

ELIANE MARIA VIEIRA

CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA PARA A PRÉ-IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS  
ADEQUADAS À IMPLANTAÇÃO DE PARQUES AQUÍCOLAS NO  
RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE – MINAS GERAIS

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção  
do título de *Doctor Scientiae*

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL

2009

ELIANE MARIA VIEIRA

CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA PARA A PRÉ-IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS  
ADEQUADAS À IMPLANTAÇÃO DE PARQUES AQUÍCOLAS NO  
RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE – MINAS GERAIS

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção  
do título de *Doctor Scientiae*

APROVADA: 21 de dezembro de 2009.

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Lucia Calijuri  
(Coorientadora)

---

Prof. Nerilson Terra Santos  
(Coorientador)

---

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

---

Prof. Ricardo Motta Pinto Coelho

---

Profa. Izabel Christina d'A. Duarte Azevedo  
(Orientadora)

“... aquele que atende as necessidades presentes sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades.”

Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987.

## Agradecimentos

A Deus, que sempre proveu e proverá.

A Professora Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo, pela orientação, paciência, confiança, amizade e pelo exemplo profissional.

À equipe do projeto "Delimitação de parques aquícolas e dimensionamento da capacidade de suporte na represa de Nova Ponte - MG", da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), pelo apoio, especialmente à Maria Lélia Simão, Marley Lamounier Machado, Ivair Gomes, Elizabeth Lomelino Cardoso e ao Ricardo Mota Pinto Coelho, que concordaram em alterar toda a sistemática de coleta de informações do projeto para atender às proposições desta tese, mesmo implicando em um aumento significativo em gastos financeiros e, principalmente, em tempo de coleta e análises laboratoriais.

À FAPEMIG, pelo financiamento ao referido projeto, do qual este trabalho se integra.

Aos Professores Nerilson Terra Santos, Maria Lucia Calijuri e Eduardo Antonio Gomes Marques, pela amizade e orientação.

Ao Professor Ricardo Motta Pinto Coelho, pelas valiosas contribuições.

À Professora Maria do Carmo Calijuri, que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos do NEPUT, verdadeira escola profissional, pelo apoio no início desta caminhada, especialmente ao Professor João Luiz Lani, ao Pesquisador Eufraim Amaral e à Rita Maria de Souza.

Aos Professores Sérvulo Batista de Rezende e Mauro Resende, pelos ensinamentos.

Aos amigos do SIGEO, pela amizade, disponibilidade com que me atenderam.

Ao bolsista de Iniciação científica, Roberto Ferreira Junior, pela valiosa ajuda na digitalização dos mapas.

Às minhas amigas Andréia, Rosane, Roseane, Elidia e Silvana, que, mesmo com o pouco tempo voltado para a nossa amizade, estiveram presentes nos momentos difíceis e alegres. E à Milta, que, mesmo não estando entre nós, estará sempre presente.

Ao Adenilson Evangelista Botelho, pelo apoio, paciência e amor durante mais esta etapa de nossas vidas.

Aos meus irmãos Regiane, Cristiano e Denilson, que foram verdadeiros amigos em todos os momentos.

Aos meus pais, pelo exemplo, apoio e amor.

## Sumário

Índice de figuras.....	vi
Índice de tabelas.....	ix
Índice de mapas.....	x
Índice de equações.....	xii
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA.....	2
3. OBJETIVOS.....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4.1 Cultivo de peixes em tanques-rede.....	6
4.1.1 Impactos do cultivo.....	6
4.1.2 Caracterização do entorno e da água para o cultivo em tanques-rede ..	7
4.2 Estruturação das camadas de informação.....	22
4.3 Interpolação de dados pontuais.....	22
4.4 Processamento e análise da informação.....	37
4.4.1 Álgebra de mapas.....	37
4.4.2 <i>Multi Criteria Evaluation</i> _ MCE.....	38
5. METODOLOGIA.....	44
5.1 Área de estudo.....	44
6. RESULTADOS e DISCUSSÕES.....	62
6.1 Espacialização dos fatores restritivos.....	62
6. 2 Integração dos fatores restritivos.....	81
6. 3 Espacialização dos fatores qualitativos.....	83
6.4 Integração dos fatores qualitativos.....	93
7. CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES.....	105

8. REFERÊNCIAS .....	108
Anexo I Semivariogramas .....	116
Anexo II Mapas interpolados.....	121

## Índice de Figuras

		Páginas
Figura 1	Faixas de variação da temperatura para peixes	12
Figura 2	Faixas de variação do pH para peixes	14
Figura 3	Faixas de variação do oxigênio dissolvido para peixes	16
Figura 4	Faixas de variação da concentração de amônia e nitrato para peixes	19
Figura 5	Exemplo de um semivariograma	29
Figura 6	Modelos com soleira	31
Figura 7	Modelos sem soleira	32
Figura 8 a	Exemplo de funções sigmoidais	40
Figura 8 b	Exemplo de funções J-shaped	40
Figura 8 c	Exemplo de funções lineares	40
Figura 8 d	Exemplo de funções ajustadas por meio de pontos de controle	41
Figura 9	Localização da área de estudo	45
Figura 10	Vistas parciais do lago da represa de Nova Ponte	46
Figura 11	Localização dos pontos de monitoramento do IGAM na bacia PN2	47
Figura 12	IQA nos pontos de amostragem na microbacia PN nos anos de 2002 e 2003	48
Figura 13	QA nos pontos de amostragem na microbacia PN nos anos de 2003 e 2004	48
Figura 14	IQA nos pontos de amostragem na microbacia PN nos anos de 2004 e 2005	49

Figura 15	Metodologia proposta	52
Figura 16	Sólido definido pela ferramenta Viewshed do ArcGIS	56
Figura 17a	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 1	64
Figura 17b	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 2	64
Figura 17c	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 3	64
Figura 17d	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 4	64
Figura 17e	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 5	64
Figura 17f	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 6	64
Figura 17g	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 7	64
Figura 17h	Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações das estações	64
Figura 18a	Áreas consideradas de elevada beleza cênica	71
Figura 18b	Áreas consideradas de elevada beleza cênica	72
Figura 19	Áreas com incidência de erosão	76
Figura 20	Fatores restritivos adotados	82
Figura 21a	Espacialização do fator temperatura, leitura a 0,5 m	89
Figura 21b	Espacialização do fator temperatura, leitura a 1 m	89
Figura 21c	Espacialização do fator temperatura, leitura a 1,5 m	89
Figura 21d	Espacialização do fator temperatura, leitura a 2,5 m	89
Figura 21e	Espacialização do fator OD, leitura a 0,5 m	90
Figura 21f	Espacialização do fator OD, leitura a 1 m	90
Figura 21g	Espacialização do fator OD, leitura a 1,5 m	90
Figura 21h	Espacialização do fator OD, leitura a 2,5 m	90

Figura 21i	Espacialização do fator pH, leitura a 0,5 m	91
Figura 21j	Espacialização do fator pH, leitura a 1,0 m	91
Figura 21k	Espacialização do fator pH, leitura a 1,5 m	91
Figura 21l	Espacialização do fator pH, leitura a 2,5 m	91
Figura 21m	Espacialização do fator St, leitura a 0,5 m	92
Figura 21n	Espacialização do fator St, leitura a 0,5 m	92
Figura 21o	Espacialização do fator N, leitura a 0,5 m	92
Figura 21p	Espacialização do fator St, leitura a 0,5 m	92
Figura 22	Fatores qualitativos adotados	94
Figura 23	Taxa de atividade do peixe em função da temperatura	97
Figura 24 a	Função sigmoidal decrescente	97
Figura 24 b	Função sigmoidal simétrica	97
Figura 25a	Pré-identificação para tilápias a 0,5 m de profundidade	101
Figura 25b	Pré-identificação para tilápias a 1,0 m de profundidade	101
Figura 25c	Pré-identificação para tilápias a 1,5 m de profundidade	101
Figura 25d	Pré-identificação para tilápias a 2,5 m de profundidade	101
Figura 26	Pré-identificação das áreas adequadas para a espécie tilápia	102
Figura 27	Pré-identificação das áreas adequadas para a espécie piracanjuba	103
Figura 28	Pré-identificação das áreas adequadas para a espécie lambari	103

## Índice de Tabelas

	Páginas	
Tabela 1	Profundidades para instalação de tanques	08
Tabela 2	Temperatura para criação de peixes em tanques	13
Tabela 3	pH para criação de peixes em tanques	14
Tabela 4	OD para criação de peixes em tanques	16
Tabela 5	CE para criação de peixes em tanques	17
Tabela 6	Concentrações indicadas para criação de peixes em tanques	20
Tabela 7	Teores indicados de transparência e sólidos totais para criação de peixes em tanques	21
Tabela 8	Correlações e p-valores correspondentes entre os dados das estações e o volume da represa sem defasagem	62
Tabela 9	Correlações e os respectivos p-valores entre os dados de volume da represa e a soma das precipitações com as defasagens em meses	63
Tabela 10	Correlações e p-valores correspondentes entre os dados das estações e o volume da represa com defasagem de 8 meses	63
Tabela 11	Cota, volume e área do espelho d'água do reservatório de Nova Ponte nas datas de estudo.	66
Tabela 12	Razão de dependência dos fatores qualitativos de setembro de 2009	86
Tabela 13	Parâmetros de avaliação das krigagens	87
Tabela 14	Parâmetros de avaliação do IDW e da função de base radial (spline)	88
Tabela 15	Comparação dos fatores qualitativos	95
Tabela 16	Pesos atribuídos aos fatores qualitativos	96

## Índice de Mapas

		Páginas
Mapa 01	Localização dos pontos coletados na área de estudo em setembro de 2009	59
Mapa 02	Área de depleção da represa de Nova Ponte	66
Mapa 03	Localização da ocupação humana na represa de Nova Ponte	67
Mapa 04	Localização das áreas de captação de água ao longo da represa de Nova Ponte	68
Mapa 05	Uso e ocupação do entorno da represa de Nova Ponte	69
Mapa 06	Localização da RPPN Galheiro no entorno da represa de Nova Ponte	70
Mapa 07	Localização dos pontos de beleza cênica e de lazer ao longo da represa de Nova Ponte	71
Mapa 08	Campo de visão das áreas de beleza cênica	72
Mapa 09	Localização do ponto de travessia de balsa na represa de Nova Ponte	73
Mapa 10	Localização das concessões de direitos minerários na represa de Nova Ponte	74
Mapa 11	Localização da zona de segurança da barragem	75
Mapa 12	Locais com incidência de erosão nas margens da represa de Nova Ponte	77
Mapa 13	Restrições devido ao deplecionamento da represa de Nova Ponte	78
Mapa 14	Restrições devido à captação de água na represa de Nova Ponte	79
Mapa 15	Restrições devido à presença de balneários de lazer e turismo na represa de Nova Ponte	79
Mapa 16	Restrições devido à presença de reservas na represa de Nova Ponte	80

Mapa 17	Restrições devido à presença de rotas de navegação na represa de Nova Ponte	80
Mapa 18	Restrições devido ao plano-diretor da represa de Nova Ponte	81
Mapa 19	Resultado da aplicação do modelo de fatores restritivos	83

## Índice de Equações

	Páginas
Equação 1 <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW)	25
Equação 2 Fator $\lambda_i$ da IDW	25
Equação 3 Valor esperado $E\{Z(x_i)\}$	26
Equação 4 Função covariância	27
Equação 5 Variância finita dos valores medidos	27
Equação 6 Variância	27
Equação 7 Covariância	28
Equação 8 Semivariância	28
Equação 9 <i>Modelo esférico</i> para $0 < h < a$	30
Equação 10 <i>Modelo esférico</i> para $h \geq a$	30
Equação 11 <i>Modelo exponencial</i>	30
Equação 12 <i>Modelo gaussiano</i>	31
Equação 13 Modelo potencial	31
Equação 14 Razão de dependência	33
Equação 15 Krigagem simples	34
Equação 16 Krigagem ordinária	34
Equação 17 Krigagem universal	35
Equação 18 Avaliação da predição pela krigagem	35
Equação 19 Pressão atmosférica local	98
Equação 20 Oxigênio dissolvido corrigido	98

## Resumo

VIEIRA, Eliane Maria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2009. **Contribuição metodológica para a pré-identificação de áreas adequadas à implantação de parques aquícolas no reservatório de Nova Ponte – Minas Gerais.** Orientadora: Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo. Co-Orientadores: Maria Lucia Calijuri e Nerilson Terra Santos.

Objetivou-se, nesta tese, propor uma metodologia para a delimitação de parques aquícolas em reservatórios. A metodologia proposta foi aplicada no reservatório de Nova Ponte-MG, com o cultivo em tanques-rede das espécies Lambari-rabo-vermelho (*Astyanax fasciatus*), Piracanjuba (*Brycon orbygnianus*) e Tilápia (*Tilapia sp.*), utilizando-se SIGs. Foram levantados na represa os fatores considerados restritivos: profundidade; captação de água; poluição doméstica e industrial; áreas agrossilvopastoris; áreas de reservas; balneários de lazer e turismo; locais de pesca; rotas de navegação; patrimônio histórico e cultural; direitos minerários; restrições nos planos diretores; formações de ondas e processos erosivos e espacializados empregando-se a lógica booleana. Escolheu-se um braço do reservatório com áreas sem restrições e procedeu-se ao levantamento dos parâmetros qualitativos: temperatura, oxigênio dissolvido (OD), pH, clorofila a, fósforo (fósforo total), nitrato e sólidos totais. Para os dados que se dispunha dos perfis verticais, adotaram-se os valores das leituras realizadas a 0,5; 1,0; 1,5 e 2,5 m. Para os dados com dependência espacial empregou-se a krigagem universal ou ordinária e, para o restante, foi usado o IDW ou a função de base radial (spline). Na integração das camadas de informação utilizaram-se a álgebra de mapas para os parâmetros restritivos e a lógica *fuzzy com* a análise multicritério com a combinação linear ponderada (*MCE-WLC*), com os pesos definidos pelo método *Analytical Hierarchy Process (AHP)*, para os parâmetros qualitativos. Apenas com a integração dos fatores restritivos houve redução para

24,75% da área do reservatório, que foi considerada apta e que deverá ser analisada utilizando-se os fatores qualitativos. No braço escolhido, a variabilidade de todos os fatores qualitativos, para as quatro profundidades, encontrava-se dentro dos limites de conforto para as três espécies, assim 25,34% do braço foi classificado como adequado.

## Abstract

VIEIRA, Eliane Maria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, december, 2009. **Methodological contribution for the delimitation of fish farms in tanks in the reservoir of Nova Ponte – Minas Gerais.** Adviser: Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo. Co-advisers: Maria Lucia Calijuri and Nerilson Terra Santos.

The purpose of this thesis is to propose a methodology for the delimitation of fish farms in tanks. The proposed methodology was applied in the reservoir of Nova Ponte - MG, with the cultivation in net cages of the Red-tailed Lambari (*Astyanax fasciatus*), Piracanjuba (*Brycon orbygnianus*) and Tilapia (*Tilapia sp.*) species, using GIS. It was surveyed the factors of the dam considered restrictive: depth, water abstraction, domestic and industrial pollution, agroforestry areas, reserve areas, resorts and leisure tourism, local fishing, shipping lanes, historic and cultural heritage, mining rights, restrictions in the master plans, wave formations, erosion and spatialized processes using the Boolean logic. It was chosen an arm of the reservoir areas with no restrictions and proceeded to the survey of qualitative parameters: temperature, dissolved oxygen (DO), pH, chlorophyll a, phosphorus (total phosphorus), nitrate and total solids. For the data that had the vertical profiles, it was adopted the values of the readings taken at 0.5, 1.0, 1.5 and 2.5 m of depth. For data with spatial dependence, it was used the universal or ordinary kriging, and for the remainder, it was used the IDW or radial basis function (spline). On the integration of data layers it was used the map algebra to the restrictive parameters and for the fuzzy logic and multi-criteria analysis with the Weighted Linear Combination (MCE-WLC), with the weights measured by Analytical Hierarchy Process (AHP) for qualitative parameters. Only with the integration of the restricting factors there was a reduction of 24.75% of the reservoir area, which was considered suitable and should be analyzed using the qualitative

factors. In the chosen arm, the variability of all the qualitative factors for the four depths was within the limits of comfort for the three species, and 25.34% of the arm was classified as appropriate.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de reservatórios para a criação de peixes em tanques-rede tem sido uma alternativa promissora, principalmente em Minas Gerais, devido ao elevado número de represas distribuídas no Estado, além da alta rentabilidade e do baixo tempo de retorno do empreendimento.

Nos últimos anos, o governo brasileiro, tanto em nível federal por meio da Secretaria Especial de Aquicultura e Pesca da Presidência da República – SEAP/PR, como estadual, por meio da Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior \_ SECTES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais \_ FAPEMIG, e da Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento \_ SEAPA, tem fomentado pesquisas acerca da delimitação de parques aquícolas.

O uso das águas públicas para fins de aquicultura foi estabelecido e autorizado pelo Decreto 4.895, do presidente Luiz Inácio Lula da Silva, publicado em novembro de 2003. Esse ato inaugurou uma nova fase no setor e representa um grande salto na produção brasileira de pescado. Especialistas acreditam que apenas com o aproveitamento dos reservatórios das seis maiores hidrelétricas do país, a produção anual de pescado, que hoje está próxima de 1 milhão de toneladas sendo a maior parte (74%) vinda da pesca extrativa, poderá chegar a 10 milhões de toneladas.

No Estado de Minas Gerais já foram delimitados parques nos lagos das Usinas Hidroelétricas de Furnas e de Três Marias, e que no final do ano de 2007, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) aprovou o projeto “Delimitação de parques aquícolas e dimensionamento da capacidade de suporte da represa de Nova Ponte”, desenvolvido por pesquisadores da Empresa de Pesquisa

Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e por professores e estudantes do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

A piscicultura em tanques-rede, quando implantada em reservatórios, é uma técnica relativamente pouco onerosa e simples, se comparada à forma tradicional, em viveiros de terra, pois dispensa o alagamento de novas áreas, o que reduz os gastos com a construção de viveiros. Além da redução de custos, a piscicultura em tanques-rede pode, ainda, diminuir a pressão da pesca sobre os estoques pesqueiros naturais e reduzir os impactos negativos que a exploração pesqueira indiscriminada pode causar aos ecossistemas aquáticos.

Contudo, para que a implantação seja bem sucedida, é indispensável escolher criteriosamente os locais para a instalação dos parques aquícolas com base em levantamentos sistemáticos de uma ampla diversidade de aspectos técnico-científicos e institucionais.

## **2. JUSTIFICATIVA**

No Brasil, o Governo Federal, por meio de políticas públicas, além de estimular a implantação de projetos aquícolas em 1% da área dos corpos d'água de domínio da união, financia estudos técnicos e pesquisas relacionadas ao setor e à conservação dos ecossistemas.

A norma *Procedimentos para Solicitação de Parecer para Realização de Obras sobre e às Margens das Águas Jurisdicionais Brasileiras* (NORMAM 11, 2007) define parques aquícolas como sendo “o espaço físico contínuo em meio aquático, delimitado, que compreende um conjunto de áreas aquícolas afins, em cujos espaços físicos intermediários podem ser desenvolvidas outras atividades compatíveis com a prática da aquicultura”.

O código de conduta para o desenvolvimento sustentável e responsável da piscicultura em tanques-rede (com base na Resolução CONAMA nº 357, de 17/03/2005) estabelece que sejam adotadas em

sua implantação técnicas que evitem a degradação da qualidade da água e dos ambientes pelágico e bentônico.

O desenvolvimento da atividade aquícola, juntamente com a tomada de consciência dos problemas ambientais, justifica plenamente a atenção que se deve voltar à qualidade da água, pois essa influencia diretamente o crescimento dos peixes.

De acordo com Silva (1994), fatores como oxigênio dissolvido e temperatura, entre outros, estão diretamente relacionados com o desenvolvimento dos peixes, enquanto pH, alcalinidade, dureza e transparência afetam os peixes, embora não sejam tóxicos isoladamente. Contudo, segundo os autores, suas interações podem ser complexas, de forma que o que pode ser tóxico e causar mortalidade em uma situação pode ser inofensivo em outra. O próprio sistema de cultivo pode alterar esses fatores ao longo do ciclo produtivo.

Em reservatórios, as alterações dos parâmetros físicos e químicos de qualidade da água são, na maioria dos casos, decorrentes das atividades desenvolvidas nas áreas adjacentes, por exemplo, a agropecuária, que pode contribuir com resíduos agroquímicos, e as cidades, que podem gerar aporte de matéria orgânica e de resíduos e da dinâmica interna do reservatório. Na implantação de parques aquícolas, portanto, é fundamental avaliar a qualidade do corpo hídrico bem como suas possíveis fontes de contaminação.

Algumas metodologias têm sido desenvolvidas para auxiliar a escolha de locais destinados à implantação de parques aquícolas, como a da SEAP/PA em parceria com a Universidade Estadual Paulista e aplicada ao reservatório da UHE de Ilha Solteira; a da SEAP/MG, em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais e aplicada nos reservatórios das UHEs de Furnas e de Três Marias em Minas Gerais; e a aplicada na demarcação do Parque Aquícola de Tucuruí, no Pará, entre outras. Nesses estudos houve consenso quanto aos parâmetros que deveriam ser avaliados: oxigênio dissolvido, pH, turbidez, profundidade etc. Na maioria dessas metodologias trabalha-se com a

interpolação de dados pontuais para predizer o comportamento dos parâmetros em toda a área de estudo.

Várias técnicas que facilitam o processo de interpolação têm sido implementadas nos sistemas computacionais atuais. No entanto, os algoritmos produzem resultados distintos para cada parâmetro, podendo ser apropriado para um e não para os demais. Mesmo considerando-se um único parâmetro, um algoritmo que produz um resultado mais próximo do esperado para um meio pode não ser apropriado para outros meios.

Para a integração destas informações, as metodologias empregadas até então utilizam-se da experiência de profissionais com o parecer para cada parâmetro individualmente, tornando o processo moroso e subjetivo. Também é difícil identificar quais parâmetros restringiram o emprego de determinada área para a piscicultura em tanques-rede.

Por se tratarem de informações que possuem um registro no espaço (coordenadas geográficas), estas podem ser avaliadas por Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), de forma a agilizar a análise, a integração das informações e o processo de tomada de decisão.

### 3. OBJETIVOS

Essa tese tem por objetivo geral a proposição de uma metodologia para a delimitação de parques aquícolas, com cultivo em tanques-rede, para três espécies: lambari-rabo-vermelho (*Astyanax fasciatus*), piracanjuba (*Brycon orbygnianus*) e tilápia (*Tilapia sp.*), utilizando-se de ferramentas de sistemas de informações geográficas (SIGs). Os objetivos secundários são:

- Propor uma metodologia para a espacialização das variáveis de qualidade do meio biofísico relacionadas ao cultivo de peixes em tanques-rede.
- Propor uma metodologia para a análise e integração das variáveis envolvidas no processo de seleção de áreas para o cultivo nesses tanques, hierarquizando-as.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Cultivo de peixes em tanques-rede**

De acordo com Zaniboni Filho (2005), o cultivo de peixes em tanques-rede e gaiolas vem sendo amplamente utilizado no Brasil, principalmente em reservatórios de usinas hidrelétricas. Nesses sistemas, o cultivo é realizado com elevada densidade de estocagem por meio da introdução de alimento artificial. Os peixes são mantidos em caixas construídas com telas ou redes, instaladas em grandes corpos d'água. A água nos tanques-rede é renovada de acordo com a hidrodinâmica local e com o tamanho da malha das estruturas que aprisionam os peixes.

Segundo Barbosa (2008), o sistema de cultivo em gaiolas, como a maioria dos tipos de aquicultura, teve sua origem no sul da Ásia, sendo hoje praticado em mais de 35 países em todo o mundo. No Brasil, ainda pode ser considerada uma atividade recente, mas em grande expansão.

#### **4.1.1 Impactos do cultivo**

Grande parte do impacto produzido pelo cultivo intensivo em tanques-rede deve-se à matéria orgânica depositada no ambiente, tanto como resultado do metabolismo dos peixes como pelo excedente de ração não ingerida (cerca de 20%, de acordo com Pearson e Gowen, 1990), podendo causar mudanças nas características físicas, químicas e biológicas do local onde os tanques estão instalados (ZANIBONI FILHO, 2005).

De acordo com Pulatsü (2003), devido à dinâmica dos diferentes ambientes que podem ser utilizados para implantação do cultivo de peixes em tanques-rede, determinar a localização do projeto aquícola e da capacidade de suporte do ambiente, ou seja, a capacidade máxima da atividade que o ambiente suporta sem entrar em colapso, é

fator importante para a redução dos efeitos ecológicos e dos riscos que podem emergir com o uso desse sistema.

#### **4.1.2 Caracterização do entorno e da água para o cultivo em tanques-rede**

De acordo com Cardoso (2005), na criação de peixes confinados devem-se avaliar os parâmetros de qualidade da água: temperatura, taxa de oxigênio dissolvido, pH, concentração de amônia; profundidade: um metro entre o piso da gaiola e fundo do corpo hídrico, no mínimo e a velocidade do vento. Outro fator importante, segundo a autora, é a velocidade da corrente d'água, que interfere no peso dos peixes. O aumento da velocidade influi negativamente no ganho de peso, devido a perdas de alimento e ao gasto de energia provocado pela necessidade de nadar em busca do alimento.

#### ***Principais fatores restritivos e qualitativos relacionados ao cultivo***

O código de conduta elaborado pela SEAP, em 2004, estabelece como um dos compromissos na etapa de *"seleção de áreas para a implantação do cultivo"*, que em tanques-rede ou gaiolas devam ser considerados a capacidade de suporte do corpo d'água, a renovação da água, a profundidade do local para a diluição dos metabólitos, o espaçamento entre as estruturas e o impacto visual do empreendimento.

A capacidade de suporte do corpo d'água, a renovação da água e o espaçamento entre as estruturas devem ser calculados por meio do estudo da hidrodinâmica do reservatório, assunto não abordado nesse trabalho, mas que poderá ser otimizado quando realizada a pré-seleção a que este se propõe.

Os fatores restritivos à implantação de parques aquícolas, listados em seguida, devem ser os primeiros a serem avaliados no estabelecimento de tanques-rede, pois sua presença já se caracteriza

como um impeditivo. Estes fatores independem da espécie a ser adotada para o cultivo em tanques-rede.

### *1. Profundidade*

Os tanques-rede devem ser instalados em locais que apresentem profundidade suficiente para que os resíduos alimentares depositados no sedimento não interfiram na qualidade da água do cultivo (ZANIBONI FILHO, 2005). Portanto, áreas que apresentem profundidade restritiva e, ou, em processo de assoreamento deverão ser excluídas.

A profundidade mínima para a instalação de tanques depende diretamente da profundidade do tanque a ser adotado para o cultivo MENESES (2008).

Na Tabela 1 são apresentadas algumas recomendações de profundidade mínima necessária aos locais para a instalação de tanques-rede.

Tabela 1 – Profundidades para instalação de tanques-rede.

Profundidade (m)	OBS.	Autor
3,0	Profundidade mínima para a instalação de tanques em represas	MENESES (2008)
2,0	Para gaiolas de pequeno volume, considerando o período em que o reservatório esteja com o seu nível mínimo	BARBOSA (2008)
0,75	Distância mínima entre o fundo do tanque-rede e o fundo da represa	COCHE (1982)

## *2. Captação de água*

Os locais de captação de água para consumo humano e irrigação também devem ser protegidos por uma faixa de segurança, a fim de não se induzir o uso conflitante das águas do reservatório.

## *3. Poluição doméstica e industrial*

Em Virtude do potencial perigo de contaminação dos peixes, locais onde existem fontes significativas de poluição doméstica e industrial devem ser evitados na escolha das áreas para a implantação dos parques aquícolas, já que se trata de produção destinada à alimentação humana, muitas vezes consumida sem cozimento.

## *4. Balneários de lazer e turismo*

Locais onde existem balneários de lazer e turismo também deverão ser excluídos, por se tratar de uso conflitante.

## *5. Áreas agrossilvopastoris*

Os tanques-rede não deverão ser instalados em locais próximos a áreas agrossilvopastoris, que apresentam potencial poluidor difuso gerado pelo carreamento de agrotóxicos, metais traços e outros agentes contaminantes.

## *6. Áreas de reservas*

Serão excluídos os locais próximos a áreas de reservas públicas ou particulares, identificadas no mapa de uso e cobertura do solo, adotando-se a faixa de segurança indicada pela legislação vigente para a categoria de reserva.

### *7. Locais de pesca*

Locais de pesca amadora, profissional e esportiva também deverão ser excluídos.

### *8. Rotas de navegação*

As rotas de navegação são destinadas em cartas náuticas, pelo Diretoria de Hidrografia e Navegação\_DHN. Na qualidade de Serviço Hidrográfico Brasileiro, cabe manter, por meio do Centro de Hidrografia da Marinha, todas as Cartas Náuticas em Águas Jurisdicionais Brasileiras atualizadas (DHN, 2008). Tais cartas são documentos cartográficos resultantes de levantamentos de áreas oceânicas, mares, baías, rios, canais, lagos, lagoas, ou qualquer outra massa d'água navegável e que se destina a servir de base à navegação; representam os acidentes terrestres e submarinos, fornecendo informações sobre profundidades, perigos à navegação, natureza do fundo, fundeadouros e áreas de fundeio, auxílios à navegação (como faróis, faroletes, bóias, balizas etc.), altitudes e pontos notáveis aos navegantes, linha de costa e de contorno das ilhas, elementos de marés e outras indicações necessárias à segurança da navegação (DHN, 2008).

### *9. Patrimônio histórico e cultural*

Deverão ser excluídos os locais onde há bens relacionados ao patrimônio histórico e cultural.

### *10. Direitos minerários*

Devem-se excluir as áreas onde já exista a concessão de direitos minerários, bem como os locais de extração de areia.

