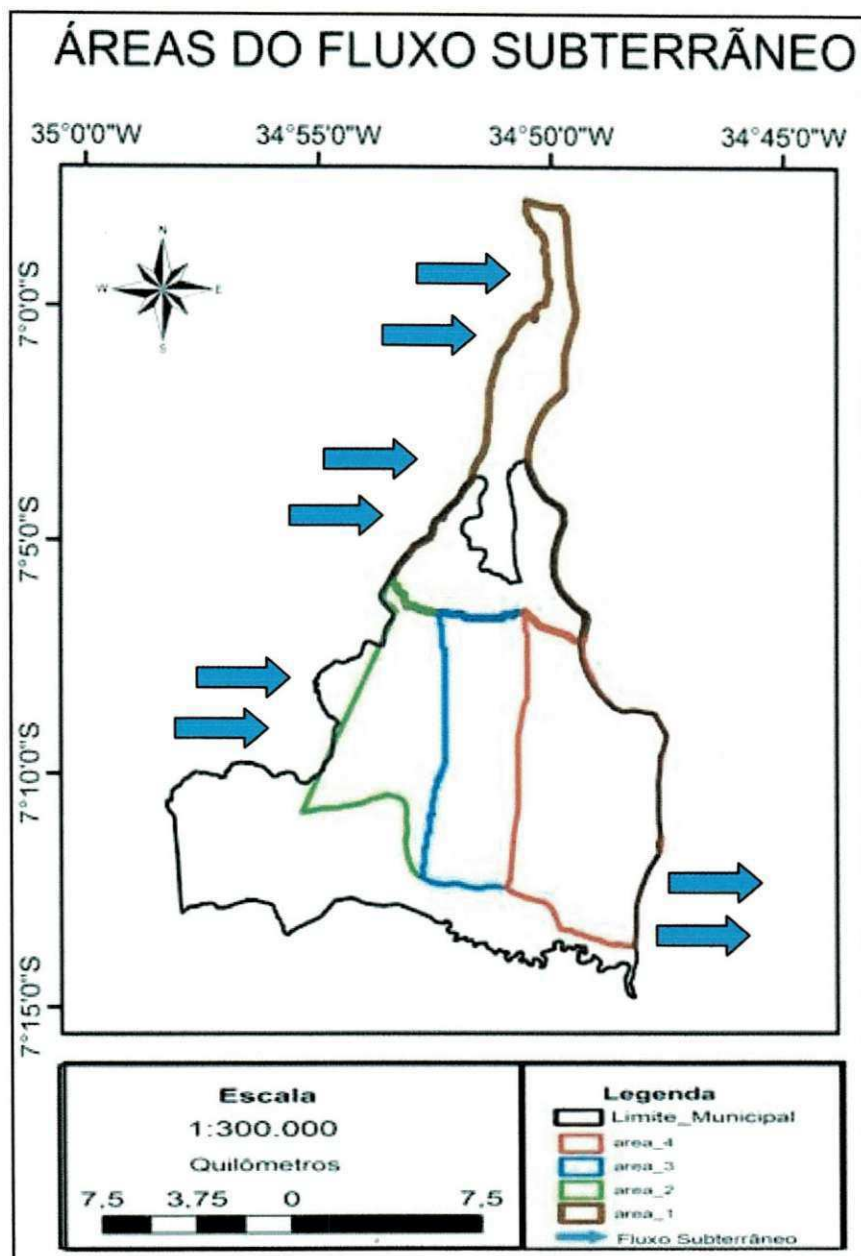


Figura 10. Áreas do fluxo subterrâneo (BATISTA, 2010), adaptado.

4.2.5 Aplicação do PAH – Gerando as Matrizes de Decisão

Como esta análise propõe o uso do PAH como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão dos recursos hídricos em João Pessoa visando prioritariamente à manutenção da qualidade das águas subterrâneas, a aquisição de dados da espacialização das principais atividades potencialmente poluidoras tem uma importância fundamental nesta análise. Associando-os aos dados de fluxo subterrâneo e ao posicionamento dos poços de captação de

água subterrânea, é possível simular cenários que apontarão áreas com possíveis indícios de contaminação.

Estes indícios estão baseados apenas na relação de proximidade dos poços de captação e das zonas de recarga com as atividades potencialmente poluidoras através das ponderações propostas para a criação dos cenários.

No contexto deste trabalho, uma hierarquia de quatro níveis formada por meta, objetivos, atributos e alternativas (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2007) apresentada pela Figura 11, foi adaptada para uma nova nomenclatura a partir das necessidades da análise espacial proposta.

Assim, o problema de decisão espacial envolve um conjunto de subcritérios, geograficamente definidos, (polígonos, linhas e pontos), associados a dois critérios de avaliação que objetivam uma meta (Ver Figura 12).

Observa-se que, no modelo adaptado, os critérios correspondem aos objetivos do modelo original.

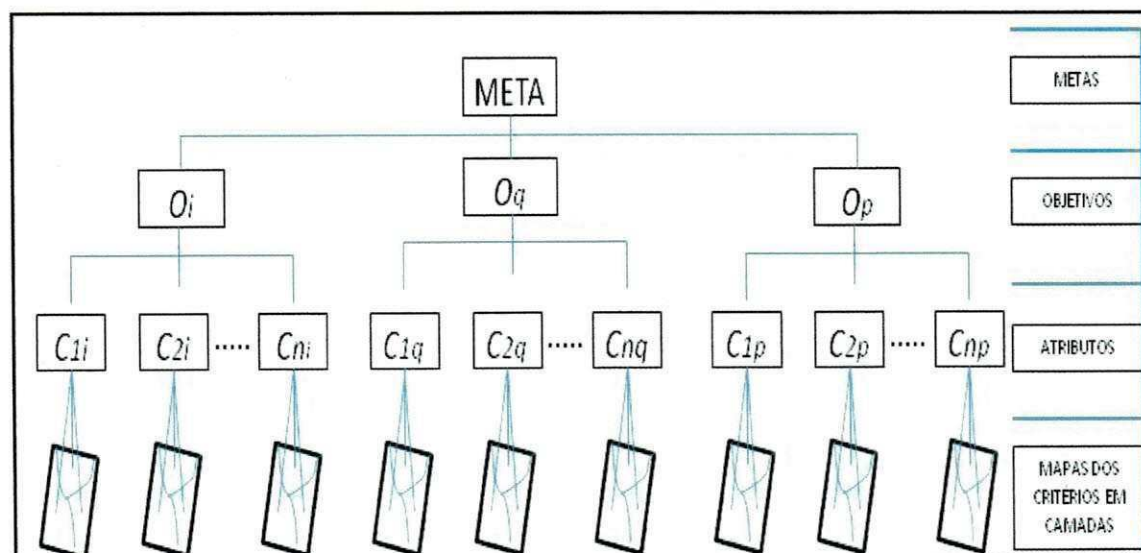


Figura 11. Estrutura hierárquica de um nível de quatro problemas de decisão espacial (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2007), traduzido.

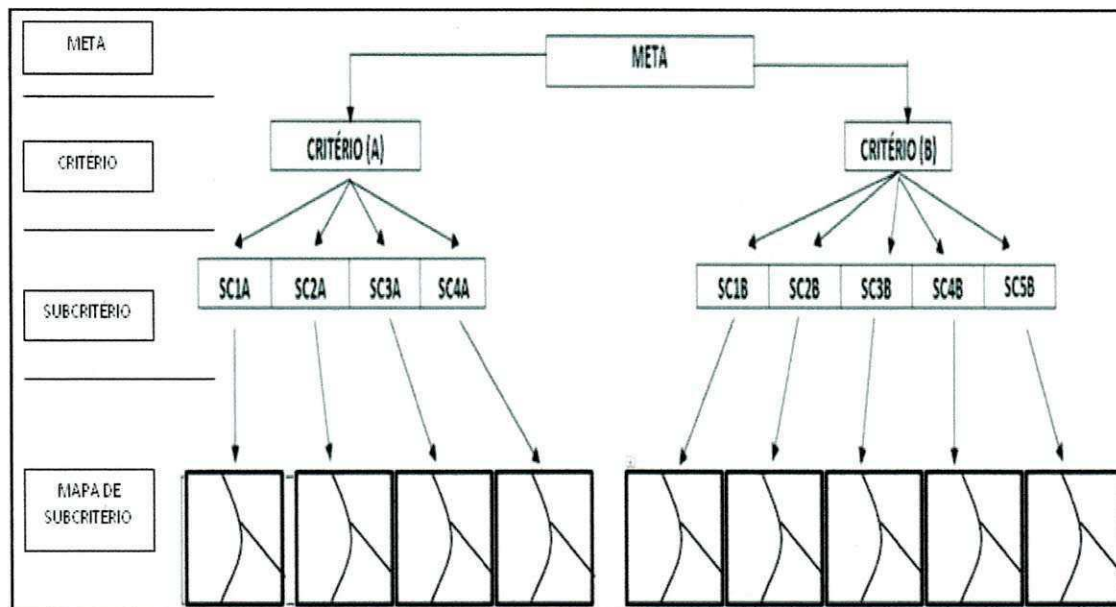


Figura 12. Adaptação da estrutura hierárquica dos problemas de decisão espacial.

Nesta etapa as matrizes de decisão foram geradas a partir da extensão *AHP 1.1 – Decision Support Tool* que gera essas matrizes com base na comparação par a par de todos os subcritérios envolvidos e em seguida calcula os seus respectivos pesos normalizados.

O processo para o cálculo do peso normalizado envolve primeiramente o cálculo da respectiva média geométrica de cada subcritério a partir das matrizes de comparação para, em seguida, cada uma das médias geométricas serem divididas pelo somatório de todas as médias geométricas. Chegando assim, a um valor ou peso normalizado. O cálculo para estes dois procedimentos está demonstrado nas equações 3 e 4.

$$M.G. = \sqrt[n]{a_1 * a_2 * \dots * a_n} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

M.G. é Média Geométrica;

n é o número de subcritérios envolvidos;

a_n é o valor para os n subcritérios envolvidos.

$$P.N. = \frac{M.G.}{\sum M.G.} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

P.N. é o Peso Normalizado.

A atribuição de pesos foi realizada utilizando a escala fundamental de Saaty (1977), apresentada na Tabela 1. Desta forma, foram desenvolvidos diversos cenários possíveis dentro da gama de subcritérios envolvidos gerando matrizes de comparação com os seus respectivos pesos normalizados.

A aplicação do PAH deste trabalho não determina a escolha da melhor alternativa, devido ao fato de não ser o objetivo central do mesmo, e sim, demonstrar a viabilidade de uma análise espacial utilizando o método analítico hierárquico simulando diversos cenários dentro de um vasto leque de preferências.

A Figura 13 mostra a estrutura conceitual do sistema com os critérios A e B, critério ecológico e critério hidráulico, respectivamente, compostos por seus subcritérios ou dados de entrada do sistema.

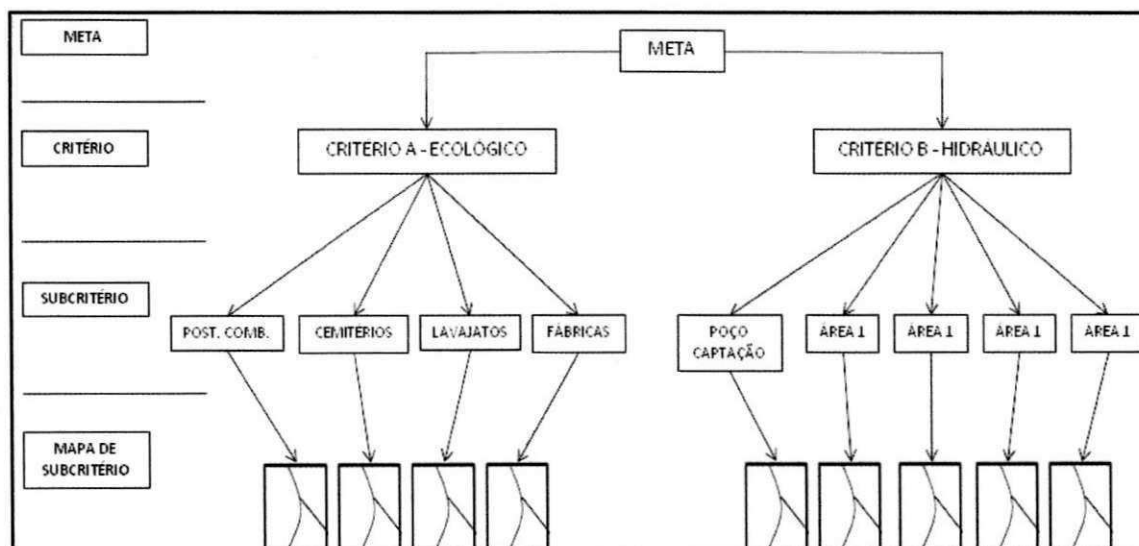


Figura 13. Estrutura conceitual do sistema PAH.

4.2.5.1 Aplicação PAH – critério ecológico

Para o critério ecológico quatro cenários foram simulados, e nomeados como Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4, a Figura 14 ilustra as ponderações para estes cenários.

Para a construção de todos os cenários foi adotada uma equação linear simples ($Y = aX + b$), mas inversamente proporcional ao grau de comprometimento das áreas afetadas, ou seja, quanto menor for o valor do

pixel da imagem, maior será o grau de um possível comprometimento do corpo hídrico.

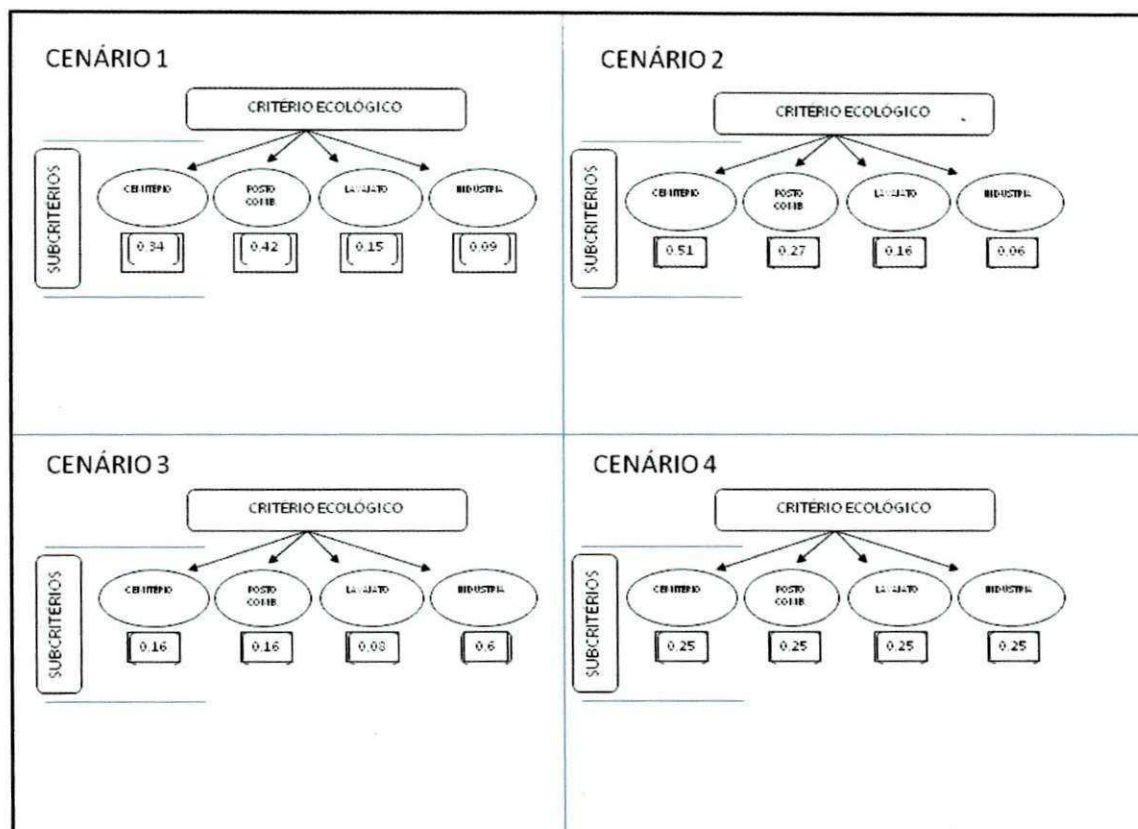


Figura 14. Ponderações para os Cenários do critério ecológico.

a) Cenário 1

Para este Cenário atribuiu-se um peso maior aos postos de combustíveis devido ao fato de que, em sua grande maioria, possuem tanques de armazenamento com mais de 25 anos de atividade (SINDIPETRO-PB, 2010) o que significa um maior risco de que estes apresentem fissuras ou rachaduras em sua estrutura favorecendo a contaminação das águas subterrâneas.

Tabela 3. Matriz de comparação Cenário 1.

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 1				
Subcritério	postos combustíveis	lava jatos	cemitérios	fábricas
postos combustíveis	1	3	1	5
lava jatos	0,3333	1	0,4	0,2
cemitérios	1	2,5	1	3
fábricas	0,2	0,5	0,3333	1

Tabela 4. Parâmetros do Cenário 1

CENÁRIO 1	
Subcritério	Peso Normalizado
postos combustíveis	0,4114
lava jatos	0,1503
cemitérios	0,3482
fábricas	0,0901
RC	0,0137

b) Cenário 2

Para este Cenário atribuiu-se um peso maior aos cemitérios por estes apresentarem o maior tempo de atividade dentre os subcritérios considerados, por não existir uma fiscalização das jazidas e ainda, a não adequação dos cemitérios seculares às normas atuais vigentes.

Tabela 5. Matriz de comparação Cenário 2.

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 2				
Subcritério	postos combustíveis	lava jatos	cemitérios	fábricas
postos combustíveis	1	2	0,5	4
lava jatos	0,5	1	0,25	3
cemitérios	2	4	1	6
fábricas	0,25	0,3333	0,1667	1

Tabela 6. Parâmetros do Cenário 2 (atividades potencialmente poluidoras).

CENÁRIO 2	
Subcritério	Peso Normalizado
postos combustíveis	0,2713
lava jatos	0,1522
cemitérios	0,5097
fábricas	0,0608
RC	0,017

c) Cenário 3

Para este Cenário atribuiu-se um peso maior as atividades industriais devido ao fato de que elas, individualmente, são grandes poluidoras de corpos d'água.

Tabela 7. Matriz de comparação Cenário 3 (atividades potencialmente poluidoras).

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 3				
Subcritério	postos combustíveis	lava jatos	cemitérios	fábricas
postos combustíveis	1	2	1	0,25
lava jatos	0,5	1	0,5	0,1667
cemitérios	1	2	1	0,25
fábricas	4	6	4	1

Tabela 8. Parâmetros do Cenário 3 (atividades potencialmente poluidoras).

CENÁRIO 3	
Subcritério	Peso Normalizado
postos combustíveis	0,1595
lava jatos	0,0859
cemitérios	0,1595
fábricas	0,5951
RC	0,0039

d) Cenário 4

No último Cenário do critério ecológico todos os subcritérios receberam o mesmo peso. O objetivo deste Cenário é buscar a visualização de uma situação em que os subcritérios do critério ecológico exerçam a mesma influência no tocante ao tipo do dado, restringindo às características de tamanho e distribuição das atividades potencialmente poluidoras a influenciar na construção da imagem.

As tabelas 9 e 10 mostram a matriz de comparação e os pesos normalizados das atividades para este Cenário, respectivamente.

Tabela 9. Matriz de comparação Cenário 4 (atividades potencialmente poluidoras).

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 4				
Subcritério	postos combustíveis	lava jatos	cemitérios	fábricas
postos combustíveis	1	1	1	1
lava jatos	1	1	1	1
cemitérios	1	1	1	1
fábricas	1	1	1	1

Tabela 10. Parâmetros do Cenário 4 (atividades potencialmente poluidoras).

CENÁRIO 4	
Subcritério	Peso Normalizado
postos combustíveis	0,25
lava jatos	0,25
cemitérios	0,25
fábricas	0,25
RC	0,0

4.2.5.2 Aplicação PAH – critério hidráulico

Para o segundo critério outros quatro Cenários foram simulados. A Figura 15 apresenta as ponderações para os Cenários do critério hidráulico.

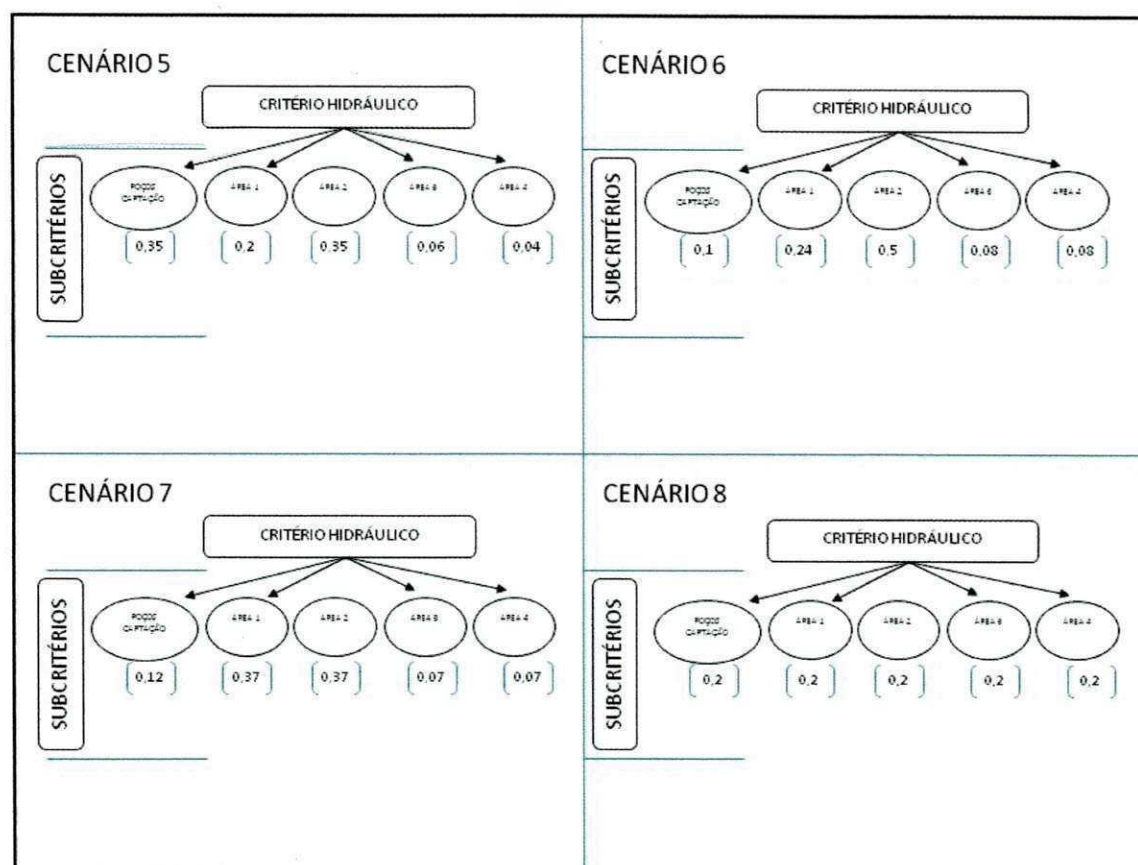


Figura 15. Ponderações para os Cenários do critério hidráulico.

- Cenário 5

Neste primeiro Cenário, abordando os subcritérios hidráulicos, foi atribuído um peso maior para a área 2 e para os poços de captação e ainda uma relevância um pouco menor para a área 1. A justificativa para que estes subcritérios se sobressaíssem em relação aos demais é dada primeiramente pelo fato de que a área 2 corresponde à uma zona importante de recarga do aquífero, a área 1 também caracteriza-se como uma zona de recarga, mas com menor contribuição (BATISTA, 2010), e segundo, de modo geral, áreas com maiores concentrações de poços de captação representam um risco maior de rebaixamento do nível freático. Desta forma, a matriz de comparação proposta para este Cenário é apresentada conforme Tabela 11, seguida da Tabela 12 que detalha os pesos normalizados para cada subcritério e a relação de consistência (RC). Neste Cenário o que se tentou simular foi uma situação onde as áreas de recarga e as já altamente exploradas teriam mais importância no contexto da manutenção da recarga do aquífero.

Tabela 11. Matriz de comparação Cenário 5 (subcritérios hidráulicos).

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 5					
Subcritério	Área 1)	Área 2	Área 3	Área 4	Poços de captação
Área 1	1	0,5	3	5	0,5
Área 2	2	1	5	7	1
Área 3	0,333	0,2	1	1,5	0,2
Área 4	0,2	0,1429	0,6667	1	0,1429
Poços de captação	2	1	5	7	1

Tabela 12. Parâmetros do Cenário 5 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 5	
Subcritério	Peso Normalizado
Área 1	0,1937
Área 2	0,3466
Área 3	0,0676
Área 4	0,0456
Poços de captação	0,3466
RC	0,0031

- Cenário 6

No Cenário 6 apenas as áreas de recarga, já mencionadas, tiveram atribuições de valores mais elevados, levando em consideração o grau de contribuição de cada uma no processo de recarga como um todo. Desta forma, a matriz de comparação proposta para o Cenário 6 é apresentada conforme Tabela 13, seguida da Tabela 14 detalhando os pesos normalizados para cada subcritério e a relação de consistência (RC). Nesta simulação o objetivo era apresentar uma situação onde as áreas de recarga seriam melhor preservadas, respeitando suas contribuições ao aquífero, mas sem levar muito em consideração a exploração já existente na região.

Tabela 13. Matriz de comparação Cenário 6 (subcritérios hidráulicos).

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 6					
Subcritério	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Poços de captação
Área 1	1	0,3333	4	5	1,5
Área 2	3	1	5	7	3
Área 3	0,25	0,3	1	1	1
Área 4	0,2	0,1429	1	1	1
Poços de captação	0,6667	0,2	1	1	1

Tabela 14. Parâmetros do Cenário 6 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 6	
Subcritério	Peso Normalizado
Área 1	0,2398
Área 2	0,509
Área 3	0,08
Área 4	0,072
Poços de captação	0,0993
RC	0,0368

- Cenário 7

Para o Cenário 7 atribuíram-se pesos maiores e iguais para a zonas de recarga e ainda uma relevância considerável para as áreas densamente exploradas. Com isso, a matriz de comparação proposta para o Cenário 7 é apresentada conforme Tabela 15 e com os pesos normalizados para cada

subfator e a relação de consistência (RC) expostos na Tabela 16. O Cenário 7 tem o intuito de simular uma situação em que as áreas de recarga, independente do grau de contribuição, possuam grande relevância na manutenção do aquífero, seguidas pela observância das áreas com maiores concentrações de poços de captação.

Tabela 15. Matriz de comparação Cenário 7 (subcritérios hidráulicos).

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 7					
Subcritério	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Poços de captação
Área 1	1	1	5	5	3
Área 2	1	1	5	5	3
Área 3	0,2	0,2	1	1	0,6667
Área 4	0,2	0,2	1	1	0,6667
Poços de captação	0,3333	0,3333	1,5	1,5	1

Tabela 16. Parâmetros do Cenário 7 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 7	
Subcritério	Peso Normalizado
Área 1	0,3665
Área 2	0,3665
Área 3	0,0749
Área 4	0,0749
Poços de captação	0,1172
RC	0,0004

- Cenário 8

No último Cenário do critério hidráulico, assim como ocorreu no Cenário 4, todos os subcritérios foram equiparados recebendo o mesmo peso. Esta situação busca visualizar um Cenário em que os subcritérios do critério hidráulico exerçam a mesma influência no tocante ao tipo do dado. Sendo assim, o que vai caracterizar a produção da imagem, é o tamanho e a distribuição espacial da informação. Desta forma, a matriz de comparação proposta para o Cenário 8 é apresentada conforme Tabela 17, seguida da

Tabela 18 que traz os valores dos pesos normalizados para cada subcritério e a relação de consistência (RC).

Tabela 17. Matriz de comparação Cenário 8 (subcritérios hidráulicos).

MATRIZ DE COMPARAÇÃO 8					
Subcritério	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Poços de captação
Área 1	1	1	1	1	1
Área 2	1	1	1	1	1
Área 3	1	1	1	1	1
Área 4	1	1	1	1	1
Poços de captação	1	1	1	1	1

Tabela 18. Parâmetros do Cenário 8 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 8	
Subcritério	Peso Normalizado
Área 1	0,2
Área 2	0,2
Área 3	0,2
Área 4	0,2
Poços de captação	0,2
RC	0,0

4.2.5.3 Aplicação PAH – critério ecológico x critério hidráulico

Nesta última aplicação PAH, quatro Cenários foram desenvolvidos para dar suporte aos sistemas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Uma vez produzidas às matrizes de comparação dos subcritérios dos critérios ecológico e hidráulico, estas puderam ser simuladas e utilizadas para as mais diversas situações e estão ilustradas no Capítulo 5 deste trabalho.

Os parâmetros empregados na construção dos Cenários foram os seguintes:

- Cenário 9

O Cenário 9 apresenta uma situação em que tanto os subcritérios ecológicos quanto os hidráulicos foram equiparados e os dois critérios receberam o mesmo grau de relevância da escala Saaty (1977) na composição

da matriz de comparação (Tabela 19), por isso os pesos normalizados também foram os mesmos e o RC igual a zero (Tabela 20).

Tabela 19. Matriz de comparação Cenário 9 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 9		
Critério	Cenário 8	Cenário 4
Cenário 4	1	1
Cenário 8	1	1

Tabela 20. Parâmetros do Cenário 9.

CENÁRIO 9	
Critério	Peso Normalizado
Cenário 4	0,5
Cenário 8	0,5
RC	0,0

A Figura 16 mostra o modelo conceitual e as ponderações empregadas no Cenário 9.

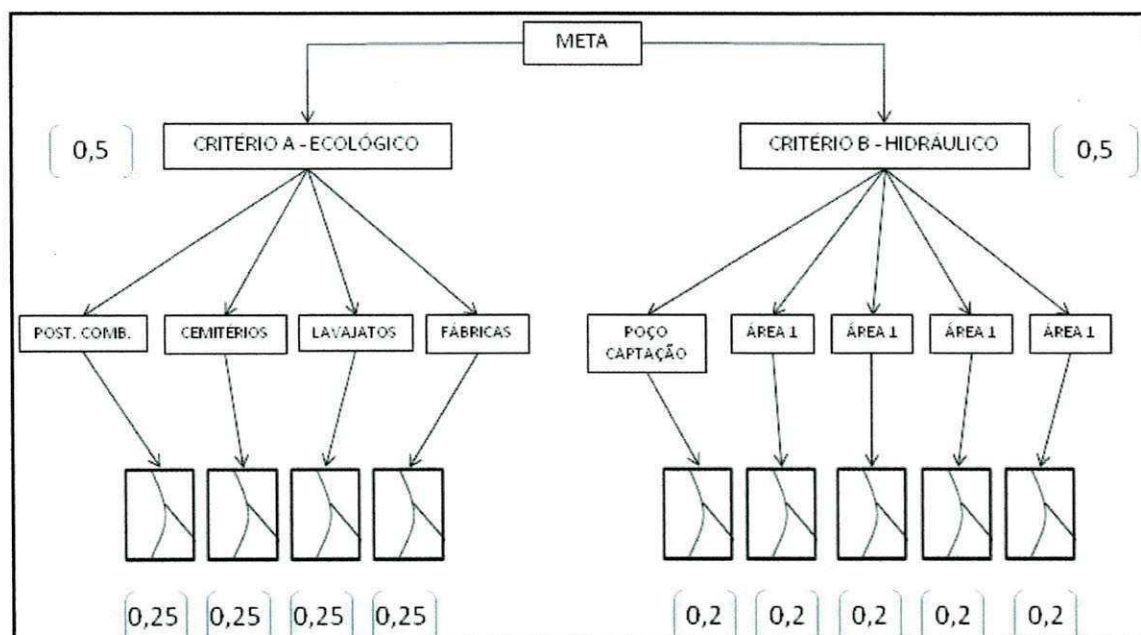


Figura 16. Modelo conceitual – Cenário 9.

- Cenário 10

A situação simulada no Cenário 10 visa à construção de uma realidade em que o critério hidráulico tem maior significância para a gestão hídrica no que diz respeito à concessão de outorgas de uso de águas subterrâneas. Sendo assim, os subcritérios receberam as atribuições de valores diferenciadas como é mostrado na Tabela 21 e os pesos normalizados na Tabela 22.

Tabela 21. Matriz de comparação Cenário 10 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 10		
Critério	Cenário 8	Cenário 4
Cenário 4	1	0,25
Cenário 8	4	1

Tabela 22. Parâmetros do Cenário 10.

CENÁRIO 10	
Critério	Peso Normalizado
Cenário 4	0,2
Cenário 8	0,8
RC	0,0

A Figura 17 detalha o modelo conceitual com as respectivas ponderações referentes ao Cenário 10.

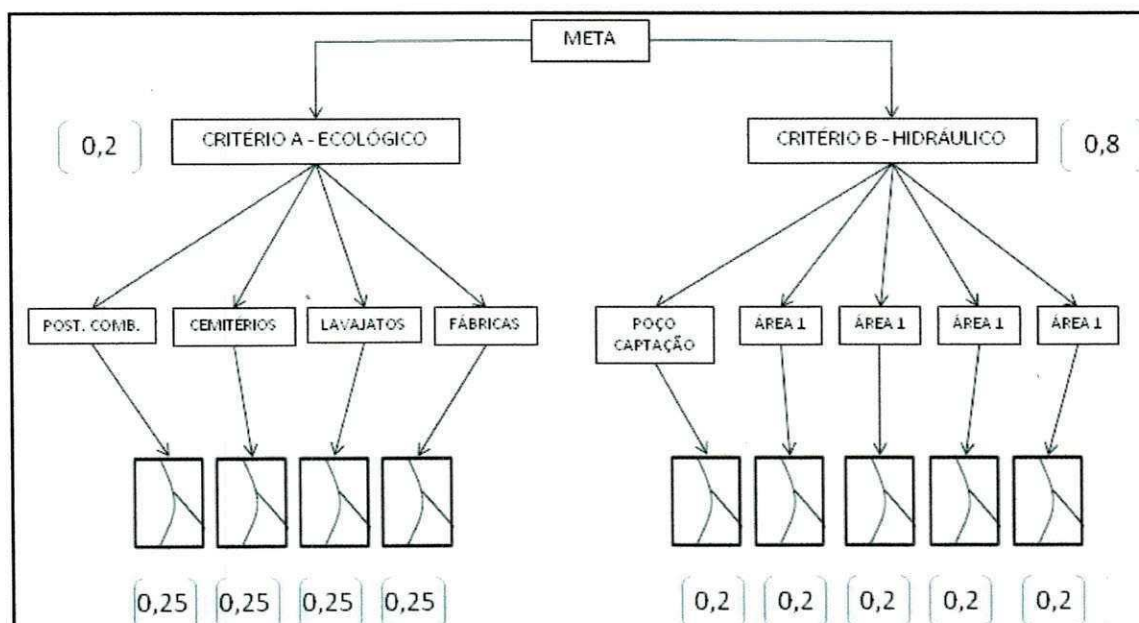


Figura 17. Modelo conceitual – Cenário 10.

- Cenário 11

No Cenário 11 o subcritério 'postos combustíveis' do critério ecológico e os subcritérios 'área 1' e 'área 2' do critério hidráulico receberam atribuição de valores maiores do que os demais subcritérios, mas mantendo o relevância dos dois critério equiparáveis. Com isso, este Cenário teve o objetivo de simular uma realidade em que as regiões próximas aos postos de combustíveis e as áreas de recarga do aquífero pudessem ser melhor preservadas, ou seja, sinalizando-as como sendo as áreas menos indicadas para a outorga de uso de água baseados nos critérios estabelecidos. As tabelas 23 e 24 apresentam a matriz de comparação e os pesos normalizados, respectivamente.

Tabela 23. Matriz de comparação Cenário 11 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 11		
Fator	Cenário 8	Cenário 4
Cenário 1	1	1
Cenário 7	1	1

Tabela 24. Parâmetros do Cenário 11.

CENÁRIO 11	
Fator	Peso Normalizado
Cenário 1	0,5
Cenário 7	0,5
CR	0,0

A Figura 18 mostra o modelo conceitual e as ponderações empregadas para o Cenário 11.

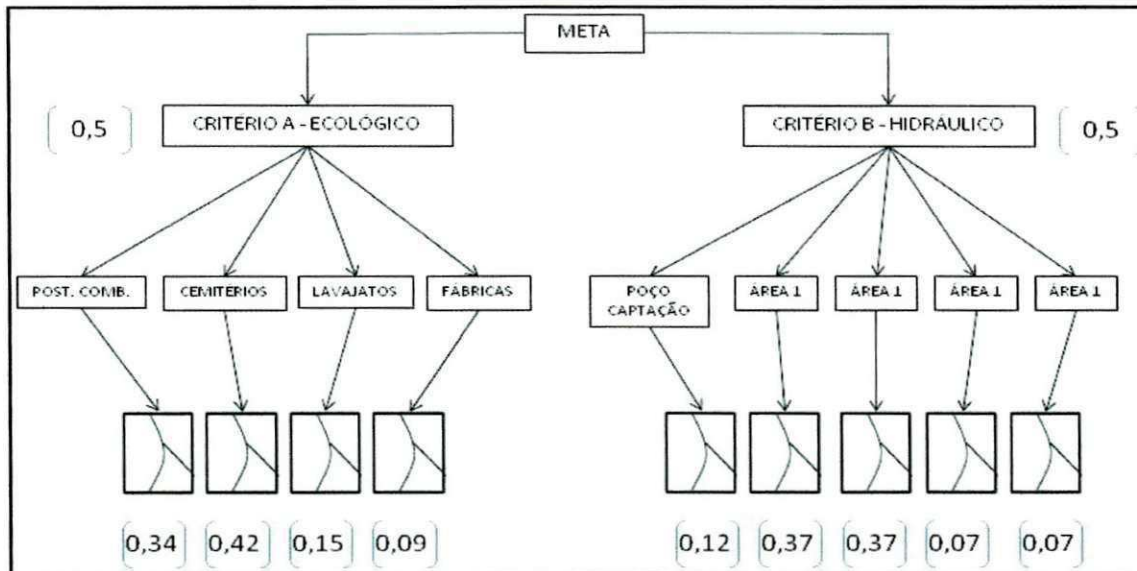


Figura 18. Modelo conceitual – Cenário 11.

- Cenário 12

Para este Cenário os valores estabelecidos foram os mesmos do Cenário 11, tendo como única diferença a atribuição de uma relevância maior do critério hidráulico em relação ao critério ecológico. Esta situação visa apresentar uma realidade em que a atividade com maior índice de contaminação (postos de combustíveis) e as áreas de recarga associadas à quantidade e distribuição dos poços de captação, sejam consideradas regiões menos indicadas na concessão das outorgas de uso de águas subterrâneas. Os dados referentes a este Cenário estão expostos nas tabelas 25 e 26.

Tabela 25. Matriz de comparação Cenário 12 (subcritérios hidráulicos).

CENÁRIO 12		
Fator	Cenário 8	Cenário 4
Cenário 1	1	0,25
Cenário 7	4	1

Tabela 26. Parâmetros do Cenário 12.

CENÁRIO 12	
Fator	Peso Normalizado
Cenário 1	0,2
Cenário 7	0,8
CR	0,0

A Figura 19 detalha o modelo conceitual com suas respectivas ponderações.

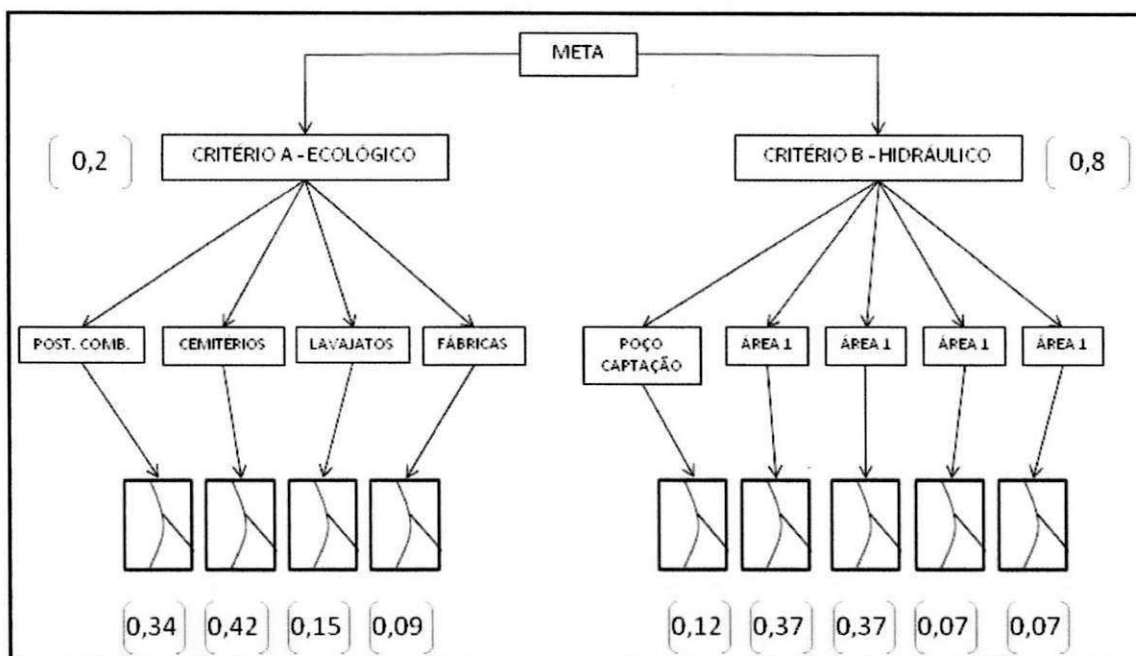


Figura 19. Modelo conceitual – Cenário 12.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MAPEAMENTO DOS SUBCRITÉRIOS ECOLÓGICOS

Os resultados obtidos aqui apresentam a espacialização das atividades potencialmente poluidoras tomadas nesta análise. A Figura 20 mostra esta espacialização. De acordo com o banco de dados da prefeitura de João Pessoa em 2008 verificou-se que a atividade de venda de combustíveis e de lubrificantes encontra-se em maior número e melhor distribuída no município com 212 postos. Em segundo lugar em números, estão os lava jatos distribuídos em 34 estabelecimentos, em seguida as fábricas com 19 instalações e por fim, os cemitérios presentes em 6 localidades. A Tabela 27 mostra a quantidade de instalações por atividade.

Tabela 27. Quantificação das atividades potencialmente poluidoras.

QUANTIFICAÇÃO DAS ATIVIDADES POTENCIALENTE POLUIDORAS	
Atividade	Quant. (un.)
Postos de combustíveis	212
Lava jatos	34
Fábricas	19
Cemitérios	6
Total	271

Na Figura 20 pode-se observar que a distribuição das atividades encontra-se mais centralizada dentro do município e que as áreas periféricas a oeste, sul e leste não foram tão exploradas por estas atividades.