### *11. Restrições nos planos diretores*

Também se devem excluir os locais onde há restrições nos planos diretores (zoneamentos) dos reservatórios, caso existam.

### *12. Processos erosivos*

Locais com incidência de processos erosivos ativos devem ser excluídos, em virtude do aporte de sedimentos que interfere na qualidade da água e dificulta a parte operacional, como acesso ao local, diminuição da calha.

Além dos fatores restritivos, outros fatores foram considerados qualitativos na implantação de parques aquícolas. A presença desses fatores, entretanto, não é um empecilho, mas seus teores podem indicar a região mais apropriada do reservatório à implantação dos parques aquícolas. O grau de adequabilidade destes fatores pode variar em função da espécie adotada para o cultivo.

#### *a. Temperatura*

Em lagos e reservatórios pode ocorrer uma estratificação térmica em consequência do aquecimento diferenciado do corpo do lago em função de sua profundidade, provocando diferença de densidade e estabelecendo três regiões distintas: uma superficial, de maior temperatura e menor densidade, denominada epilímnio; uma profunda, de menor temperatura e maior densidade, o hipolímnio; e uma intermediária, o metalímnio (PORTO, 1991).

Em lagos tropicais profundos, com pouca influência do vento ocorre a estratificação na maior parte do ano e a desestratificação no inverno, com o resfriamento inicial do epilímnio, posteriormente do metalímnio e, finalmente, de toda a coluna d'água (ESTEVES, 1988).

Os peixes apresentam baixa tolerância às variações bruscas de temperatura (choque térmico), portanto, variações de mais ou menos 5 °C são extremamente perigosas para os ovos, larvas e alevinos (SILVA, 1994).

Além de se evitarem variações bruscas, também é necessário considerar a faixa ideal de temperatura para as espécies a serem cultivadas. Na Tabela 2 são apresentadas algumas destas faixas.

De modo geral, outro ponto importante na piscicultura é a necessidade do monitoramento da temperatura no local de cultivo. Segundo Furtado (1995) deve-se medir a temperatura na superfície, no meio e no fundo de viveiros de criação de peixes.

A faixa de temperatura para peixes tropicais varia de espécie para espécie e em função da fase de crescimento destas, como pode ser observado na Figura 1 e Tabela 2.

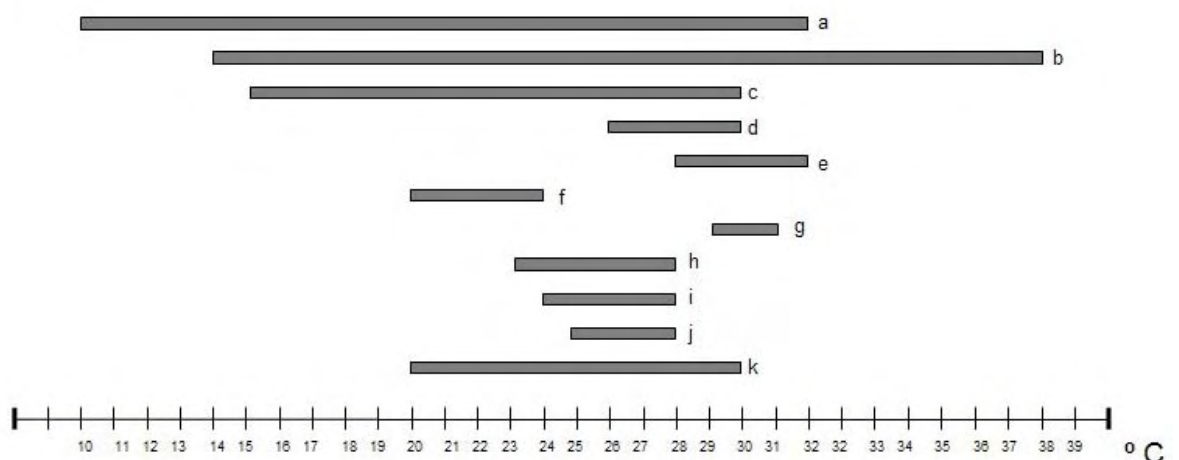


Figura 1 – Faixas de variação da temperatura para peixes

Tabela 2 – Temperatura para criação de peixes em tanques

Temperatura	Considerações	Autor
a	Sobrevivência para a maioria de peixes tropicais	MACEDO (2007)
b	Sobrevivência para tilápias	KUBITZA (2000)
c	Temperatura ideal para as espécies de lambari	GARUTTI (2003)
d	Faixa em que as principais espécies de peixes tropicais, cultivados comercialmente, apresentam crescimento ótimo	CODEVASF (2008)
e	Conforto térmico para tilápias, apresentando nesta faixa melhor desempenho e morfometria	MACIEL JUNIOR (2006)
f	Faixa de temperatura que favorece a alimentação para tilápias	FERNANDES (1993)
g	Faixa de temperatura que favorece o melhor ganho de peso para as tilápias	BARBOSA (2008) e BONZANO (1998)
h	Faixa confortável para espécies de peixes tropicais	ANDRADE (1998)
i	Faixa de apetite máximo para peixes de águas tropicais	SILVA (1994); FURTADO (1995); WOYNAROVICH (1985)
j	Patamar ótimo para a maioria das espécies tropicais	VIEIRA (2003)

### *b. pH*

O termo pH (potencial hidrogeniônico) expressa o grau de acidez ou a alcalinidade de uma solução.

O pH pode influenciar diretamente os ecossistemas aquáticos naturais, devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies, além de contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos, como os metais pesados, e exercer efeito sobre a solubilidade de nutrientes (CETESB, 2006).

Na Figura 2 e na Tabela 3 encontram-se os valores de pH sugeridos por alguns autores para a criação de peixes.

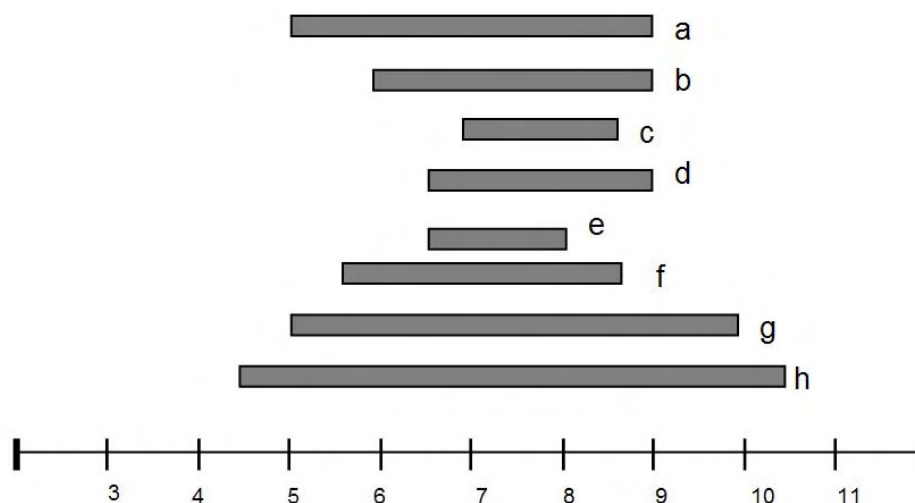


Figura 2 – Faixas de variação do pH para peixes.

Tabela 3 – pH para criação de peixes em tanques

pH	Considerações	Autor
a	Faixa de pH em que as tilápias suportam bem	BARBOSA (2008)
b	Faixa de pH ideal para a sobrevivência e crescimento de peixes em sistemas intensivos	SILVA (1994) e PROENÇA e BITTENCOURT (1994) (in SILVA, 2007a); CONAMA 357/2005
c	Crescimento adequado	SIPAÚBA-TAVARES (1994) e FURTADO (1995)
d	Faixa ideal para a maioria das espécies tropicais, para que cresçam normalmente	ANDRADE (1998) SHIMODA (1998) e MATOS (2006)
e	Faixa considerada boa na produção intensiva de peixes, para a maioria das espécies tropicais	YANCEY e MENEZES (1982)
f	pH ideal para as espécies de lambari	GARUTTI (2003)
g	Sobrevivência para peixes tropicais	MACEDO (2007)
h	Sobrevivência para as tilápias	KUBITZA (2000)

### *c. Oxigênio dissolvido*

A concentração de OD na água depende das condições físicas, químicas e bioquímicas do meio, diminuindo com o aumento da temperatura e a oxidação de componentes químicos e materiais orgânicos. Também está diretamente relacionada à altitude onde se localiza o corpo hídrico. O teor de OD pode decrescer do epilímnio para o hipolímnio, em virtude de sua liberação por algas planctônicas (fitoplâncton) e ervas aquáticas (macrófitas), que se desenvolvem em regiões com maior incidência luminosa, e pela demanda bentônica, que diminui consideravelmente a concentração de oxigênio no hipolímnio (MATOS, 2006).

Esteves (1988) afirma que a concentração de oxigênio é normalmente maior na zona eufótica, onde há intenso consumo de gás carbônico e considerável liberação de oxigênio, devido à fotossíntese. Por outro lado, há produção de gás carbônico e consumo de oxigênio na zona afótica, por causa da atividade microbiana.

Em lagos tropicais é constante a estratificação química, especialmente de oxigênio, independentemente da estratificação térmica, sendo ainda mais nítida em represas que foram formadas em áreas com densas coberturas florestais.

O perfil vertical da distribuição de oxigênio pode ser influenciado, principalmente, pela temperatura e, ou, pelas características morfométricas do lago, que têm influência direta na ação do vento, e podem tanto aumentar a concentração como promover sua distribuição no interior do ecossistema (ESTEVES, 1988).

Segundo Pavanelli (1998), peixes tropicais podem suportar até 300% de supersaturação de oxigênio, havendo maior ou menor mortalidade, dependendo do estágio de vida destes, com a ocorrência da "doença das borbulhas".

Na Tabela 4 e Figura 3 encontram-se os valores de OD sugeridos por alguns autores para a criação de peixes.

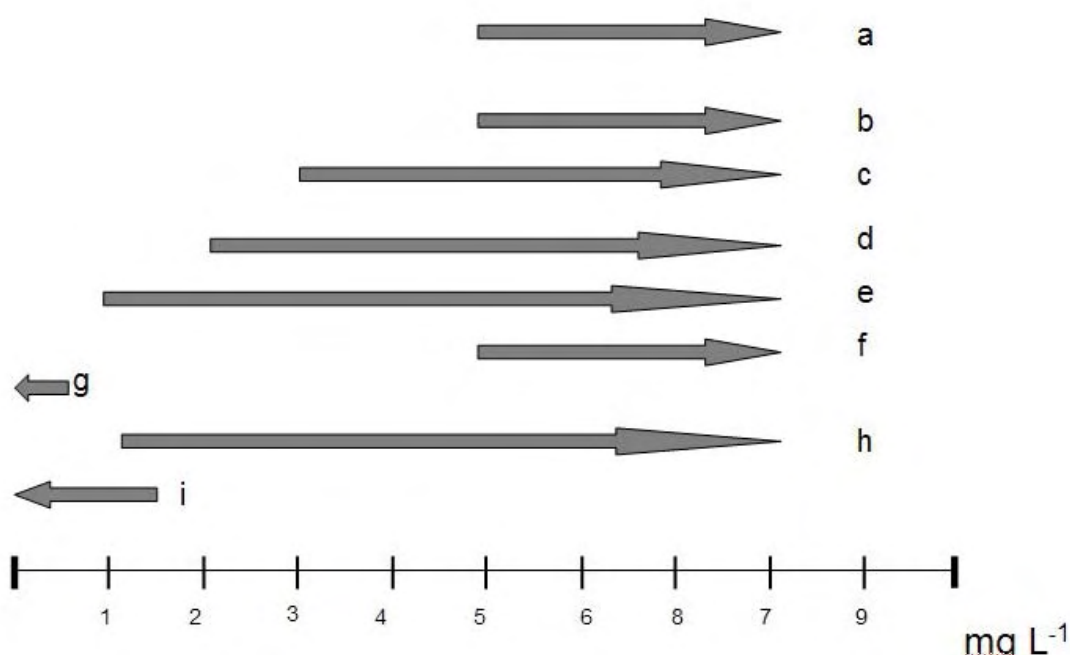


Figura 3 – Faixas de variação do oxigênio dissolvido para peixes

Tabela 4 – OD para criação de peixes em tanques

OD	Considerações	Autor
a	As espécies tropicais, em sua maioria, crescem e se reproduzem normalmente	ANDRADE (1998), SHIMODA (1998); FURTADO (1995)
b	Valor ideal para tilápias	BARBOSA (2008)
c	Para as espécies de lambari	GARUTTI (2003)
d	Para cultivo em tanques-rede de espécies tropicais	CODEVASF (2008)
e	Valor ideal para tilápias	VIEIRA (2003)
f	Águas da classe 2	CONAMA 357/2005
g	Os peixes tropicais apresentam curto período de sobrevivência	MACEDO (2007)
h	Mínimo de OD para tilápias	MACEDO (2007)
i	Faixa crítica para tilápias	KUBITZA (2000)

#### *d. Condutividade elétrica*

A condutividade elétrica (CE) mostra a capacidade do meio em conduzir corrente elétrica, indicando indiretamente a concentração de íons.

Valores de CE para a água pura variam de 0,5 a 2,0  $\mu\text{mohs cm}^{-1}$  (MATOS, 1994), e são cerca de 10  $\mu\text{mohs cm}^{-1}$  para a água de chuva.

Na Tabela 5 encontram-se os valores de CE sugeridos por alguns autores para a criação de peixes.

Tabela 5 – CE para criação de peixes em tanques

CE	Considerações	Autor
0,02 a 0,1 $\mu\text{S cm}^{-1}$	Desejável para a piscicultura	SILVA (1994)
40 $\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutividade média ideal para as espécies de lambari	GARUTTI (2003)

#### *e. Clorofila a*

Segundo Esteves (1988), por ser a clorofila um dos pigmentos responsáveis pela fotossíntese, o conhecimento de sua concentração pode indicar a biomassa do fitoplâncton.

MAINARDES-PINTO e MERCANTE (2003) afirmam que valores de clorofila superiores a 1,5 mg L<sup>-1</sup> podem estar relacionados à mortandade de peixes.

De acordo com a Resolução CONAMA 357/2005, as águas são consideradas de classe 2 (indicadas à aquicultura), quando apresentam teores de clorofila inferiores a 30  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

Segundo Tundisi (1988), a Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico\_OECD adota o limite superior de 75  $\mu\text{g L}^{-1}$  para o fator clorofila a, correspondente ao limite superior de classificação como eutrófico. Já a CETESB (2006) adota o limite de 30,55  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

#### *f. Fósforo*

De acordo com Esteves (1988), para a maioria das águas continentais, o fósforo é o principal fator limitante de sua produtividade, sendo apontado como o responsável pela eutrofização artificial desses ambientes. O fósforo presente nas águas (iônico ou complexado) encontra-se na forma de fosfatos. Ainda, segundo o mesmo autor, o fosfato presente em ecossistemas aquáticos tem origem em fontes naturais, como rochas da bacia de contribuição (apatita, principalmente), material particulado presente na atmosfera e o resultante da decomposição de organismos de origem alóctone. O fosfato também pode ter origem artificial, como esgotos domésticos e industriais, fertilizantes agrícolas e material particulado de origem industrial na atmosfera.

Segundo Macedo (2007), a concentração de fósforo total em ambientes naturais não poluídos está entre 0,01 e 0,05 mg L<sup>-1</sup>.

A CETESB (2006) adota o limite superior de 120 µg L<sup>-1</sup> para fósforo total, correspondente ao limite superior de classificação como eutrófico.

Águas de classe 2 devem apresentar teores de fósforo total de até 0,050 mg L<sup>-1</sup> em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 20 e 40 dias e tributários diretos de ambiente lântico, conforme a Resolução CONAMA 357/2005.

#### *g. Série nitrogenada*

O nitrogênio participa da formação de proteínas, um dos componentes básicos da biomassa. Por esse motivo, é um dos elementos mais importantes no metabolismo de ecossistemas aquáticos.

As principais fontes desse elemento são a chuva, os materiais orgânicos e inorgânicos de origem alóctone e a fixação de nitrogênio molecular dentro do próprio lago. Apresenta-se nas formas de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), amônia (NH<sub>3</sub>), íon amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>), nitrogênio orgânico dissolvido

(peptídeos, purinas, aminas, aminoácidos, entre outros), nitrogênio orgânico particulado (bactérias, fitoplâncton, zooplâncton e detritos) etc. Dentre as formas presentes no ecossistema, o nitrato e o íon amônio assumem grande importância, pois são as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários. Em pH básico, o íon amônio transforma-se em amônia ( $\text{NH}_3$  livre, na forma gasosa), que pode ser tóxica para a comunidade de peixes (ESTEVES, 1988).

A tolerância aos compostos nitrogenados varia de acordo com a espécie e condições ambientais (ANDRADE, 1998).

Segundo Santos (2000), os teores de nitrato normalmente encontrados em águas superficiais estão entre 0,1 e 10  $\text{mg L}^{-1}$ .

A exposição crônica de peixes a níveis de amônia de 0,06  $\text{mg L}^{-1}$ , pode causar problemas nos rins e brânquias, afetar o funcionamento cerebral e reduzir a capacidade de carga de oxigênio do peixe.

Na Tabela 6 e Figura 4 encontram-se os valores sugeridos de amônia e nitrato por alguns autores para a criação de peixes.

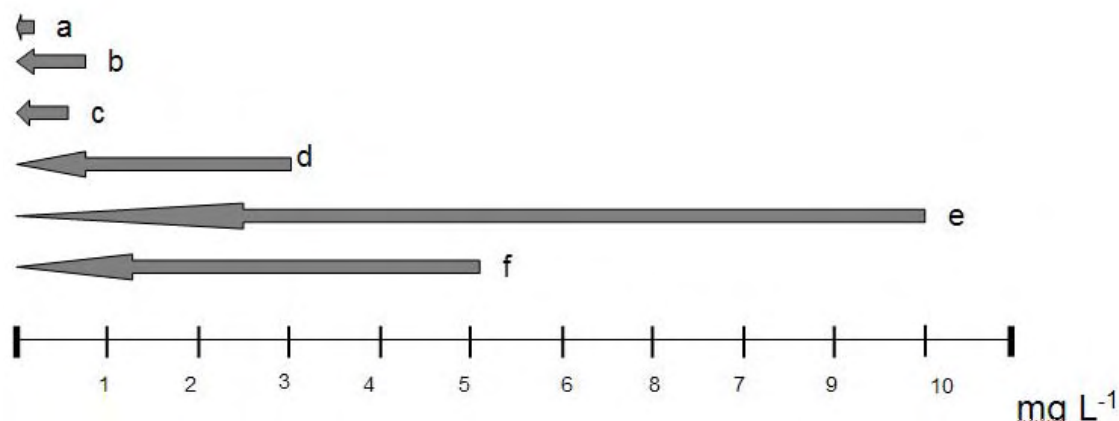


Figura 4 - Faixas de variação da concentração de amônia e nitrato para peixes.

Tabela 6 – Concentrações indicadas para criação de peixes em tanques

Concentrações	Considerações	Autor
a	Amônia (NH <sub>3</sub> livre, na forma gasosa).	ESTEVES (1988)
b	De amônia não ionizada para juvenis do peixe pacamã ( <i>Lophiosilurus alexandri</i> )	BALDISSEROTTO (2004)
c	De amônia não ionizada para juvenis do <i>guadalupe bass</i> ( <i>Micropterus treculi</i> )	BALDISSEROTTO (2004)
d	Nível máximo de amônia na água para o bagre americano ( <i>Ictalurus punctatus</i> )	BALDISSEROTTO (2004)
e	Teores de nitrato (águas da classe 2)	CONAMA 357/2005
f	Concentração de nitrato mortal para os peixes	(ANDRADE, 1998)

#### *h. Turbidez e transparência*

A turbidez da água, medida de sua capacidade em dispersar a radiação, normalmente expressa em termos de coeficientes de dispersão ou unidades empíricas (ESTEVES, 1988), é considerada uma característica relacionada à presença de partículas suspensas com tamanhos que variam entre suspensões grosseiras a coloides, dependendo do grau de turbulência (RICHTER e NETTO, 1998).

A turbidez de corpos d'água é geralmente alta em regiões com solos erodíveis, onde o escoamento superficial pode carrear partículas de argila, silte, areia, fragmentos de rocha e óxidos metálicos do solo. Altos índices de turbidez podem ocorrer em decorrência das características geológicas das bacias de drenagem, altos índices pluviométricos, práticas agrícolas, muitas vezes inadequadas, ou lançamentos de esgotos domésticos ou industriais.

A turbidez também pode ser avaliada indiretamente através da medição dos sólidos suspensos, uma vez que os dois parâmetros possuem relação direta entre si.

A quantidade e a qualidade dos sólidos nas águas superficiais são muito variáveis, podendo sua concentração oscilar entre 20 e 1000 mg L<sup>-1</sup> (CERETTA, 2004; GARCIA *apud* SILVEIRA, 2003).

Segundo Silva (1994), em sistemas de gaiola ou tanques, a transparência da água pode afetar a taxa de crescimento dos peixes.

Na Tabela 7 encontram-se os limites de transparência e sólidos totais sugeridos por alguns autores para a criação de peixes.

Tabela 7 – Teores indicados de transparência e sólidos totais para criação de peixes em tanques

Teores	Considerações	Autor
20 a 40 cm	Faixa ideal para a profundidade de Secchi, dependendo da profundidade do tanque-rede	SILVA (1994)
20 a 60 cm	Transparência ideal para as espécies de lambari	GARUTTI (2003)
30 a 60 cm	Transparência ideal para o cultivo de peixes em tanques-rede	CECCARELLI (2000); CODEVASF (2008)
Até 100 UNT	Transparência indicada para águas da classe 2	CONAMA 357/2005
< 2 g/L	Concentração ideal de sólidos dissolvidos em viveiros de criação de peixes	MACEDO (2007)
< 500 mg/L	Teores de sólidos dissolvidos totais indicados para águas da classe 2	CONAMA 357/2005

### *i. Radiação*

Os comprimentos de onda de maior interesse ecológico abrangem as faixas do ultravioleta, do visível e do infravermelho, sendo que o visível se destaca por sua participação nos processos fotossintéticos.

A radiação, ao penetrar na coluna d'água, sofre profundas alterações, tanto em intensidade como em qualidade, o que vai

dependem de fatores como concentração de material dissolvido e concentração de material em suspensão.

A absorção da radiação na água ocorre de maneira exponencial com a profundidade e está relacionada à absorção pela própria molécula de água, às substâncias dissolvidas, aos organismos clorofilados e aos detritos orgânicos e inorgânicos (ESTEVES, 1988).

A porção iluminada da coluna d'água é denominada zona eufótica, que pode variar de alguns centímetros a dezenas de metros (ESTEVES, 1988).

#### **4.2 Estruturação das camadas de informação**

Para qualquer análise que envolve dados espacialmente referenciados, a estruturação das camadas de informação é de suma importância, pois são estas que definirão a qualidade do resultado.

Segundo Meirelles (2007), quando um dado é manipulado por um modelo lógico, admite-se que os resultados encontrados sejam corretos. Contudo, na realidade, os resultados poderão conter erros, devido ao fato de os valores dos atributos de entrada não serem determinados de forma exata. Assim, a validade dos resultados dependerá diretamente da precisão com que a base de dados foi montada. Além desses erros, somam-se os erros oriundos do gerenciamento e da análise da informação.

#### **4.3 Interpolação de dados pontuais**

Para a interpolação de dados pontuais estão disponíveis várias estruturas como: a *triangular irregular network (TIN)* e *GRID*, entre outras. Cada uma possui peculiaridades que podem ser ou não favoráveis a um determinado atributo.

Segundo Silva (2007b), a grade triangular é uma estrutura vetorial (nó-arco) que representa uma superfície por meio de um conjunto de

faces triangulares interligadas em que são armazenados, para cada vértice, as coordenadas de localização ( $x$ ,  $y$ ) e o atributo  $z$ . O autor afirma ainda que quanto mais equiláteras forem as faces dos triângulos, maior será a exatidão da superfície descrita.

Os modelos de grade representam a superfície a partir de uma matriz (*grade raster*), em que cada célula está associada a um valor numérico da propriedade representada, obtido por atribuição direta (quando se dispõe do valor para aquela coordenada geográfica) ou por meio de interpolação.

A interpolação espacial pode ser definida como um conjunto de técnicas direcionadas à criação de superfícies contínuas a partir de dados pontuais.

Para a interpolação de dados pontuais existem diversos algoritmos implantados em sistemas computacionais, que permitem a geração da superfície de forma rápida e a adoção de um vasto número de pontos amostrais.

Os procedimentos de interpolação, a partir de amostras, variam de acordo com a grandeza da medida. Para a altimetria, por exemplo, é comum o uso de funções de ponderação pelo inverso da distância, enquanto para as variáveis geofísicas podem-se empregar procedimentos de filtragem bidimensional ou de geoestatística (SILVA, 2007b).

O resultado das interpolações depende de fatores como número de pontos amostrais, magnitude das leituras dos parâmetros avaliados, espaçamento de disposição dos pontos no espaço, além da precisão dos resultados obtidos nas análises laboratoriais para cada amostra coletada ou da leitura *in situ*.

Os algoritmos aplicados na interpolação (interpoladores) podem ser classificados como determinísticos, quando não permitem a avaliação dos erros associados aos valores simulados, e estocásticos,

quando permitem a avaliação dos erros com base na estimativa de variâncias.

Quando as técnicas de interpolação prevêm valores idênticos aos medidos, os interpoladores são denominados exatos, ao contrário são chamados de interpoladores inexatos.

De acordo com Howart (1983) e Kansa (1990), citados por Landim (2003) os métodos de interpolação podem ser ainda divididos em globais e locais. Os globais consideram toda a população de pontos, podendo-se interpolar qualquer ponto dentro do domínio de dados original. Nesse caso, a adição ou exclusão de um ponto amostral tem influência em todo o domínio. Enquadram-se nesta categoria os *Modelos de Regressão Polinomial*, a *Análise de Superfície de Tendência* e a *Análise Espectral* (Séries de Fourier).

Os métodos locais consideram uma zona próxima ao ponto que está sendo interpolado. Para esses interpoladores, a exclusão ou adição de um ponto amostral afeta apenas os pontos adjacentes, até determinada distância. Nesse grupo, enquadram-se os métodos do *polígono de thiessem*, do *vizinho mais próximo*, do *inverso da distância*, das *funções de base radial* e da *krigagem*. Uma explicação sucinta é apresentada, em seguida, para os métodos do inverso da distância, das funções de base radial e da krigagem.

- Inverso da distância

Nesse algoritmo, que pressupõe autocorrelação espacial positiva, os valores estimados dependem da distância e da magnitude dos pontos adjacentes e utilizam o inverso da distância para atenuar a influência de pontos mais distantes.

Esse interpolador também pode ser aplicado elevando-se o valor da distância a uma potência (Ponderação do Inverso das Distâncias - *Inverse Distance Weighting* (IDW)), que atenua ainda mais a influência de pontos mais distantes na predição do valor no ponto calculado.

A estimativa para cada ponto é obtida pela seguinte equação:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{Equação 1}$$

em que

$Z(x_0)$  – é o valor a ser estimado para o local  $x_0$ ;

$\lambda_i$  – é o peso atribuído a cada ponto observado empregado na estimativa do valor  $Z(x_0)$ ;

$n$  – é o número de amostras; e

$Z(x_i)$  – é o valor de cada ponto amostral na posição  $x_i$ .

O fator  $\lambda_i$  é calculado em função da distância ( $d$ ) entre o local predito ( $x_0$ ) e cada ponto amostral ( $x_i$ ) conforme a equação:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_i^n d_i^{-p}} \quad \text{Equação 2}$$

em que a soma de todos  $\lambda_i$  é igual a um.

Devido ao fator de ponderação, esse interpolador nunca fornece valores superiores àqueles observados.

- Funções de base radial

Esses interpoladores, determinísticos, moderadamente rápidos, exatos e mais flexíveis do que o da ponderação do inverso das distâncias, têm por base funções polinomiais, que são ajustadas a pequenos conjuntos de pontos. Neles, a junção das funções é contínua, o que assegura uma curvatura mínima para a superfície, sendo, portanto, apropriado apenas a variações suaves de determinado parâmetro que não compreenda descontinuidades.

Por serem determinísticos, não permitem avaliar o erro associado, mas, no entanto, fornecem uma predição comparável ao método de krigagem. Também não permitem investigar a autocorrelação entre os dados. Suas funções básicas são: *spline* suave (*thin-plate spline*), *spline*

com tensão (*spline with tension*), *spline* completamente regular (*completely regularized spline*), função multiquadrática (*multiquadratic function*) e *spline* multiquadrática inversa (*inverse multiquadratic spline*). Cada uma dessas funções resulta em uma superfície de interpolação distinta.

A utilização desses interpoladores na simulação permite, entretanto, a obtenção de valores maiores que os observados.

- Geoestatística

A geoestatística define um conjunto de procedimentos matemáticos que permite que se reconheça e descreva relacionamentos espaciais. Esta técnica pressupõe que amostras mais próximas entre si tendem a ser mais semelhantes que aquelas mais distantes.

A geoestatística baseia-se em pressupostos da estatística clássica em que as amostras podem ser tomadas aleatoriamente de uma população descrita por uma distribuição normal. No entanto, diferentemente das análises da estatística clássica, a geoestatística baseia-se na teoria das variáveis regionalizadas, e pressupõe que a variação espacial de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes: componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; componente aleatória, espacialmente correlacionada; e o ruído aleatório ou erro residual.