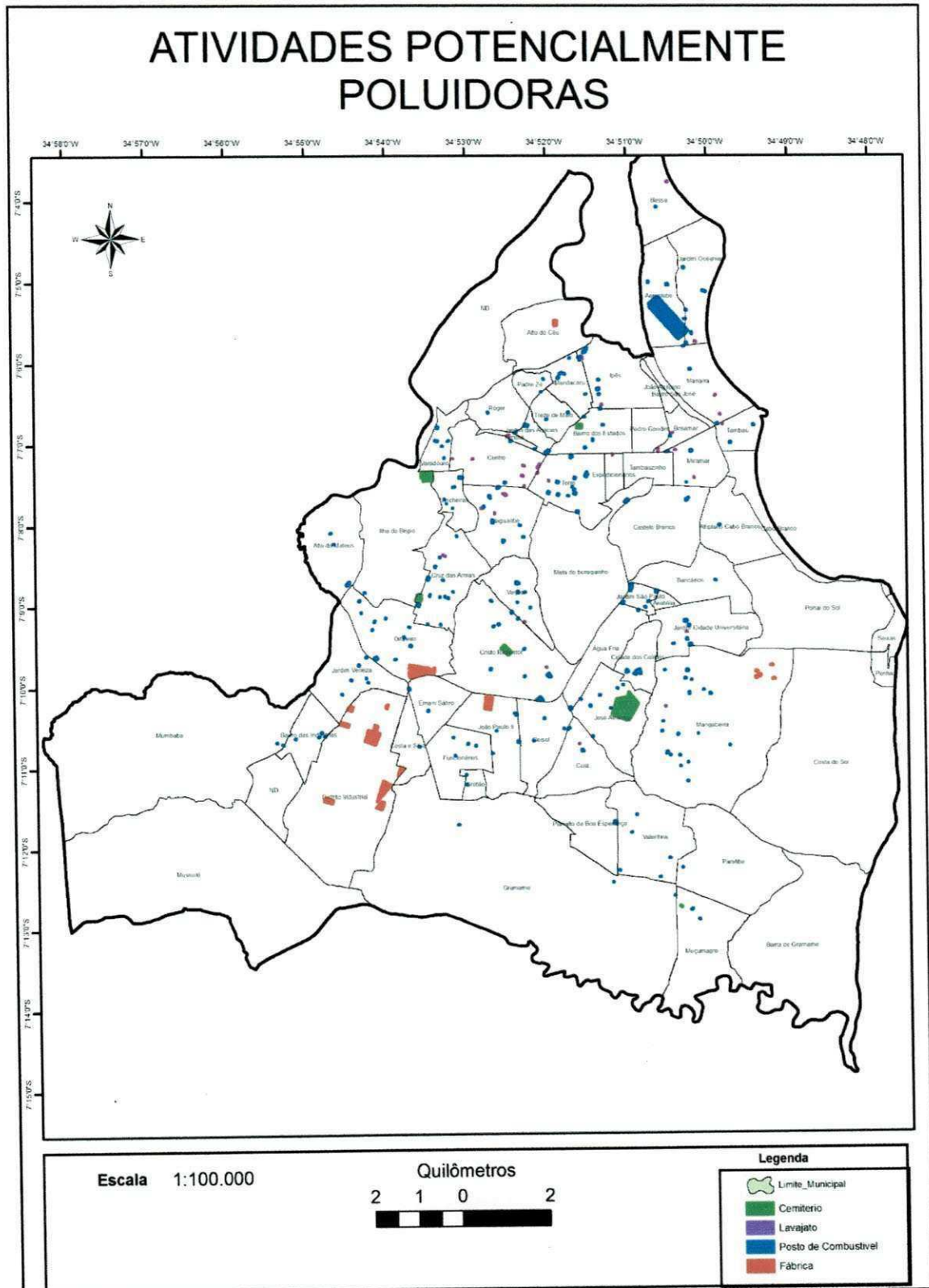


Figura 20. Espacialização das atividades potencialmente poluidoras.

5.2 PADRONIZAÇÃO DO DISTANCIAMENTO DAS ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS

O que se obteve como resultados nesta etapa foram os mapas da adequação das distâncias irradiadas de todas as camadas de informação para um intervalo comum entre 0 a 255. Estes resultados foram obtidos a partir do procedimento especificado conforme item 4.2.3.1.

Com estes mapas as operações algébricas, inerentes as análises espaciais, puderam ser realizadas. Uma vez que, no cálculo das distâncias euclidianas, automaticamente todos os polígonos são convertidos em um único dado *raster*, o que permite que estas operações sejam corretamente realizadas.

As figuras 21, 22, 23 e 24 expõem as distâncias euclidianas dos postos de combustíveis, lava jatos, cemitérios e fábricas, respectivamente.

Observa-se que nesta adequação as distâncias calculadas crescem de forma analítica a partir do 0 (zero).

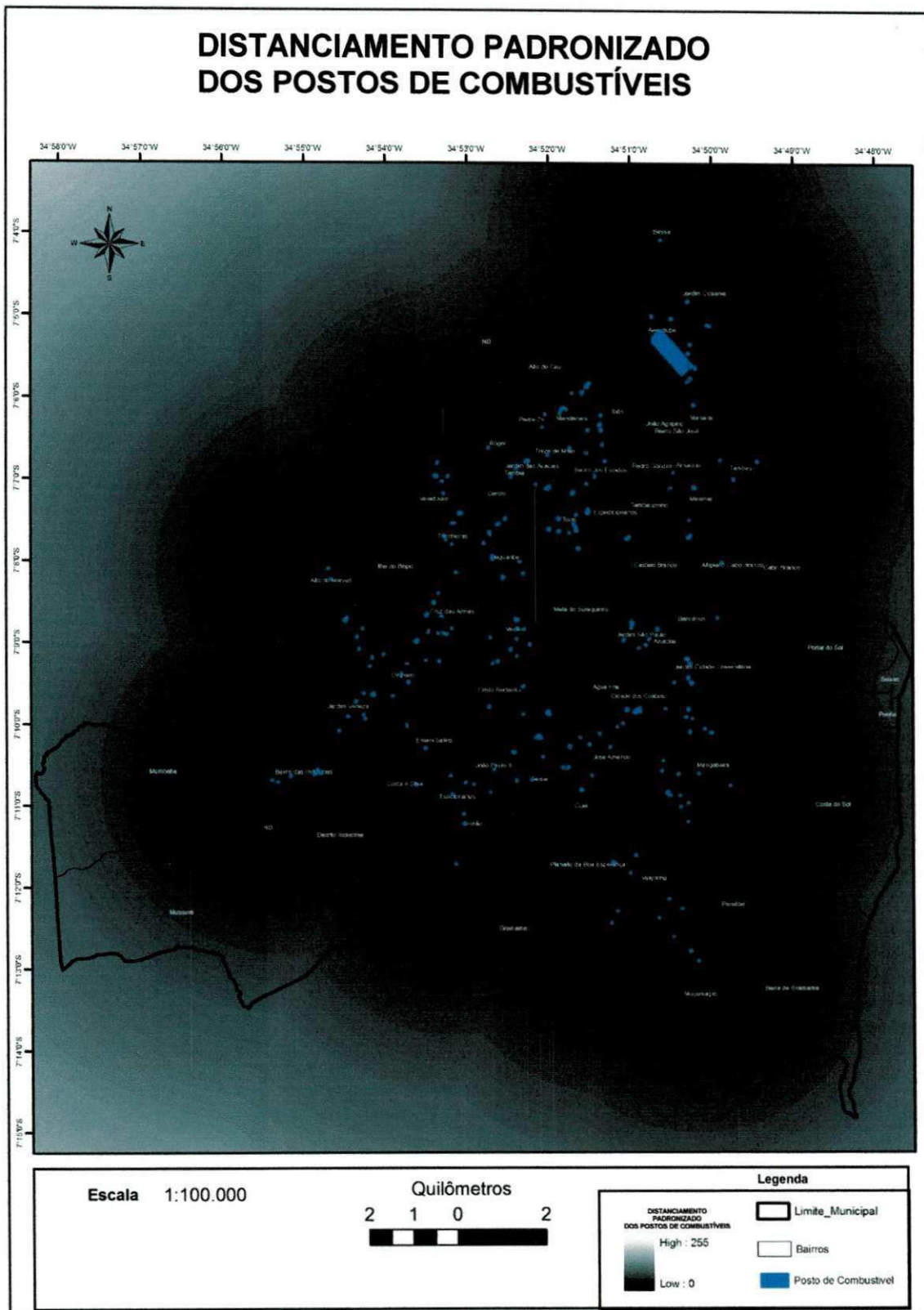


Figura 21. Distanciamento padronizado dos postos de combustíveis.

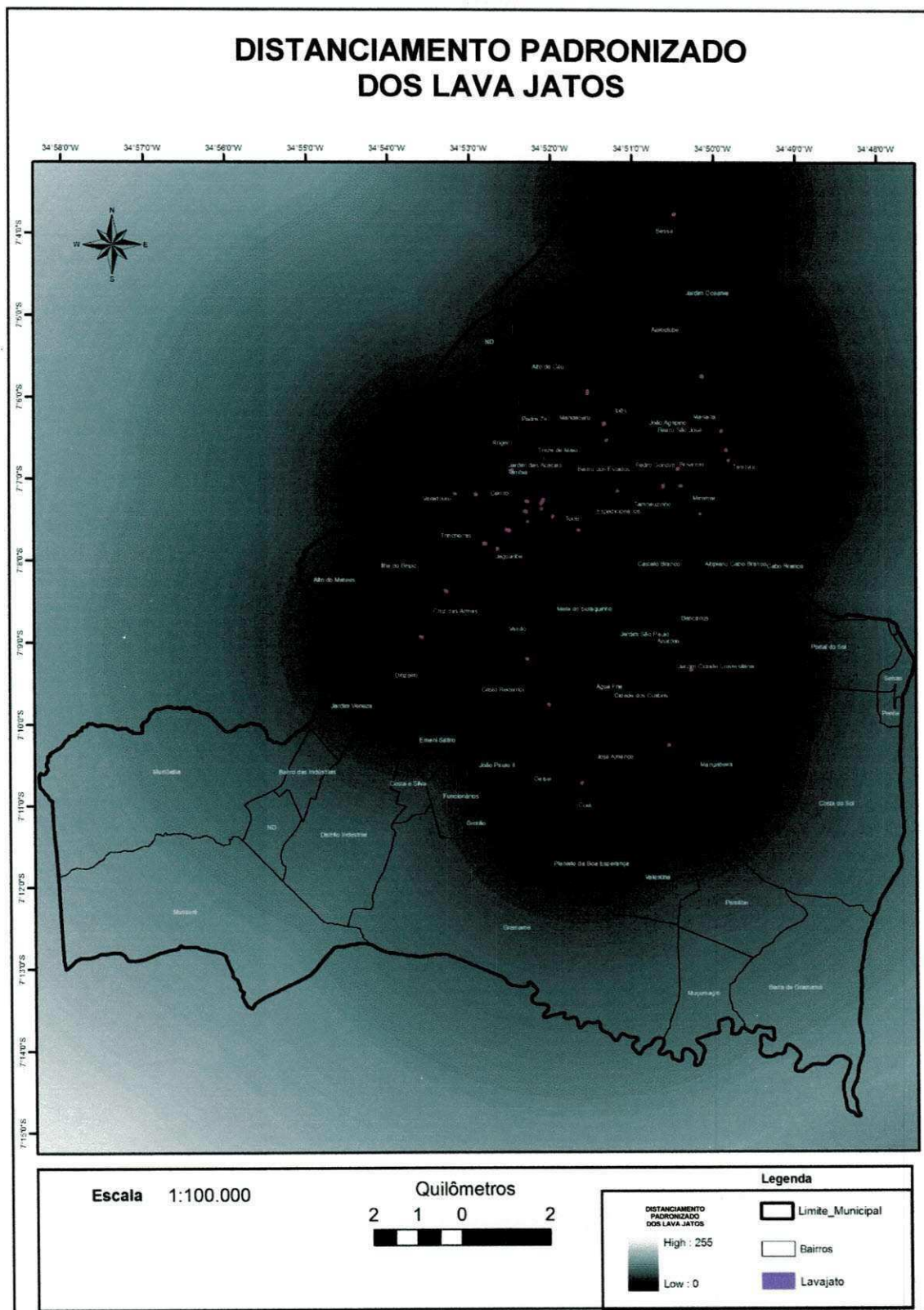


Figura 22. Distanciamento padronizado dos lava jatos.

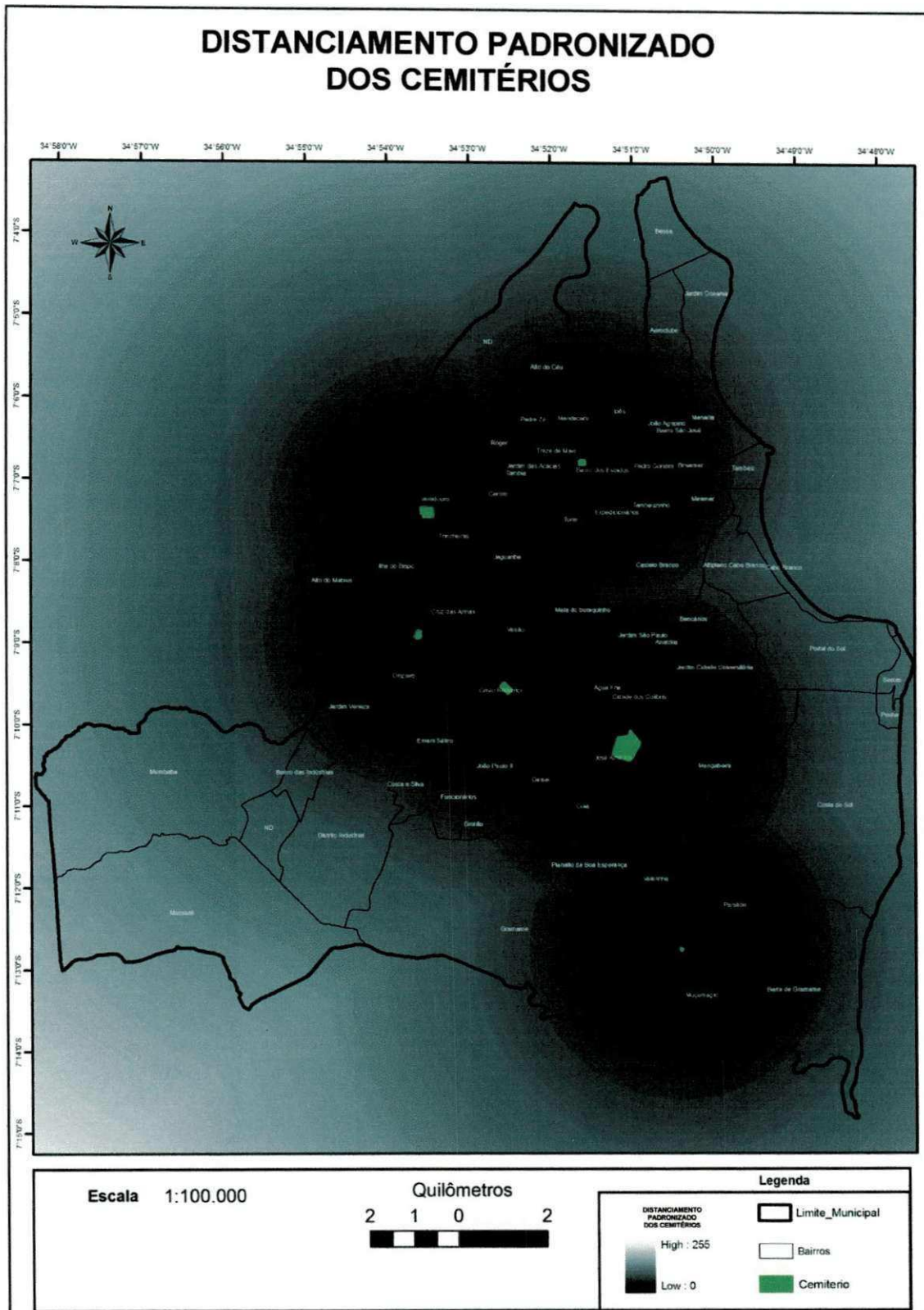


Figura 23. Distanciamento padronizado dos cemitérios.

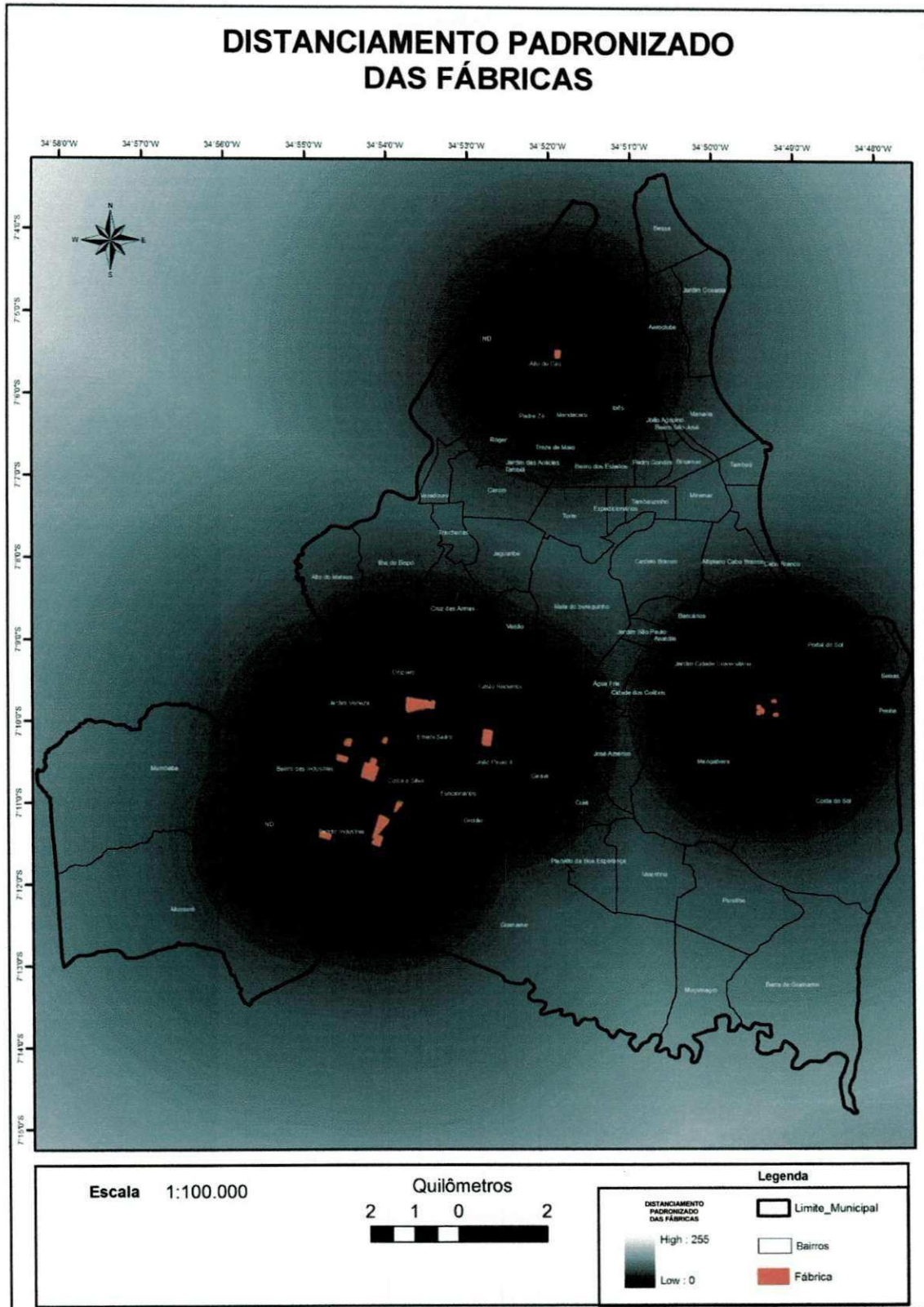


Figura 24. Irradiamento das distâncias euclidianas das fábricas.

5.3 PADRONIZAÇÃO DO DISTANCIAMENTO DOS SUBCRITÉRIOS HIDRÁULICOS

Os subcritérios hidráulicos também tiveram suas distâncias calculadas a partir de um irradiação direto, em seguida, foram padronizados dentro de um intervalo de valores entre 0 e 255, assim como ocorreu para as atividades potencialmente poluidoras. Os subcritérios hidráulicos utilizados foram as áreas de diferentes fluxos subterrâneos e os poços de captação.

A Figura 25 mostra a distribuição das áreas do fluxo subterrâneo modelado e dividido em quatro áreas definidas como Área 1, Área 2, Área 3 e Área 4 (BATISTA, 2010). Os critérios e os métodos utilizados para esta modelagem foram realizados por Batista (2010) conforme especificado no item 4.2.4.2.

A Figura 26 traz a compilação do distanciamento padronizado para os diferentes fluxos subterrâneos e a Figura 27 para o distanciamento padronizado dos poços de captação.

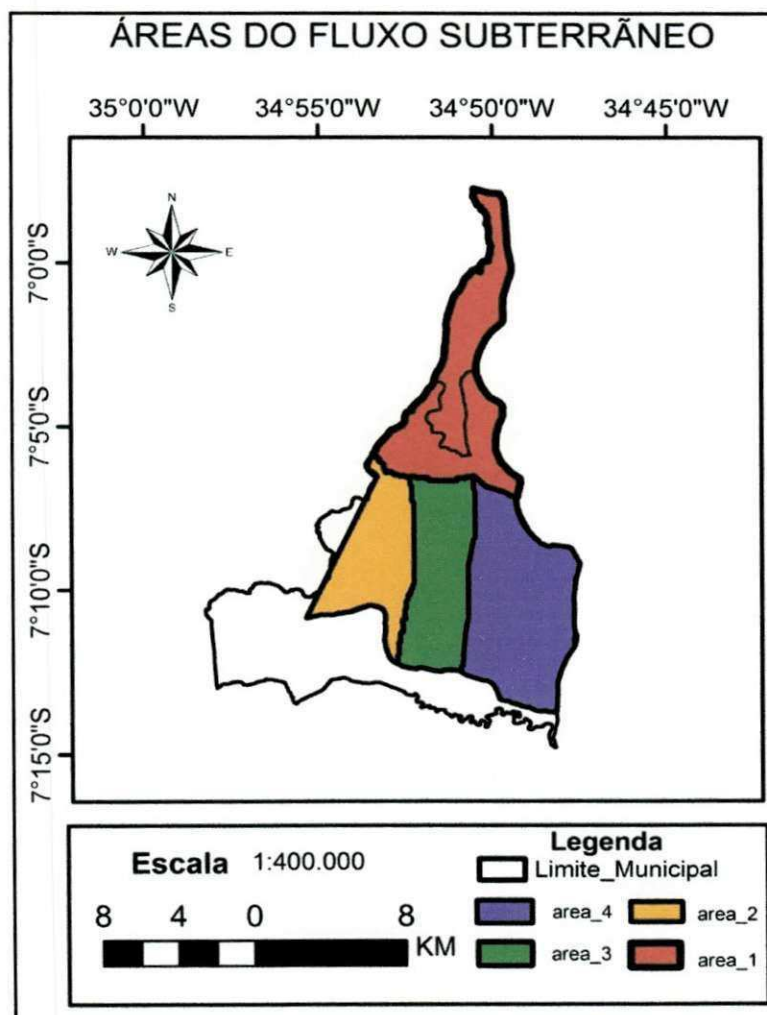


Figura 25. Áreas do fluxo subterrâneo (BATISTA, 2010), adaptado.

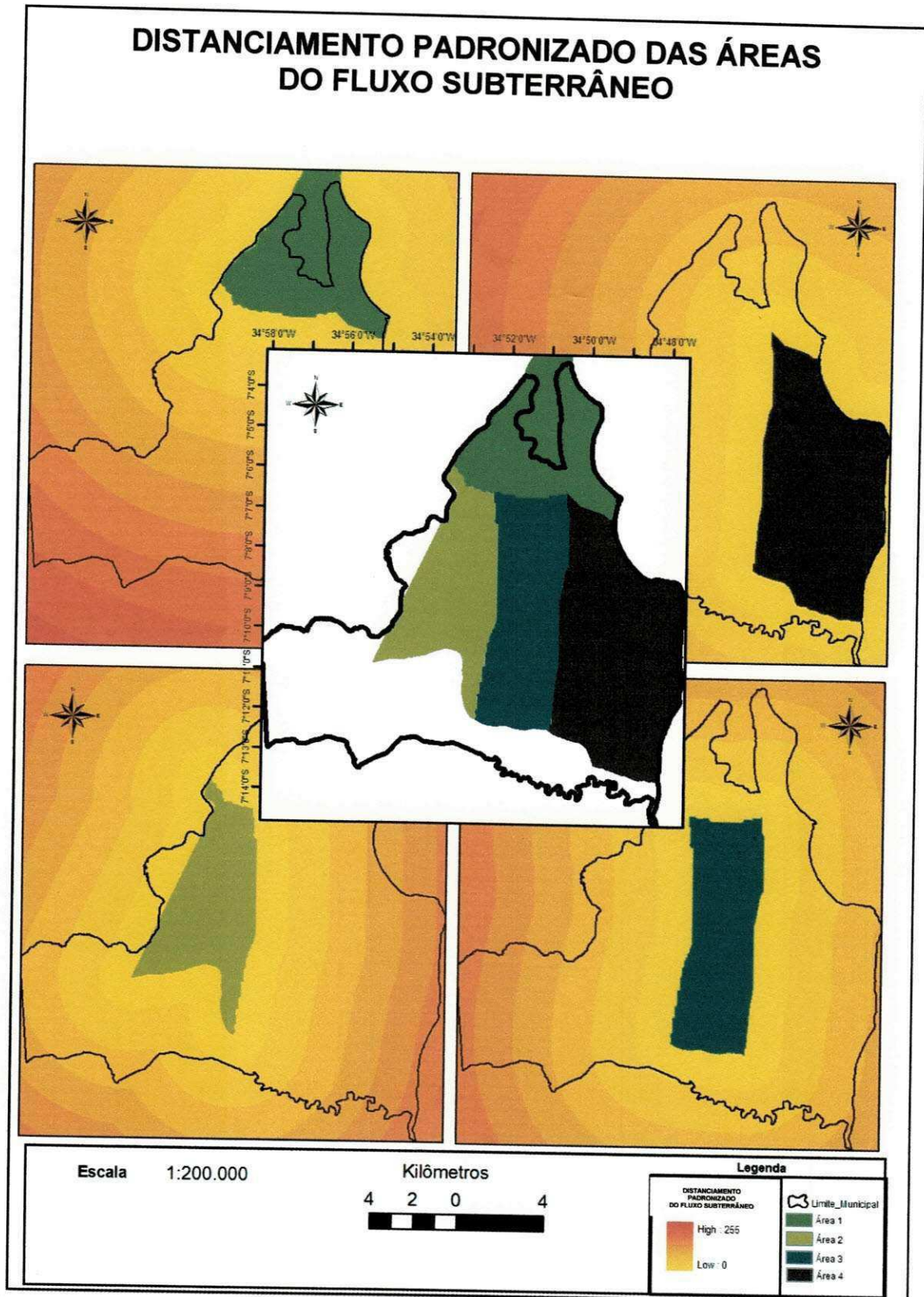


Figura 26. Distanciamento padronizado das áreas do fluxo subterrâneo.



Figura 27. Distanciamento padronizado dos poços de captação.

5.4 APLICAÇÃO PAH – CRITÉRIO ECOLÓGICO

5.4.1 Cenário 1

Para o Cenário 1 a situação simulada tem como objetivo identificar as regiões onde existam maiores concentrações de postos de combustíveis e/ou cemitérios, para que estas possam ser melhor geridas no tocante a preservação da qualidade das águas subterrâneas.

Observa-se que a relação é inversamente proporcional entre o intervalo de 0 a 255 e o grau de comprometimento das áreas afetadas, assim, quanto menor for o valor do *pixel* da imagem, maior será o grau de um possível comprometimento do corpo hídrico.

Com este mapa verificou-se que as áreas mais centralizadas e urbanizadas estão com um nível mais acentuado de risco de contaminação das águas subterrâneas devido ao fato de que nestas localidades a presença de duas ou mais atividades potencialmente poluidoras certamente serão constatadas (Ver Figura 28). Esta situação se agrava ainda mais se as atividades de comercialização de combustíveis, lubrificantes e cemitérios estiverem próximas umas das outras. Como mostra o detalhe da Figura 29.

5.4.2 Cenário 2

Para o Cenário 2 a situação simulada apresenta uma maior preocupação com as águas subterrâneas possivelmente atingidas pelo necrochorume originado dos corpos em decomposição nas covas e jazidas dos cemitérios. Por isso, o subcritério 'cemitério' recebeu um peso maior que os demais subcritérios. O mapa gerado neste Cenário é apresentado na Figura 30.

Com este mapa constatou-se uma variação em relação ao primeiro Cenário, no Cenário 2, as áreas mais comprometidas em sua maioria ficaram próximas dos cemitérios, mas ainda assim a área que apresentou um maior grau de comprometimento (valor próximo a zero), foi aquela onde existe um grande cemitério associado a outras atividades em seu entorno. A Figura 31 apresenta esta visão e no detalhe, identifica a área mais comprometida.

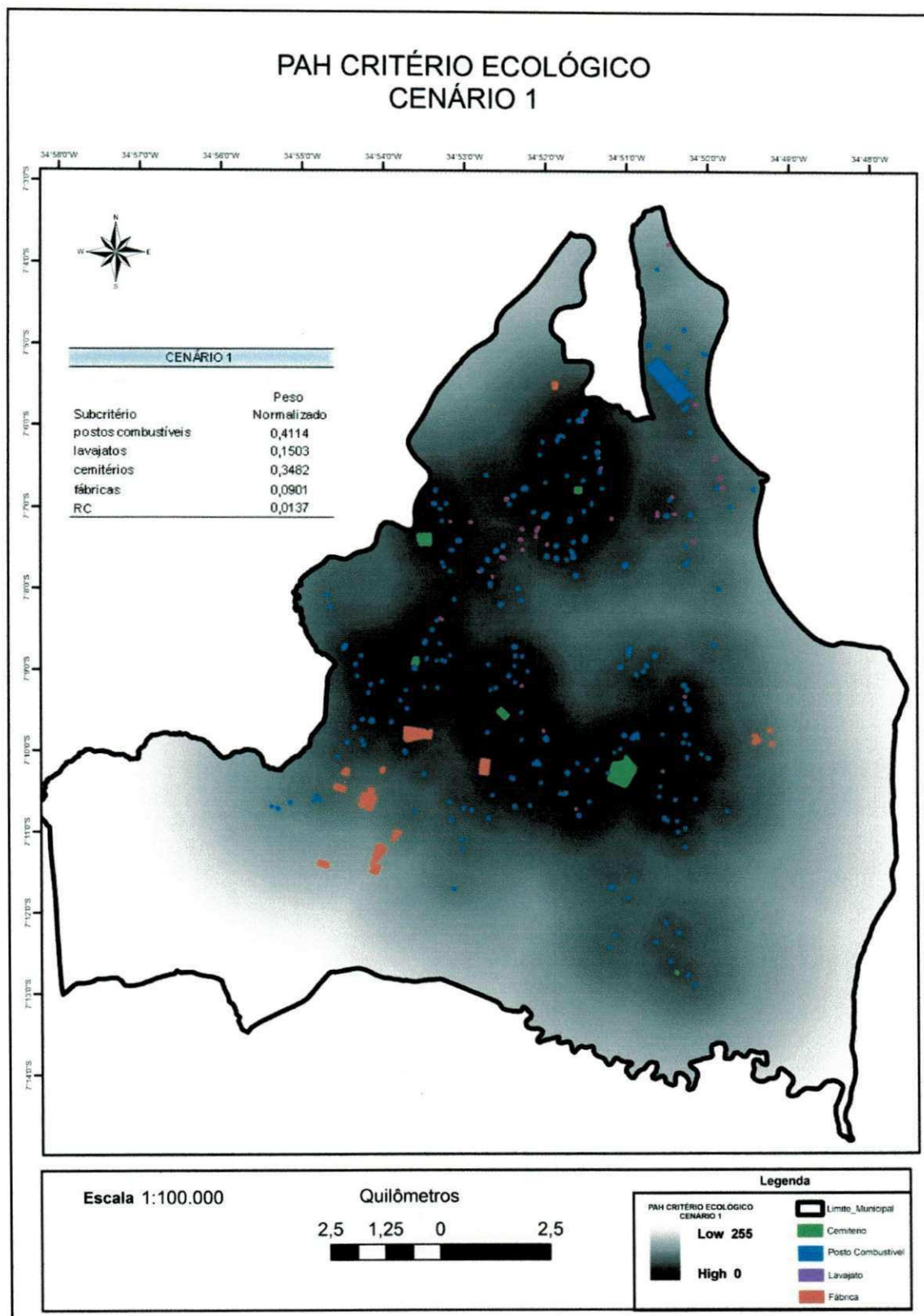


Figura 28. PAH para o Cenário 1.

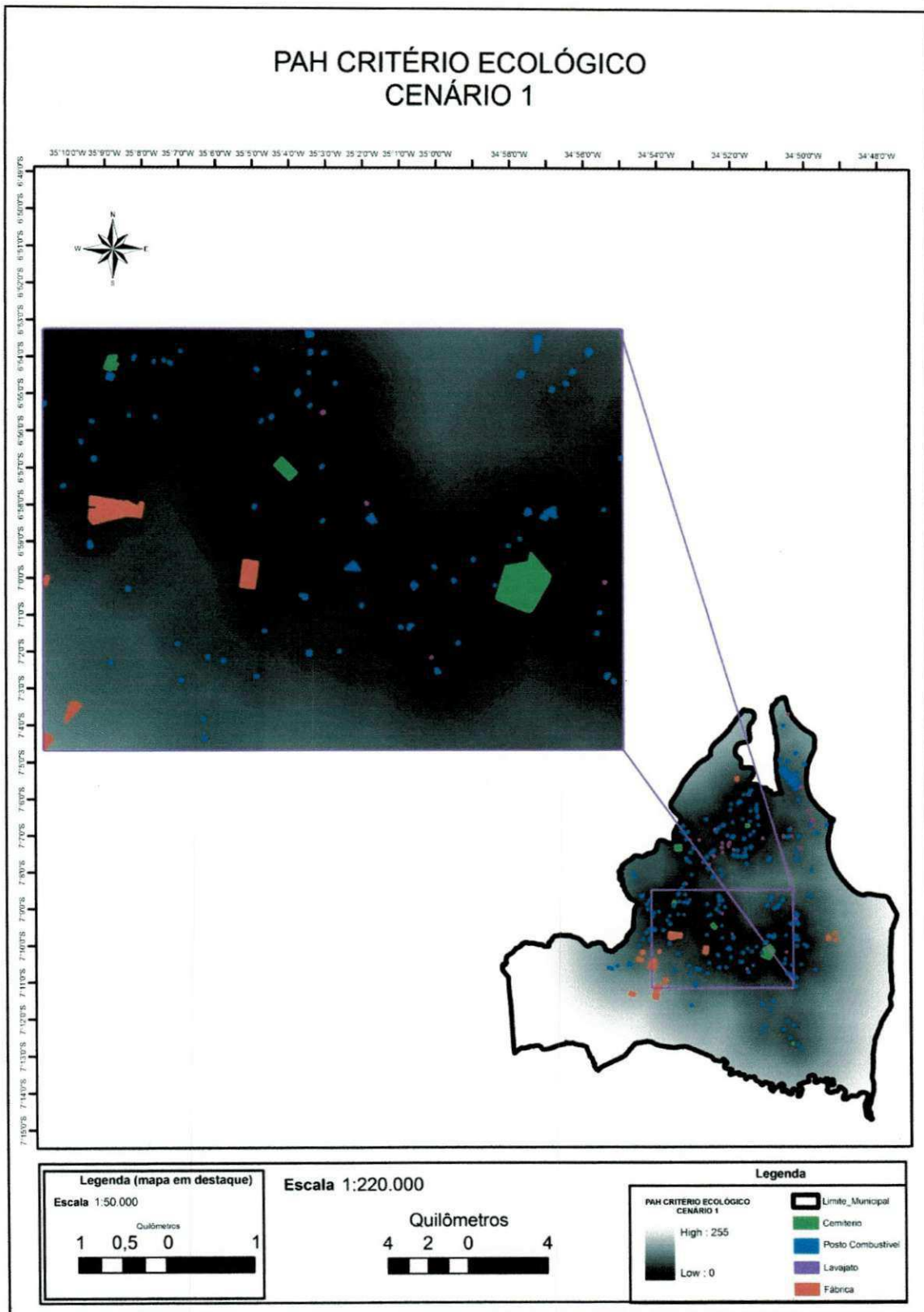


Figura 29. Detalhe de áreas com duas ou mais atividades muito próximas – Cenário 1.

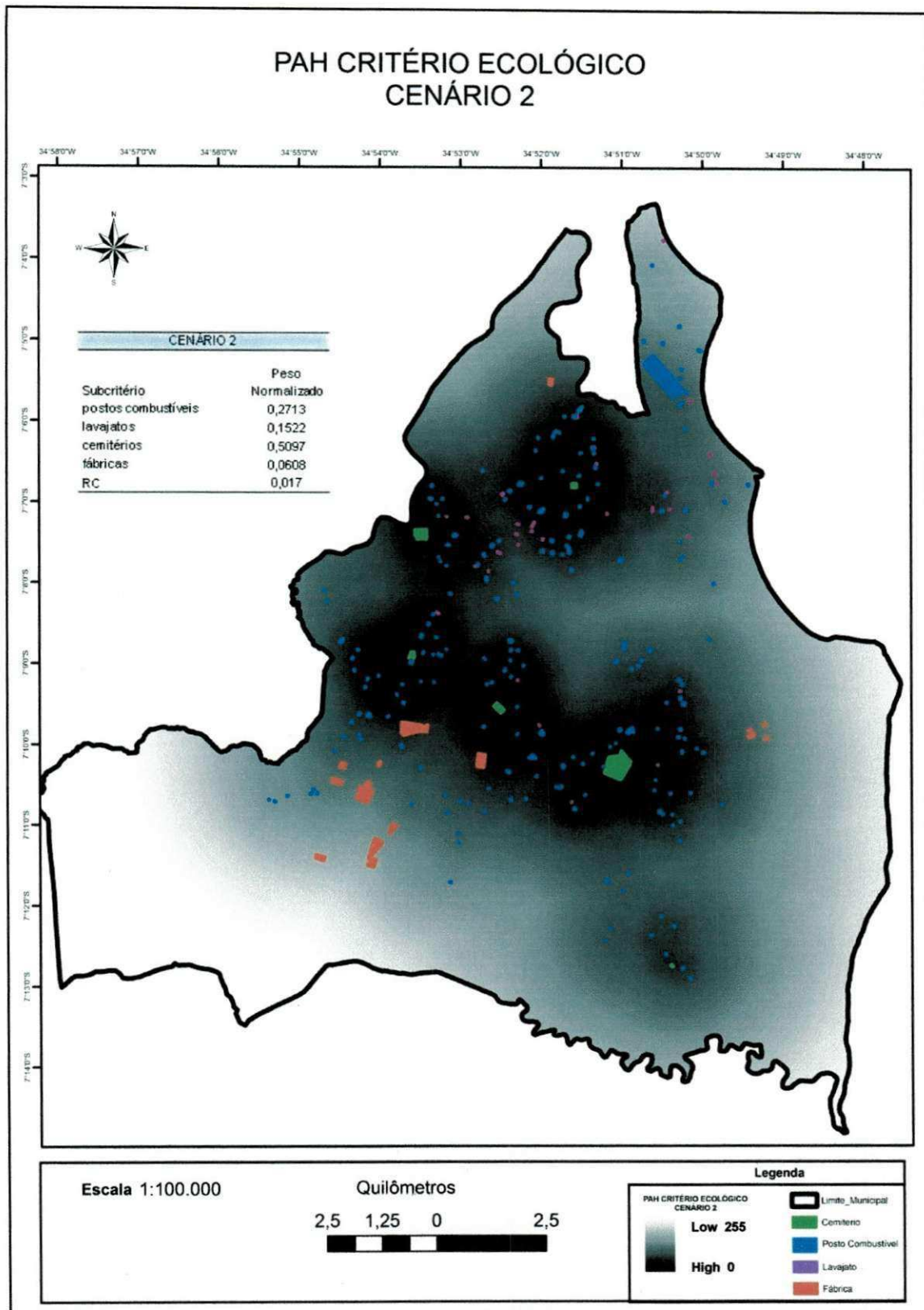


Figura 30. PAH para o Cenário 2.

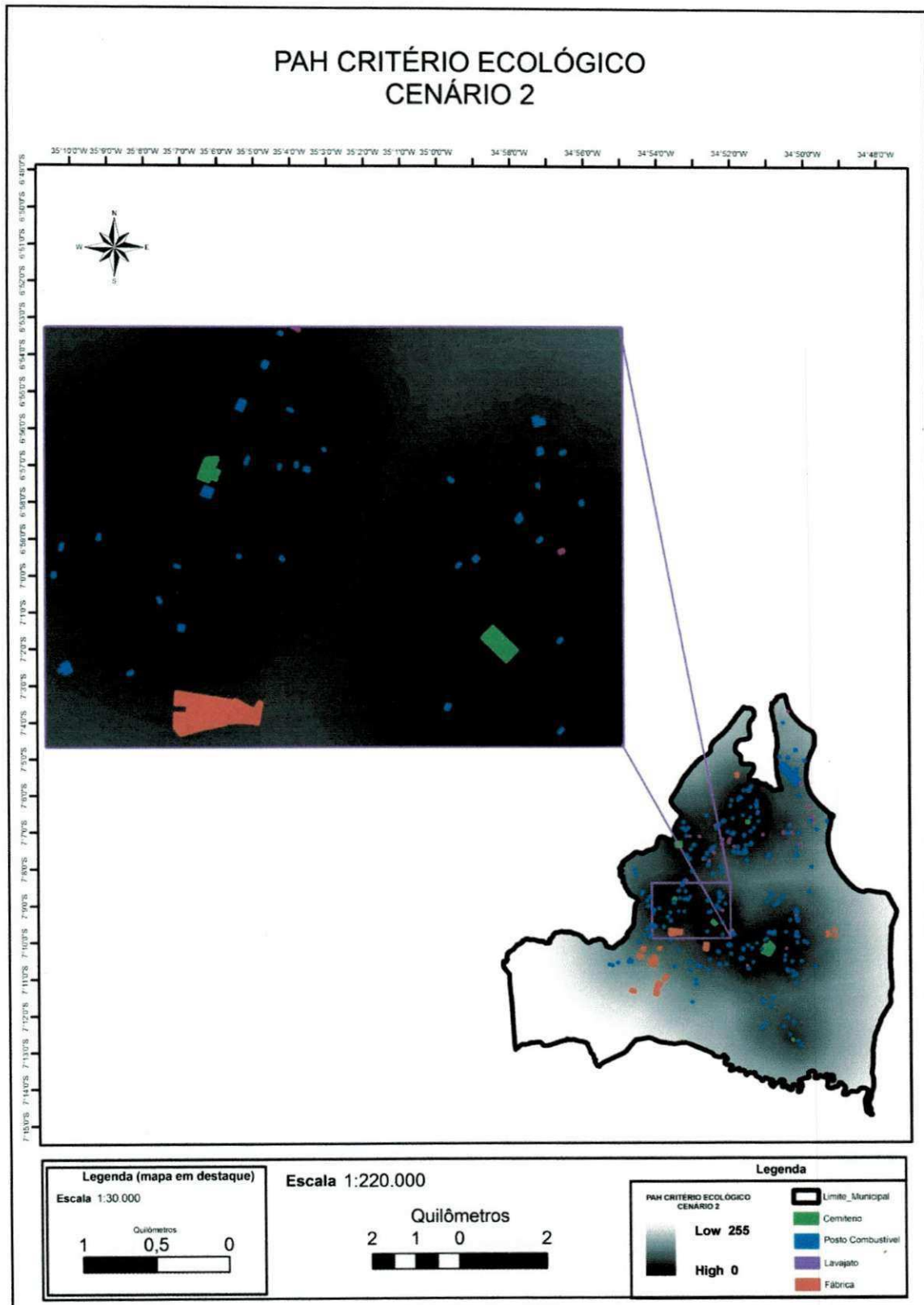


Figura 31. Detalhe de áreas com duas ou mais atividades muito próximas – Cenário 2.

5.4.3 Cenário 3

A situação simulada no Cenário 3 tem o intuito de dar mais atenção a produção industrial no tocante à contaminação dos lençóis freáticos. Este mapa é mostrado na Figura 32 com as zonas industriais da cidade em destaque.

No Cenário 3 constatou-se que atribuindo um peso maior a imagem *raster* das distâncias euclidianas das fábricas estas sofreram uma menor influência das demais, isso deve-se ao fato das fábricas encontrarem-se mais isoladas na cidade de João Pessoa, ou seja, com postos de combustíveis, lava jatos e cemitérios mais distantes. Nota-se que estas estão bem definidas na imagem (ver Figura 32), as três regiões em destaque no mapa, correspondem ao distrito industrial de João Pessoa (mais a oeste), ao distrito industrial de Mangabeira (mais a leste) e ao distrito industrial de Cabedelo (mais ao norte) que adentra aos limites do Município de João Pessoa. A Figura 33 mostra em detalhe o distrito industrial de João Pessoa com suas principais indústrias.