Nas formulações geoestatísticas admite-se a estacionaridade de segunda ordem. Isto implica que o valor esperado  $E\{Z(x_i)\}$  existe para qualquer  $x_i$  e independe da posição ( $h$ ).

$$E\{Z(x_i)\} = m \quad \text{Equação 3}$$

E para cada par de variáveis aleatórias,  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$ , a função covariância,  $Cov(h)$ , existe e é função de  $h$ .

$$\text{Cov}(h) = E\{Z(x_i)Z(x_{i+h})\} - m^2 \quad \text{Equação 4}$$

Assim, a hipótese de estacionaridade de segunda ordem implica uma variância finita dos valores medidos.

$$\text{Var}\{Z(x)\} = \text{Cov}(0) \quad \text{Equação 5}$$

Contudo, alguns fenômenos não satisfazem esta hipótese, apresentando capacidade infinita de dispersão. Uma hipótese menos restritiva é então assumida, chamada hipótese intrínseca.

A hipótese intrínseca requer apenas a estacionaridade do variograma, sem exigir a variância finita (GOOVAERTS, 1997). A função aleatória é considerada intrínseca quando o valor esperado  $E\{Z(x_i)\}$  existe para qualquer  $x_i$  e independe da posição ( $h$ ) e também o incremento  $\{Z(x_{i+h}) - Z(x_i)\}$  tem variância finita e não depende de  $x_i$  para qualquer  $h$ .

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2}\right) E[Z(x_{i+h}) - Z(x_i)]^2 \quad \text{Equação 6}$$

Segundo Landim (2003), a análise geoestatística busca assegurar que um erro máximo de estimativa não seja excedido, por meio de análises matemáticas, da gênese e das leis naturais que governam fenômenos interpretados como regionais, usando informações e relações de um conjunto discreto de amostras e avaliação dos erros estimados estabelecendo o grau de segurança em previsões e padrões ótimos de amostragem.

Para que se descreva a tendência espacial do parâmetro a ser interpolado devem-se tomar múltiplas amostras, considerando-se a representatividade espacial do fenômeno.

A geoestatística considera a tendência de variação da amostra em função da distância de um ponto amostrado (isotropia) ou em função tanto da distância quanto da direção (anisotropia).

A variabilidade de um parâmetro, regularmente espaçado, em função da distância pode ser estimada comparando-se amostras

distribuídas em diferentes intervalos de separação entre elas (denominados lag ou  $\Delta h$ ).

O grau de relação, em certa direção, entre os pontos, pode ser expresso pela covariância, estipulando que sejam considerados apenas pontos regularmente espaçados por múltiplos inteiros de  $\Delta h$  (LANDIM, 2003).

A covariância ( $C(h)$ ) entre os valores encontrados, separada por  $\Delta h$  ao longo de  $h$ , é:

$$C(h) = C(\Delta h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^n x_i x_{i+n} - m \quad \text{Equação 7}$$

em que  $m$  é a média da variável regionalizada  $x_i$ .

A semivariância ( $\gamma$ ) descreve o desvio esperado nos valores das amostras ( $z$ ) em função da distância ( $h$ ) entre pares de amostra.

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad \text{Equação 8}$$

em que:

$\gamma(h)$  - semivariância estimada a uma distância  $h$ ;

$N(h)$  - número de pares de valores medidos [ $Z(x_i)$ ,  $Z(x_{i+h})$ ] separados por um vetor  $h$ ;

$x_i$  - posição espacial da variável  $Z$ ; e

$z$  - valores da variável estudada.

A distância é representada por um vetor  $h$ , definido por uma distância e uma direção (VIEIRA, 2000; SOARES, 2000).

O variograma descreve quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado.

Quando a semivariância é representada em função da distância ( $h$ ), fica demonstrada a correlação espacial (covariância) de um fenômeno regionalizado e torna-se possível o ajuste de um modelo teórico para a semivariância.

O ajuste de um modelo teórico permite definir seus parâmetros, quais sejam, o alcance, o patamar e o efeito pepita, exemplificados na Figura 5.

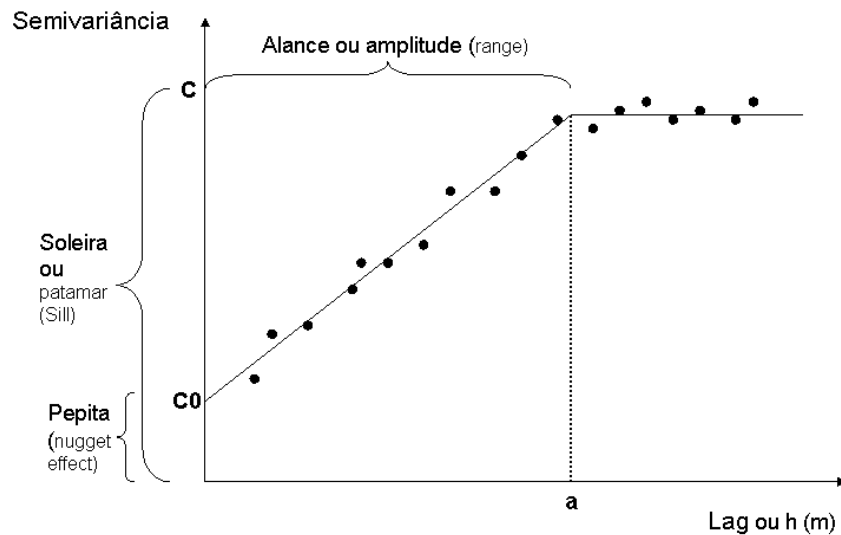


Figura 5 – Exemplo de um semivariograma.

O alcance (ou amplitude (*range*)) representa a distância a partir da qual os valores da variável em análise podem ser considerados independentes.

O patamar (ou soleira (*sill*)) é o valor no qual o variograma estabiliza-se. A distância para o patamar corresponde ao valor do alcance.

O efeito pepita (*nugget effect*) é o valor da função variograma na origem ( $h=0$ ). Este parâmetro reflete os erros embutidos no processo, como erros de amostragem, análise etc.

Existem diversas funções matemáticas para modelar o semivariograma definindo diversos modelos como o linear, o esférico e o exponencial, entre outros. A definição do modelo não é direta e automática, sendo realizada por treinamento, como tentativa e erro, e depende diretamente do conhecimento que se tem do fenômeno estudado (SOARES, 2000).

Tais modelos podem ser divididos em: com soleira e sem soleira, (LANDIM, 2003).

### 1) Modelos com soleira

Nos modelos descritos a seguir C representa o patamar,  $C_0$  o efeito pepita,  $C_1$  a contribuição, a o alcance e h a distância entre os pares amostrais.

#### a) Modelo esférico

É o modelo mais comum, sendo considerado equivalente à função de distribuição normal da estatística clássica (LANDIM, 2006). É definido pelas Equações 9 e 10:

$$\lambda(h) = C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{para } 0 < h < a \quad \text{Equação 9}$$

$$\lambda(h) = C_0 + C_1 \quad \text{para } h \geq a \quad \text{Equação 10}$$

#### b) Modelo exponencial

É definido pela Equação 11, para  $0 < h < d$ , em que d é a distância máxima do semivariograma:

$$\lambda(h) = C \left[ 1 - e^{\left( \frac{-3h}{a} \right)} \right] \quad \text{Equação 11}$$

A inclinação junto à origem ( $h \sim 0$ ) é  $C/a$ , em que C é a assíntota da curva exponencial e corresponde ao alcance prático, correspondendo à distância na qual 95% da soleira foi alcançada.

#### c) Modelo gaussiano

É definido pela Equação 12, para  $0 < h < d$ , em que d é a distância máxima do semivariograma.

$$\lambda(h) = C \left[ 1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right] \quad \text{Equação 12}$$

No modelo gaussiano, a curva é parabólica junto à origem, e a tangente neste ponto é horizontal, indicando pequena variabilidade para curtas distâncias. Neste, também, corresponde ao alcance prático, correspondendo à distância na qual 95% da soleira foi alcançado.

Na Figura 6 agrupam-se os três modelos descritos.

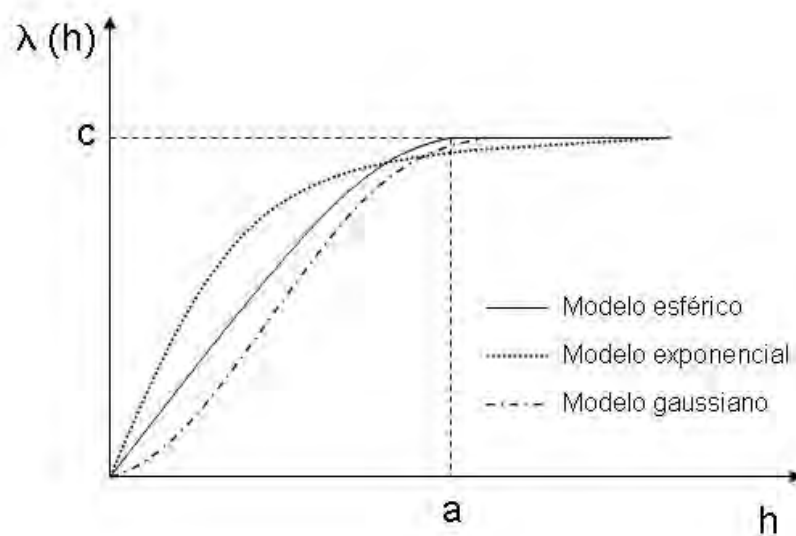


Figura 6 – Modelos com soleira.

Fonte: GOOVAERTS, 1997.

## 2) Modelos sem soleira

Os modelos sem soleira (ou patamar) correspondem a fenômenos que possuem infinita capacidade de dispersão.

### a. Modelo potencial

É definido pela Equação 13:

$$\lambda(h) = Ch^\theta \quad \text{Equação 13}$$

O termo  $\omega$  assume valores entre 0 e próximos de 2. Quando  $\omega = 1$ , o modelo torna-se linear, sendo, neste caso, o mais simples, em que a reta passa na origem do gráfico (Figura 7).

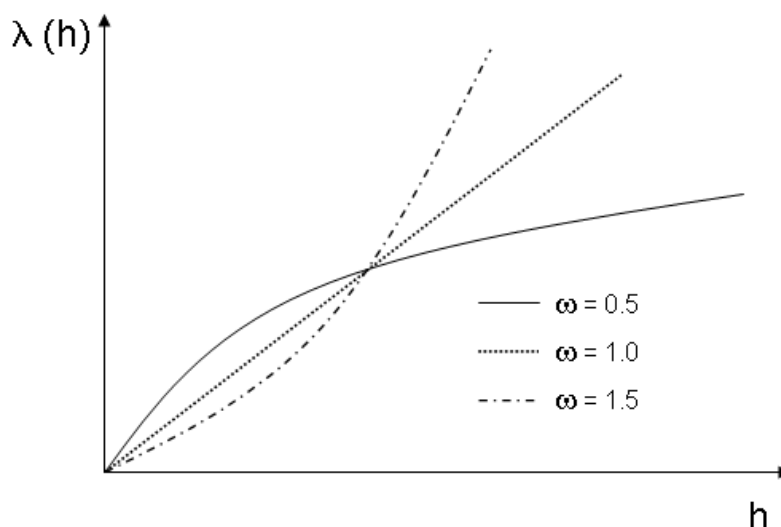


Figura 7 – Modelos sem soleira.

Fonte: GOOVAERTS, 1997.

Muitas vezes é necessária a combinação de dois ou mais modelos (modelos aninhados) para descrever com mais fidelidade o comportamento do parâmetro analisado (GOOVAERTS, 1997).

Segundo Landim (2003), nos modelos sem soleira a indicação é de que os dados apresentam uma variância infinita, não ocorrendo uma função de covariância. Assim, a hipótese intrínseca é a única aceitável. Porém, nos modelos com soleira a função de covariância está presente.

Também há que se levar em consideração a anisotropia dos dados, pois a dependência espacial (autocorrelação) também muda de acordo com a direção entre as amostras.

Para dados irregularmente distribuídos, não é possível encontrar pares de amostras suficientes com exatamente o mesmo espaçamento  $h$ , o que pode ser contornado adotando-se uma distância de tolerância  $\Delta h$  para a distância  $h$  e um ângulo  $\Delta\alpha$  para a direção considerada.

Desse modo, consideram-se, geralmente, nas análises, todas as amostras que se encontram dentro de um ângulo  $\alpha \pm \Delta\alpha$ , e em distâncias  $h \pm \Delta h$ , cobrindo toda a área (LANDIM, 2003).

A krigagem é um método exato de interpolação que leva em conta todos os valores observados de uma variável regionalizada e que permite a obtenção do erro associado à estimativa (LANDIM, 2003). É um dos interpoladores da geoestatística mais empregados. É direcionada a dados dispersos e pouco abundantes, além de analisar variações determinísticas (tendência; níveis), dados autocorrelacionados espacialmente e ruído não correlacionado. É indicada para a espacialização de dados geológicos, pedológicos, geomorfológicos, parâmetros hidrológicos entre outros, em que se reconhece a existência de correlação espacial e, ou, controle direcional.

Para a verificação da dependência espacial pode-se calcular a razão de dependência (RD), definida como a proporção em percentagem do efeito pepita ( $C_0$ ) em relação ao patamar ( $C_0 + C_1$ ), conforme a Equação 14. Cambardella et al. (1994) propuseram a avaliação da dependência segundo os níveis: dependência forte para RD inferiores a 25%, moderada para RD entre 25% e 75% e fraca para valores superiores a 75%.

$$RD = \frac{(C_0)}{(C_0 + C_1)} * 100 \quad \text{Equação 14}$$

Existindo dependência espacial, demonstrada pelo semivariograma, é possível, com a krigagem, estimar valores para os locais não amostrados sem tendenciosidade e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos, ou seja, com variância mínima (VIEIRA et al., 2000).

O método da krigagem difere dos métodos tradicionais de interpolação, como inverso do quadrado da distância, a interpolação linear e outros, por apresentar pesos variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma.

A Krigagem pode ser simples, ordinária, universal, anisotrópica, estratificada, co-krigagem e multivariada.

A krigagem simples considera a média conhecida e constante em toda a área de estudo (GOOVAERTS, 1997). Este interpolador permite estimar o valor de um atributo  $z$  em locais não amostrados,  $x$ , utilizando-se  $n$  dados amostrados,  $\{Z(x_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$ , conforme Equação 15.

$$Z(x) - m(x) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(x) [Z(x_\alpha) - m(x_\alpha)] \quad \text{Equação 15}$$

em que  $\lambda_\alpha(x)$  é o peso associado ao valor observado  $z(x_\alpha)$ , e  $m(x)$  e  $m(x_\alpha)$  os valores esperados das variáveis aleatórias  $Z(x)$  e  $Z(x_\alpha)$ , respectivamente.

Na krigagem ordinária, admite-se que a média local não é, necessariamente, próxima à média da população. Como a média local pode variar consideravelmente dentro de uma dada região, na krigagem ordinária estima-se sua variação para cada local, limitando o domínio de sua estacionariedade à vizinhança centrada na localização  $x$  onde é estimada (GOOVAERTS, 1997). O valor do atributo é calculado por meio da Equação 16.

$$Z(x) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(x) Z(x_\alpha) + \left[ 1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(x) \right] m(x) \quad \text{Equação 16}$$

em que  $m(x)$  é a media local constante.

Na krigagem universal, espera-se que haja uma tendência de variação dos valores entre as amostras. Segundo Camargo et al. (1998), uma variável regionalizada não estacionária pode ser considerada constituída por dois componentes: a média que corresponde ao valor esperado dessa variável dentro de certo domínio (ou vizinhança) e o resíduo que corresponde a um componente aleatório, obtido pela diferença entre os valores medidos e a média. Caso a média seja removida, os resíduos serão estacionários, podendo-se, assim, aplicar a

krigagem. Desse modo, a krigagem universal requer a estimação da média e sua remoção, sendo o valor da variável assim calculado:

$$Z(x) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(x) Z(x_{\alpha}) \quad \text{Equação 17}$$

Segundo Landim (2003), realizado o ajuste da função ao variograma e estimados os valores para os locais não amostrados, deve-se proceder à validação cruzada, em que cada dado original é removido do conjunto e estimado a partir dos demais. Um gráfico pode ser construído mostrando a correlação entre os valores reais e os estimados. O ajuste perfeito teria correlação igual a 1.

A avaliação da estimação dos dados pela krigagem pode ser realizada utilizando-se um procedimento de autovalidação, como o "Jack-Knifing". Neste método a estimativa de cada ponto medido é realizada como se este não existisse, pois a krigagem é um interpolador exato e, assim, o valor do peso calculado para os pontos amostrados seria unitário ( $\lambda=1$ ). O peso seria então calculado levando-se em conta a variabilidade espacial.

Para a avaliação da predição pela krigagem pode-se calcular a regressão linear dos valores pareados do valor medido ( $z(x_i)$ ) e do valor estimado ( $Z(x_i)$ ).

$$Z(x_i) = a + bz(x_i) \quad \text{Equação 18}$$

Assim, se a estimativa fosse idêntica ao valor lido em campo, a seria nulo e b e r (coeficiente de correlação) seria igual à unidade.

O método também pode ser avaliado por meio do erro médio padronizado (*mean standardized*) dos valores, do erro-quadrático-médio (*root-mean-square*), do erro padrão médio (*average standard error*) e do erro-quadrático-médio padronizado (*root-mean-square standardized*). O ideal seria ter um erro-médio-padronizado dos valores preditos próximo de "0", um erro-quadrático-médio o mais baixo possível, um erro padrão médio próximo do erro-quadrático-médio, e um erro-quadrático-médio padronizado próximo de "1" (ESRI, 2008).

A definição do tamanho da vizinhança a ser adotado na estimativa por krigagem é de grande importância, visto que os cálculos quando se usa o semivariograma dependem principalmente de distâncias especificadas.

Quando todos os dados amostrais não comprometem a memória e a tempo computacional e não apresentam implicações errôneas na estimativa dos dados, eles poderão ser empregados em sua totalidade, definindo uma vizinhança única. Contudo, os pesos associados a vizinhos separados por distâncias superiores ao alcance não terão contribuição significativa no valor estimado na Krigagem (VIEIRA, 2000).

Outra forma de estabelecer o tamanho da vizinhança é definir uma distância constante em que, para cada ponto estimado, é selecionada uma vizinhança com todos os pontos contidos dentro de um raio amostral. Nesse procedimento, o número de pontos pode variar muito, dependendo da configuração espacial dos pontos amostrais.

Pode, também, determinar o número de vizinhos a serem utilizados na estimativa de cada ponto. Nesse caso, o raio de busca não é necessariamente constante, pois os vizinhos são procurados dentro de um raio inicial. Caso o número de vizinhos seja inferior ao estipulado, o raio é incrementado até se obter o número desejado.

O emprego de quadrantes também pode ser adotado, e neste, o número de vizinhos é estipulado e obedecido em cada quadrante. Assim, evita-se usar um número maior de vizinhos de um lado do que do outro do ponto a ser estimado.

## 4.4 Processamento e análise da informação

### 4.4.1 Álgebra de mapas

Na maioria dos sistemas de informações geográficas (SIGs), as operações de modelagem são representadas por sequências de operações primitivas descritivas em linguagem computacional, que procuram respeitar as propriedades dos tipos de dados envolvidos.

De acordo com Cordeiro *et al.* (2007), os elementos de álgebra de mapas, descritos por Tomlin (1990), consistem em mapas que associam a cada local de uma dada área de estudo um valor quantitativo (escalar, ordinal, cardinal ou matricial) ou qualitativo (nominal).

Nas operações de álgebra de mapas em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) utiliza-se uma coleção de mapas registrados numa base cartográfica comum, em que cada mapa é uma variável sujeita a operações matemáticas tradicionais. A modelação é um processo que decorre de operações primitivas de pontos, vizinhança e regiões sobre diferentes mapas, numa lógica sequencial para interpretar e resolver problemas espaciais. Nesse contexto, a sequência de operações é similar à solução algébrica de um conjunto de equações.

Quando se trabalha com álgebra de mapas em SIGs, normalmente três operações estão disponíveis (SILVA, 2007b):

- A modificação aritmética dos valores dos atributos sobre o espaço por um escalar.
- A transformação dos valores dos atributos por uma operação-padrão, como funções trigonométricas, transformações logarítmicas, entre outras.
- Combinação matemática de diferentes *layers* de dados, por meio da adição, subtração, multiplicação e divisão, para produzir um resultado composto.

Os operadores comumente implementados nos SIGs são os booleanos que, aplicados a uma série de mapas de entrada, fornecem como saída um mapa binário, com as classes satisfatório ou não satisfatório (MEIRELES, 2007).

#### **4.4.2 *Multi Criteria Evaluation* \_ MCE**

A combinação dos fatores também pode ser realizada pelo emprego da avaliação multicritério (MCE), que consiste, basicamente, em classificar e alocar áreas mais apropriadas para determinado uso (objetivo) e espacializar os dados através da produção de mapas indicativos (EASTMAN, 1998).

Os métodos mais utilizados na MCE são a análise booleana, o combinação linear ponderada (WLC, do inglês *weighted linear combination*) e a média ponderada ordenada (OWA, do inglês *ordered weighted average*).

Na análise booleana, também conhecida como mapeamento de restrições, os fatores são reduzidos a imagens booleanas (0 e 1, em que 0 corresponde à condição restrita e 1 à apta) e integrados por meio da álgebra booleana básica, sendo o método mais comum de combinação a operação AND (EASTMAN, 1998). Assim, qualquer número de restrições pode ser multiplicado produzindo uma única imagem de aptidão.

Na combinação linear ponderada, os fatores são padronizados para uma escala contínua de aptidão (de 0, menos apto, a 255, mais apto) e combinados conservando o conceito relativo ou fuzzy. Desse modo, a variabilidade dos dados contínuos é preservada, permitindo que os fatores se compensem uns por meio de pesos que indicam a importância relativa de cada um (EASTMAN, 1998). Nesse método, os fatores padronizados são multiplicados por seu peso correspondente e somados. Além disso, é possível multiplicar as restrições (imagens booleanas), caso existam, obtendo-se como resultado uma imagem de aptidão com valores entre 0 e 255.

O método média ponderada ordenada é similar ao WLC, com a padronização e ponderação dos fatores por pesos, tendo-se por resultado mapas contínuos, empregando-se restrições booleanas. Nesse método, entretanto, um segundo conjunto de pesos de ordenação é aplicado aos fatores, o que permite maior grau de controle sobre o nível global de compensação entre fatores (EASTMAN, 1998).

Assim, para as operações MCE, os passos podem ser resumidos em (a) normalização, (b) definição de pesos para cada fator (no caso do WLC e do OWA), e (c) combinação dos fatores.

### **Lógica fuzzy**

A abordagem *fuzzy* é utilizada em fenômenos ambíguos, vagos ou ambivalentes, em que as classes possuem ou não fronteiras bem definidas. Nesse modelo, a pertinência de determinado parâmetro é expressa na escala de 0 a 1 ou de 0 a 255, sendo que quanto mais perto de 1 ou 255, mais próximo do conceito central da função de pertinência.

Para associar determinado teor a uma classe fuzzy são empregadas funções (sigmoidal, J-shaped, linear) ou define-se uma função por meio de pontos de controle que associe cada valor à classe (Figuras 8a a 8c). Essas funções requerem quatro pontos ao longo do eixo x, que representam os limiares de inclusão/exclusão da classe *fuzzy*, que são os pontos de inflexão das curvas. Por exemplo, na Figura 8a, o primeiro corresponde ao ponto onde a função começa a subir, o segundo onde a função alcança 255, o terceiro onde começa a diminuir e o quarto onde retorna a 0.

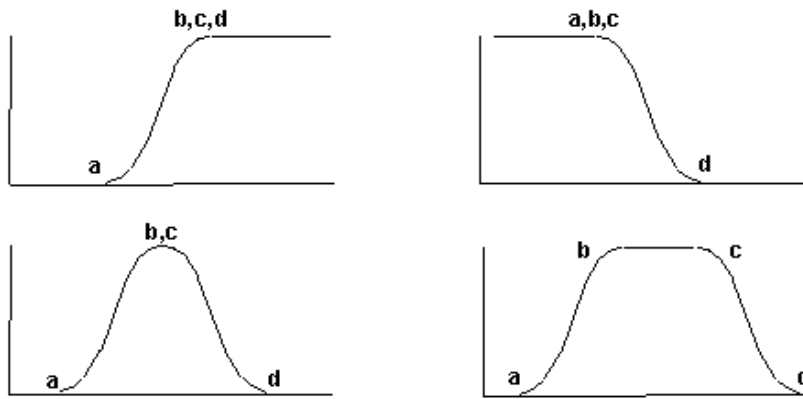


Figura 8 a – Exemplo de funções sigmoidais.

Fonte: EASTMAN, 1998.

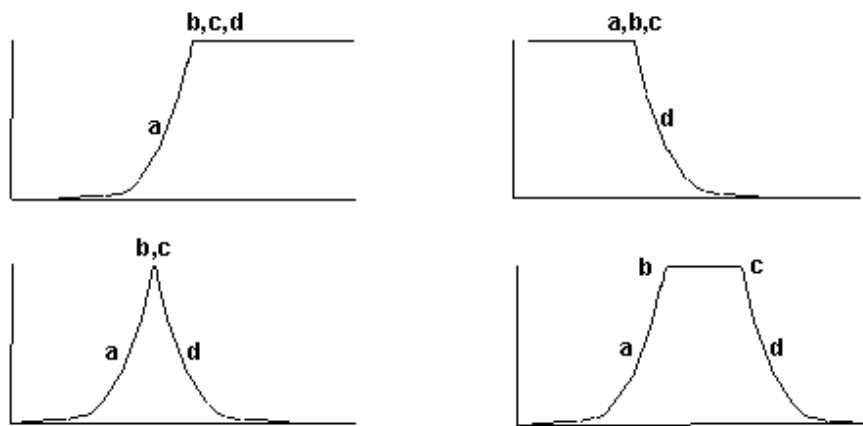


Figura 8 b – Exemplo de funções J-shaped.

Fonte: EASTMAN, 1998.

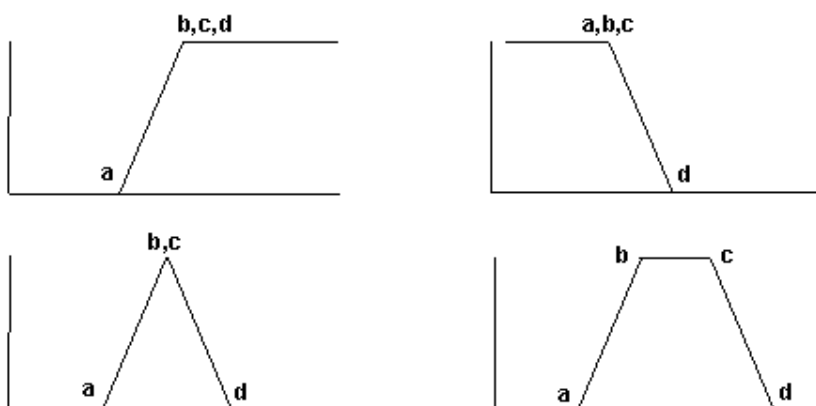


Figura 8 c – Exemplo de funções lineares.

Fonte: EASTMAN, 1998.

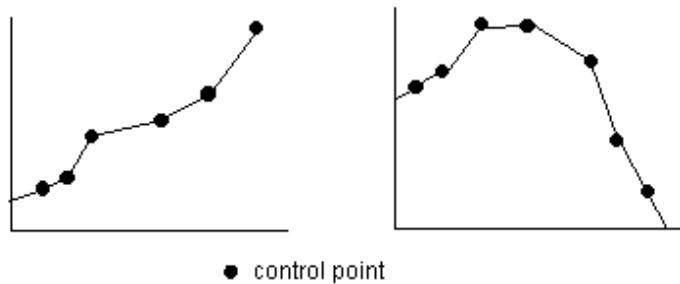


Figura 8 d – Exemplo de funções ajustadas por meio de pontos de controle.

Fonte: EASTMAN, 1998.

De acordo com Meirelles *et al.* (2007), a atratividade da lógica *fuzzy* reside no fato de esta ser dotada de atributos como generalidade, simplicidade e poder consistente de inferência. Contudo, é fortemente dependente dos dados e não apresenta soluções robustas para lidar com formas de compensar a variabilidade natural na coleta das amostras, além da tênue, ou por vezes, ausente relação com os processos físicos.

Segundo Burrough (1998), citado por Escala (1998), a função de pertinência para conjuntos *fuzzy* deve assegurar que, no centro do conjunto, o grau de pertinência seja igual a 1,0 e que decresça de forma adequada das regiões de fronteira até as regiões externas do conjunto onde o valor é nulo. O ponto onde o grau de pertinência é 0,5 é denominado ponto de *crossover*.

Os produtos gerados por essa categoria de análise são mapas integrados, ao invés de mapas fundidos gerados pela álgebra de mapas cumulativos.

### **Definição dos pesos dos fatores**

Nas operações de álgebra de mapas com pesos, a atribuição dos pesos para os diversos mapas, segundo Bonham-Carter citado por Meirelles (2007), pode ser efetuada por meio de critérios estatísticos,

com base em uma região conhecida para estimar os relacionamentos espaciais (*data-driven*) ou por pesos atribuídos por especialistas (*knowledge-driven*). No primeiro caso, podem-se utilizar modelos como regressão e redes neurais a partir de amostras de treinamento. Já no segundo são empregadas a lógica *fuzzy* e a probabilidade *bayesianas*, entre outras.

Uma outra forma de se obterem os pesos é usando o método *AHP* – *Analytical Hierarchy Process*, proposto por Saaty (1986), que consiste na comparação pareada dos fatores, na qual os julgamentos são realizados considerando-se o grau de importância relativa entre eles. Nesse método, a escala de ponderação proposta varia de 1 a 9, sendo que o valor 1 representa importância idêntica entre fatores, e o valor 9 é atribuído a uma variável que tem importância infinitamente maior que outra.

Na estrutura de organização dos dados no modelo *AHP*, os fatores são distribuídos em diferentes níveis hierárquicos. Fatores de maior importância transmitem sua maior influência para as variáveis menos importantes, em níveis hierárquicos mais baixos, que, por sua vez, contribuem também com a funcionalidade e coerência nos níveis superiores (SAATY, 1986). Para Alphonse (1997), o processo analítico hierárquico baseia-se em três princípios: decomposição, julgamentos comparativos e síntese de prioridades. Os valores atribuídos aos fatores, na comparação pareada, são referentes a uma escala de medida de valores de intensidade ou de importância relativa. Esses valores expressam a importância pela qual um fator é mais importante que o outro.

Os fatores podem ser comparados dois a dois, e um grau de importância relativa é então atribuído ao relacionamento entre eles, conforme a escala fornecida por Alphonse (1997), em que: "1", significa que os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo; "3", um fator é um pouco mais importante que o primeiro; "5", um fator é claramente mais importante que o outro; "7", um fator é fortemente favorecido; 9, a

diferença entre os fatores é da maior ordem possível; e 2, 4, 6 e 8 são valores intermediários entre os julgamentos dos fatores.

O modelo AHP informa uma razão de consistência, que deve ser menor que 0,1. Esta razão atesta a coerência nos julgamentos realizados entre os fatores avaliados (ALPHONCE, 1997).

Para a obtenção do modelo AHP, são construídas matrizes quadradas de ordem igual ao número de fatores avaliados, recíprocas e positivas. As comparações por pares fornecem pesos para cada alternativa, dentro de cada fator. Os pesos são obtidos por meio do cálculo do autovetor principal de cada matriz quadrada. Ao final do processo, os pesos geram uma função de agregação aditiva, na qual, para cada alternativa específica, atribui-se um valor final que possibilita a ordenação global de todas as alternativas (BARROS, 2007).

Enquanto a análise hierárquica é utilizada para comparação e ponderação dos fatores e a lógica fuzzy empregada para a normalização destes, a avaliação multicritério é a ferramenta por meio da qual os diferentes mapas temáticos que representam os fatores são combinados para gerar um mapa indicativo da adequação da superfície de estudo para determinado uso.

## 5. METODOLOGIA

Esta tese está vinculada ao projeto *Delimitação de Parques Aquícolas e Dimensionamento da Capacidade de Suporte na represa de Nova Ponte – Minas Gerais*, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e com financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG - CRA APQ-1820-5.02/07).

### 5.1 Área de estudo

O reservatório de Nova Ponte está localizado na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, apresentada na Figura 9, especificamente na bacia do rio Araguari (PN2), que possui uma área drenada de 21.567 km<sup>2</sup> (IGAM, 2003), de acordo com a Figura 9. O reservatório abrange os municípios de Nova Ponte, Patrocínio, Perdizes, Araxá, Santa Juliana, Pedrinópolis, no Triângulo Mineiro, e áreas rurais de outros oito municípios.

A barragem de Nova Ponte, construída no leito do rio Araguari, com 1600 metros de comprimento de crista e 141 metros de altura máxima, foi inaugurada no ano de 1994. Seu reservatório tem capacidade para armazenar 12,8 bilhões de metros cúbicos de água (CEMIG, 2007). Vistas parciais do reservatório estão apresentadas na Figura 10.





Figura 10 – Vistas parciais do lago da represa de Nova Ponte.

Fotos: Eliane

### ***Clima***

O clima na região é do tipo Awa de Köppen, tropical megatérmico com verão chuvoso e período seco entre abril e setembro. A precipitação média anual na região é de 993,6 mm, sendo que nos meses de janeiro a março excede 100 mm (WERNECK et al., 2000).

### ***Economia local***

A economia no entorno da represa é baseada no setor agrícola, com predomínio das culturas de café e cana, pecuária, extração de areia e mineração de fosfato na sub-bacia do rio Araguari, nióbio, principalmente em Araxá, e titânio em Patos de Minas e Patrocínio. Quanto ao setor industrial, destacam-se os ramos alimentícios, especialmente laticínios e matadouros, a fabricação de fertilizantes, cerâmicas, destilarias e curtumes (IGAM, 2006).

### ***Uso da água***

A utilização da água na sub-bacia é direcionada ao abastecimento doméstico, agroindustrial e industrial, contenção de

rejeitos, dessedentação de animais, geração de energia elétrica, irrigação, pesca, piscicultura, recreação, paisagismo e urbanização.

Segundo o Instituto Mineiro de Gestão das Águas \_ IGAM (2005), entre 2003 e 2005 houve crescente aumento da vazão outorgada de águas superficiais na bacia, com ênfase no uso para irrigação, que passou de 6,037% do total outorgado na bacia, em 2003, para 6,890%, em 2004, e para 14,976%, em 2005.

### ***Qualidade da água***

As análises de água realizadas pelo IGAM, de 2002 a 2005, apresentaram IQA (Índice de Qualidade da água) médio para os pontos a montante da represa (PB011, PB013, PB015 e PB017 (Figura 11)), com uma evolução do nível médio para bom no ponto PB015 e uma evolução no ponto PB017 do nível médio para o bom do ano de 2003 para o ano de 2004, mas retornando ao nível médio no ano de 2005 (Figuras 12,13 e 14).

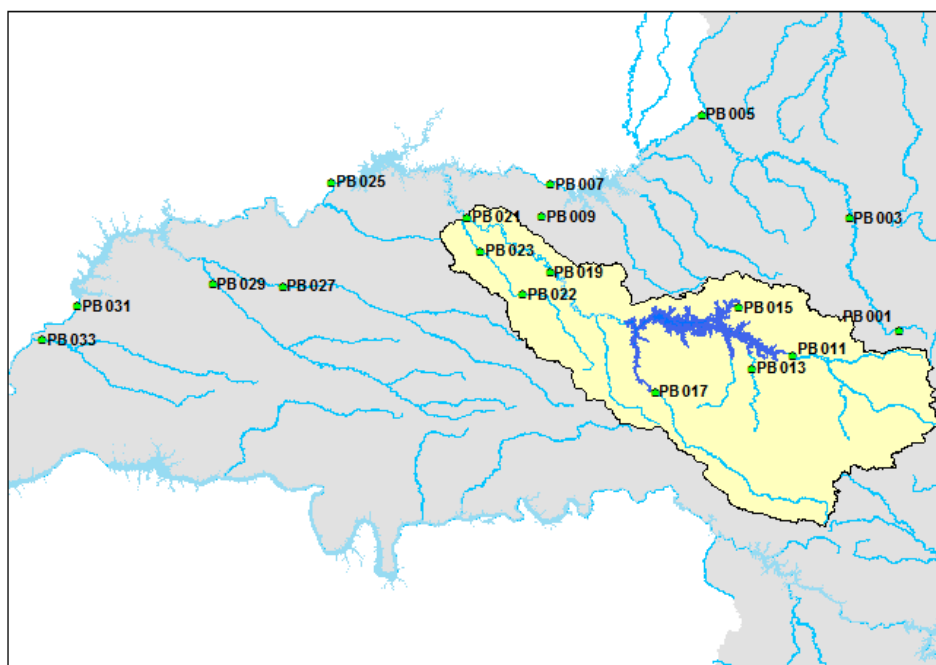


Figura 11 – Localização dos pontos de monitoramento do IGAM na bacia PN2.

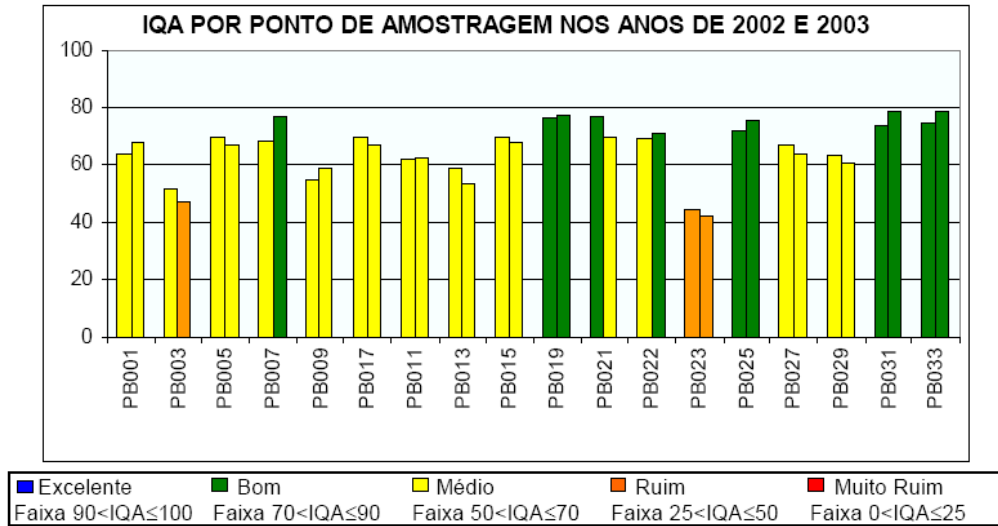


Figura 12 – IQA nos pontos de amostragem na microbacia PN em 2002 e 2003.  
 Fonte: IGAM, 2004.

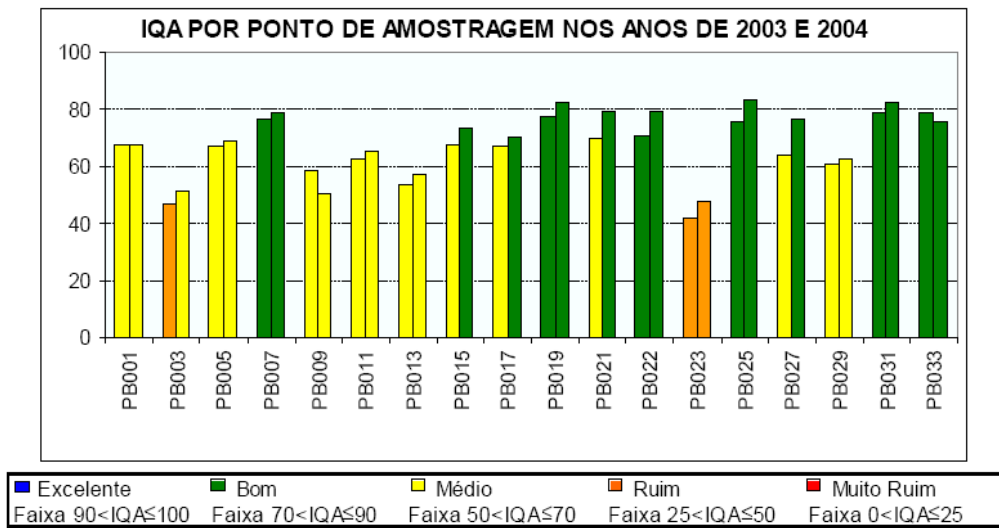


Figura 13 – IQA nos pontos de amostragem na microbacia PN em 2003 e 2004.  
 Fonte: IGAM, 2005.

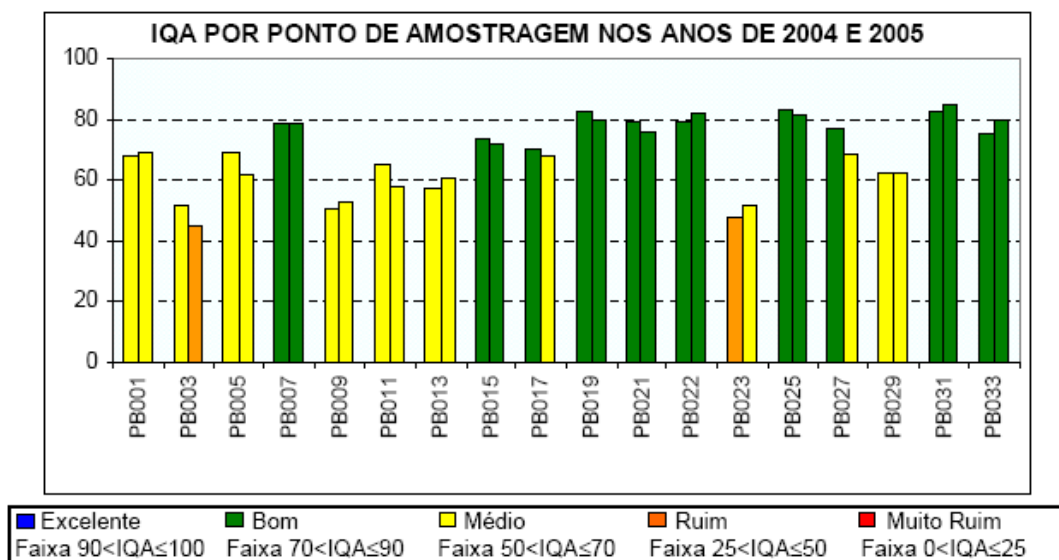


Figura 14 – IQA nos pontos de amostragem na micro-bacia PN em 2004 e 2005.  
 Fonte: IGAM, 2006.

De acordo com o Relatório de Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais (IGAM, 2004), no ponto de amostragem PB017 os valores dos parâmetros coliformes fecais, fosfato total e turbidez foram os principais responsáveis pela condição *média* no ano de 2003, em decorrência dos impactos da poluição difusa neste curso d'água, que também foi responsável pela piora no IQA nesse ponto, nos períodos de maior vazão do ano de 2004 e pelo aumento no fosfato total e turbidez, nas quatro campanhas. Neste ponto, também houve elevada concentração de manganês, refletida no registro elevado de turbidez também alta, na quarta campanha realizada. Outro elemento detectado em concentração elevada foi o cobre, em razão do emprego de agroquímicos na atividade agrícola neste relatório.

O Relatório de Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais (IGAM, 2005) apresenta como justificativa da piora no IQA no mesmo ponto, nos períodos de maior vazão do ano de 2004, os impactos da poluição difusa. Neste ponto houve aumento no fosfato total e turbidez, nas quatro campanhas.

Para o ano de 2005, o Relatório de Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais (IGAM, 2006) apresenta como principais

atores no decaimento do IQA no ponto PB017 os parâmetros coliformes termotolerantes e turbidez no período chuvoso. Para o parâmetro fósforo total também foi obtida elevada concentração no período chuvoso, devido à exploração de fósforo nesta região. Também os parâmetros turbidez e cor verdadeira foram elevados na primeira campanha de 2005, devido às atividades de extração de minerais não metálicos desta região. E, novamente, os teores de manganês total pelos mesmos motivos do ano de 2004.

No ponto PB011, houve ocorrência do índice IQA Ruim na quarta campanha. Essa condição foi observada nos anos de 2000, 2001, 2002 e 2003 de monitoramento, em reflexo aos resultados de contagens de coliformes fecais e turbidez. Conforme o Relatório de Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais (IGAM, 2004) isto se deve ao recebimento de poluição difusa em suas águas, com teores elevados de fosfato total nas suas águas, manganês e devido à concentração do índice de fenóis.

As águas da represa encontram-se, portanto, com IQA de bom a médio, ao longo dos anos, demonstrando que há grandes possibilidades de se estabelecer o cultivo de peixes em tanques-rede nesta represa, em relação à qualidade da água.

Os dados ora citados do IGAM são provenientes de amostras coletadas em alguns pontos específicos. Portanto, é necessário o levantamento de dados sobre a qualidade da água e dos demais parâmetros a serem avaliados ao longo de toda a represa.

As informações sobre a qualidade da água foram obtidas a partir de levantamentos no campo e de análises laboratoriais, pela equipe de limnologia da UFMG, coordenada pelo professor Ricardo Mota Pinto Coelho.

Até o momento, todos os projetos desenvolvidos para delimitação de parques aquícolas no Brasil, empregavam em sua metodologia apenas a coleta de dados pontuais e, para a integração desses dados e tomada de decisão, usavam questionários direcionados a

especialistas na área, que avaliavam os dados disponíveis e davam seu parecer quanto ao local mais apropriado. Um processo moroso e, muitas, vezes subjetivo. A utilização de dados pontuais (sem que sejam interpolados), na definição dos polígonos que delimitariam os parques aquícolas, não permite sua definição de forma eficiente, consistindo em outro ponto vulnerável dessa metodologia.

Com base nos dados limnológicos coletados pela equipe de limnologia da UFMG, foram realizadas a espacialização, a análise e integração desses dados por meio de SIGs para obter um produto final que oriente quanto às possíveis localizações dos tanques-rede. Para tanto, apresenta-se uma metodologia para a pré-identificação de áreas adequadas ao cultivo de três espécies nesses tanques.

Foram adotadas uma espécie exótica (Tilápia sp \_ tilápia) e duas espécies nativas da bacia hidrográfica da represa (*Astyanax fasciatus* \_ lambari-rabo-vermelho e *Brycon orbygnianus* \_ piracanjuba). Um fator importante no momento da escolha das espécies nativas foi a existência de trabalhos e linhas de estudos que pudessem fornecer parâmetros técnicos para o manejo em sistemas intensivos como, por exemplo os estudos sobre a piracanjuba de Feiden e Hayashi (1999), Dumont-Neto et al. (1997), Ganeco e Nakaghi (2003), Murgas et al. (2003 e 2004), sobre a reprodução desta espécie, Seixas Filho (1998), Borba *et al.* (2003), sobre a composição corporal e rendimentos do filé e outros sobre a cadeia produtiva desta espécie. No caso da tiliápia, sua escolha deu-se em função da existência de cinco criatórios instalados na represa.

A metodologia para a pré-identificação das áreas adequadas ao cultivo em tanques-rede está ilustrada no fluxograma da Figura 15 e apresenta três pontos centrais:

- A espacialização de dados considerados restritivos à implantação de parques aquícolas.

- A espacialização de dados considerados qualitativos à implantação de parques aquícolas em um braço da represa.
- A integração dos dados e o ranqueamento das áreas consideradas apropriadas ao cultivo no braço.



Figura 15 – Metodologia proposta.

Sendo:

MCE – Avaliação Multicritério.

WLC – Combinação linear ponderada.

IDW – Ponderação pelo inverso da distância.

SLP – Função de base radial/Spline.

A metodologia proposta foi testada na represa de Nova Ponte, com a coleta e espacialização dos fatores restritivos para toda a represa e dos fatores qualitativos para um braço escolhido (não excluído pela integração dos fatores restritivos), conforme se descreve em seguida.

Na primeira etapa foram levantados os fatores considerados restritivos: profundidade; captação de água; poluição doméstica e industrial; áreas agrossilvopastoris; áreas de reservas; balneários de lazer e turismo; locais de pesca; rotas de navegação; patrimônio histórico e cultural; direitos minerários; restrições nos planos diretores; formações de ondas e processos erosivos, por meio de levantamento de campo com o auxílio de um GPS, o que possibilitou a espacialização desses fatores sobre a imagem do satélite *LandSat 5 TM*, do mês de setembro de 2007, composição RGB, bandas 3, 4 e 5.

Foram georreferenciados os pontos referentes a cada fator e nos casos em que o fator constituía uma área contínua, coletaram-se o início e o fim desta, ao longo da margem da represa.

O fator profundidade foi obtido em duas fases: durante o levantamento dos fatores restritivos e dos qualitativos.

Na primeira, elaborou-se o mapa de depleção da represa, utilizando as séries históricas de sete estações pluviométricas da bacia obtidas no HIDROWEB (2008), que foram correlacionadas com dados de volume mensal da represa cedidos pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Identificada a cota de deplecionamento, foi obtida a imagem do satélite *LandSat 5 TM*, referente à data de deplecionamento e digitalizado o limite do espelho d'água que corresponde à área que não se depleciona.

Em um segundo momento, tendo sido delimitados os fatores considerados restritivos e excluídas as áreas por eles delimitadas, escolheu-se um braço do reservatório sem restrições (quanto a estes fatores) e procedeu-se ao levantamento dos dados de profundidade e os parâmetros qualitativos.

Com base no mapa batimétrico do braço, elaborado utilizando-se o SIG ArcGis e uma estrutura TIN, identificaram-se e excluíram-se todas as áreas que possuíam profundidades inferiores à mínima necessária à implantação de tanques-rede.

Para o *fator captação de água* identificaram-se os locais detentores de outorga para captação superficial na bacia e os locais com uso da água insignificante, mas que se caracterizavam como conflitantes quando destinados ao consumo humano.

As informações sobre os pontos de ocupação foram levantadas *in situ* com o emprego de GPS de navegação e pela espacialização dos locais repassados pela equipe de monitoramento da CEMIG. Como os locais referem-se às sedes de sítios e não à localização do ponto de captação, foi necessário definir a área que esse ponto poderia ocupar, uma vez que a represa apresenta uma variação de nível do reservatório de até 45 m, o que implica necessidade de se dispor de um sistema de captação flutuante. Para essa definição considerou-se, então, a distância horizontal de cada ponto (sede) ao limite máximo de depleção do reservatório (limite do espelho d'água, em setembro de 2000) acrescida de 200 m, para que a profundidade do ponto onde se encontrava o sistema de captação fosse suficiente para seu correto funcionamento, mesmo em períodos de menor nível do reservatório. A distância determinada para cada ponto foi definida como o raio de possível captação de água, em que a área do círculo no espelho d'água foi considerada de exclusão à implantação de tanques-rede.

As áreas agrossilvopastoris foram identificadas por meio do mapa de uso e ocupação do entorno da represa, que foi elaborado utilizando-se os dados de uso e ocupação do solo no entorno da

represa. Esses dados foram obtidos em duas expedições, com duração de quatro dias cada, quando foram georreferenciados por GPS de navegação e realizados os registros fotográficos. Os dados foram geoespacializados sobre a imagem do satélite *LandSat 5 TM*, do mês de setembro de 2007, composição RGB, bandas 3, 4 e 5. Utilizou-se o SIG ArcGis 9.3, com digitalização em tela e, por sugestão da equipe de execução do projeto, adotou-se um limite de 2 km no entorno da represa. Após a digitalização dos polígonos, identificaram-se os usos utilizando os pontos coletados. Os locais onde não havia pontos foram classificados por similaridade na obtenção do mapa de uso e ocupação do entorno da represa.

Para o *fator áreas de reserva*, identificaram-se todas as áreas que apresentavam registro legal junto aos órgãos ambientais e seus limites definidos pelos responsáveis por sua manutenção. Digitalizaram-se os limites sobre a imagem *Landsat 5 TM* do mês de setembro de 2007, composição RGB 3, 4 e 5, utilizando o SIG ArcGis 9.3, com digitalização em tela, para delimitar as áreas de reserva e suas zonas de amortecimento, locais restritivos à implantação de tanque-rede.

O *fator balneários de lazer e turismo* foi obtido com base em levantamentos da CEMIG dos locais destinados à recreação e por meio da identificação de locais considerados de beleza cênica no entorno da represa. Como não existe definição legal para a delimitação das zonas de amortecimento dos locais julgados de elevada beleza cênica, considerou-se a área de visão na preservação desses locais. Para a delimitação do campo de visão utilizou-se o modelo digital de elevação da bacia hidrográfica onde se insere o reservatório de Nova Ponte e as regiões delimitadas ao longo de sua margem dos locais considerados. Para tanto foi empregada a ferramenta *Viewshed* do SIG *ArcGIS*, identificando as áreas contidas no campo de visão, conforme se apresenta na Figura 16.

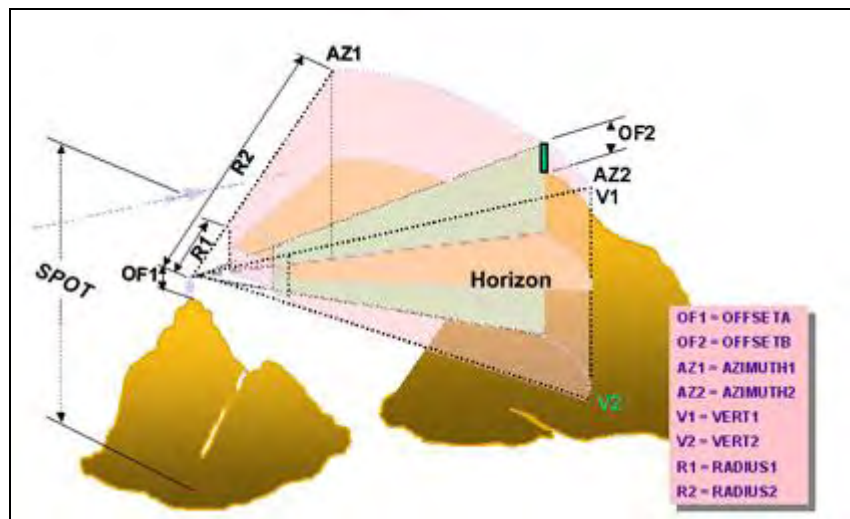


Figura 16 – Sólido definido pela ferramenta *Viewshed* do ArcGIS.

Fonte: ESRI, 2008.

O fator locais de pesca foi levantado junto às associações de pescadores, prefeituras e EMATER dos municípios que compõem a área de abrangência da represa. Os locais identificados com atividade pesqueira foram digitalizados sobre a imagem LandSat dentro do espelho d'água do reservatório e considerados excludentes à implantação de tanques-rede.

O *fator rotas de navegação* foi levantado junto ao DNH e no campo, tendo-se verificado a existência de locais com travessias de balsa não registradas no DNH. Os locais identificados foram espacializados sobre a imagem *LandSat*. Para os locais registrados adotou-se a zona de segurança da rota com área excludente. Para as rotas não registradas adotou-se uma zona de segurança de 500 m, conforme definido pela Secretaria de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais em parceria com o Departamento de Biologia da Universidade Federal de Minas Gerais na delimitação dos parques aquícolas de Furnas e Três Marias.

No Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAM levantaram-se as áreas da represa e, ou, de seu entorno registradas como patrimônio, para a delimitação do *fator patrimônio histórico e cultural*. As áreas identificadas foram, também, espacializadas sobre a

imagem *LandSat*, de modo análogo ao que foi realizado anteriormente nos outros fatores, e excluídas da área de estudo.

Com base nas informações obtidas no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), as áreas com autorização de pesquisa, concessão de lavra e com processos já iniciados para a concessão, que compõem o *fator direitos minerários* foram, da mesma forma, espacializados e excluídas as regiões contidas no leito da represa.

Para o *fator restrição nos planos diretores* obteve-se junto à CEMIG o plano diretor da UHE de Nova Ponte, a partir do qual foi possível identificar as regiões restritivas à implantação dos parques. Tais áreas foram digitalizadas na imagem *LandSat* e excluídas.

Nos levantamentos de campo foram, também, identificados, georreferenciados e espacializados de forma pontual, os locais com incidência de erosão às margens da represa, para compor o *fator processos erosivos*.

Em seguida ao levantamento dos fatores restritivos à implantação dos parques aquícolas, os dados foram convertidos para o formato *raster* para se proceder à álgebra de mapas com a subtração das áreas restritas. Adotou-se a resolução espacial de 30x30 m, ou seja, a mesma apresentada pela imagem *LandSat* empregada como base para a digitalização.

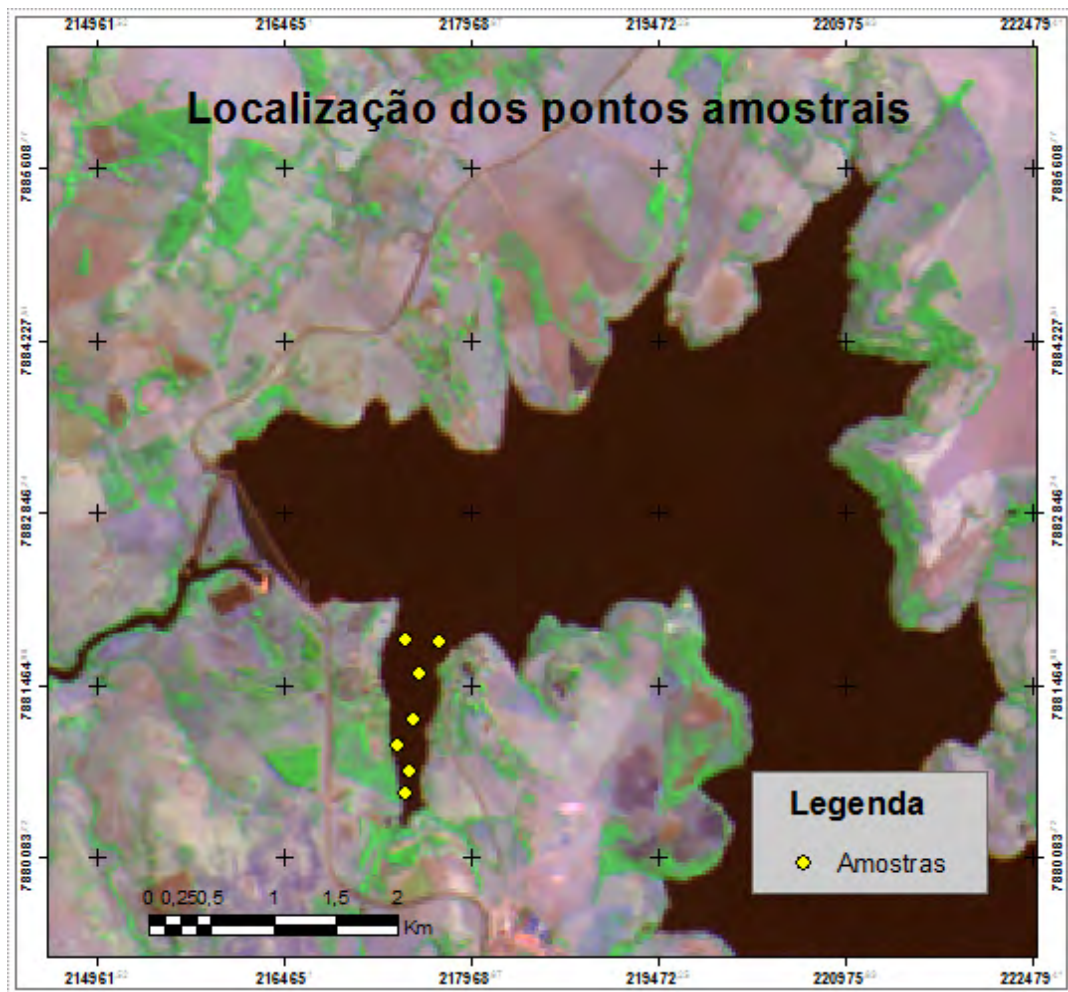
Os fatores considerados qualitativos foram espacializados mantendo-se como padrão o formato *raster*. Entretanto, dispunham-se, nesse caso, de dados pontuais que deveriam ser a base para a elaboração da camada de informação e que variavam de valor de um ponto amostral para outro, não podendo, assim, serem tratados com a mesma metodologia usada nos fatores admitidos restritivos.