5.4.4 Cenário 4

O Cenário 4 simula uma realidade em que o objetivo é visualizar a influência das atividades potencialmente poluidoras única e exclusivamente através da dimensão da área ocupada e da distribuição no espaço, uma vez que tiveram os mesmos pesos. Para este Cenário os resultados obtidos mostraram que é fácil constatar que as regiões onde existem mais atividades concentradas, independente de sua natureza, terão maiores riscos de contaminação. A Figura 34 apresenta o mapa para este Cenário e a Figura 35 mostra uma área em destaque deste Cenário.

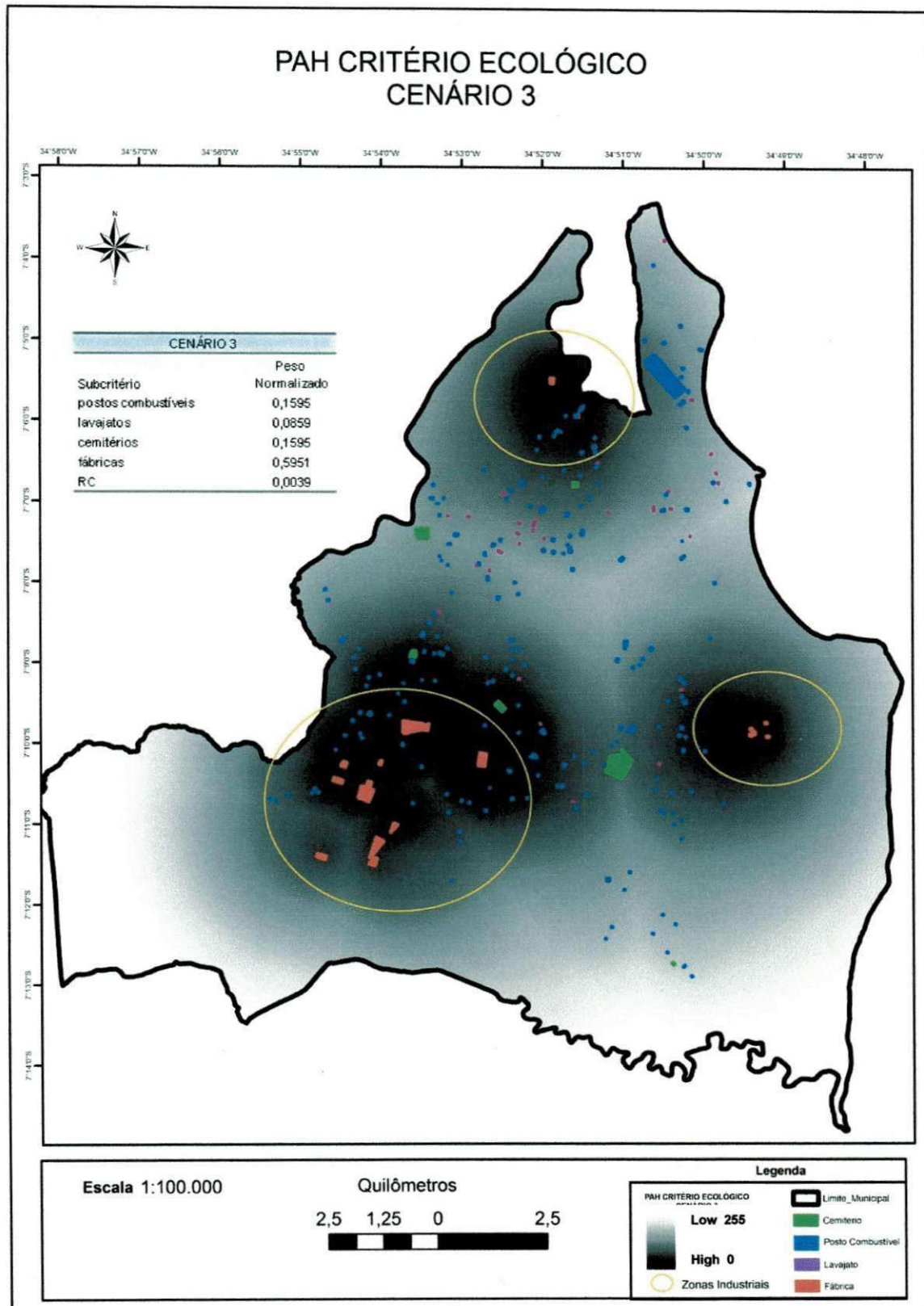


Figura 32. PAH para o Cenário 3.

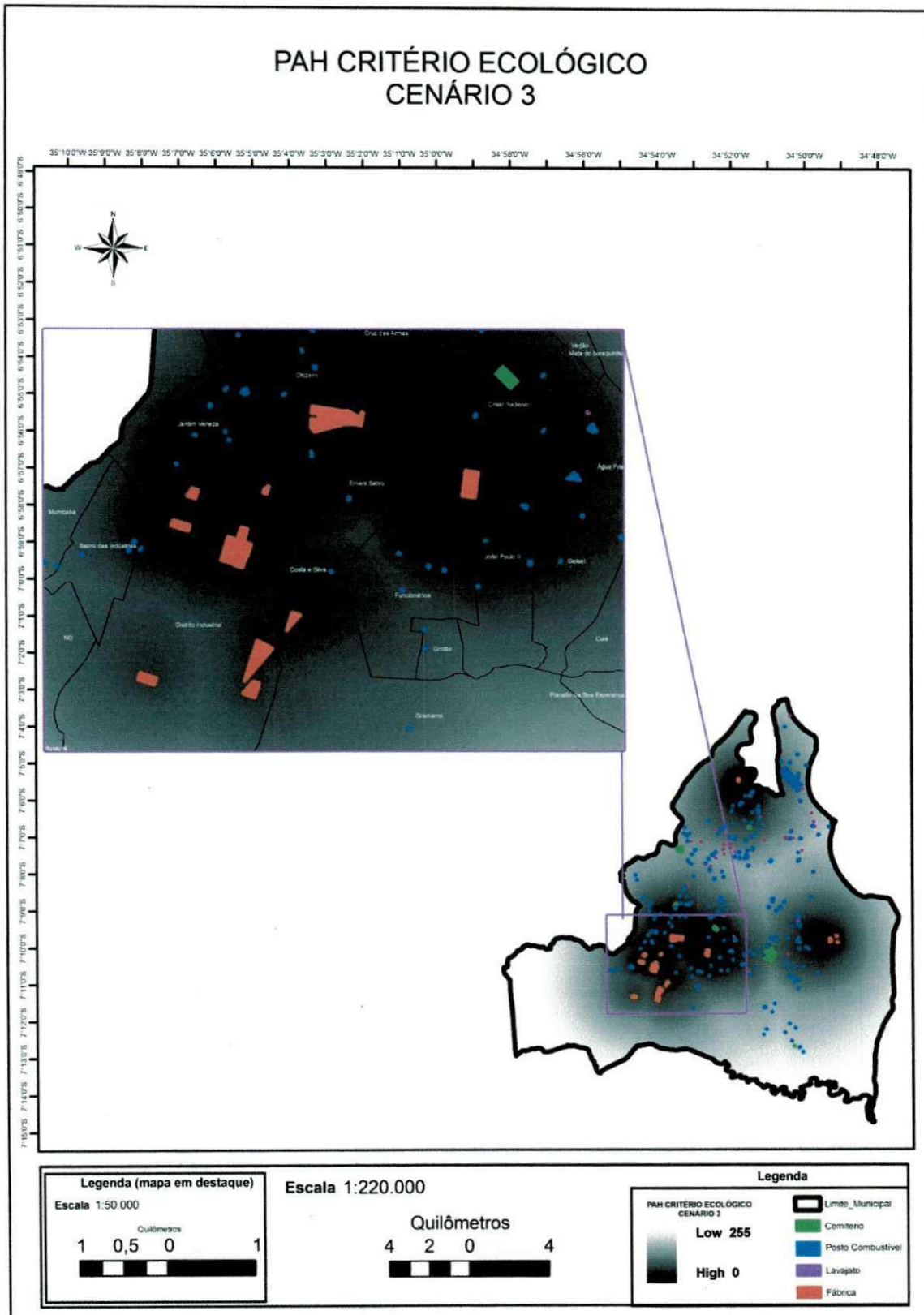


Figura 33. Detalhe de zona industrial de João Pessoa – Cenário 3.

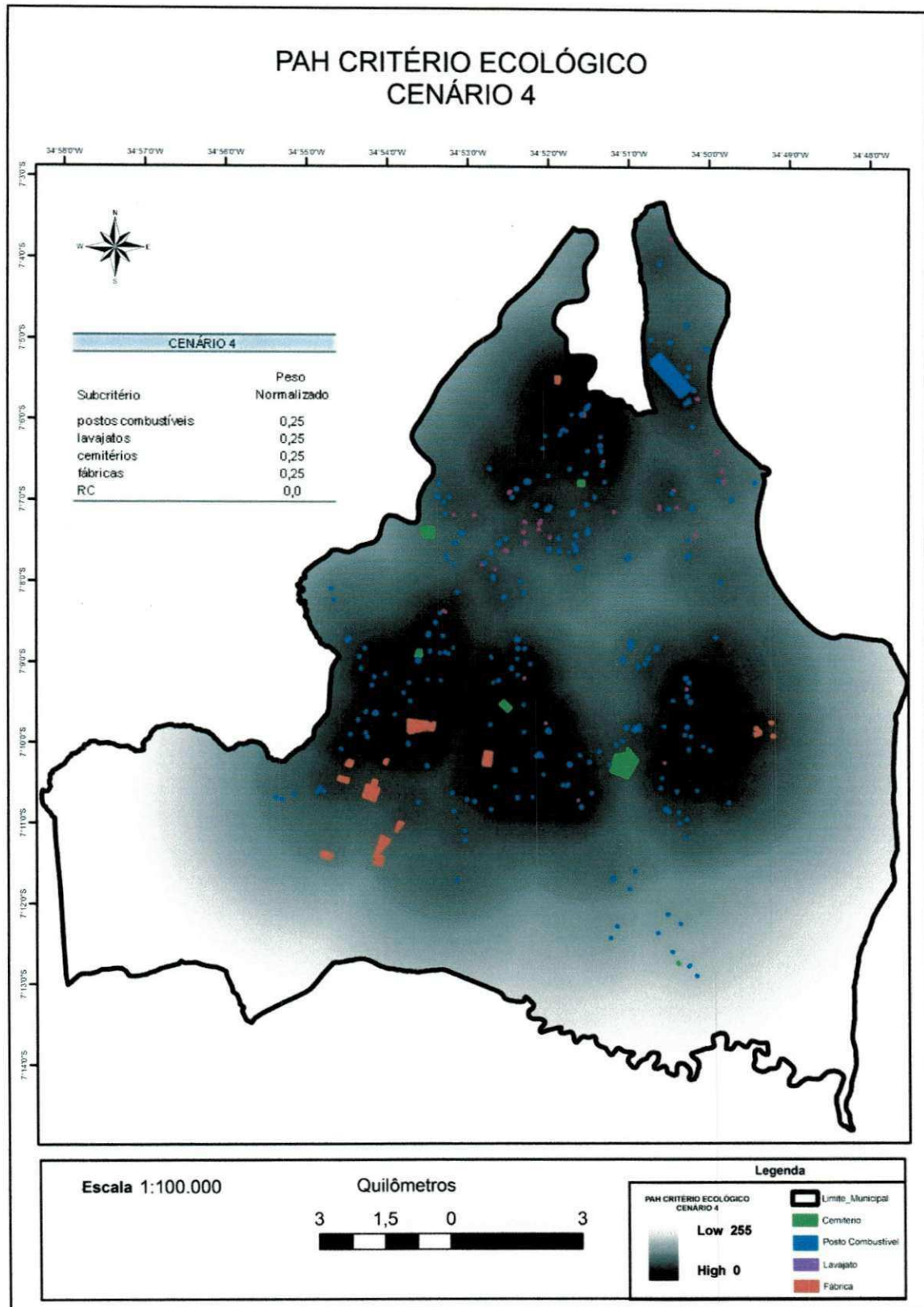


Figura 34. PAH para o Cenário 4.

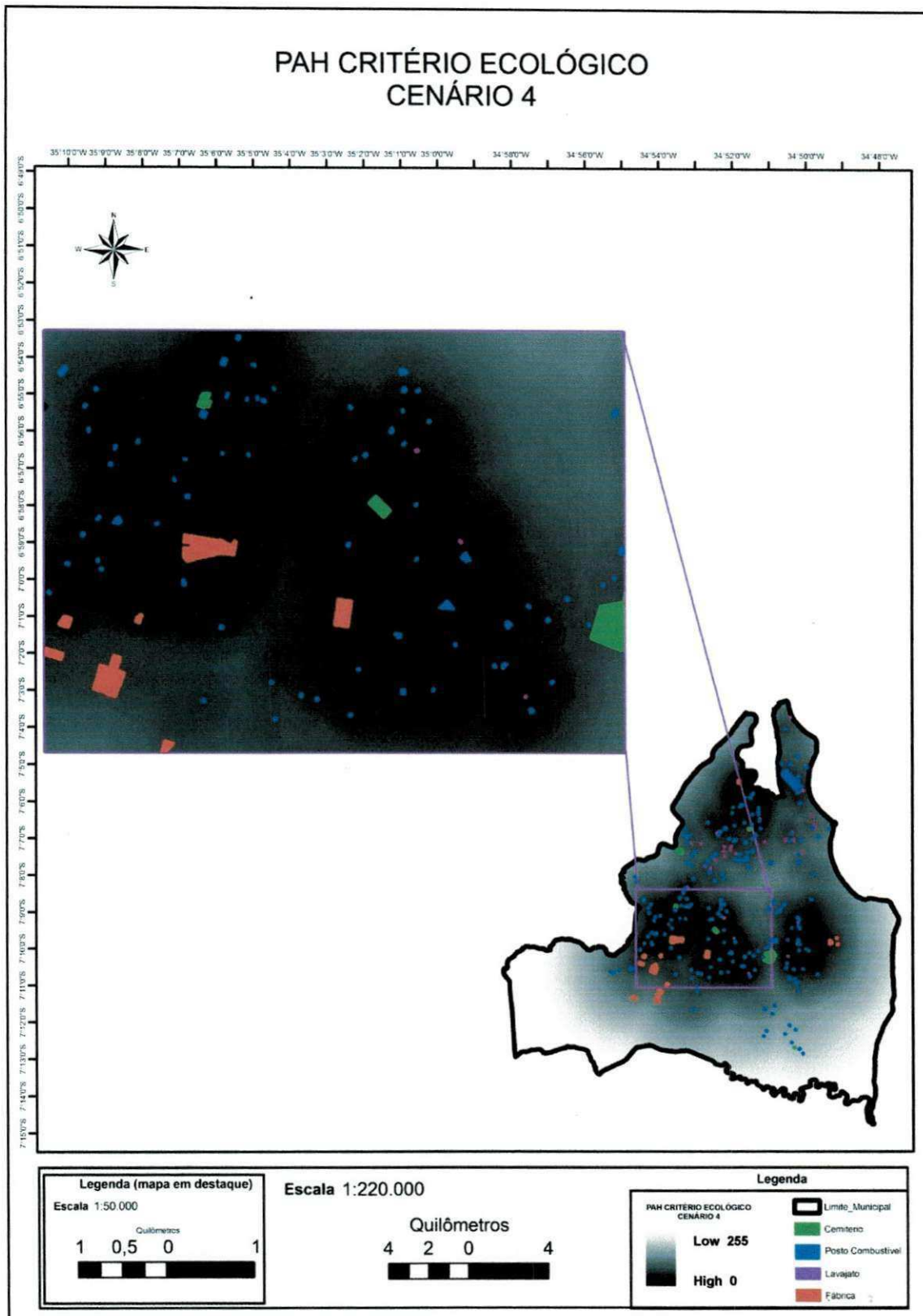


Figura 35. Área e destaque do Cenário 4.

5.5 APLICAÇÃO PAH – CRITÉRIOS HIDRÁULICOS

5.5.1 Cenário 5

O Cenário 5 corresponde primeira simulação do critério hidráulico. Neste Cenário o objetivo foi de visualizar uma realidade em que a área de maior contribuição de recarga (área 2) do aquífero e as localidades onde já existem poços de captação tivessem o maior peso.

Os resultados obtidos mostraram que essas duas atividades receberam os maiores pesos normalizados a partir da matriz de comparação empregada. Ainda como resultado, verificou-se que as regiões com valores mais próximas de zero, correspondem àquelas mais comprometidas, ou seja, regiões onde deve haver uma exploração da água mais seletiva e branda possível. Isto pode ser visto na Figura 36 que apresenta a interface do software ArcGIS 9.2 com a leitura do valor do *pixel* igual a zero de um ponto em que está inserido na área 2 (recarga) e existem vários poços de captação próximos a ele. O mapa para este Cenário pode ser visualizado na Figura 37.

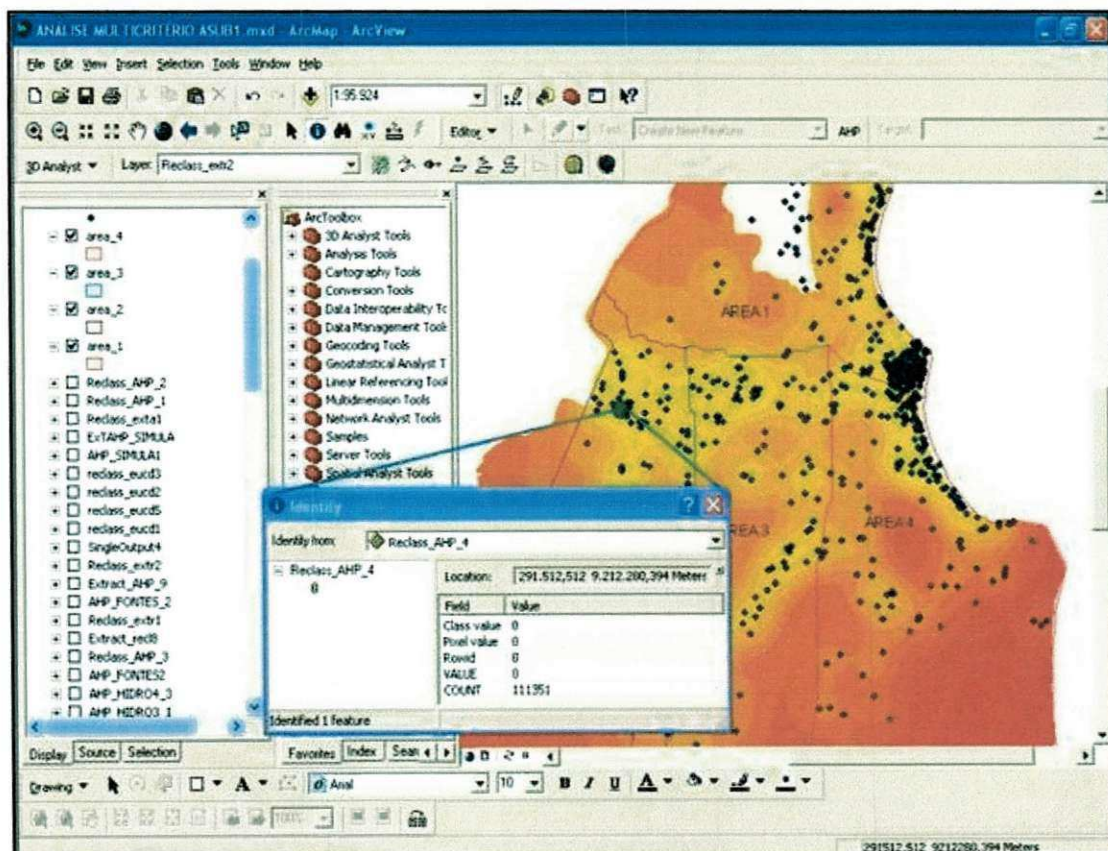


Figura 36. Leitura do valor do pixel de um ponto – Cenário 5.

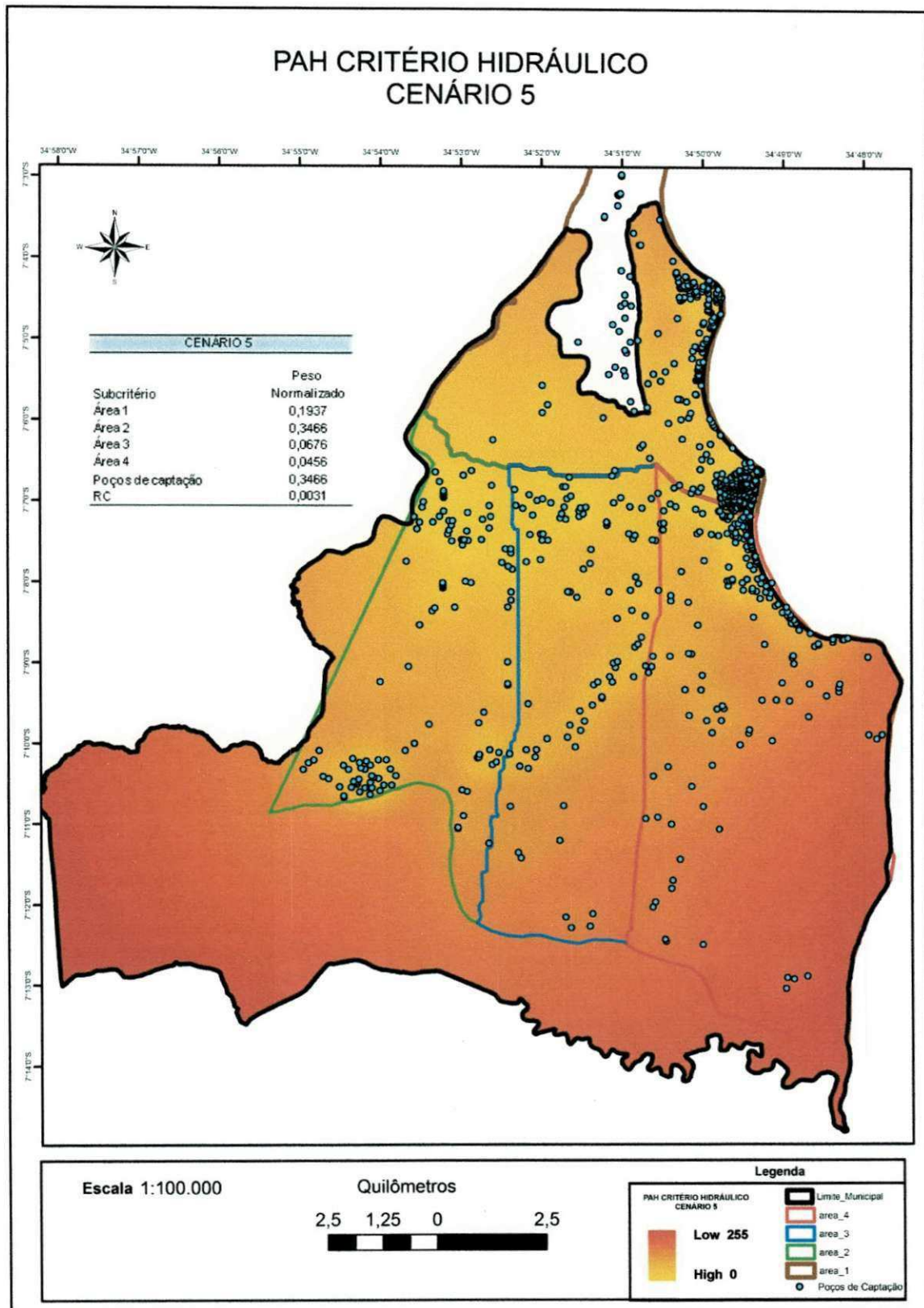


Figura 37. PAH para o Cenário 5.

5.5.2 Cenário 6

No Cenário 6 tomou-se a preservação das áreas de recarga como sendo o primordial no que diz respeito a conservação das áreas, uma vez que se atribuiu uma relevância maior a área 2 e área 1. Vale salientar que neste Cenário o peso atribuído levou em consideração o grau de contribuição das duas áreas de recarga desta região propostas por Batista (2010) que aponta a área 2 como aquela que contribui com uma entrada maior de volume de água no aquífero.

Pode-se observar através da Figura 38 que as regiões com maiores concentrações de poços de captação e que estão em uma das áreas de recarga tiveram os valores mais próximos de zero, ou seja, sinalizou-se que estas deveriam ser mais bem preservadas visto que, está ocorrendo uma elevada captação de água em zonas de recarga. Neste Cenário fica claro que a maior prioridade é a preservação das áreas de recarga, uma vez que mesmo numa área com grande concentração de poços o valor do *pixel* já se distancia dos valores mais baixos próximos de zero como mostra a Figura 39. O mapa para este Cenário pode ser visualizado na Figura 40.

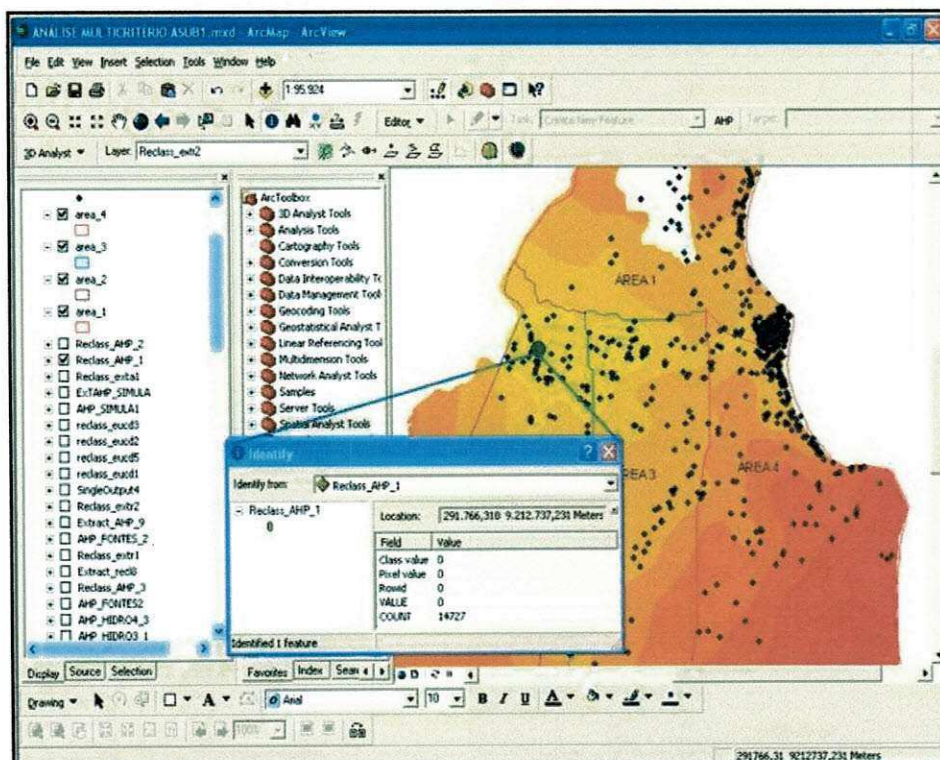


Figura 38. Leitura do valor do pixel de um ponto – Cenário 6.

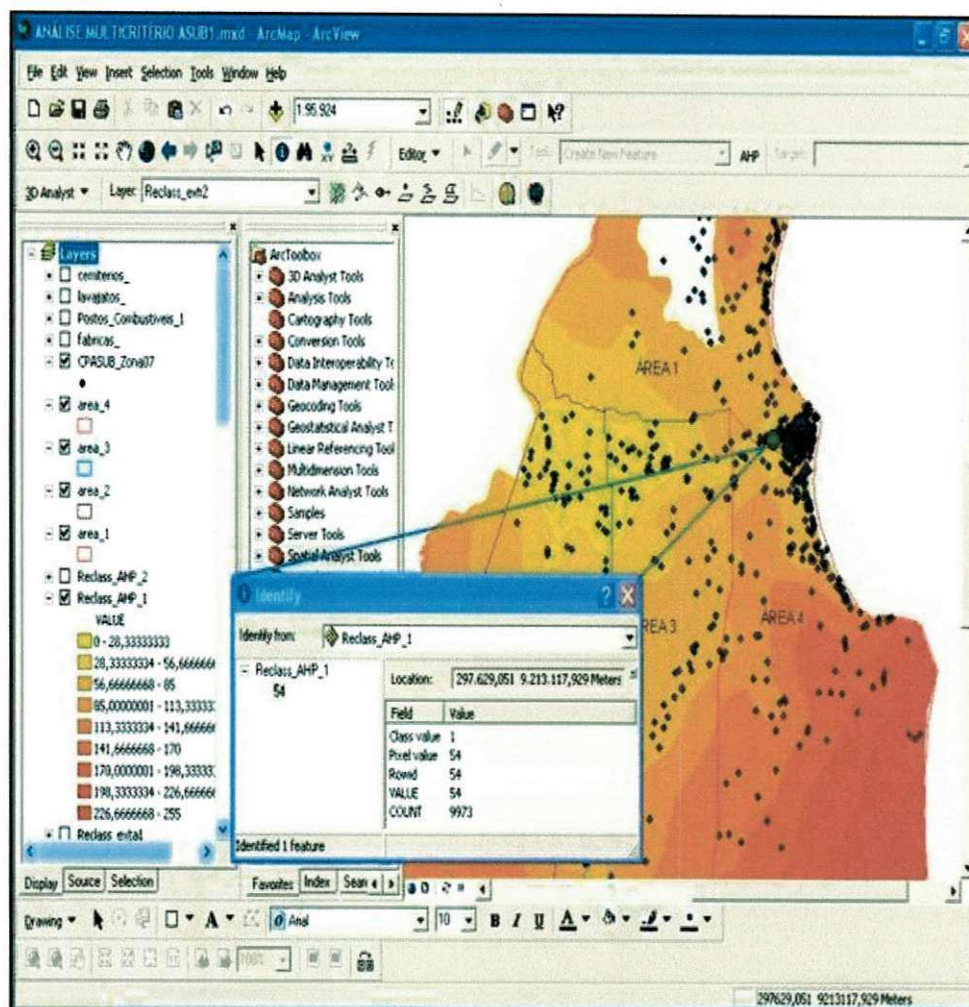


Figura 39. Leitura do valor do pixel de um ponto – Cenário 6.

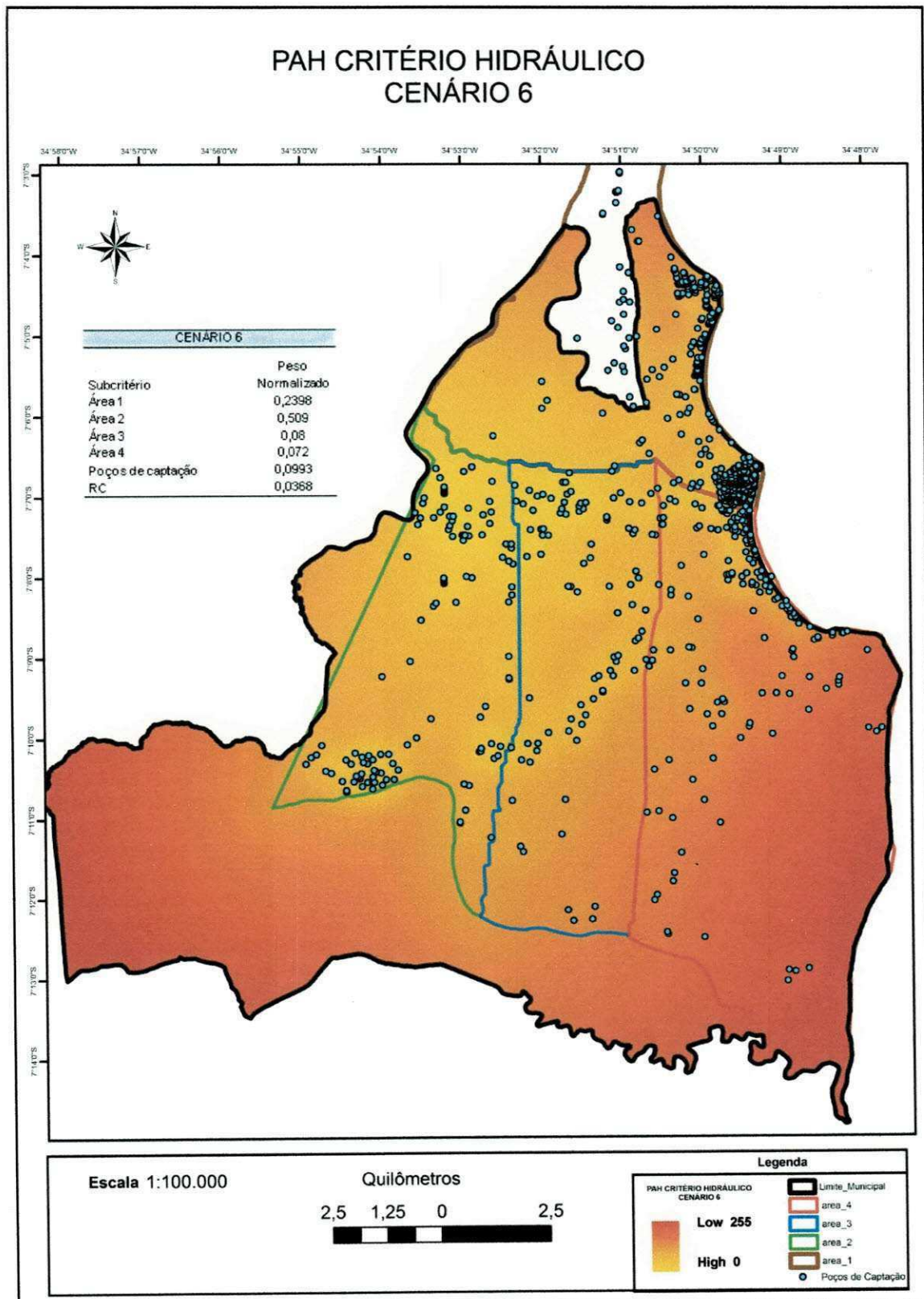


Figura 40. PAH para o Cenário 6.

5.5.3 Cenário 7

Para o Cenário 7 abriu-se mão da porcentagem de contribuição da recarga hidráulica de cada área, tornando agora as duas igualmente importantes neste processo, visando dar a mesma atenção no que tange a preservação da entrada do fluxo subterrâneo.

Observa-se na Figura 41 uma área em destaque do mapa do Cenário 7 com uma amostra da leitura de *pixel*. Pela imagem é possível notar que as áreas com valores mais próximos de zero foram determinadas pela concentração de poços de captação.

Uma vez que as áreas de recarga possuem pesos iguais, o que determinou a variação dos valores foi a número de poços encontrados nestas áreas. A Figura 42 mostra o mapa para o Cenário 7.

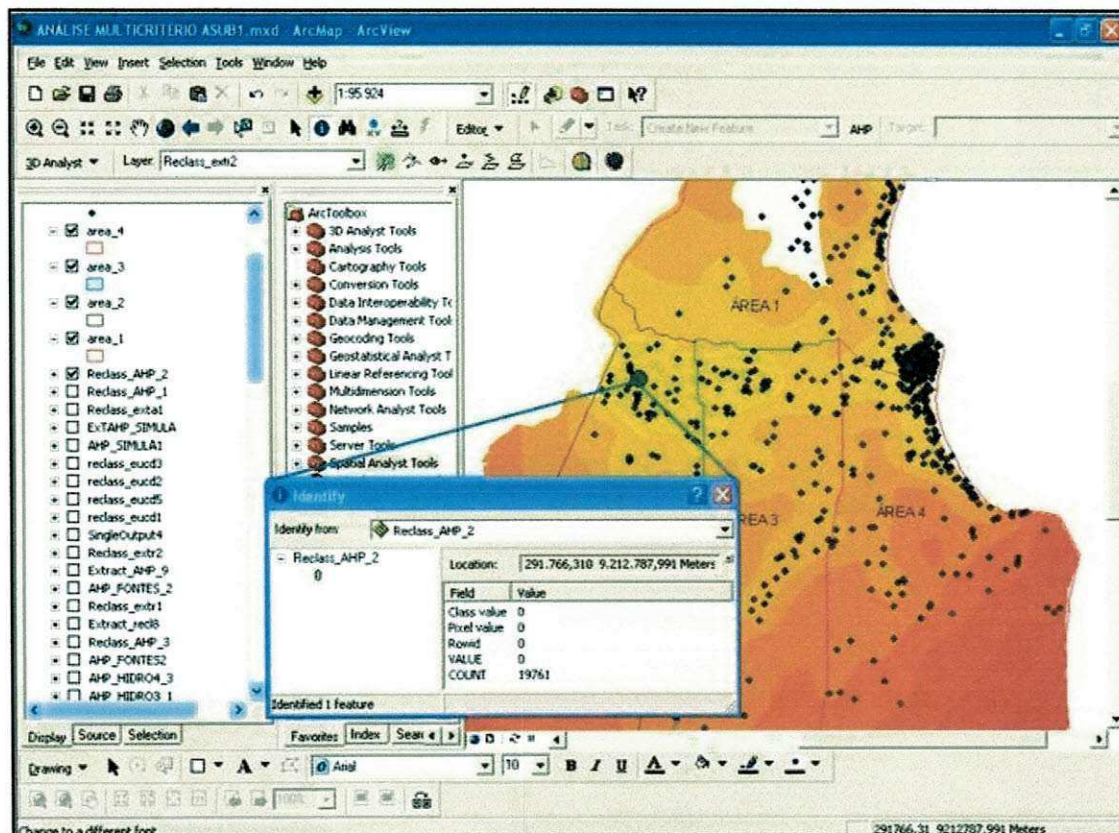


Figura 41. Leitura do valor do pixel de um ponto – Cenário 7.

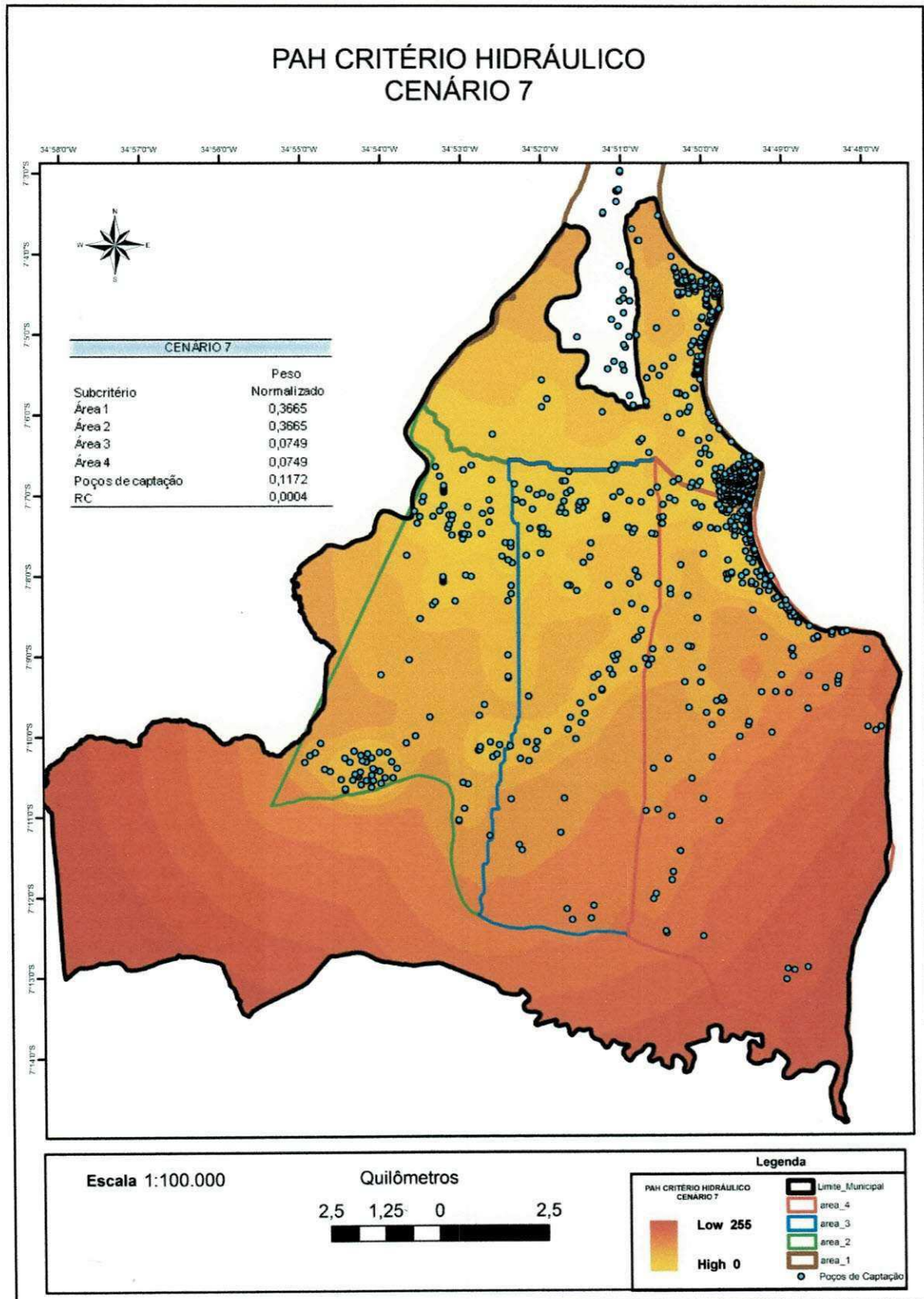


Figura 42. PAH para o Cenário 7.

5.5.4 Cenário 8

No último Cenário do critério hidráulico objetivava-se mostrar uma realidade em que todos os subcritérios hidráulicos teriam o mesmo peso. Assim como no Cenário 4, as regiões com valores mais próximos de zero, seriam aquelas menos indicadas para a captação de água.

Os resultados mostram que pelo fato de todos os subcritérios se equipararem, a quantidade e a distribuição dos poços de captação, exerceram maior influência na determinação das áreas menos indicadas para a exploração do recurso. A Figura 43 apresenta às quatro diferentes áreas do fluxo subterrâneo e os poços de captação sobrepostos na mesma imagem em destaque e a Figura 44 mostra a imagem gerada para este Cenário.

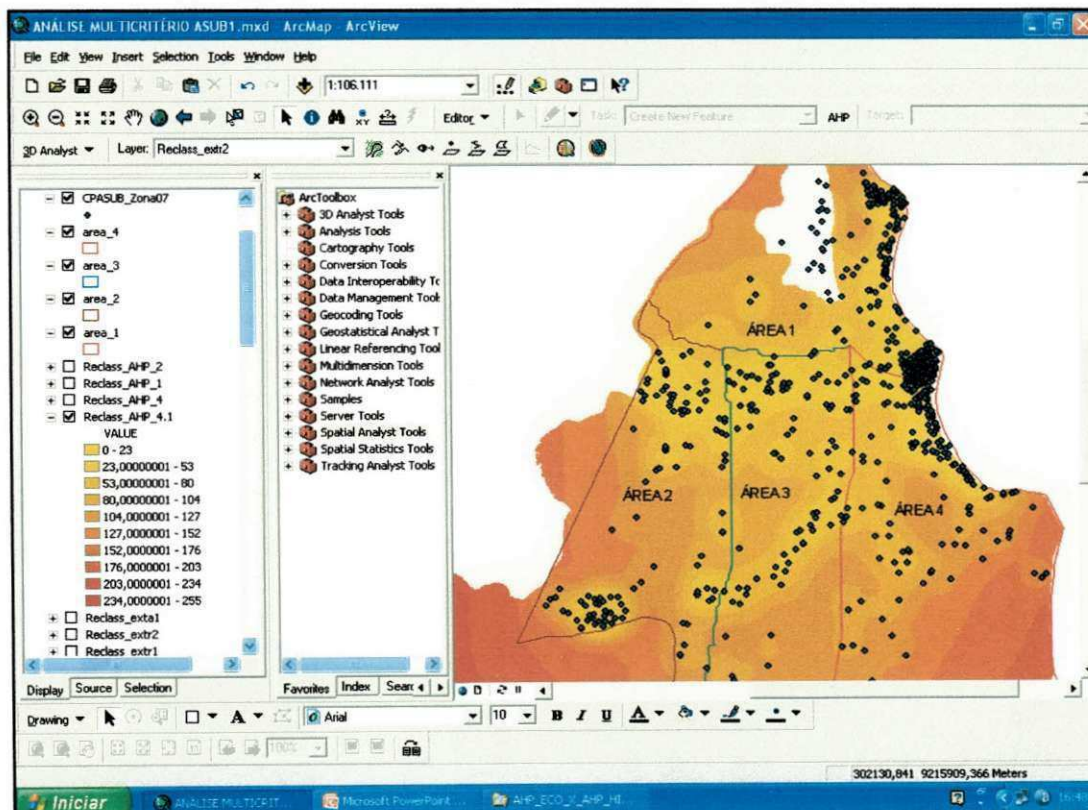


Figura 43. Interface do ArcGIS 9.2 com as informações do Cenário 8 sobrepostas.