Entre os fatores qualitativos definiram-se os mais importantes na pré-seleção dos locais indicados para as três espécies de peixes a serem cultivadas, tendo em vista que o levantamento desses fatores

constitui a etapa mais onerosa do trabalho de definição de áreas aptas à piscicultura.

Para a definição de quais fatores seriam mensurados na pré-seleção da área onde seriam aprofundados os estudos qualitativos, estabeleceu-se uma convenção entre os membros da equipe do projeto "Delimitação de Parques Aquícolas e Dimensionamento da Capacidade de Suporte na represa de Nova Ponte \_ Minas Gerais". Esta equipe foi formada por dois doutores biólogos, especializados em limnologia; um mestre biólogo, especializado em ictiologia; e dois mestres zootecnistas, especializados em ictiologia. A equipe definiu que deveriam ser mensurados os seguintes parâmetros: temperatura, oxigênio dissolvido (OD), pH, clorofila a, fósforo (fósforo total), nitrato e sólidos totais. Esses fatores foram coletados em um dos braços do reservatório não excluído pelos fatores restritivos, localizado próximo à barragem da represa e adotado como área de aplicação da metodologia proposta para a sua integração.

Foram realizadas duas amostragens. A primeira em fevereiro de 2008, com cinco pontos amostrais, mensurando-se os parâmetros temperatura, pH e oxigênio dissolvido e em três destes foram medidos também o nitrato, fósforo total e sólidos totais dissolvidos. A segunda amostragem foi realizada em setembro de 2009, em sete pontos amostrais, como ilustrado no mapa 1, mensurando-se todos os parâmetros.



Mapa 1 \_ Localização dos pontos coletados na área de estudo em setembro de 2009.

Os dados de temperatura, oxigênio dissolvido e pH foram coletados em perfis verticais, georreferenciados por DGPS, com sonda multianalisadora YSI, modelo 6920. Já os dados de fósforo total, nitrato, sólidos totais e clorofila a foram determinados por meio de análises laboratoriais realizadas no Laboratório de Gestão de Reservatórios da UFMG, em amostras coletadas em sub-superfície, a meio metro de profundidade.

Para os fatores com perfis verticais adotaram-se os valores das leituras realizadas a 0,5 m e, considerando-se a possível instalação de tanques-redes a 1,5 m de profundidade no local, escolheram-se as profundidades de 1,0, 1,5 e 2,5 m correspondentes, respectivamente, aos níveis do meio e do fundo e 1,0 m abaixo dos tanques.

Para cada fator foi avaliada a existência da dependência espacial, calculando-se a razão de dependência (RD), segundo os níveis apresentados por Cambardella (1994). No caso de ser constatada dependência espacial, os dados foram interpolados para os locais não amostrados, usando-se a krigagem universal e ordinária, caso contrário, os dados seriam interpolados usando-se o método do inverso da distância ao quadrado e a função de base radial (spline).

Para a seleção do modelo de semivariograma teórico para a dependência espacial, foram testados diferentes comprimentos e número de *lags*, diferentes ângulos de direção e tolerâncias, e anisotropia. Para cada combinação de comprimento e número de *lags* testaram-se os modelos circular, esférico e gaussiano.

Na última etapa, efetuou-se a integração das camadas de informação em que se utilizou a álgebra de mapas para os parâmetros restritivos (para os quais se tem definido o limite entre as classes), e a lógica *fuzzy* para os parâmetros qualitativos (para os quais não há limites regidos entre as classes).

Definidos e interpolados os fatores, empregaram-se as técnicas da avaliação multicritério, de acordo com os seguintes passos: definição de pesos para os critérios (fatores), normalização e combinação dos critérios (ZAMBON, 2005).

Na definição dos pesos adotou-se o método *AHP - Analytical Hierarchy Process*, proposto por SAATY (1986), em que a comparação é realizada por especialistas (*knowledge-driven*).

Avaliou-se a razão de consistência do modelo AHP, que deve ser menor que 0,1, já que essa razão atesta a coerência dos julgamentos realizados entre os fatores avaliados (ALPHONCE, 1997). Para obter o modelo AHP, construíram-se matrizes quadradas de ordem igual ao número de fatores avaliados, sendo os pesos foram determinados calculando-se o autovetor principal de cada uma das matrizes.

Na normalização de cada fator utilizaram-se as funções fuzzy em que se adotaram os limites: 0 para o menos adequado, 255 para o mais adequado e entre 0 e 255 para a variação de adequabilidade.

As camadas normalizadas foram integradas por meio da análise MCE-WLC no SIG Idrisi®, obtendo-se como produto final o mapa de adequabilidade à implantação de parques aquícolas no braço em estudo da represa, para cada profundidade analisada.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Espacialização dos fatores restritivos

Com base no levantamento dos dados referentes aos fatores restritivos e qualitativos na represa e em seu entorno, estruturou-se as camadas de informação, de acordo com as peculiaridades de cada fator.

#### 1. Profundidade

Para a criação do mapa de depleção da represa foram correlacionadas as lâminas precipitadas de cada estação meteorológica com os dados de volume médio mensal da represa, empregando-se o *software MINITAB®* em dois cenários: sem considerar defasagem nos dados de chuva de cada estação e admitindo um período de defasagem de oito meses.

Na Tabela 8 encontram-se as correlações e os p-valores correspondentes entre as lâminas precipitadas da série histórica das sete estações pluviométricas: Est. 1 (código 1947001), Est. 2 (1846002), Est. 3 (1847018), Est. 4 (1946005), Est. 5 (1947006), Est. 6 (1947007) e Est. 7 (1947009), e o volume da represa sem defasagem.

Tabela 8 – Correlações (r) e p-valores correspondentes entre a lâmina precipitada e o volume da represa sem defasagem

Estações	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5	Est. 6	Est. 7
r	-0,211	-0,149	-0,223	-0,183	-0,162	-0,173	-0,186
p-valor	0,008	0,062	0,005	0,021	0,042	0,030	0,019

Apesar de os p-valores da Tabela 3 serem aceitáveis (menores que 0,05, exceto para a Est 2), as correlações entre as lâminas precipitadas e o volume da represa foram negativas, correspondendo a

uma correlação inversa, significando que, em presença de chuva, o nível da barragem estaria diminuindo. Em vista disso, aplicou-se uma defasagem mensal de tempo nos dados de chuva em relação aos dados de volume (Tabela 9).

Tabela 9 – Correlações (r) e os respectivos p-valores entre a soma das lâminas precipitadas de todas as estações e o volume da represa com as defasagens em meses

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8
r	-0,287	-0,280	-0,211	-0,081	0,061	0,183	0,265	0,284
p-valor	0,000	0,000	0,009	0,316	0,451	0,024	0,001	0,000

O período de oito meses foi o tempo de defasagem que apresentou maior correlação entre o volume médio da represa e a soma das precipitações das estações consideradas no estudo. Na Tabela 10 apresentam-se as correlações e os p-valores correspondentes entre os dados de chuva de cada estação e o volume da represa para este período de defasagem.

Tabela 10 – Correlações (r) e p-valores correspondentes entre os dados das estações e o volume da represa com defasagem de oito meses

Estações	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5	Est. 6	Est. 7
r	0,229	0,292	0,249	0,269	0,255	0,294	0,278
p-valor	0,005	0,000	0,002	0,001	0,002	0,000	0,001

Nesse caso, também se verificaram um p-valor admissível e as correlações positivas. Porém, analisando visualmente os gráficos de dispersão dos dados de volume e as precipitações de cada estação (Figuras 17a a 17h), percebe-se que não há uma tendência clara nos dados.

Assim, optou-se pela adoção do nível mais baixo registrado pelo monitoramento da CEMIG, correspondente ao mês de setembro de 2000.

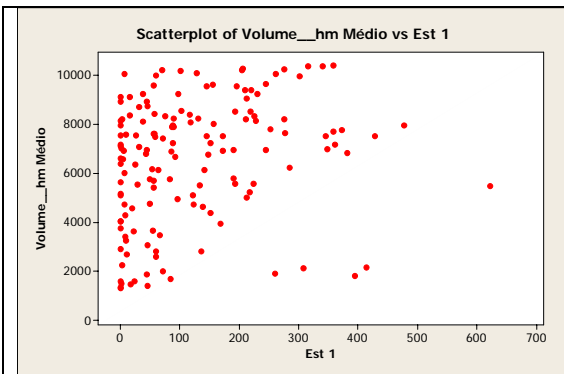


Figura 17a \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 1.

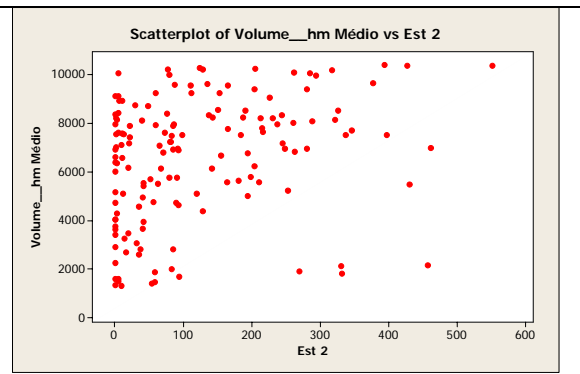


Figura 17b \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 2.

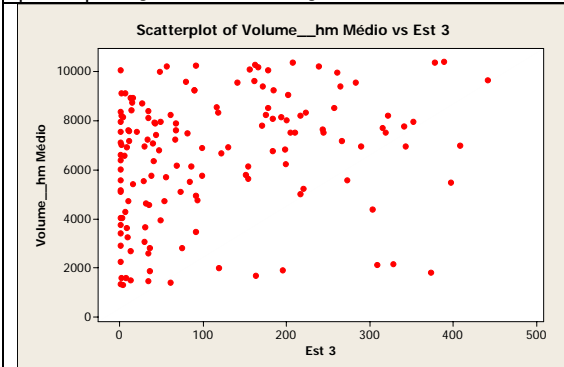


Figura 17c \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 3.

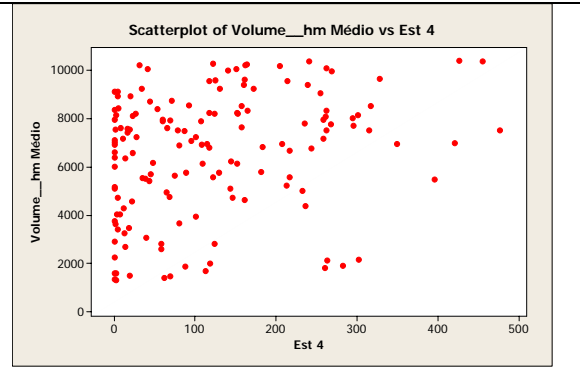


Figura 17d \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 4.

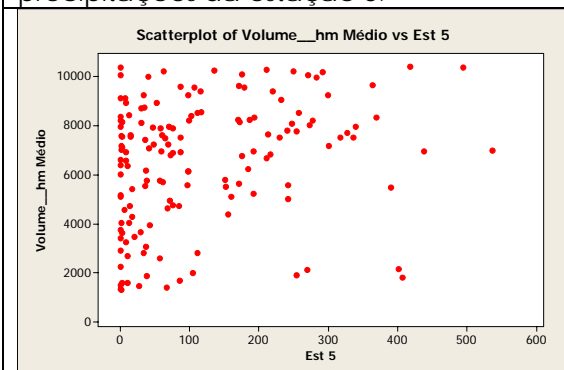


Figura 17e \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 5.

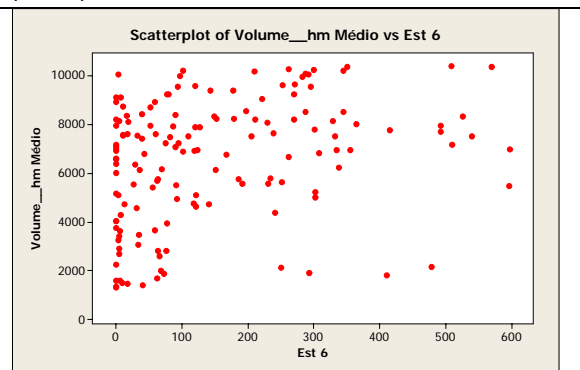


Figura 17f \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 6.

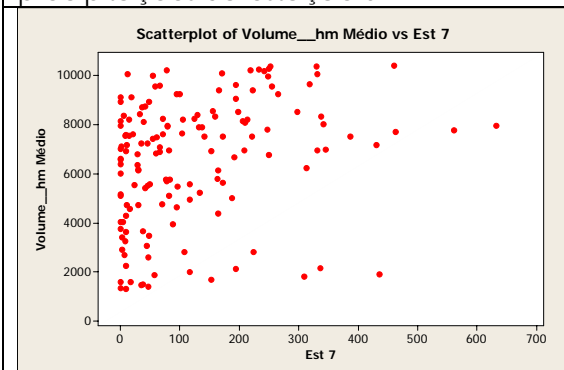


Figura 17g \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações da estação 7.

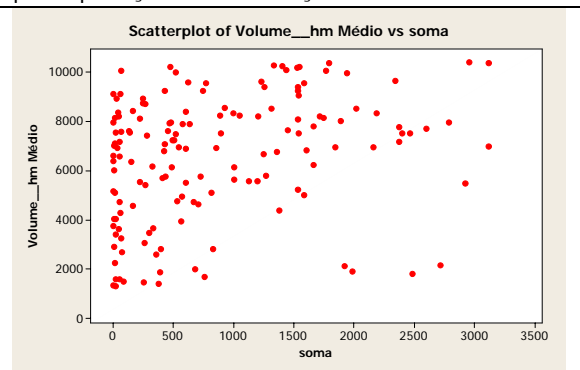
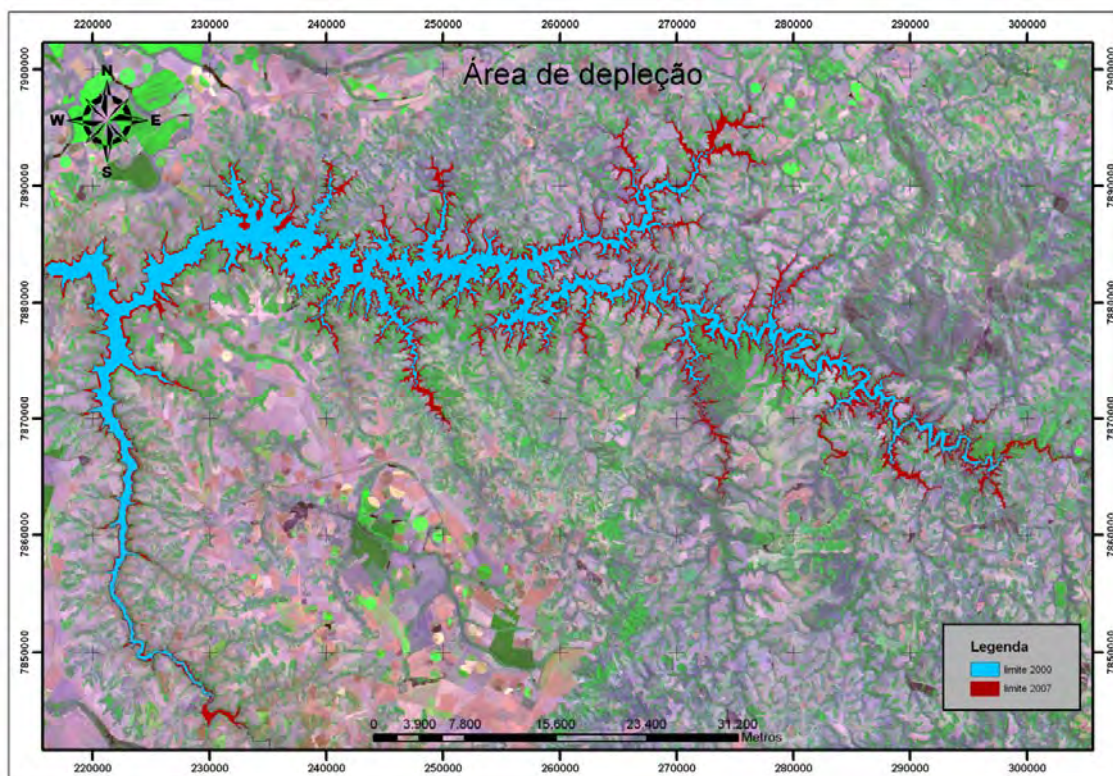


Figura 17h \_ Gráfico de dispersão dos dados de volume da represa e das precipitações das estações.

Uma vez identificada a data do nível crítico de deplecionamento (nível mais baixo), solicitou-se ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) uma imagem *Landsat* 5 TM da represa em período o mais próximo possível do mês de setembro de 2000, bem como uma imagem para o ano de 2007, de onde seria extraído o limite referente ao reservatório em plena capacidade de operação (nível máximo), para compor o mapa de deplecionamento.

Na montagem do mapa foram utilizados o Sistema de Informações Geográficas (SIG) *ArcGis 9.3®* e a composição RGB-345 das imagens obtidas. Digitalizaram-se em tela os polígonos com os limites do espelho d'água referentes às cotas selecionadas. A sobreposição desses limites no SIG propiciou a geração do mapa de depleção do reservatório.

A represa apresenta grande diferença de cotas (há registros de valores de até 45 m), o que ocasiona variação considerável na área de depleção. O espelho d'água tende a variar mais nas regiões de cabeceira dos tributários e, em menor escala, no eixo central do reservatório, onde se encontra circundado por vales mais encaixados, conforme ilustrado no Mapa 2.



Mapa 2 \_ Área de depleção da represa de Nova Ponte.

O volume do reservatório e a área do espelho d'água da represa foram obtidos a partir de dados de monitoramento do reservatório, disponibilizados pela CEMIG, conforme apresentado na Tabela 11.

Comparando a variação da área com a do volume entre os anos de 2000 e 2007, percebe-se que a variação da área é bem menor (em torno de 1,8) que a variação do volume (em torno de 3,3), o que justifica a pequena faixa de depleção encontrada com a sobreposição dos dois limites digitalizados das imagens. Esse fato pode ser atribuído às características geomorfológicas da represa onde se encontram vales encaixados.

Tabela 11 \_ Cota, volume e área do espelho d'água do reservatório de Nova Ponte nas datas analisadas

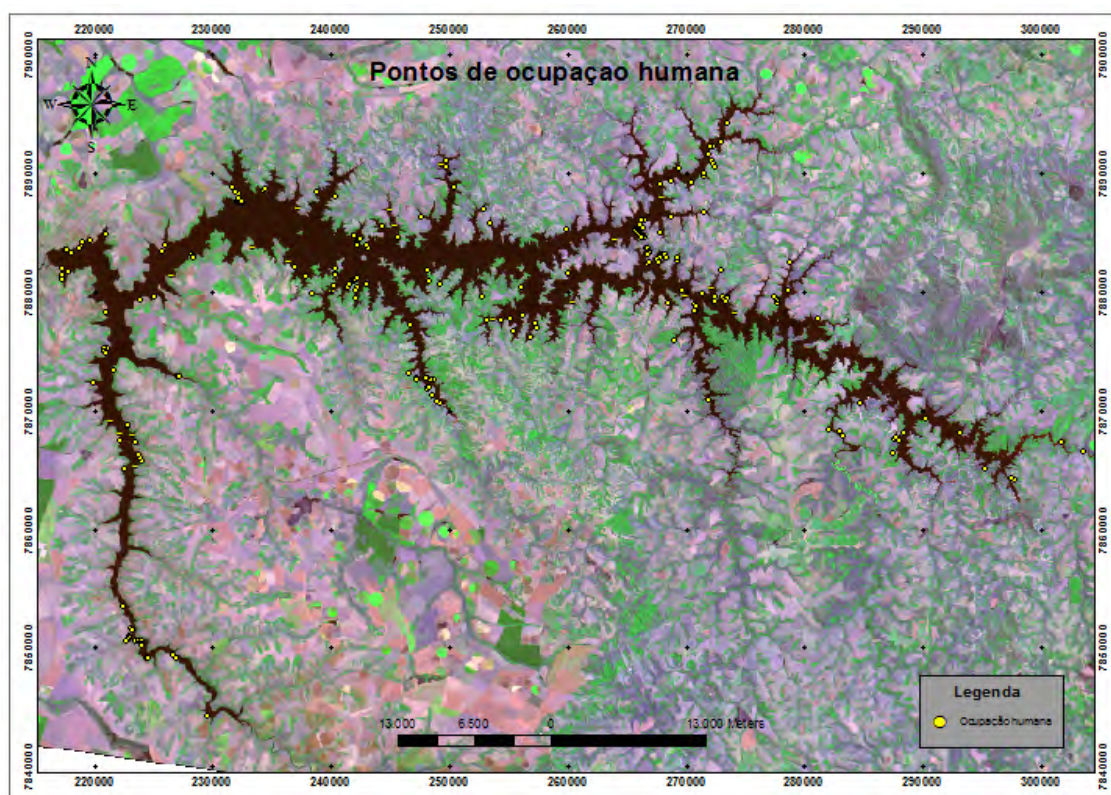
Data da imagem	Cota (m)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )
20/09/00	791,38	2.768,48	224,61
08/09/07	812,15	9.210,78	409,81

## 2. Captação de água

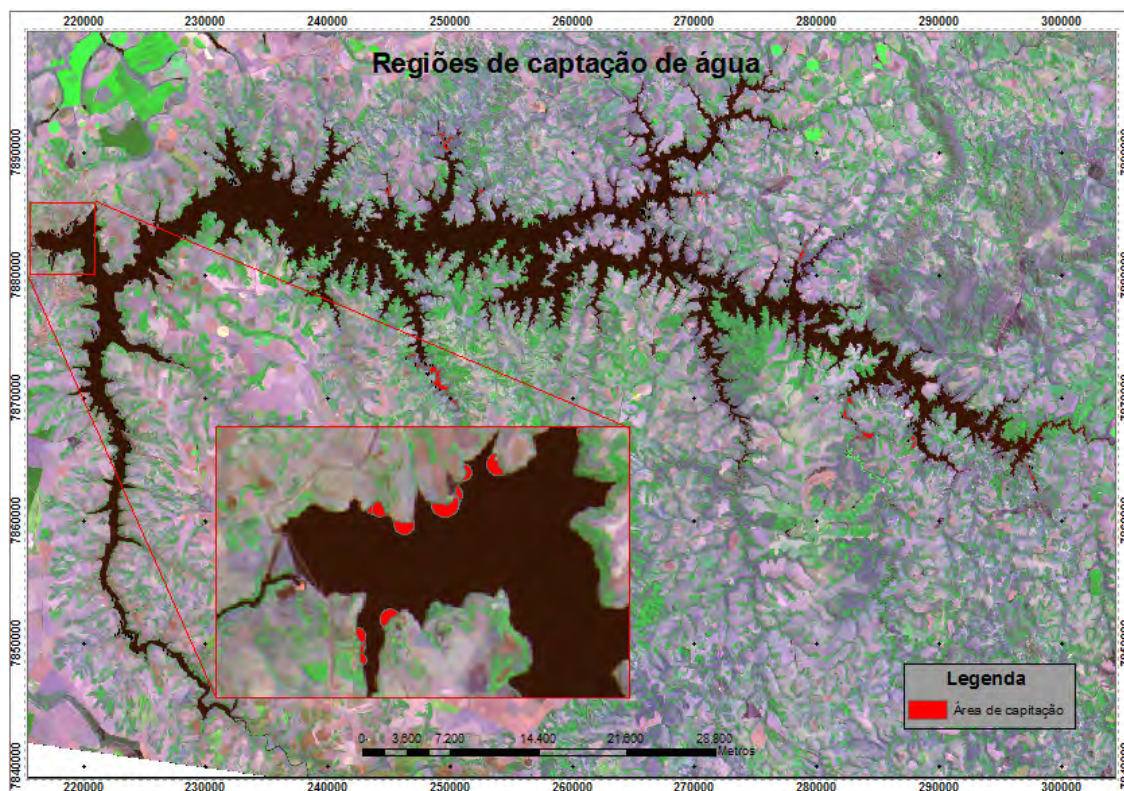
Por meio da identificação dos locais detentores de outorga para captação superficial na bacia e dos locais dispensados do processo, por se classificarem como de uso insignificante, mas que se caracterizam como conflitantes quando destinados ao consumo humano, trabalharam-se, também, os pontos de captação de água na represa. Esses locais foram espacializados conforme o Mapa 3.

No seu entorno, a represa distingue-se pela grande ocupação de sítiantes, cuja captação de água é considerada insignificante, por sua baixa vazão, sendo, por isso, dispensados de outorga. Segundo informações prestadas pela equipe de segurança da CEMIG, que monitora a ocupação no entorno da represa, essa captação não se destina ao consumo humano.

Para cada ponto de captação na represa foi delimitado um círculo com raio de 200 m, dentro do qual foi considerado local restrito à instalação dos tanques-rede (Mapa 4).



Mapa 3 \_ Localização da ocupação humana no entorno da represa de Nova Ponte.



Mapa 4 \_ Localização das áreas de captação de água na represa de Nova Ponte.

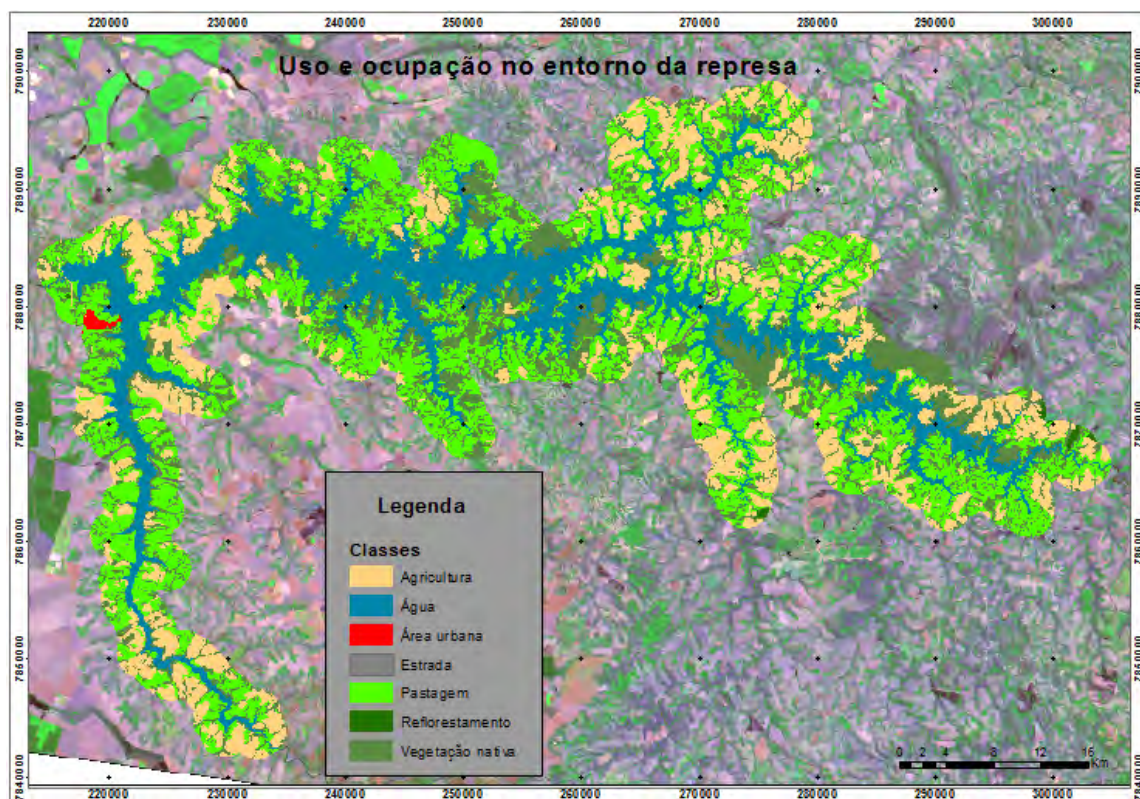
### 3. *Poluição doméstica e industrial*

Os locais cadastrados com ocupação humana (Mapa 3) no entorno da represa apresentam coleta de lixo e fossas sépticas, de acordo com informações prestadas pela CEMIG, não tendo sido, portanto, considerados nesse trabalho como pontos de poluição doméstica. Também não foram encontradas indústrias que lançassem resíduos na represa.

### 4. *Áreas agrossilvopastoris*

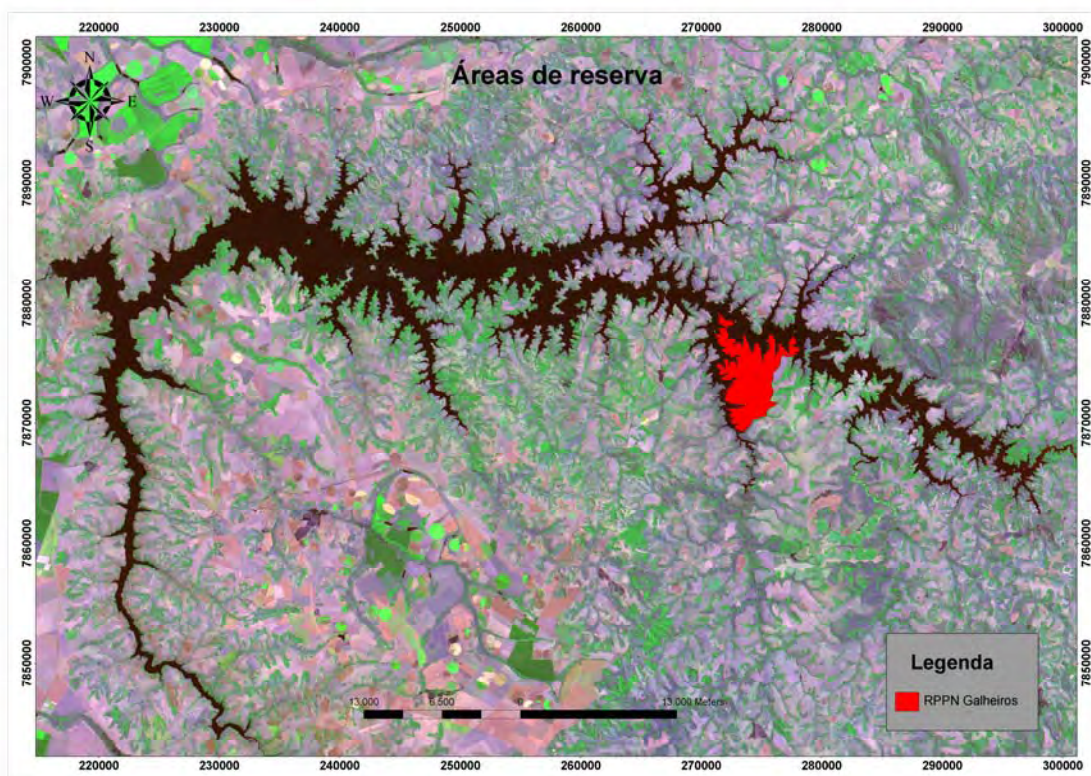
Determinou-se o uso e ocupação do solo no entorno da represa por meio de levantamentos de campo e o emprego de um GPS. Os polígonos foram digitalizados sobre a imagem do satélite *LandSat 5 TM*, do mês de setembro de 2007, composição RGB, bandas 3, 4 e 5, em um raio de 2 km no entorno da represa. Com base nos pontos levantados

classificaram-se os polígonos, obtendo-se, desse modo, o mapa de uso e a ocupação do entorno da represa (Mapa 5).



### 5. Áreas de reservas

Identificou-se uma unidade de uso sustentável no entorno da represa, a RPPN Galheiro (Mapa 6). A Unidade Ambiental Galheiro foi implantada para atender às exigências legais relacionadas à construção da UHE Nova Ponte, com uma área de 2.847 ha.



Mapa 6 \_ Localização da RPPN Galheiro no entorno da represa de Nova Ponte.

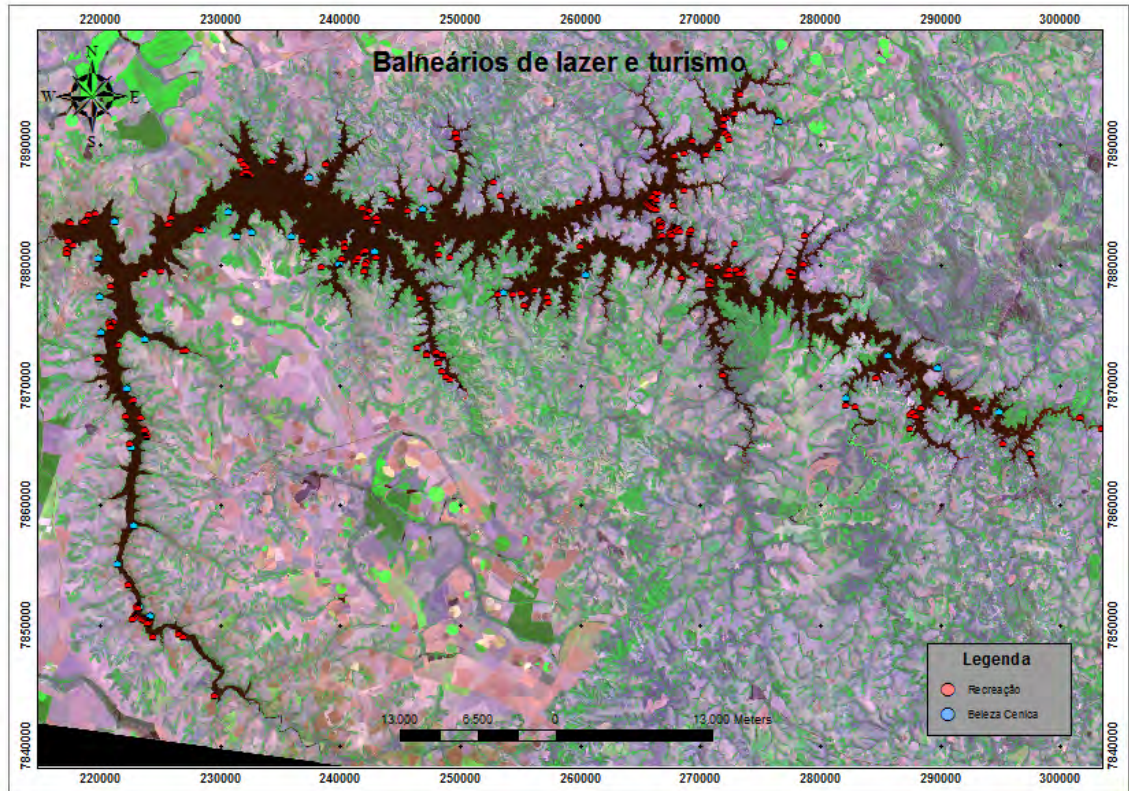
A zona de amortecimento, definida em 3 km ao redor da reserva, segundo o plano de manejo da unidade, é considerada área restrita a implantação dos parques aquícolas.

Identificou-se, também, o Parque Florestal de Patrocínio, gerenciado pela empresa Caxuana. Este Parque é área de proteção ambiental, com cerca de 2.800 ha, situado a 30 km de Patrocínio, às margens do lago artificial da Usina Hidrelétrica de Nova Ponte. No entanto, como a empresa não disponibilizou seus limites, essa área não integrou as regiões que deveriam ser preservadas.

#### 6. *Balneários de lazer e turismo*

Os locais destinados à recreação foram cadastrados e geoespacializados, bem como os locais considerados de beleza cênica (Mapa 7). Cadastraram-se, no entorno da represa, cinco cachoeiras e mais dezoito locais de considerável beleza cênica, com potencial para

a implantação do ecoturismo, apresentados nas Figuras 18a e 18b. Delimitou-se o campo de visão de cada região no espelho d'água do reservatório, utilizando a ferramenta *Viewshed* do SIG *ArcGIS*, conforme ilustrado no Mapa 8.



Mapa 7 \_ Localização dos pontos de beleza cênica e de lazer na represa de Nova Ponte.



Figura 18a - Áreas consideradas de elevada beleza cênica.

Fonte: Eliane.

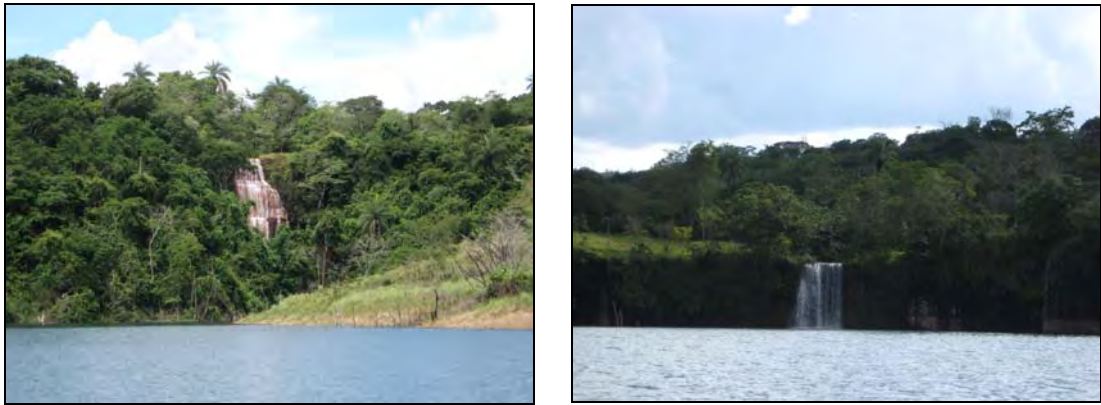
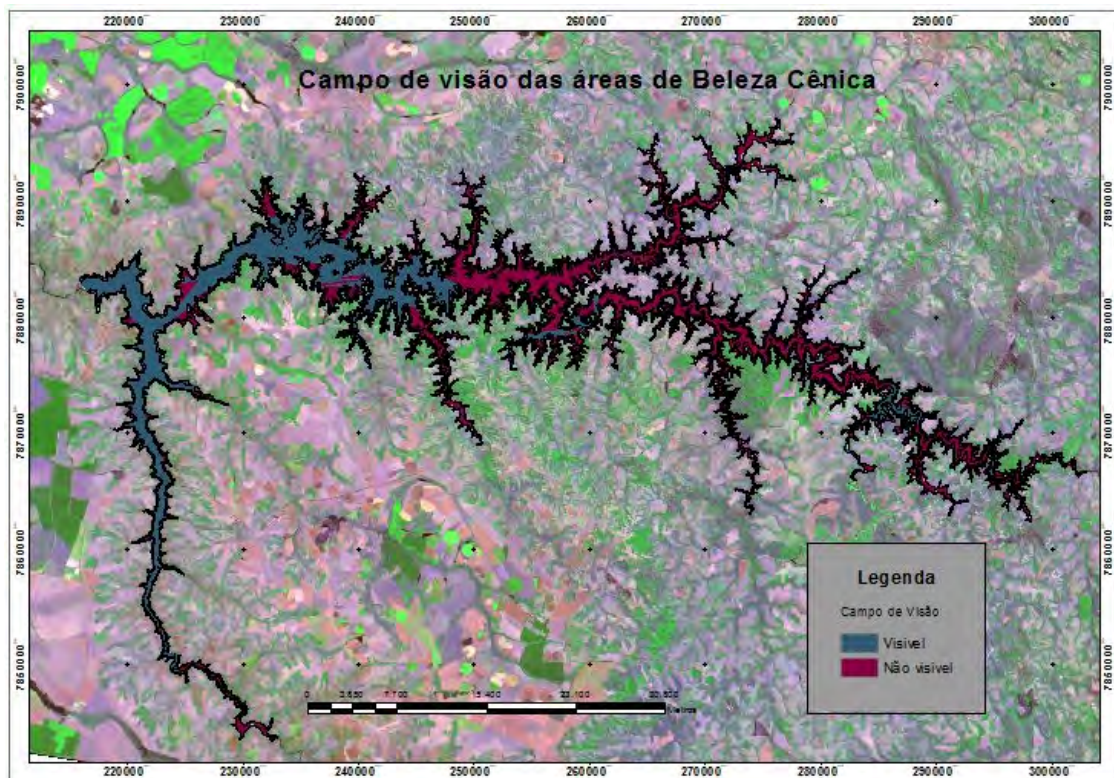


Figura 18b – Áreas consideradas de elevada beleza cênica.  
 Fonte: Eliane.



Mapa 8 – Campo de visão das áreas de beleza cênica.

### 7. Locais de pesca

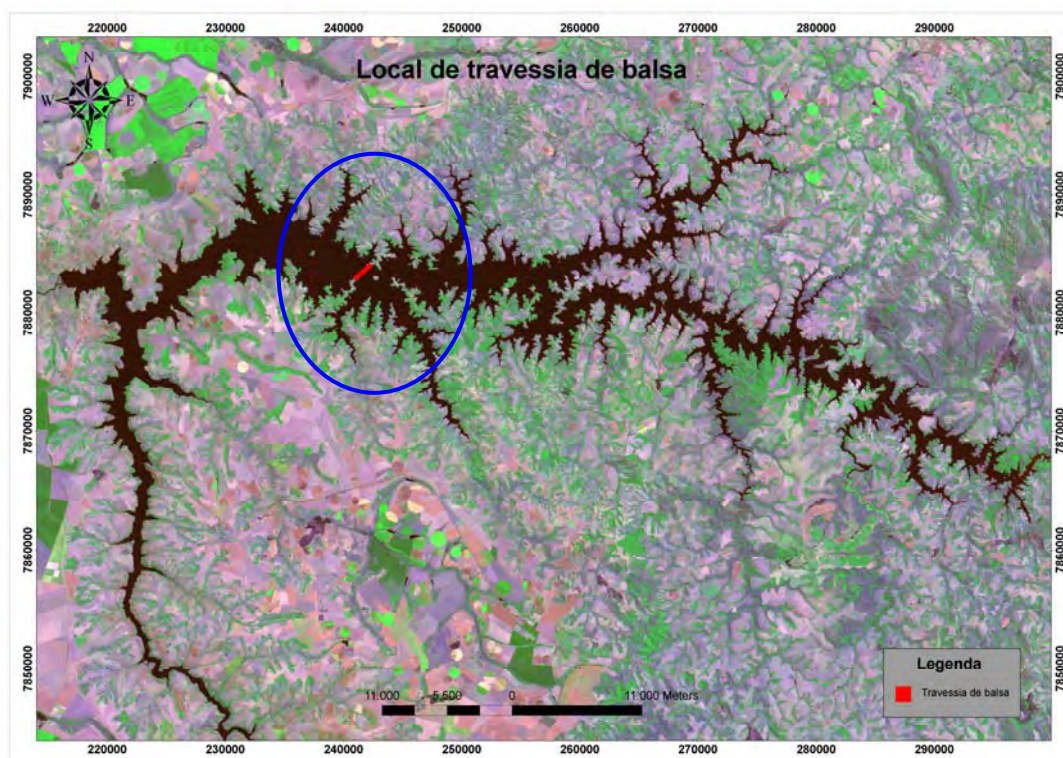
A represa não apresenta nenhum local destinado à pesca profissional. Portanto, essa camada de informação não foi inserida no processo de seleção das áreas.

Na replicação da metodologia para outras áreas, esse parâmetro pode ser tratado da mesma forma que aqueles considerados excludentes, ou seja, com a delimitação da área onde é praticada a pesca profissional.

### *8. Rotas de navegação*

No DNH, não existe qualquer registro sobre a existência de possíveis rotas de navegação na represa. Contudo, há uma balsa que interliga os municípios de Pedrinópolis a Iraí de Minas que, apesar de não estar oficialmente registrada, foi considerada (Mapa 9).

Como zona de segurança para a rota identificada, adotou-se a área do entorno num raio de 500 m, conforme considerado na delimitação dos parques aquícolas de Furnas e Três Marias, elaborado pela Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Minas Gerais, em parceria com o Departamento de Biologia da Universidade Federal de Minas Gerais.



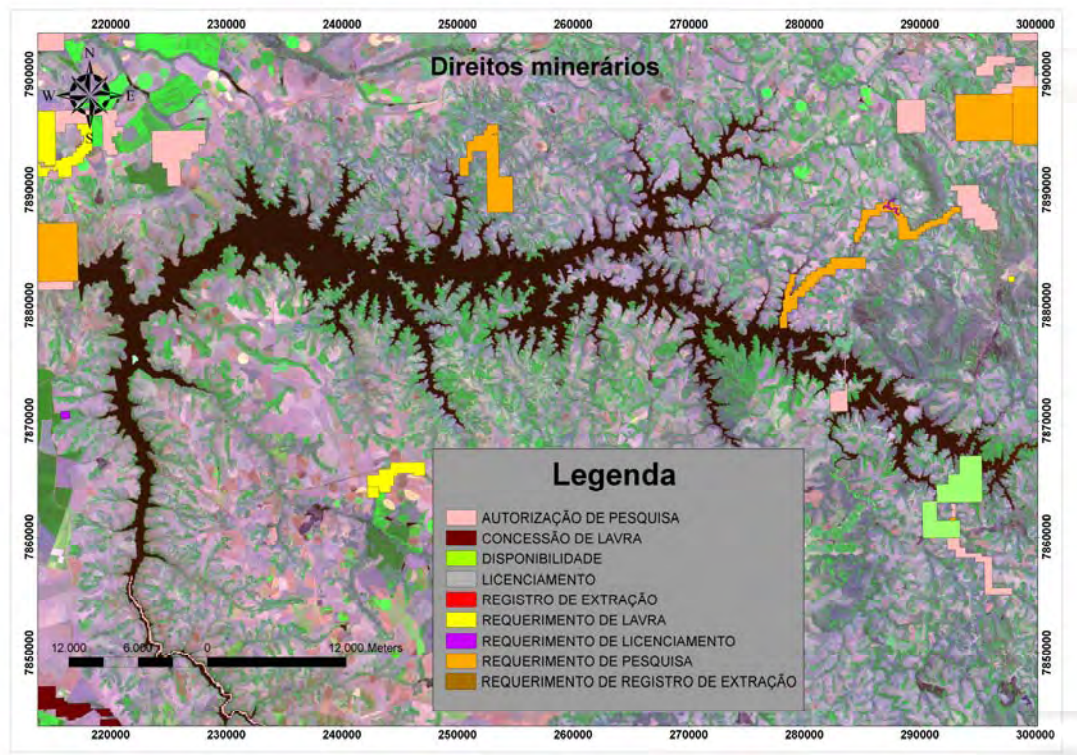
Mapa 9 \_ Localização do ponto de travessia de balsa na represa de Nova Ponte.

### 9. Patrimônio histórico e cultural

Nenhuma área da represa ou de seu entorno está registrada no Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAM como patrimônio. Os utensílios encontrados na área de inundação foram removidos para o museu mantido pela CEMIG. Portanto, não há qualquer restrição em relação a esse item para a implantação dos parques aquícolas.

### 10. Direitos minerários

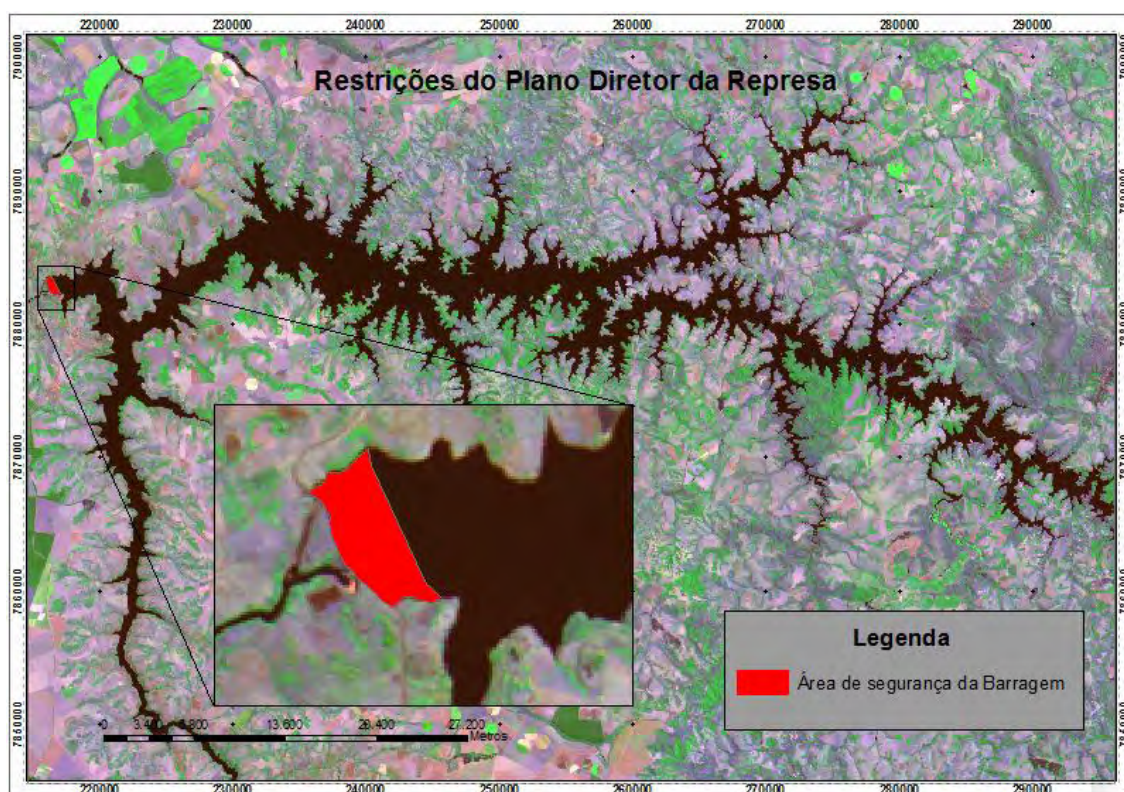
No Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) identificaram-se as áreas com autorização de pesquisa, concessão de lavra e com processos já iniciados para a concessão. Os dados, disponibilizados em 26 de março de 2009, dizem respeito a apenas três áreas com requerimento de pesquisa, três com autorização de pesquisa e uma com disponibilidade, localizadas às margens e em parte do corpo da represa, conforme se apresenta no Mapa 10.



Mapa 10 \_ Localização das concessões de direitos minerários na represa.

### 11. Restrições nos planos diretores

A zona de segurança da barragem, apresentada no Mapa 11, onde nenhuma atividade pode ser instalada e cujo acesso é restrito à CEMIG, é a única restrição que consta no plano diretor da UHE de Nova Ponte.



Mapa 11 \_ Localização da zona de segurança da barragem.

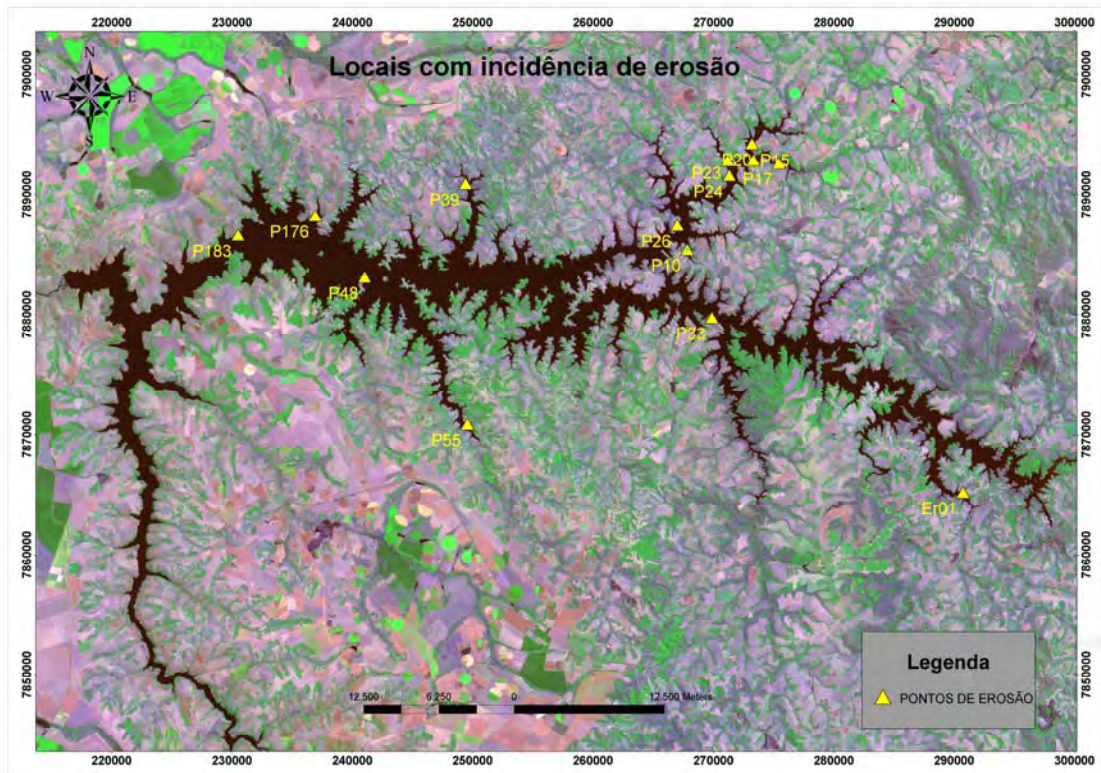
### 12. Processos erosivos

Conforme se observa o mapa 12, quatorze pontos às margens da represa com incidência de erosão foram georreferenciado (Figura 19). Nem todos, entretanto, se encontram ativos, por exemplo o ponto 10 (Mapa 12), localizado no Ribeirão Santo Antonio, está estabilizado (ponto indicado pela seta vermelha no mapa), em razão de a CEMIG possuir um programa de contenção desses processos.



Figura 19 – Áreas com incidência de erosão.

Foto: Eliane.



Mapa 12 \_ Locais com incidência de erosão nas margens da represa de Nova Ponte.

Para todos os fatores, tanto os considerados restritivos quanto os qualitativos, optou-se por uma estrutura constituída por modelos de grade. Esses modelos representam a superfície a partir de uma matriz (*grade raster \_ GRID*), em que cada célula está associada a um valor numérico da propriedade representada, obtido por atribuição direta (quando se dispõe do valor para aquela coordenada geográfica) ou por meio de interpolação.

A opção pela grade regular foi feita com o objetivo de manter o mesmo padrão no projeto, já que neste são utilizadas imagens de satélites disponibilizadas em uma grade regular com resolução especial de 30x30m, mantendo-se assim uma coerência entre as camadas de informação.

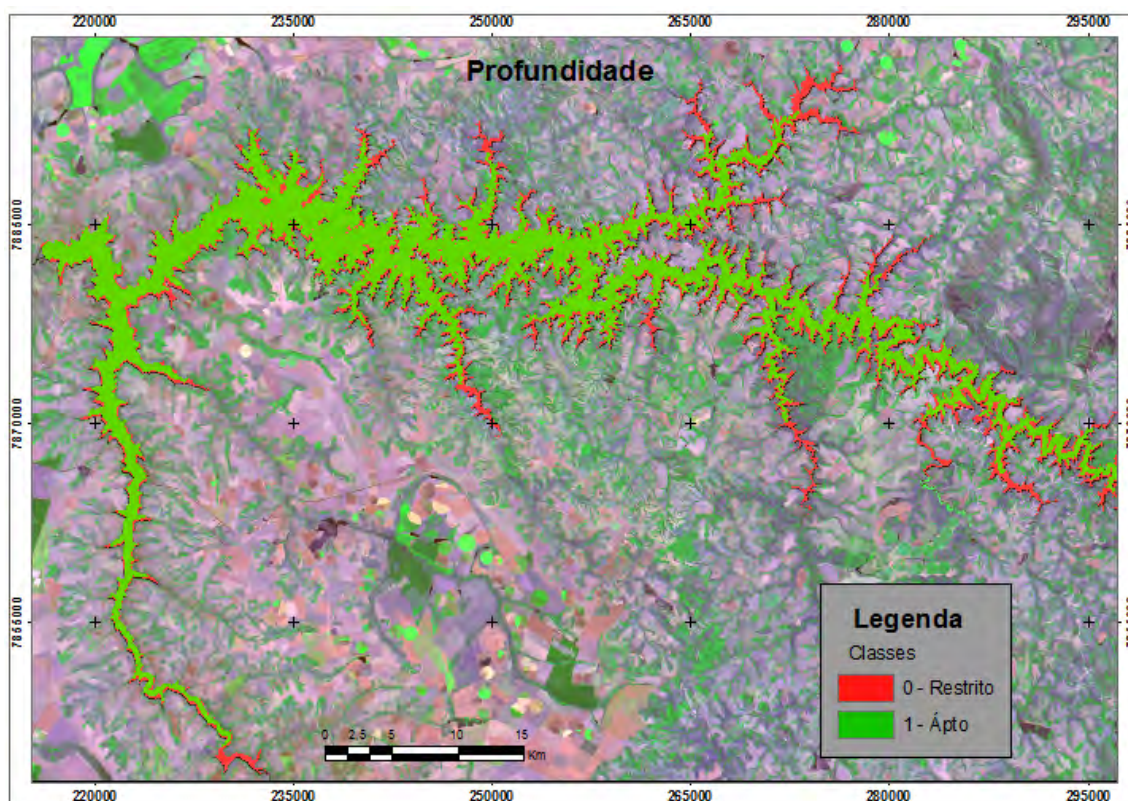
Por se tratar de um trabalho que objetiva a pré-seleção de áreas, de forma a direcionar os estudos destinados à escolha de locais aptos à

implantação de parques aquícolas, foram selecionados os fatores que podem indicar áreas destinadas à implantação destes parques.

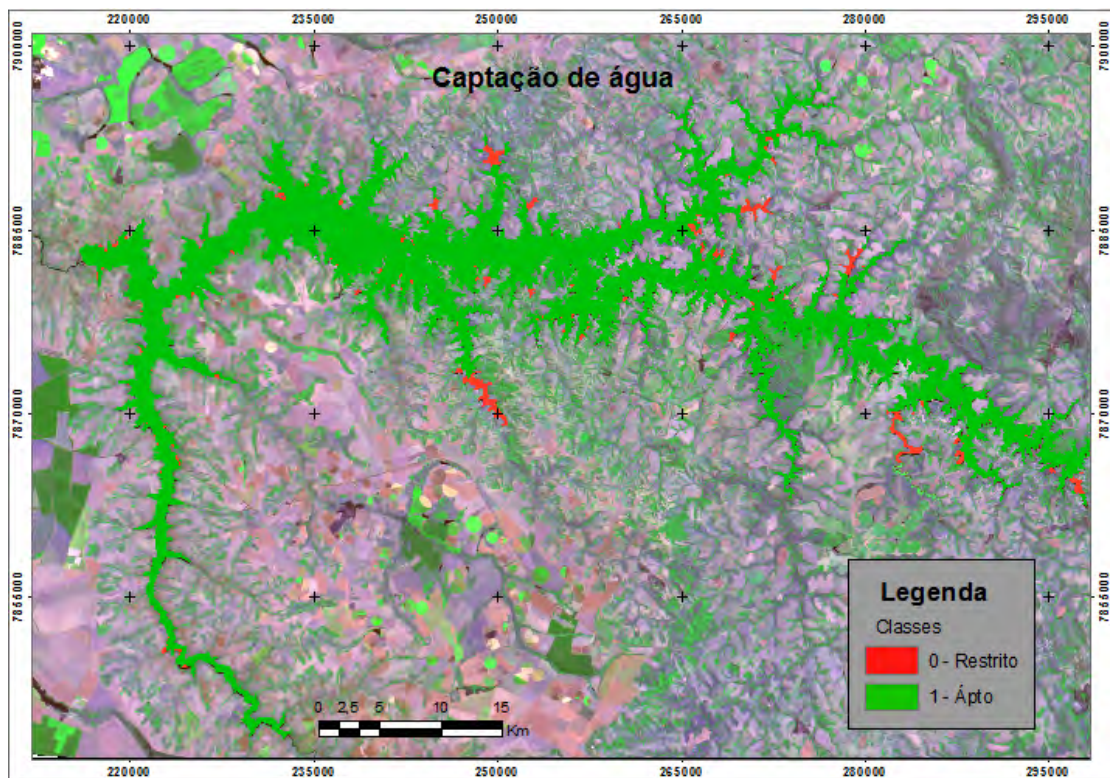
Assim, os fatores agrossilvopastoris e processos erosivos foram suprimidos, visto que afetam a qualidade da água avaliada pelos fatores qualitativos.