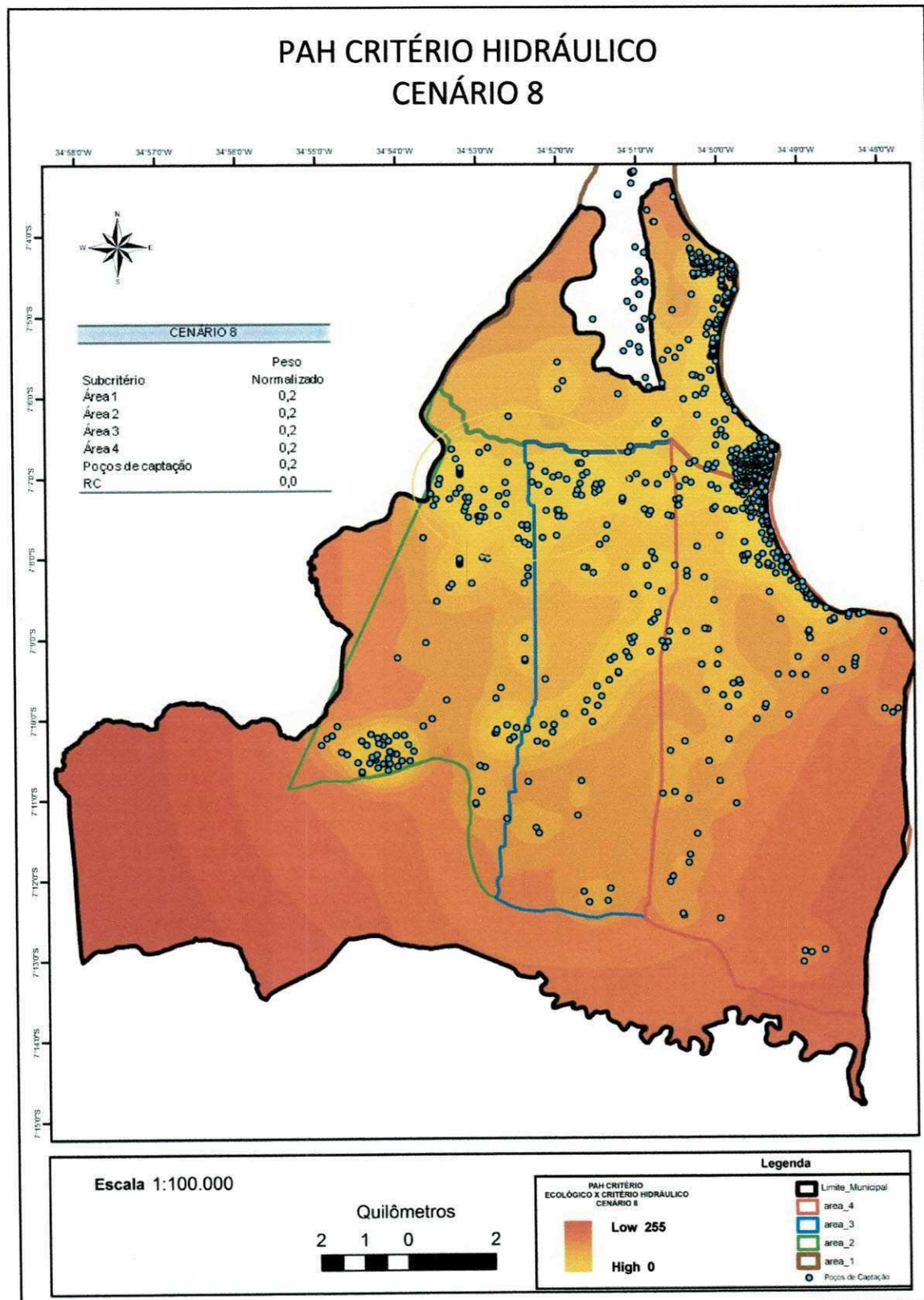


Figura 44. PAH para o Cenário 8.

5.6 APLICAÇÃO PAH – CRITÉRIO ECOLÓGICO X CRITÉRIO HIDRÁULICO

Esta etapa corresponde ao último nível do processo analítico hierárquico do modelo conceitual proposto neste trabalho. As imagens geradas neste processo representam os produtos finais desta análise multicriterial.

5.6.1 Cenário 9

No primeiro Cenário das análises finais, foram utilizados os Cenários 4 e 8 que correspondem àqueles que, tanto os critérios, quanto os subcritérios, possuem pesos iguais e, desta forma, o Cenário 9 simula uma situação em que apenas a quantidade e a distribuição espacial determinam as áreas menos indicadas para a utilização das águas subterrâneas.

Pela imagem gerada pode-se constatar que as regiões com valores mais próximos de zero são aquelas onde existe uma maior concentração das atividades potencialmente poluidoras associadas à forte presença de poços de captação, uma vez que todos os subcritérios se equivalem. As maiores influências ficam por conta da quantidade e espacialização dos dados. A Figura 45 apresenta a imagem final gerada para este Cenário.

5.6.2 Cenário 10

No Cenário 10 os subcritérios permaneceram com pesos equiparados, mas foi atribuída ao critério hidráulico uma maior relevância simulando uma situação em que, dependendo da área do fluxo subterrâneo e da quantidade de poços, estas seriam mais ou menos indicadas para a concessão de outorgas de uso de água. O mapa para este Cenário é apresentado na Figura 46.

A Figura 47 apresenta uma região onde se verifica que áreas em destaque, diferentemente do que ocorreu no Cenário 9, mostram que a área foi homogeneizada em torno dos poços.

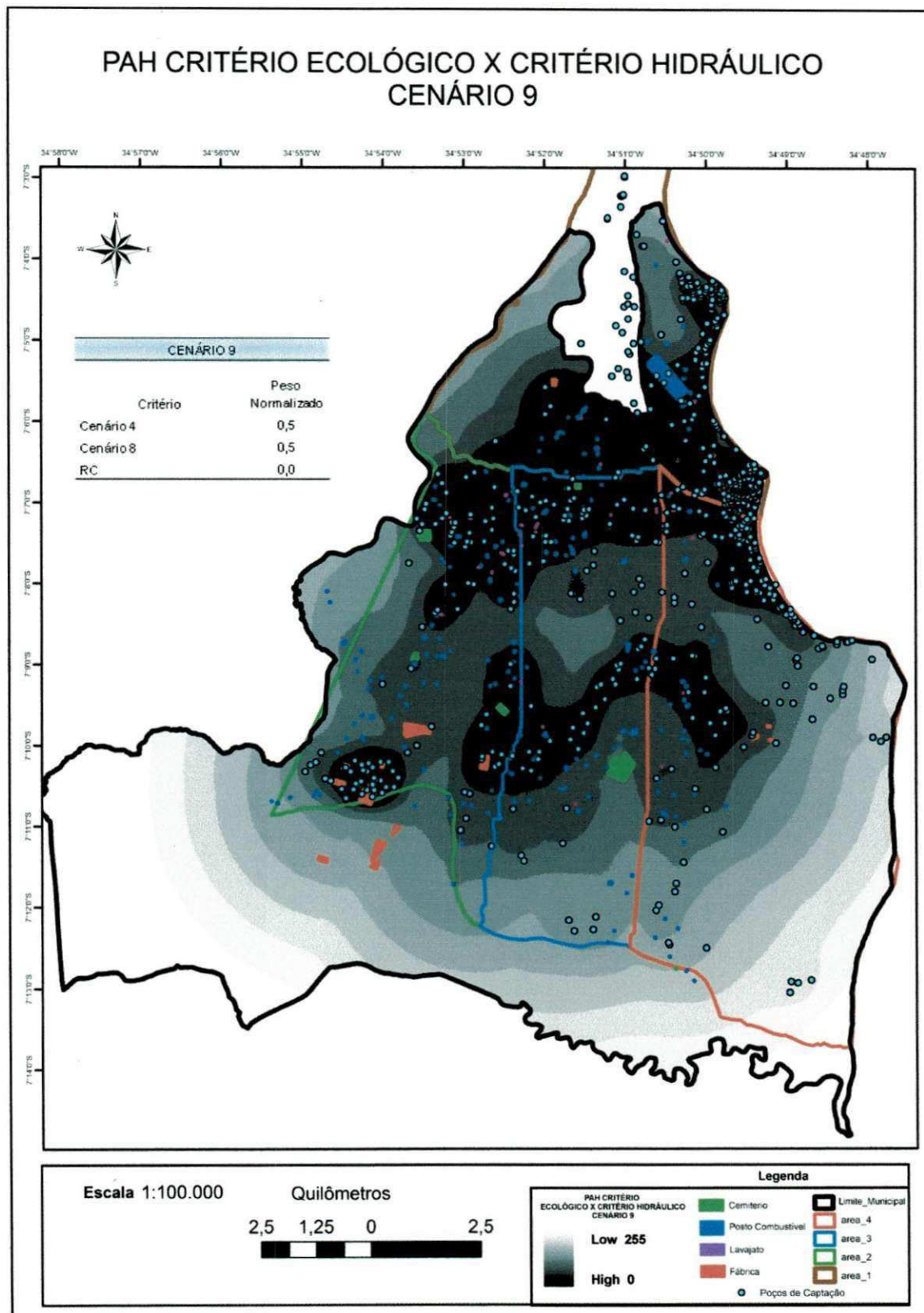


Figura 45. PAH para o Cenário 9.

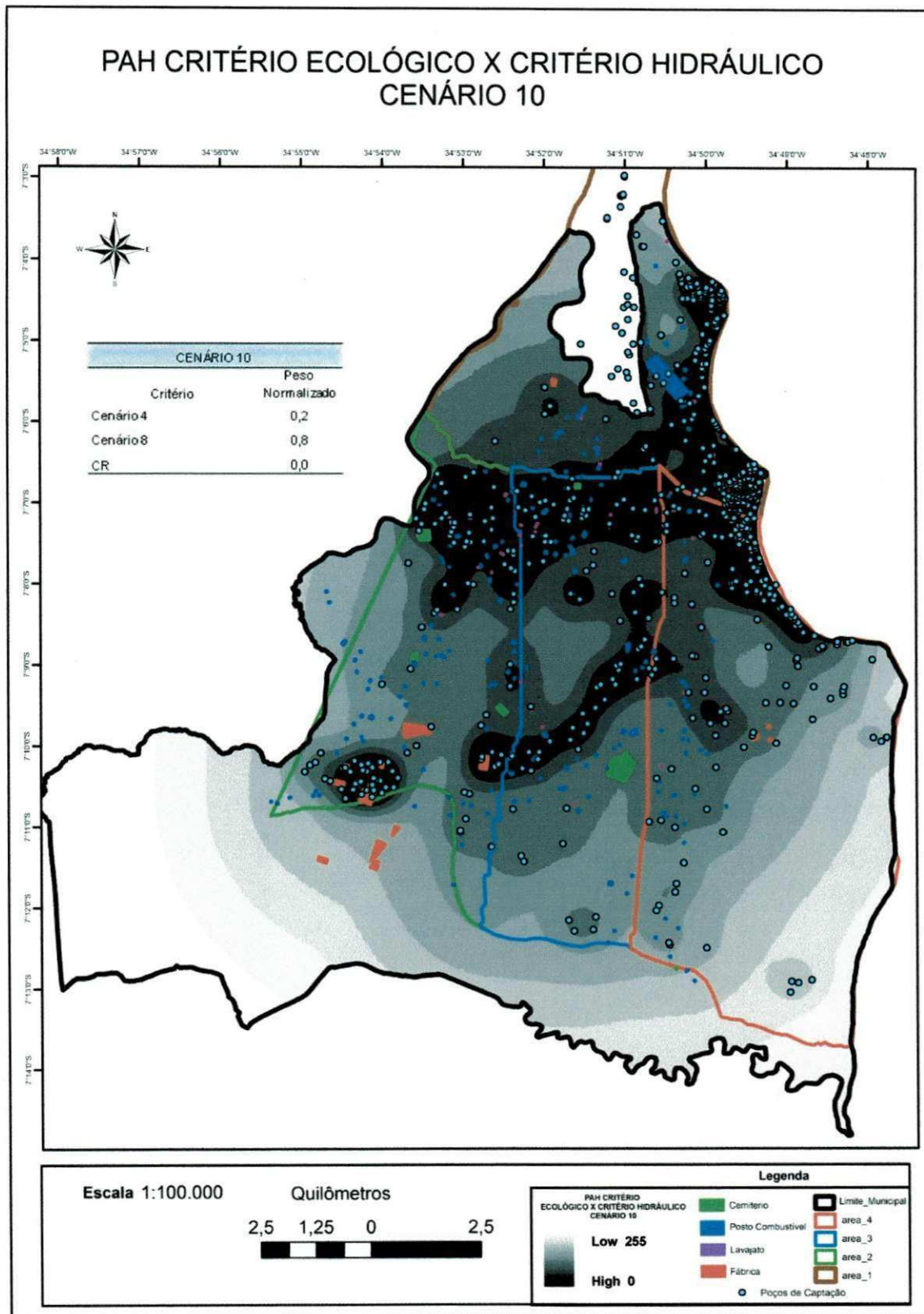


Figura 46. PAH para o Cenário 10.

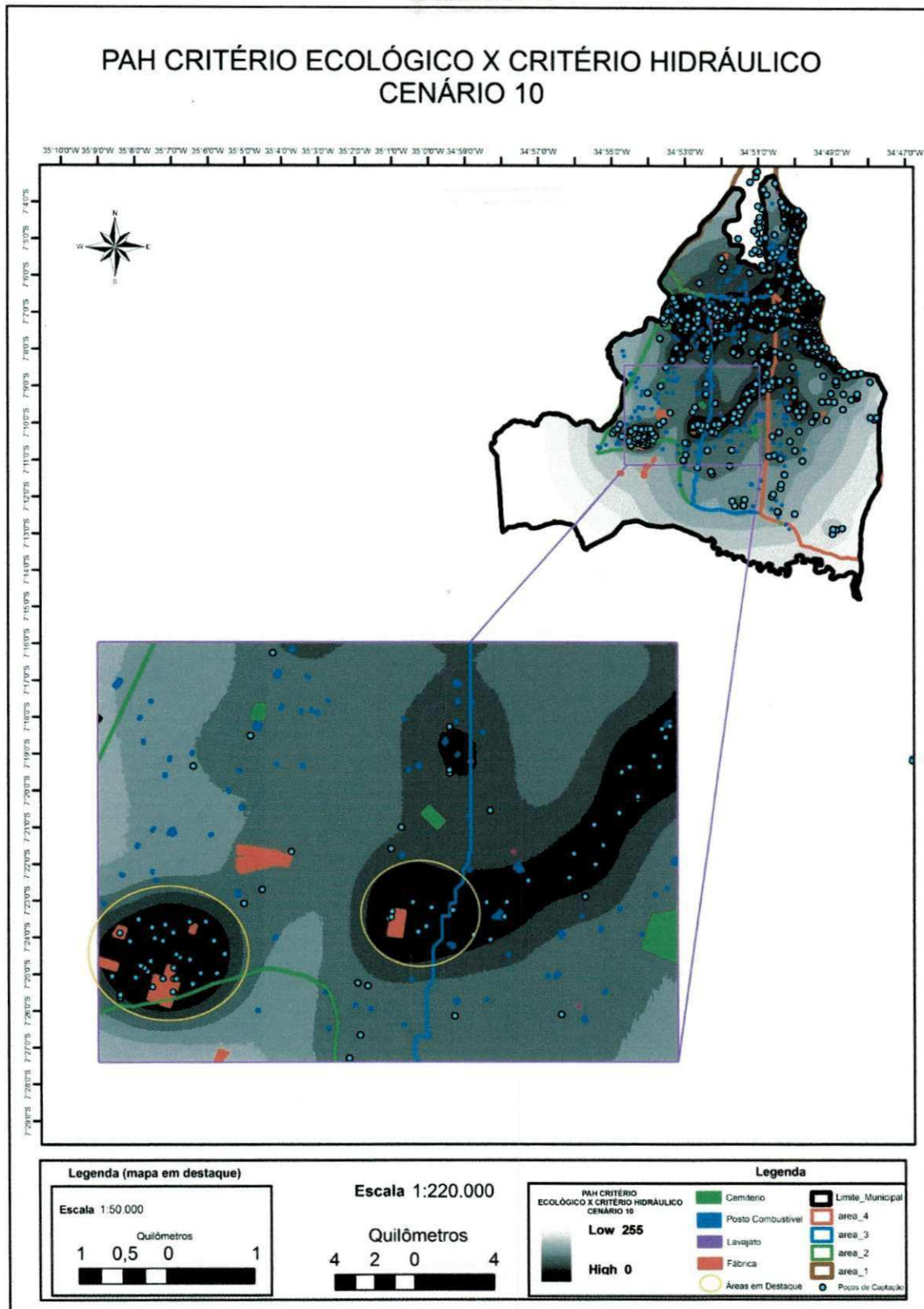


Figura 47. Área do Cenário 10 em destaque.

5.6.3 Cenário 11

Para este Cenário os critérios receberam o mesmo peso, mas com um grau de relevância maior para o subcritério 'postos de combustíveis', por serem os maiores responsáveis pela contaminação dos corpos hídricos subterrâneos, e para os subcritérios correspondentes as áreas de recargas 'área 1' e 'área 2'. A Figura 48 mostra a imagem gerada para este Cenário.

A Figura 49 apresenta uma região onde se verifica que as áreas em destaque possivelmente serão aquelas menos indicadas para a concessão de outorgas de uso de águas subterrâneas.

As ponderações para este Cenário tornaram as áreas em destaque menos restritivas em relação à liberação de outorgas devido ao fato de que estas agora sofrem influências mais significativas apenas dos postos de combustíveis e das áreas de recargas.

5.6.4 Cenário 12

Para o último Cenário simulado as ponderações em relação ao Cenário 11 diferem apenas nas atribuições dos pesos para nível dos critérios. A Figura 50 mostra a imagem gerada para este último critério.

Constatou-se que a área possivelmente menos indicada para a concessão de outorga de uso de água é a que aparece em destaque na Figura 50.

Uma vez que as ponderações para este Cenário atribuem um grau de relevância bem maior aos subcritérios hidráulicos, as áreas possivelmente mais comprometidas são àquelas inseridas nas áreas de recarga ou muito próximas a elas e com a forte presença de poços de captação.

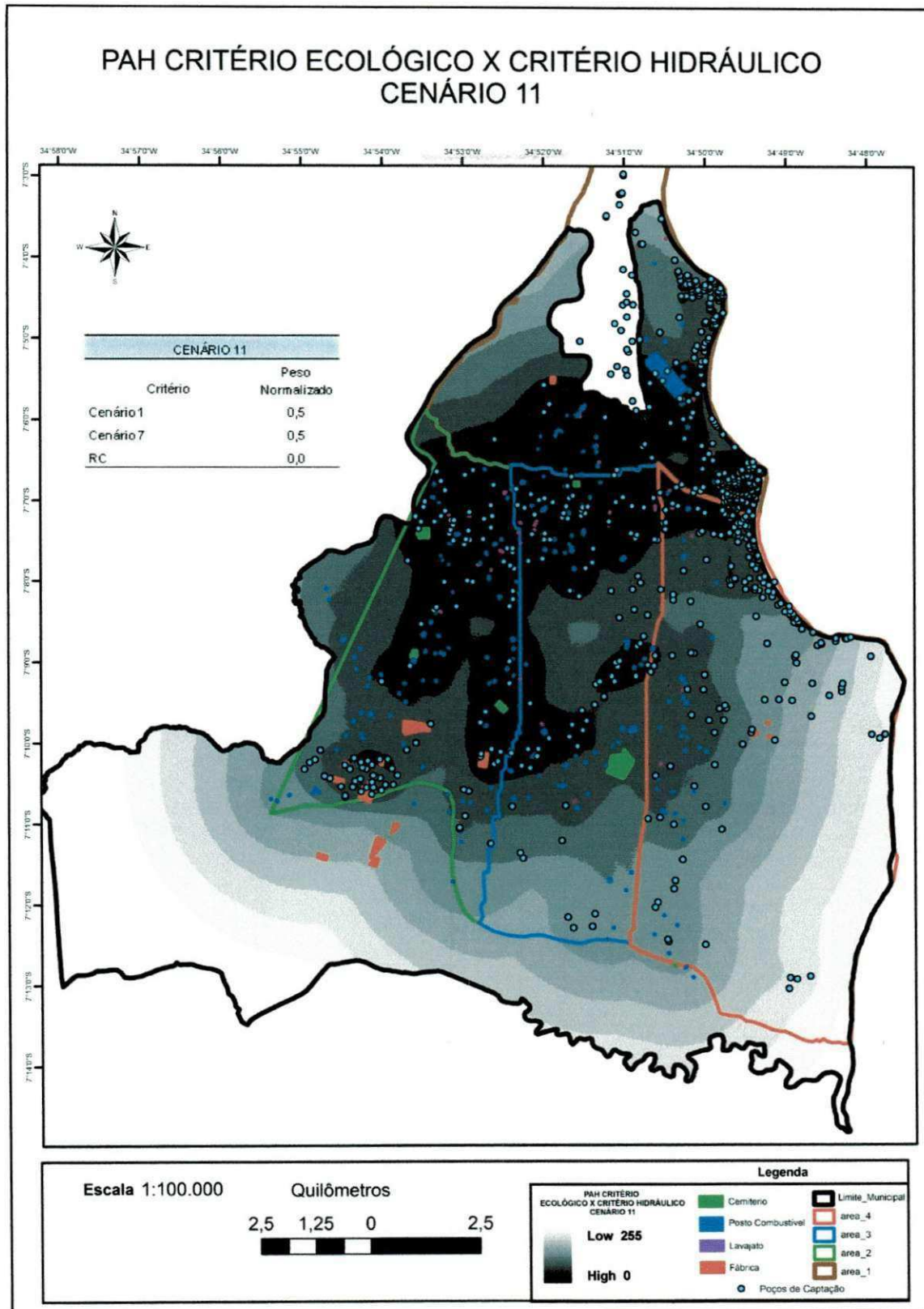


Figura 48. PAH para o Cenário 11.

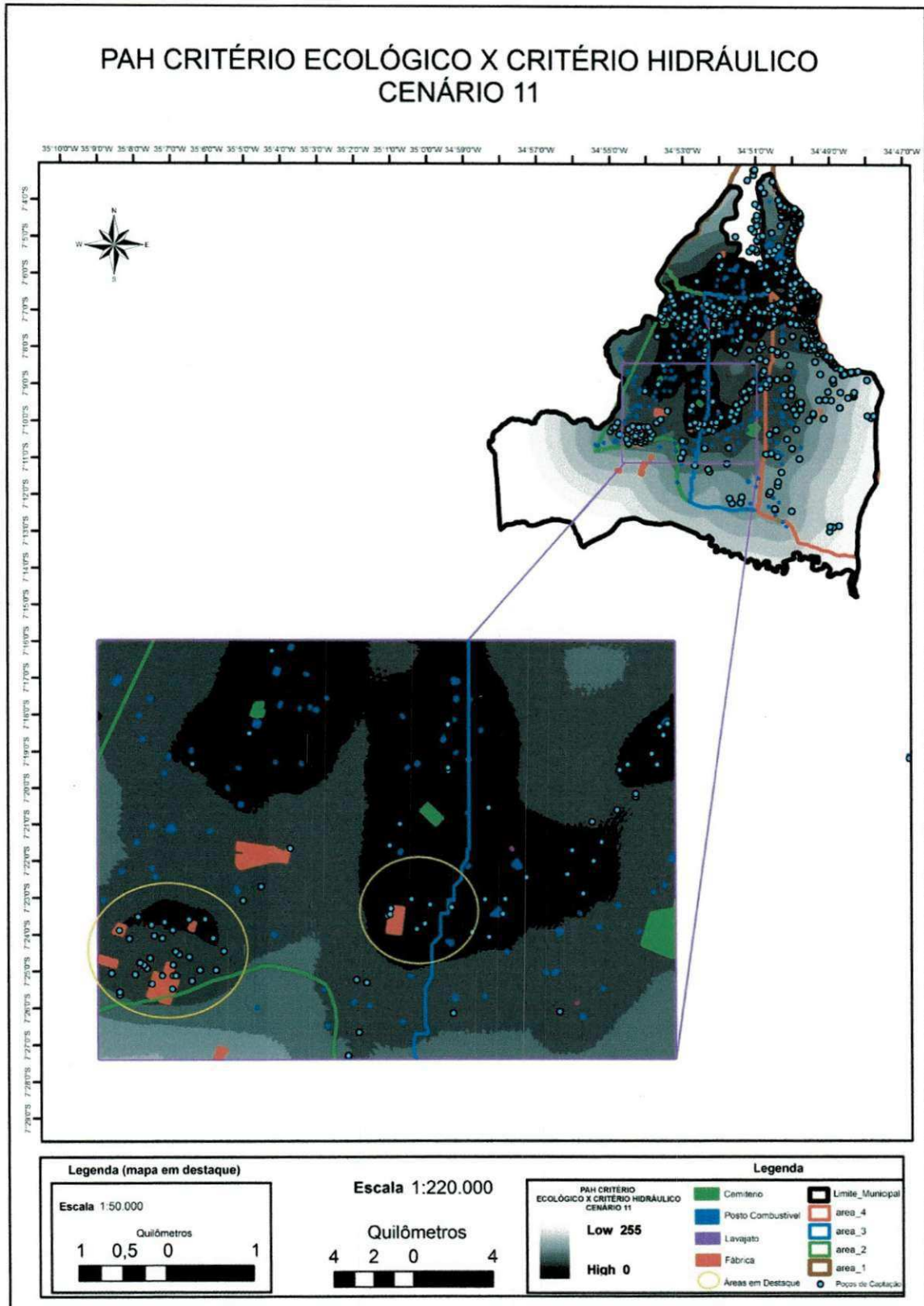


Figura 49. Área do Cenário 11 em destaque.

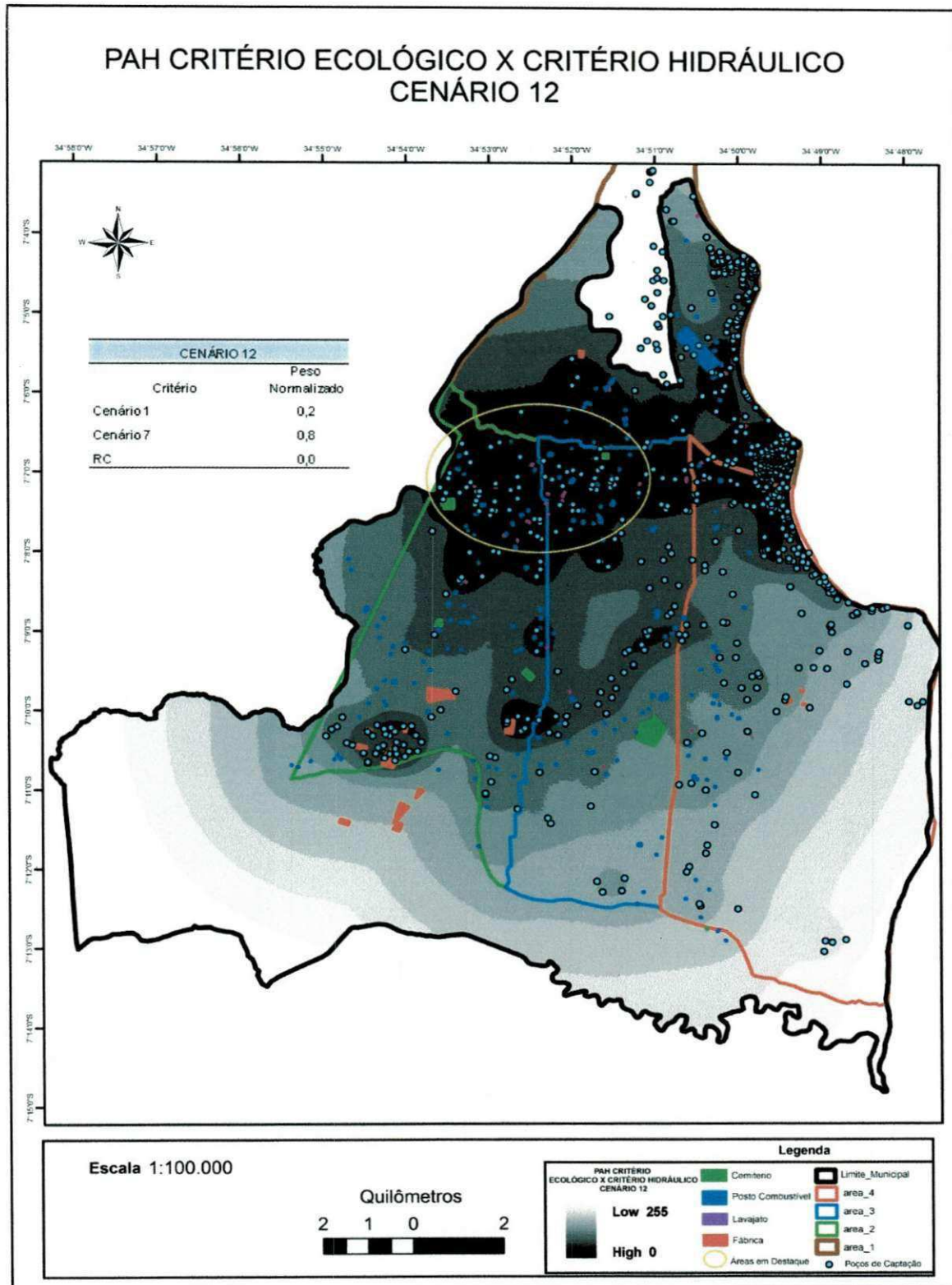


Figura 50. PAH para o Cenário 12.

6. CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os objetivos estabelecidos nesta dissertação, as seguintes conclusões puderam ser inferidas:

- A análise espacial proposta utilizando dados do tipo de uso das atividades potencialmente poluidoras e da identificação das áreas de recarga do aquífero, associados aos dados da espacialização das atividades potencialmente poluidoras, poços de captação de água subterrânea e do fluxo subterrâneo, apesar de restritos, em relação a gama de dados que podem ser usados, já fomentam uma base para a construção de cenários bastante significativos na montagem de mapas visando o planejamento estratégico da fiscalização e do monitoramento das áreas possivelmente afetados, no que diz respeito á qualidade e ao volume das águas subterrâneas;

- A análise multicriterial baseada no método do Processo Analítico Hierárquico (PAH) em um ambiente SIG mostrou-se como uma ferramenta útil e simples no auxílio à tomada de decisão, por se apresentar como uma aplicação composta por processos intuitivos e possibilitar uma manipulação e processamento dos mais diferentes tipos de dados;

- Ressalta-se que dentro da gama de possibilidades de montagem de cenários, buscaram-se apresentar aqueles que possivelmente seriam mais interessantes para os órgãos gestores baseando-se nos princípios básicos da legislação, como distanciamento de atividades potencialmente poluidoras visando à captação da água de melhor qualidade e menos comprometidas quantitativamente;

- Verificou-se que o zoneamento das áreas para concessão de outorgas poderia estar em uma escala ainda mais detalhada se a área total estudada fosse dividida em células menores para análises mais precisas;

- Constatou-se que o método PAH pode e deve ser aplicado dentro dos sistemas de gestão, pois, permite a simulação dos mais diversos cenários previstos na gestão dos recursos hídricos subterrâneos a partir da combinação dos dados envolvidos e das ponderações estabelecidas;

- A extensão *ArcScript AHP 1.1 – Decision Support Tool for ArcGIS* utilizada para a aplicação do PAH em um ambiente SIG possui como principal característica de restrição o fato de converter de forma analítica dados de caráter físico, como distanciamento entre dois pontos, em uma escala de número de *pixel* que indica maior ou menor intensidade sobre o dado avaliado.

- O Método apesar de apresentar informações a partir de dados confiáveis, não exclui a necessidade de uma validação em campo dos apontamentos das simulações, uma vez que a dinâmica dos processos subterrâneos é bastante complexa, principalmente no que diz respeito à velocidade de contaminação e do fluxo subterrâneo;

Visando contribuir com os possíveis estudos e ações futuras que possam vir a ser desenvolvidos, recomenda-se:

- O desenvolvimento de pesquisas na região que possibilitem o enriquecimento das informações que possam ser incorporadas ao modelo proposto;

- A colaboração e o trabalho conjunto entre os diversos órgãos envolvidos com os recursos hídricos na busca pela troca de dados, informações e tecnologias visando contribuir com o Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos;

- A fiscalização e atualização dos dados referentes ao uso do solo, principalmente das atividades potencialmente poluidoras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. M.; GRANEMANN, S. R.; GARTNER, I.; BERNARDES, R. S. Escolha de um programa de controle da qualidade da água para consumo humano: aplicação do método AHP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, p. 257-262, 2000. Disponível em: <www.agriamb.com.br/revista/v4n2/257.pdf>. Acesso em: 03 junho de 2011.

ALBERTASSE, L. M. T. **Vulnerabilidade à ação antrópica e uso e ocupação do solo para a Estação Ecológica Municipal Ilha do Lameirão, Vitória – ES**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

ALMEIDA, A. T. de; FERREIRA, R. J. P.; GUSMÃO, A. H. P. de; MIRANDA, C. M. G. de, **Sistema de apoio à decisão para seleção de atividades críticas no gerenciamento de projetos com avaliação multicritério**. Anais do XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto. Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR0902_1382.pdf>. Acesso em 1º de junho de 2010.

ASAHI, T.; TURO, D.; SHNEIDERMAN, B. **Visual decision-making: Using tree maps for the Analytic Hierarchy Process**. Maryland: University of Maryland, 1994. Disponível em: <http://sigchi.org/chi95/Electronic/documents/videos/ta_bdy.htm>. Acesso em: 04 de junho de 2011.

ASUB – Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão da águas subterrâneas. Relatório Técnico II de atividades 2010, UFCG Campina Grande, 2010.

AWAD, E. M. **Management Information Systems**, Benjamin/Cummings, **John Wiley & Sons, Inc** 1988.

BARBAROSOGLU, G. e PINHAS, D. **Capital rationing in the public sector using the analytic hierarchy process**. 1995. Disponível em: <<http://www.ie.uryukyu.ac.jp/~j94033/study/finalpeper2.html>>. Acesso em: 03 junho de 2011.

BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE São José dos Campos, 1997.

BATISTA, M. C. B. **Modelagem do Fluxo Subterrâneo na Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2010.

BELTON, V. e STEWART, T. J., **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2002.

BOROUSHAKI, S. e MALCZEWSKI, J. Implementing an extension of the Analytical Hierarchy Process using Ordered Weighted Averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. **Computers and Geosciences** 24, pp. 399-410, 2007.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico 2007. Seção 3 - Comercialização. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2007.asp>. Acesso em: 20 de junho de 2010.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo. Dados Estatísticos. Venda de Combustíveis. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp>. Consultado em: 20 de junho de 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA n.º 273, de 29 de novembro de 2000. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA n.º 335, de 3 de abril de 2003. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=359>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2011.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução CNRH n.º 15, de 11 de janeiro de 2001. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14>

Acesso em: 14 de janeiro de 2011.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Base de Informações Municipais, Rio de Janeiro, CD BIM, 2000.

BURCH, J. G. e GARY, G., Information Systems - Theory and Practice, **John Wiley & Sons**, Inc, 1989.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relação de áreas contaminadas**, 2008. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/publicacoes.asp>>. Acessado em: 04 de janeiro de 2011.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Noções e Definições em Hidrogeologia**, 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Informa??es-B?sicas/2-Hidrogeologia>>. Acessado em: 28 de junho de 2011.

CORSEUIL, H. X. e MARINS, M. M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamento de gasolina: o problema é grave? **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.2, n.2, p.50-54, 1997.

ESRI Support ArcScript. Disponível em:
<<http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=13764>>. Acesso em: 09 de agosto de 2009.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **El estado mundial de la água.** Disponível em:
<<http://www.fao.org/corp/publications/es/>>. Acesso em: 24 de outubro de 2010.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys. **Spring Science + Business Média, Inc.**, New York City, 2005.

FINNIE, G. R. e WITTIG, G. E. **An Intelligent Web Tool for Collection of Comparative Survey Data.** Austrália: School of Information Technology Bond University, 1999. Disponível em:
<<http://www.it.bond.edu.au/publications/99TR/9910.PDF>>. Acesso em: 04 de junho de 2011.

GARTNER, I. R. **Avaliação ambiental de projetos em bancos de desenvolvimento nacionais e multilaterais: evidências e propostas.** Brasília: Editora Universa, 2001.

GODINHO, J. C. M. **Aplicação do método de análise multicritério na escolha de traçado de linhas de ônibus de transporte public utilizando sistema de informação geográfica.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em <http://petrisc.pet.coppe.ufrj.br/dissertacoes/transporte_publico/godinho_jucemara.pdf>. Acessado em 28 de agosto de 2010.

GOICOECHEA, A.; HASEN, D. R.; DUCKSTEIN, L. Multiobjective decision analysis with engineering and business. **Jonh Wiley and Sons, Inc.** Canada, pp. 519, 1982.

GOMES, L. F. A.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. São Paulo: Pioneira, 2004.

GONÇALVES, T. D. **Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília – DF, 2007.

HOTTA, L. H. **Avaliação comparativa de tecnologia de transporte público urbano: ônibus x transporte público individualizado**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-28112007-095503/>>. Acessado em 28 de agosto de 2010.

HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. **Introdução a pesquisa operacional**. Ed. Campus Ltda e Ed. Da USP. Tradução: LEMOS, H. L. São Paulo, pp. 805, 1988.

JANKOWSKI, P. e RICHARD. L. **Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection**, *Environment and Planning B* 21, pp. 323–340, 1994.

JANSEN, L. K. C.; SHIMIZO, T.; JANSEN, J. U. **Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis**. In: XXIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Florianópolis, 2004. Anais... Disponível em: <http://www.producaoonline.inf.br/v04n04/artigos/PDF/Enegep0304_0389.pdf>. Acesso em: 03 junho 2011.

JENSEN, R. E. An alternative scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematic Psychology*, 28, pp. 317-332, 1984.

KIM, S. C. **Statistical Issues in Combining Expert Opinions for Analytic Hierarchy Process**. Coréia: Soongsil University, 1999. Disponível em:

<http://www.stat.fi/isi99/proceedings/arkisto/varasto/kim_0217.pdf>. Acesso em: 04 junho 2011

LEMOS, R. D. D. **Os fundamentos e os limites da participação popular no gerenciamento de recursos hídricos no Brasil**. Jus Navigandi, Teresina, ano 14, n. 2373, 30 dez. 2009. Disponível em: <<http://jus.uol.com.br/revista/texto/14097>>. Acesso em: 10 jan. 2011.

LIMA, C. V. B. **Modelo Multicritérios de Apoio À Decisão Aplicado Ao Uso Múltiplo de Reservatórios: Estudo da Barragem do Ribeirão João Leite**. Dissertação de Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente – Universidade de Brasília – UNB, 2006.

MARINONI, O. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS, **Computers & Geosciences** 30. pp. 637–646, 2004.

MAYS, L. W. e TUNG, Y. K. **Hidrosystems engineering and management**. McGraw-Hill, New York, pp. 530, 1992.

MENESES, L. F. **Avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos livres no município de João Pessoa-PB através do modelo DRASTIC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Brasil. 2008.

MITTRA, S. S. **Decision Support Systems Tools and Techniques**, John Wiley & Sons, Inc, 1986.

MOREIRA, R. **Avaliação de projetos de transporte utilizando análise benefício-custo e AHP**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vts000287826>>. Acessado em 28 de agosto de 2010.

PARAÍBA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs). Gestão da águas. Em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/gestao/>>. Acesso em: 20 de abril de 2011.

PARANHOS, G. C. e YARASCA, J. C. L. **Técnicas multicriteriais aplicadas ao planejamento de transportes**. UNB, Brasília – DF, 2009.

PARETO, V. **Course d'economy politique**. Lausanne, Rouge, 1896.

PORTAL DA ADMINISTRAÇÃO. **Sistema de apoio à decisão – SAD**. Disponível em: <<http://www.administradores.com.br/informe-se/artigos/sistema-de-apoio-a-decisao-sad/26378/>>. Acesso em 06 de novembro de 2010.

ROSOT, M. A. D.; BARCZAK, C. L.; COSTA, D. M. B. **Análise da vulnerabilidade do manguezal do Itacobi a ações antrópicas utilizando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento**. COBRAC 2000, UFSC. Florianópolis. In. Congresso brasileiro e cadastro técnico multifinalitário. 15 a 19 de outubro de 2000. Disponível em: <<http://geodesia.ufsc.br/geodesia-online/arquivo/cob2000.htm>> Acessado em: 10 abr. 2010.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematic Psychology**, 15, pp. 231-281, 1977.

SAATY, T. L. e VARGAS, L. G. **Prediction, Projection and Forecasting**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 251 pp, 1991.

SETTI, A. A. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. In: **Interfaces da gestão de recursos hídricos**. MMA/SRH, 2000. p. 155-175.

SHIAU, Y. C.; TSAI, T. N.; WANG, W.; HUANG, M. **Use questionnaire and AHP techniques to develop subcontractor selection system**. China: Chung Hua University, 2002. Disponível em:

<<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02143.pdf>>. Acesso em: 03 de junho de 2011.

SILVA, L. M. **Cemitérios fonte potencial de contaminação dos aquíferos livres**. In: Congresso Latino Americano de hidrologia Subterrânea, 4 1998, Montevideo. Anais... Montevideo: ALHSUD, p.667-681, 1998.

SINDIPETRO-PB. Projeto para tanques de combustíveis subterrâneos. Disponível em: <http://www.sindipetro.pb.com.br/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=46&Itemid=99>. Acessado em 18 de novembro de 2010.

SUGIMOTO, L. Sensores detectam e monitoram contaminação de águas subterrâneas. **Jornal da Unicamp**, 22 a 28 de novembro de 2004.

TAVARES, A. C. **Aspectos físicos, químicos, e microbiológicos da água armazenada em cisternas de comunidades rurais no semi-árido paraibano**. 2009. 166 f. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 548 p.

TOLIN, D. **Geographic information systems and Cartographic Modeling**. Prentice Hall, New York, 1990.

TOMA, T.; ASHARIF, M. R. **AHP coefficients optimization technique based on GA**. Japão: Department of Information Engineering of University of Ryukyus, 2003. Disponível em: <<http://www.ie.uryukyu.ac.jp/~j94033/study/finalpaper2.html>>. Acesso em: 04 junho de 2011.

VENÂNCIO, S. S. **Fundamentos Hidrogeológicos**. Apostila do Curso de Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Recursos Hídricos – aula 2– USP–SP, 2009. Trabalho não publicado.

VIEIRA, Z. M. C. L.; LINS, G. M. L.; GALVÃO, C. O. **Suporte à decisão em recursos hídricos**. Apostila do curso de Gestão Normativa de Recursos Hídricos. UFCG/ABEAS – Campina Grande, 2004. Trabalho não publicado.

ZUFFO, A. C.; REIS, L. F. R.; SANTOS, R. F. Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos.- **Rev. Bras. Rec. Hídricos**, vol. 7. n.1 Jan/Mar 2002, 81-102.