Já a formação de ondas, que deverá ser avaliada posteriormente no estudo hidrodinâmico do reservatório, será realizada após a pré-seleção de áreas para implantação de parques aquícolas.

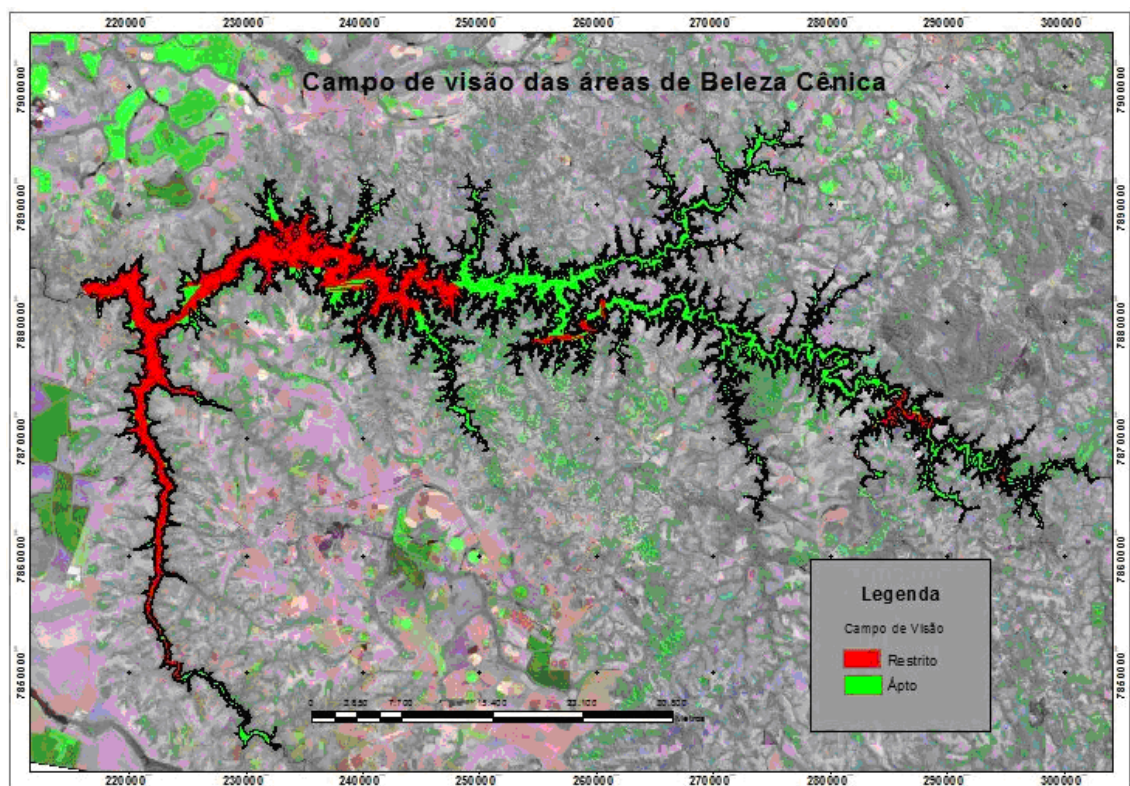
As camadas de informação com cada fator restritivo foram convertidas para o formato *raster*, atribuído-se o valor "0" para as células constituintes das áreas restritas, e "1" para as demais células (Mapas 13 a 18).



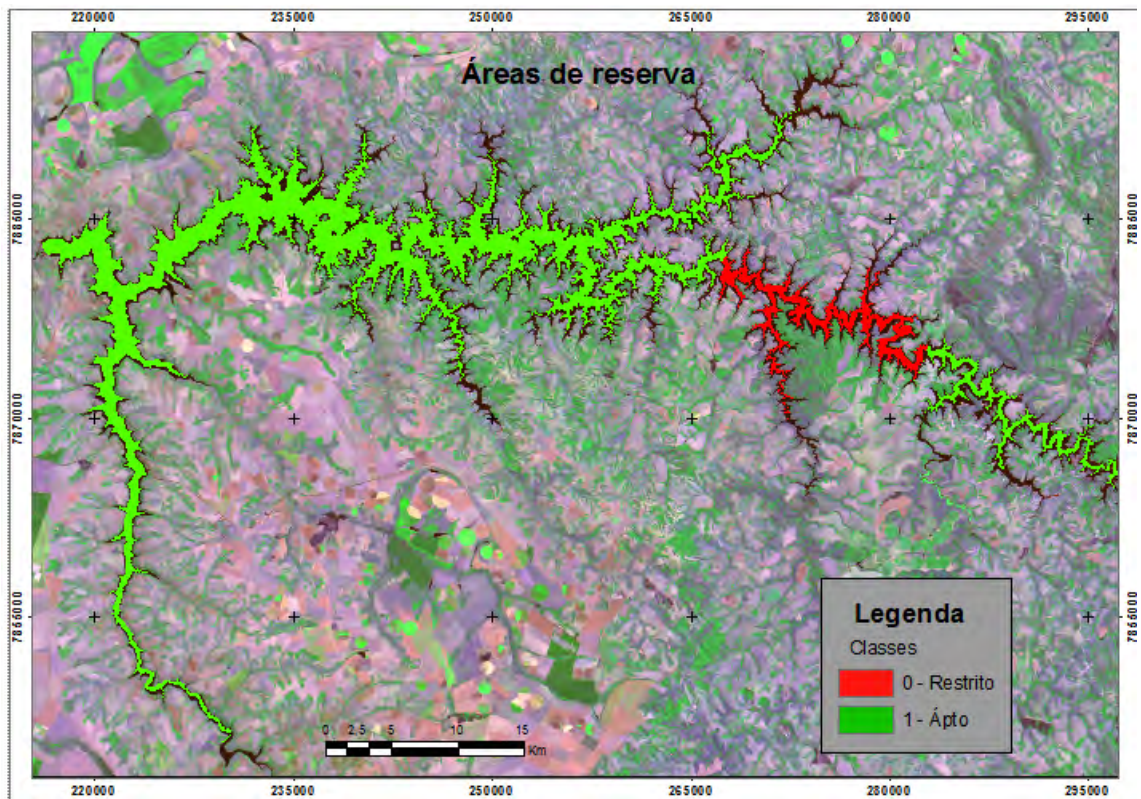
Mapa 13 \_ Restrições devido ao deplecionamento da represa de Nova Ponte.



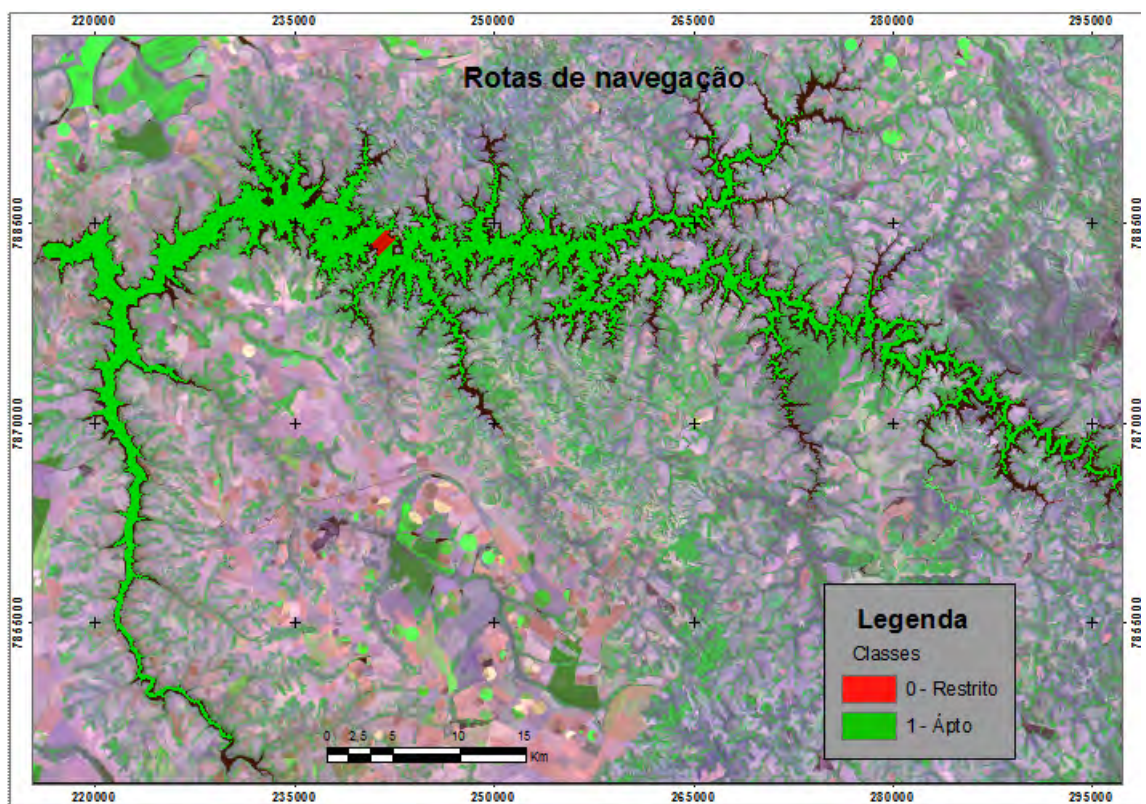
Mapa 14 \_ Restrições devido a captação de água na represa de Nova Ponte.



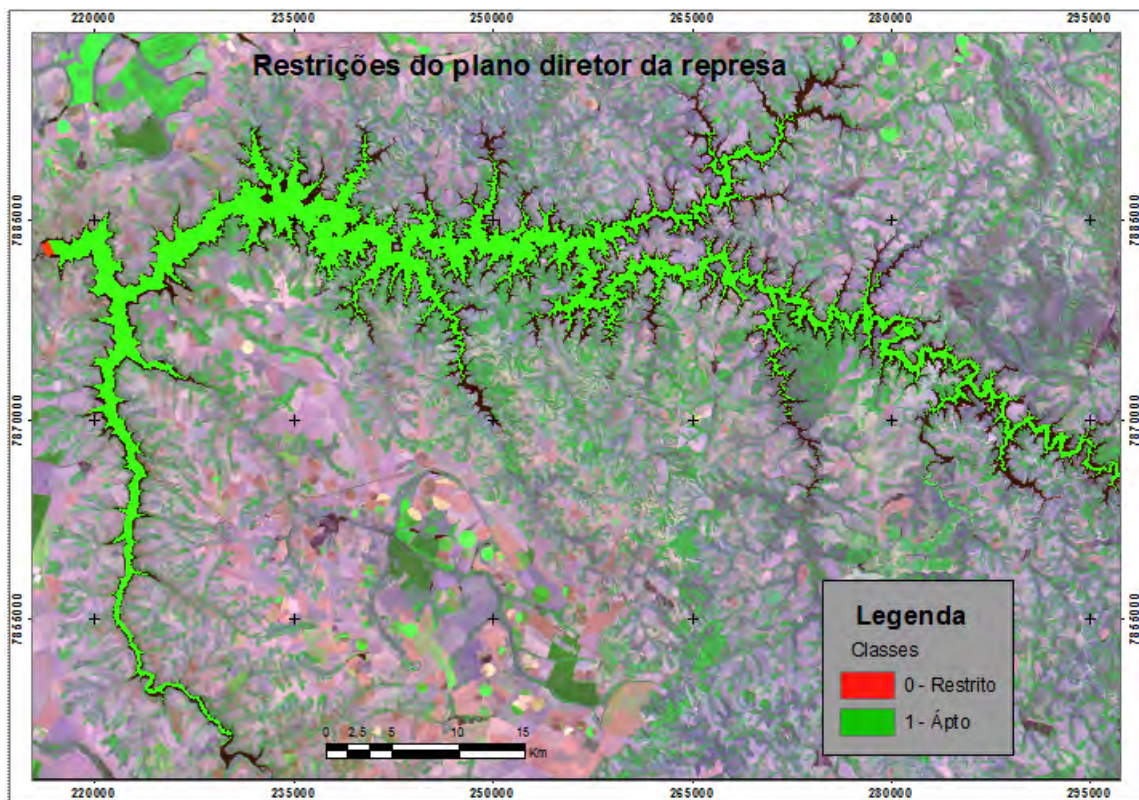
Mapa 15 \_ Restrições devido à presença de balneários de lazer e turismo na represa de Nova Ponte.



Mapa 16 \_ Restrições devido à presença de reservas na represa de Nova Ponte.



Mapa 17 \_ Restrições devido à presença de rotas de navegação na represa de Nova Ponte.



Mapa 18 \_ Restrições devido ao plano diretor da represa de Nova Ponte.

## 6. 2 Integração dos fatores restritivos

Após a espacialização de cada camada de informação, procedeu-se à elaboração do modelo para a pré-identificação das áreas não restritas, considerando-se os fatores restritivos, na represa de Nova Ponte.

Para a definição do modelo há seis fatores restritivos (Figura 20), que compõem o modelo.



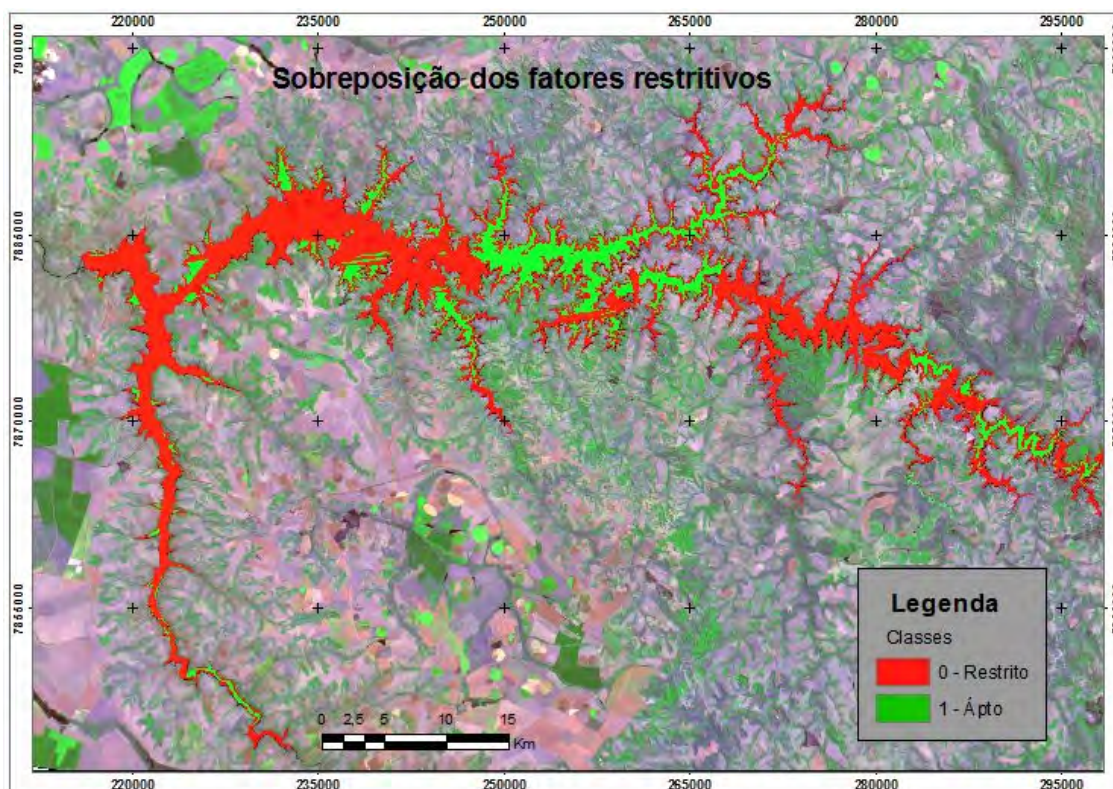
Figura 20 \_ Fatores restritivos adotados.

Para a integração das camadas de informação geradas a partir dos dados considerados restritivos optou-se pela álgebra de mapas, que é similar à solução algébrica de um conjunto de equações, empregando-se a combinação matemática de diferentes *layers* de dados (camadas de informação), por meio da multiplicação, para produzir um resultado composto.

A escolha da multiplicação foi feita tendo-se por princípio manter as áreas consideradas restritas, presentes em uma ou mais camadas de informação. Assim, todas as camadas foram multiplicadas empregando-se a extensão Map Calculator, do SIG ArcGIS, e obtido um único plano de informação contendo todas as áreas restritas (valores "0" e adotada a coloração vermelha) e todas as áreas a serem avaliadas com os fatores considerados qualitativos (valores "1" e

adotada a coloração verde) apresentada no Mapa 19. Neste caso, o modelo foi definido por:

Fatores restritivos = Profundidade AND Captação de água AND Balneários de lazer e turismo AND Áreas de Reservas AND Rotas de navegação AND Restrições nos planos diretores.



Mapa 19\_ Resultado da aplicação do modelo de fatores restritivos.

Apenas com a aplicação do primeiro modelo, que considera somente os fatores restritivos, houve redução para 24,75% da área de estudo que foram consideradas aptas e que serão analisadas de acordo com os fatores qualitativos.

### 6. 3 Espacialização dos fatores qualitativos

Após a espacialização e integração dos fatores restritivos para toda a represa, escolheu-se um braço desta contendo áreas não restritas para o levantamento, espacialização e integração dos fatores considerados qualitativos.

Foram levantados os parâmetros temperatura, pH, clorofila a, fósforo total, nitrato e sólidos totais coletados em cada profundidade considerada no braço selecionado.

Para os pontos amostrais de cada fator, considerando-se o teor de cada parâmetro, foi inicialmente realizado o estudo visando avaliar a existência de dependência espacial. Tal estudo foi feito apenas para os valores mensurados em setembro de 2009, pois havia reduzido número de pontos nos valores mensurados em fevereiro de 2008.

A dependência espacial foi avaliada com base no grau de dependência apresentado na Tabela 12 (CAMBARDELLA et al. 1994), obtido ao ajustar os modelos teóricos circular, esférico, exponencial e gaussiano.

Na procura do melhor modelo teórico semivariograma foram testadas as lag de 70, 80, 100, 120, 130, 140, 150, 160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 200, 250 e 300, com um número de lags variando de 5 a 11, adotando-se uma direção angular de 2° com tolerância de 45° e admitindo anisotropia. Cada combinação de lag e número de lags foram também avaliados.

Para as combinações de lag, número de lags e modelo que demonstraram um melhor ajuste do semivariograma dos dados, foi avaliada a dependência espacial para cada parâmetro por meio da razão de dependência (RD), testando-se a krigagem ordinária e a universal.

Os semivariogramas ajustados para cada fator e profundidade se encontram no Anexo 1 deste trabalho.

Para os fatores que apresentaram grau de dependência de médio a forte foi realizada a interpolação pelos métodos de krigagem ordinária e universal.

As interpolações foram comparadas usando-se os resultados obtidos da validação cruzada. A partir desta técnica foram obtidos os erros de estimação para cada ponto. Estes foram utilizados para

calcular o erro médio padronizado (*mean standardized \_ MS*) dos valores, o erro quadrático médio (*root-mean-square \_ RMS*), o erro padrão médio (*average standard error \_ ASE*) e o erro quadrático médio padronizado (*root-mean-square Standardized \_ RMSS*). Os resultados obtidos para a validação cruzadas são apresentados na Tabela 13.

O critério para selecionar a melhor interpolação foi erro médio padronizado dos valores preditos próximo de "0", erro quadrático médio o mais baixo possível, erro padrão-médio próximo do erro quadrático médio; e erro quadrático médio padronizado próximo de "1" (ESRI, 2008).

Tendo por base este critério, foi selecionada a krigagem universal para os fatores temperatura (leituras a 1,5 m e 2,5 m), oxigênio dissolvido (leituras a 1,0 m e 2,5 m), fósforo total (0,5 m) e clorofila a (0,5 m), e a krigagem ordinária para oxigênio dissolvido (leituras a 1,5 m) e sólidos totais (0,5 m).

Os dois métodos de interpolação, krigagem ordinária e universal, apresentaram resultados muito próximos para a validação cruzada, provavelmente em razão do reduzido número de pontos amostrais.

Tabela 12 \_ Razão de dependência dos fatores qualitativos de setembro de 2009

Fator	Prof. (m)	Krigagem Ordinária							Krigagem Universal						
		Lag	N	C1	C0	Mo	RD	Gd	Lag	N	C1	C0	Mo	RD	Gd
T	0,5	150	10	0,0007	0,0026	e	79,18	Fraca	150	10	0,0007	0,0026	e	79,18	Fraca
	1,0	170	9	0,0045	0,0478	c	91,40	Fraca	90	7	0,0160	0,0398	c	71,28	Fraca
	1,5	165	9	0,0354	0,0012	c	3,16	Forte	170	9	0,0361	0,0010	c	2,77	Forte
	2,5	170	8	0,0141	0,0054	e	27,91	Média	160	8	0,0122	0,0054	e	31,01	Média
OD	0,5	150	10	0,0006	0,0025	e	79,18	Fraca	150	9	0,0006	0,0025	e	79,18	Fraca
	1,0	120	9	0,0044	0,0001	c	2,95	Forte	120	9	0,0034	0,0011	g	23,85	Média
	1,5	130	10	0,0038	0,0016	e	29,30	Média	120	10	0,0034	0,0016	c	31,67	Média
	2,5	130	8	0,0016	0,0035	c	68,24	Média	150	9	0,0019	0,0033	c	62,55	Média
pH	0,5	160	7	0	0,0205	c	100	-	160	7	0	0,0205	c	100	-
	1,0	160	7	0	0,0171	ex	100	-	160	7	0	0,0171	ex	100	-
	1,5	170	7	0	0,0201	e	100	-	170	7	0	0,0201	e	100	-
	2,5	170	9	0	0,0193	e	100	-	170	9	0	0,0193	e	100	-
St	0,5	140	8	0,0286	0,0001	g	0,099	Forte	130	8	0,029	0,005	c	14,71	Forte
Pt	0,5	160	9	0,1822	0,0050	g	2,69	Forte	150	9	0,1903	0,0028	g	1,45	Forte
N	0,5	140	9	0,0276	0,0444	e	61,69	Fraca	140	9	0,016	0,0561	g	77,75	Fraca
Ca	0,5	120	8	0,2601	0,0003	g	0,099	Forte	120	9	0,2943	0,0003	g	0,099	Forte

Sendo C1 a contribuição ( $C1=C-C0$ ); Mo - modelo teórico de ajuste do semivariograma (c-circular,e-esférico, ex-exponencial e g-gaussiano); Gd-Grau de dependência; T-temperatura; OD-oxigênio dissolvido; St-sólidos totais; Pt-fosforo total; N-nitrato e Ca-clorofila-a

Tabela 13 \_ Parâmetros de avaliação das Krigagens

Fator	Prof. (m)	Krigagem Ordinária				Krigagem Universal			
		MS	RMS	ASE	RMSS	MS	RMS	ASE	RMSS
T	1,5	0,054	0,120	0,130	0,933	0,040	0,121	0,130	0,955
	2,5	0,067	0,132	0,127	1,022	0,057	0,130	0,130	1,01
OD	1,0	0,043	0,038	0,062	0,699	0,051	0,040	0,062	0,716
	1,5	0,142	0,064	0,074	0,922	0,165	0,065	0,072	0,968
	2,5	0,124	0,077	0,084	0,901	0,081	0,082	0,080	0,987
St	0,5	0,014	0,160	0,149	0,975	0,023	0,127	0,154	0,847
Pt	0,5	0,048	1,209	1,984	0,641	0,045	1,170	1,899	0,647
Ca	0,5	0,219	3,729	2,733	0,901	0,440	3,652	1,897	1,405

Sendo MS o erro médio padronizado, RMS o erro quadrático médio, ASE o erro padrão médio e RMSS o erro quadrático médio padronizado.

Para temperatura a 0,5 m e 1 m de profundidade, OD e nitrato a 0,5 m e pH a 0,5; 1,0; 1,5; e 2,5 m foram testados o IDW e a função de base radial, pois apresentaram fraca ou nenhuma dependência espacial. A pouca dependência espacial pode ter ocorrido em razão de o número de pontos amostrais não ter sido suficiente para se obter um bom ajuste do modelo de semivariograma teórico.

Estes interpoladores foram avaliados por meio da exclusão de ponto a ponto e da interpolação dos demais, uma vez que o número de pontos amostrais não permitiu a extração de um grupo amostral para a validação.

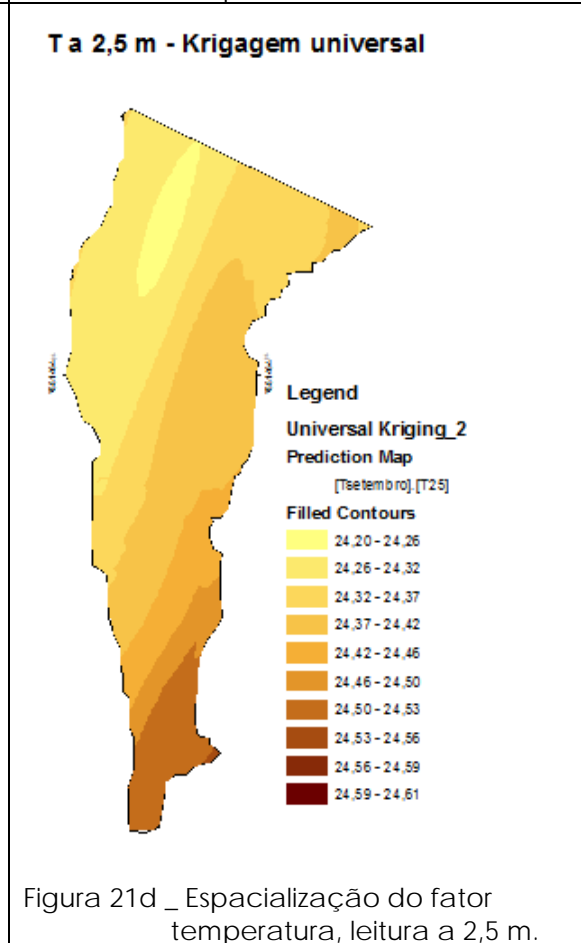
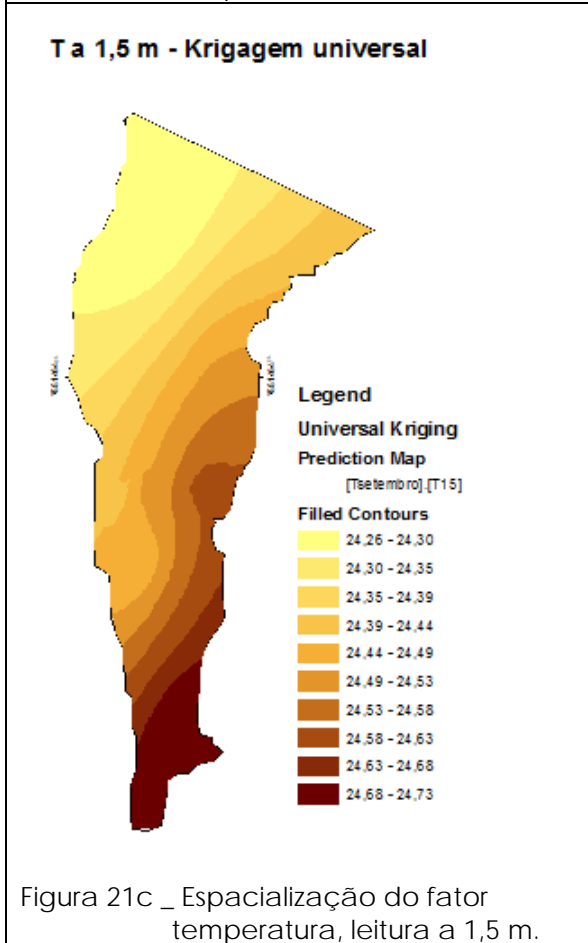
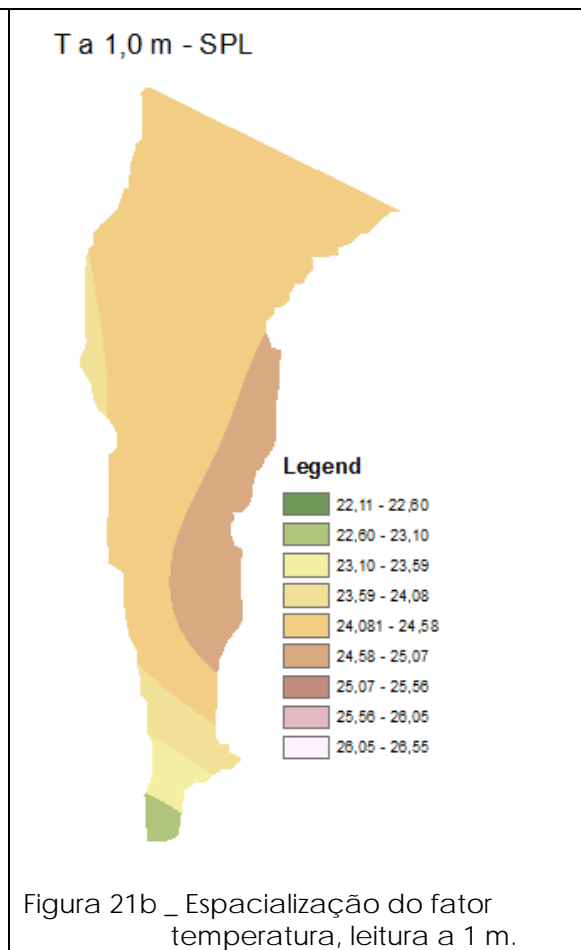
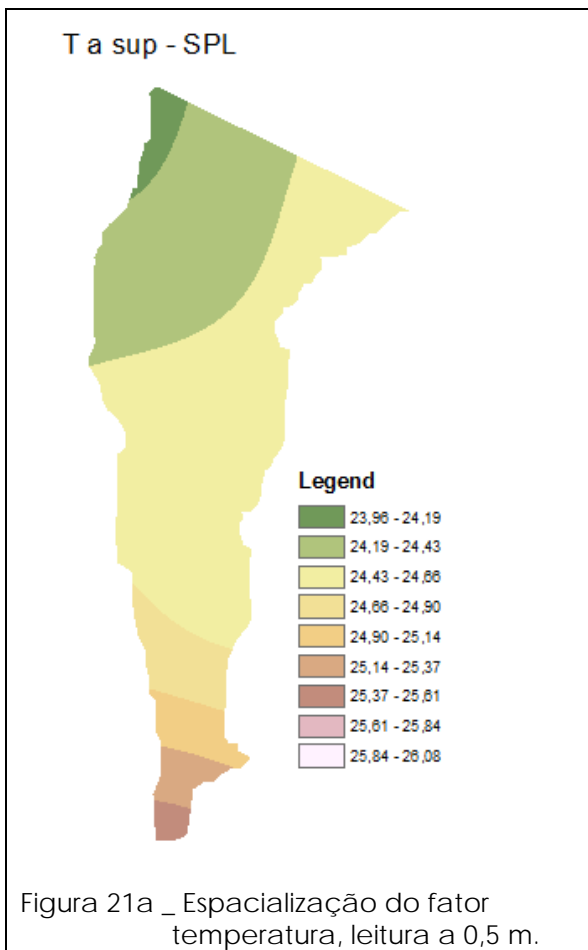
Os erros de estimação, ou seja, as diferenças entre os valores observados e os valores estimados (Tabela 14), demonstram que os interpoladores IDW com ponderação 2 e a função de base radial – spline (SPL) foram satisfatórios para todos os parâmetros interpolados, mesmo para fator nitrato, que apresenta maior variação espacial.

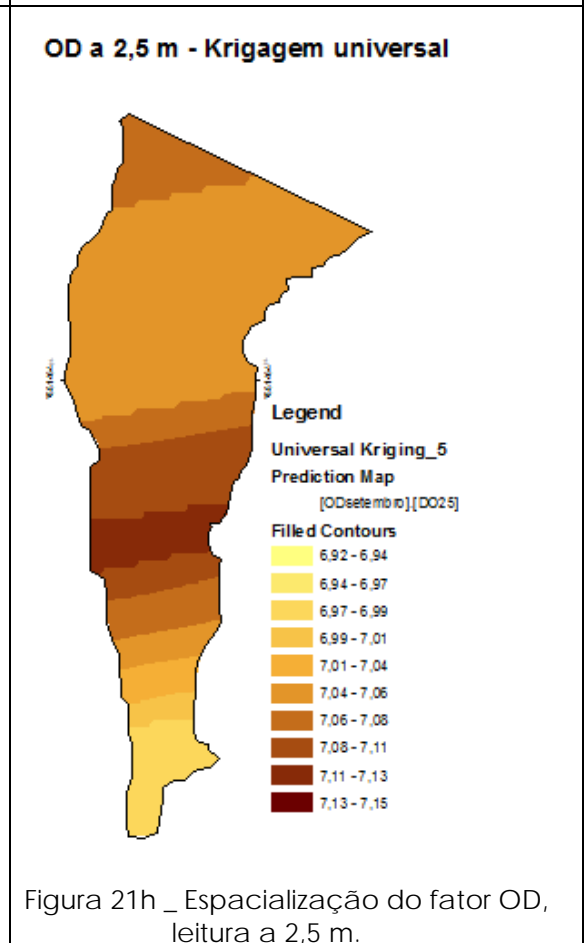
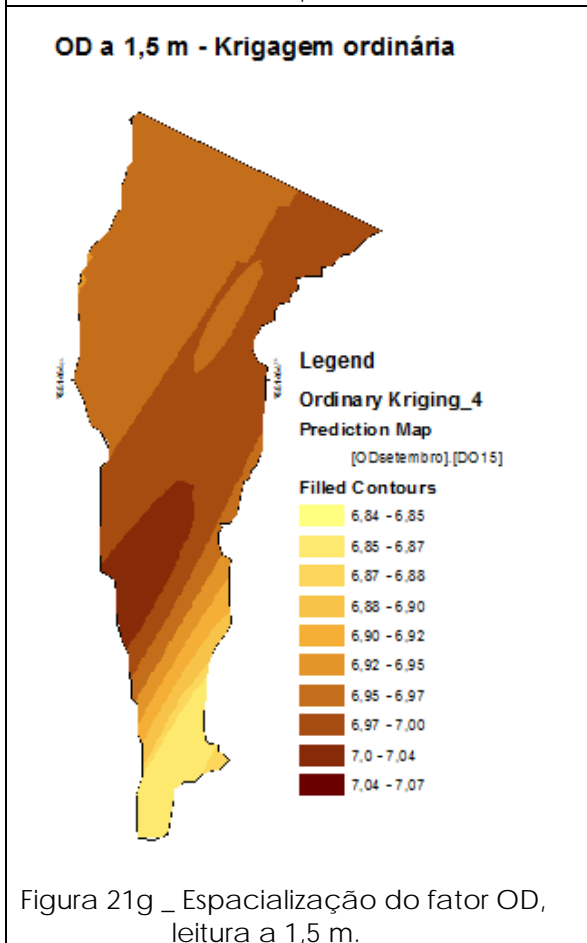
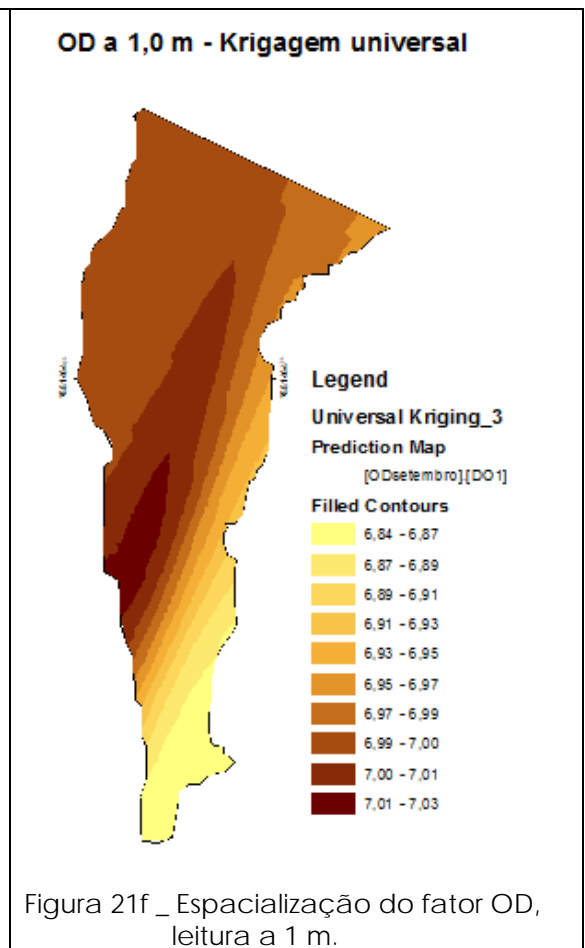
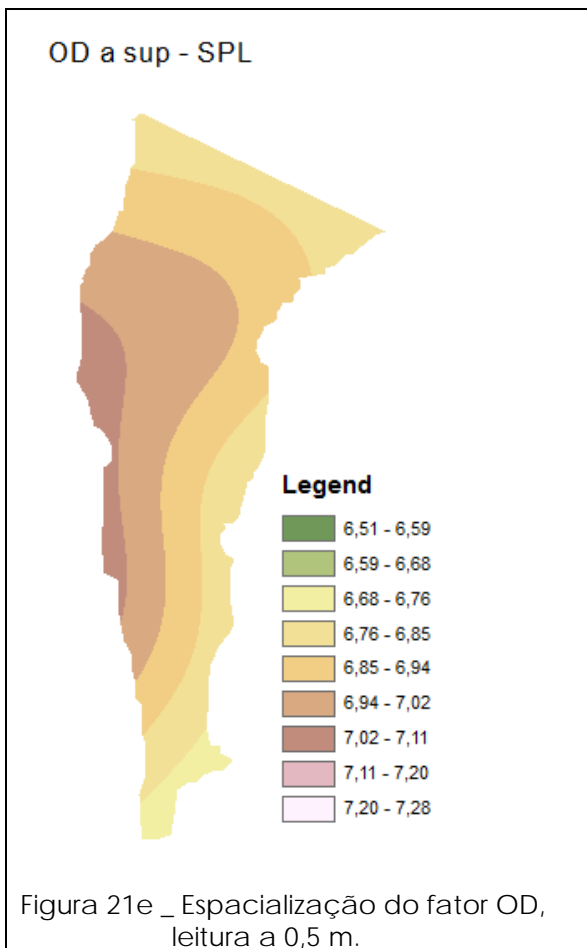
Tabela 14 \_ Parâmetros de avaliação do IDW e da função de base radial (spline).

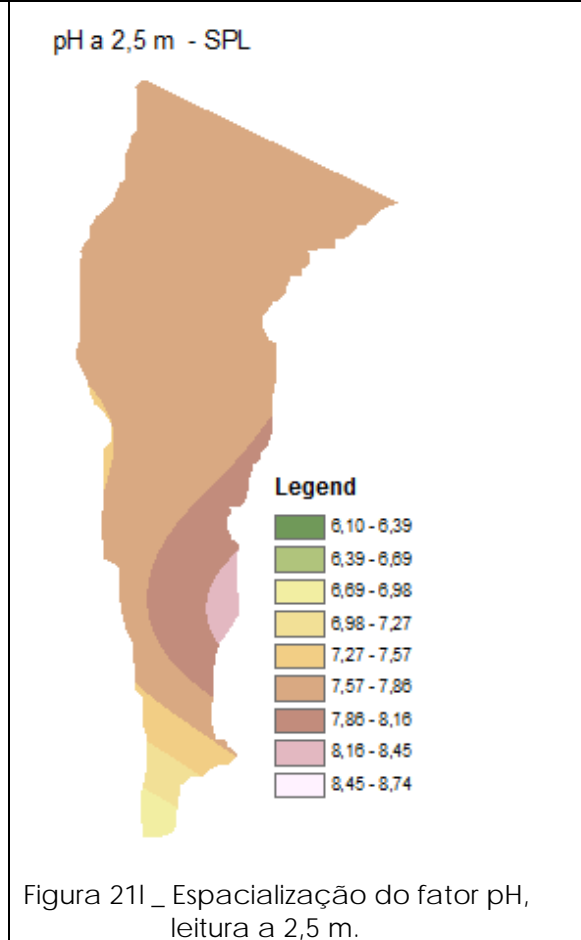
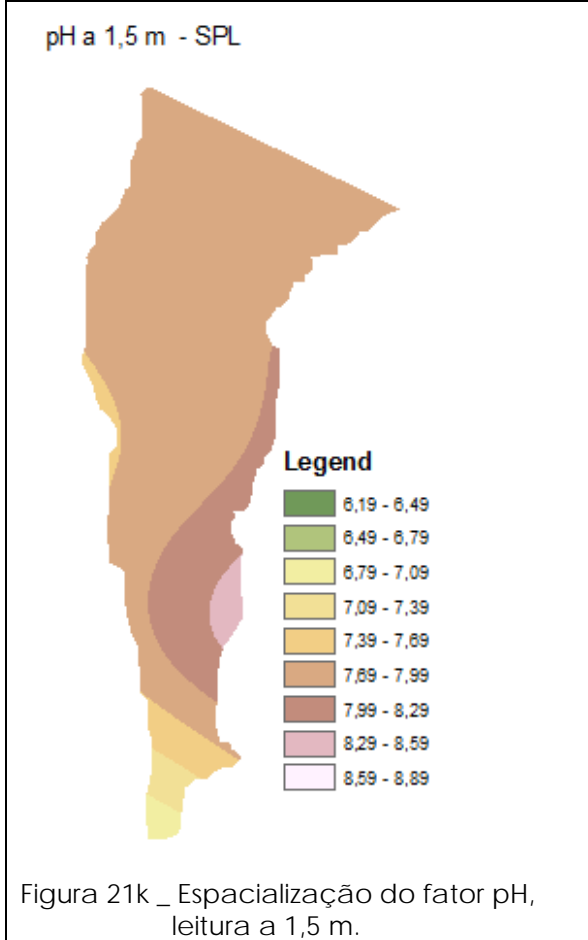
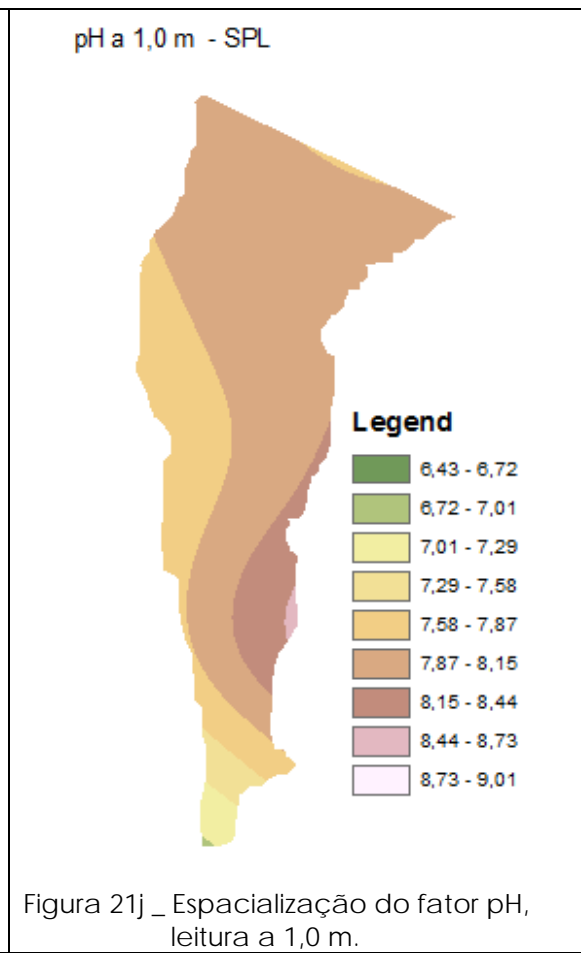
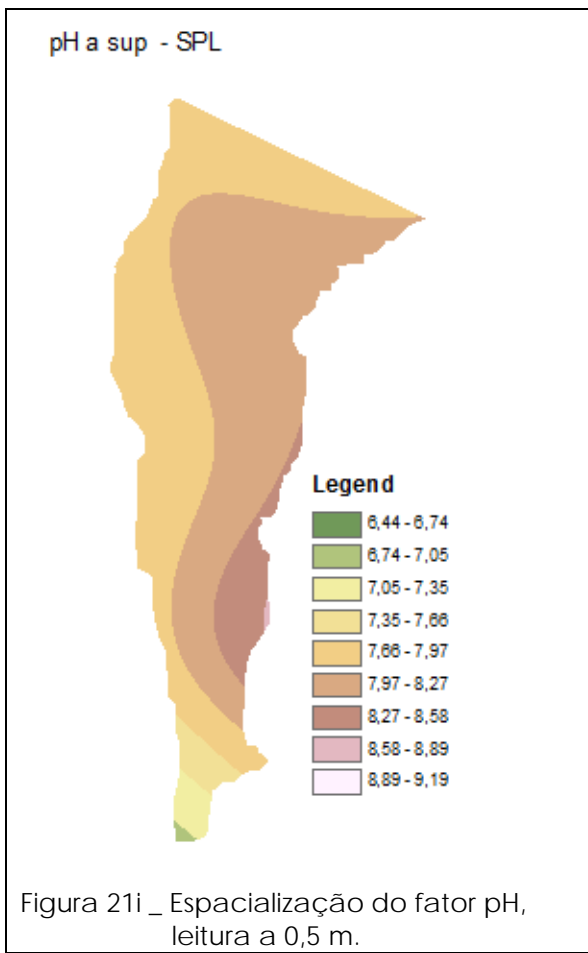
Fator	Temperatura (°C)				OD (mg/L)		Nitrato (µg/L)		pH							
	0,5		1		0,5		0,5		0,5		1		1,5		2,5	
Método	IDW	SPL	IDW	SPL	IDW	SPL	IDW	SPL	IDW	SPL	IDW	SPL	IDW	SPL	IDW	SPL
Erro Médio	<sup>+</sup> 0,01	<sup>+</sup> 0,04	<sup>+</sup> 0,1	<sup>-</sup> 0,1	<sup>-</sup> 0,01	<sup>-</sup> 0,03	<sup>+</sup> 0,2	<sup>-</sup> 4,5	<sup>-</sup> 0,03	<sup>-</sup> 0,1	<sup>+</sup> 0,06	<sup>-</sup> 0,10	<sup>+</sup> 0,1	<sup>+</sup> 0,06	<sup>+</sup> 0,2	<sup>-</sup> 0,1

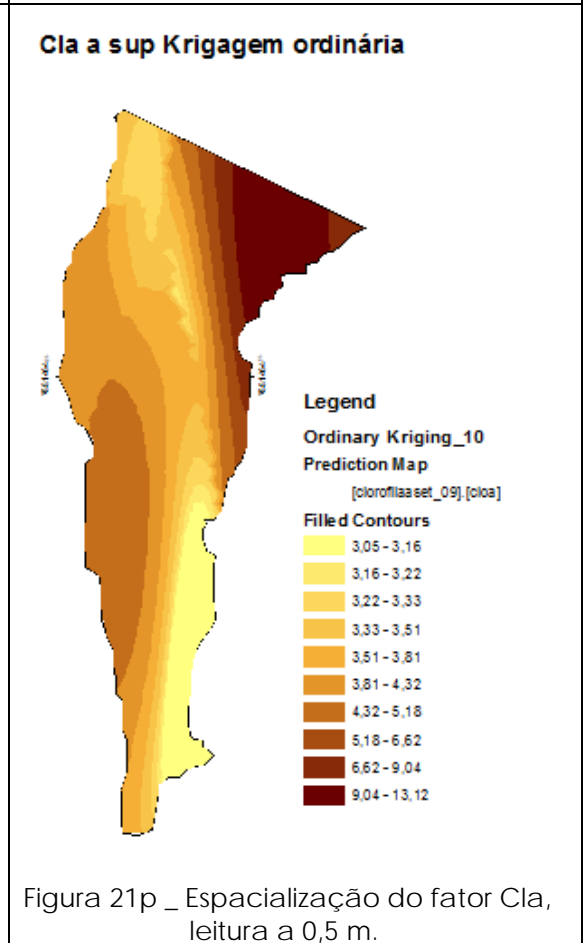
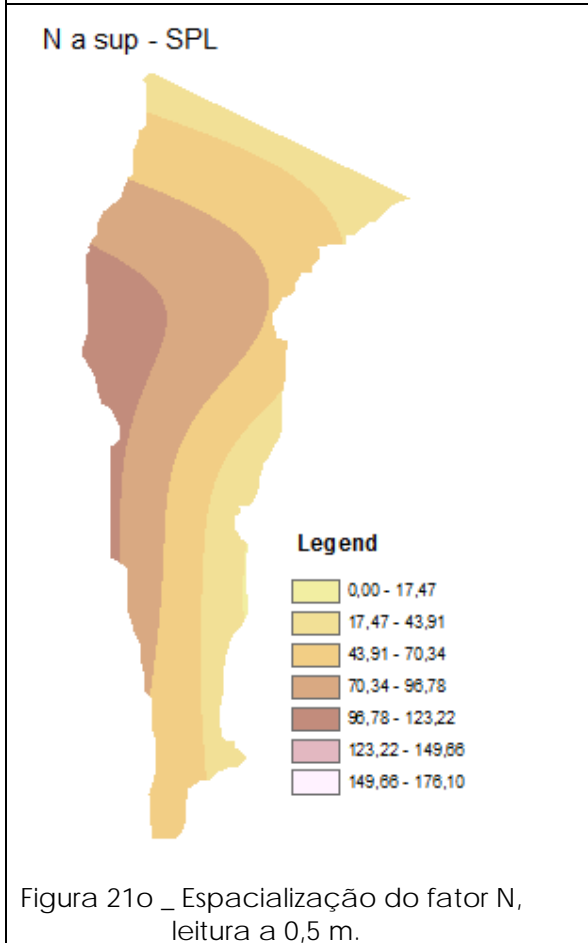
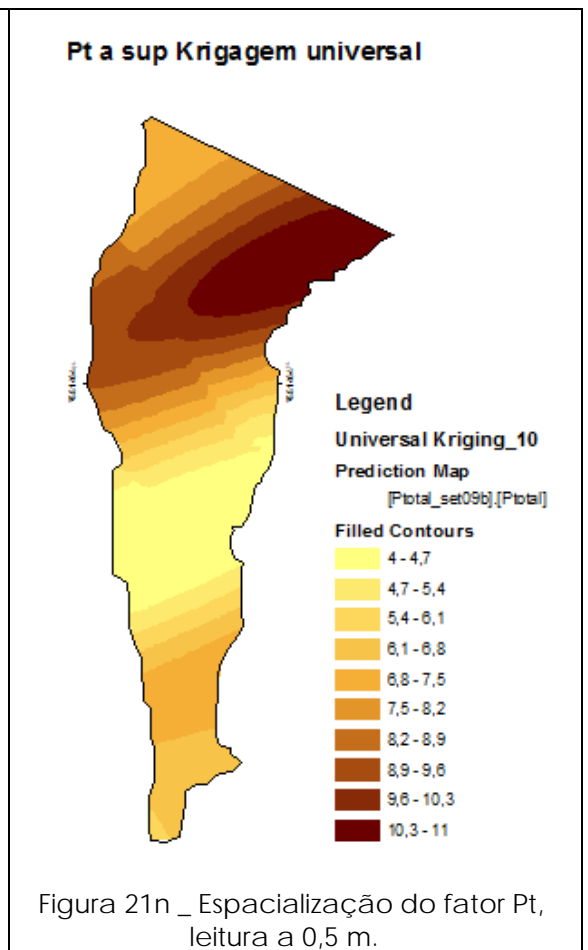
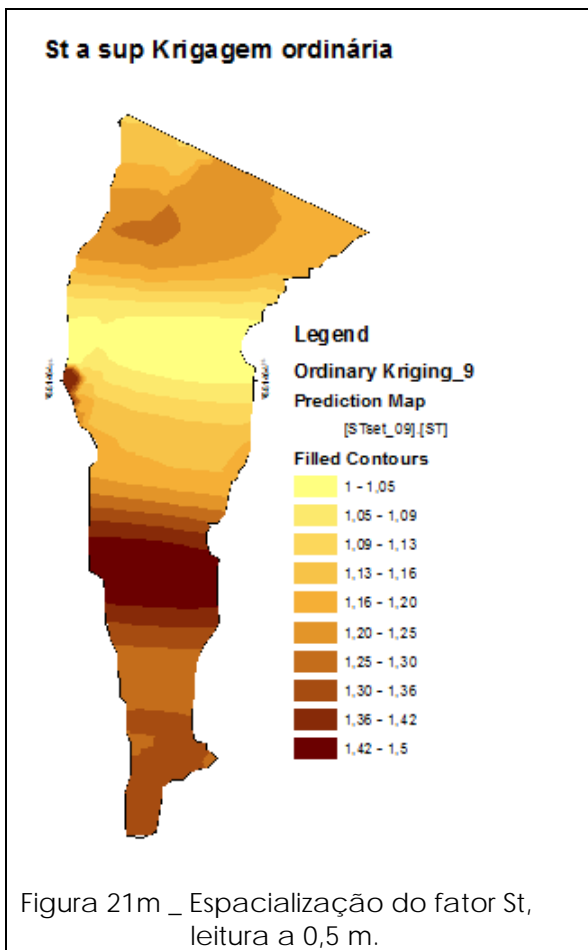
As diferenças obtidas com o interpolador IDW foram ligeiramente menores que o SPL, e ambos apresentaram erros médios relativamente baixos diante da variação destes parâmetros na área de estudo, onde a temperatura variou de 24,3 °C a 24,9 °C, o OD variou de 6,8 mg/L a 7,0 mg/L, o nitrato variou de 41,1 µg/L a 80,7 µg/L , o pH variou de 7,9 a 8,3. Estes erros obtidos demonstram que os métodos são adequados para a áreas de estudo.

Assim, optou-se pelo SPL, pois os mapas obtidos com o interpolador IDW apresentaram concentração maior nos locais dos pontos amostrais e redução acentuada entre estes. Esta configuração normalmente não é encontrada em corpos hídricos (represas), com exceção de locais que apresentem fontes pontuais de despejo de resíduos que contribuam para a elevação destes parâmetros, o que não é o caso (Figuras 21a a 21p).









## 6.4 Integração dos fatores qualitativos

Após a espacialização de cada camada de informação (fatores qualitativos), procedeu-se à elaboração do modelo para a pré-identificação das áreas no braço selecionado da represa de Nova Ponte.

Para a definição do modelo há sete fatores qualitativos (Figura 22) que compõem o modelo para a pré-identificação das áreas da represa adequadas à implantação de tanques-rede. Posteriormente, deverão ser estudos mais aprofundados como o modelo hidrodinâmico do reservatório, demais estudos limnológicos como do zooplâncton, fitoplâncton, os demais parâmetros direcionados pela resolução do CONAMA 357/2005, bem como estudos sócioeconômico e logísticos para os locais a fim de se constatar a adequabilidade final destas áreas.

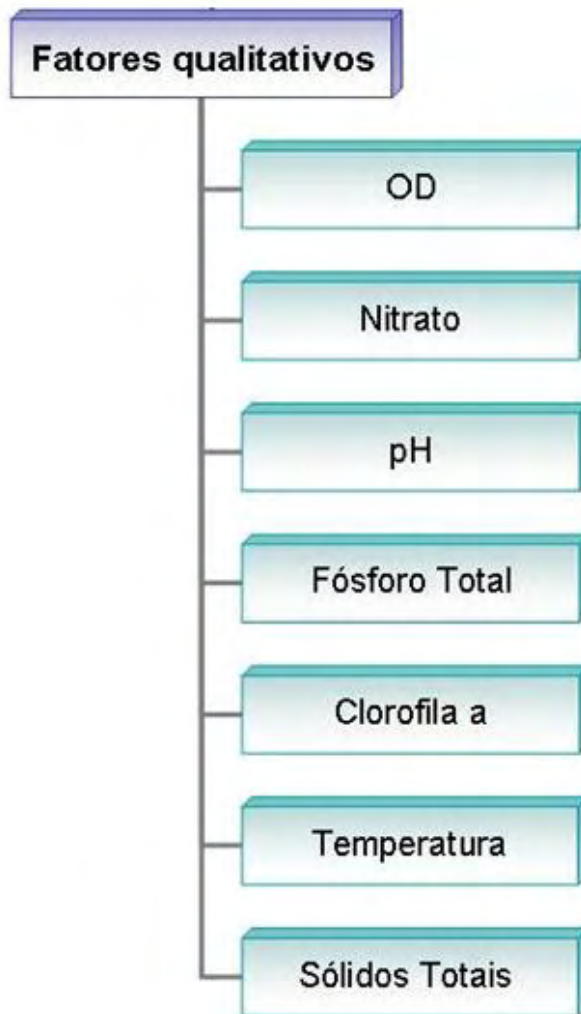


Figura 22 \_ Fatores qualitativos adotados.

Para os fatores qualitativos optou-se por utilizar as técnicas de decisão multicritério (MCE), pois para tais parâmetros há um gradiente de teores que varia no espaço e pelo fato de se poder atribuir pesos a estes de acordo com o grau de importância para a criação de peixes em tanques-rede.

Definidos e interpolados cada fator, podem-se empregar as técnicas MCE por meio dos seguintes passos: definição de pesos para cada fator, normalização e combinação dos fatores (ZAMBON, 2005).

## DEFINIÇÃO DOS PESOS

Para a definição dos pesos de cada fator qualitativo, foi adotado o método *AHP* \_ *Analytical Hierarchy Process*, proposto por Saaty (1986), sendo a comparação realizada por especialistas (*knowledge-driven*), conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação dos fatores qualitativos

	OD	Nitrato	pH	Fósforo total	Clorofila-a	Temperatura	Sólidos totais
OD	1,00	1,00	3,00	5,00	5,00	3,00	7,00
Nitrato	1,00	1,00	1,00	3,00	5,00	3,00	5,00
pH	0,33	1,00	1,00	2,00	4,00	3,00	5,00
Fósforo total	0,20	0,33	0,50	1,00	3,00	3,00	4,00
Clorofila -a	0,20	0,20	0,25	0,33	1,00	3,00	3,00
Temperatura	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00
Sólidos totais	0,14	0,20	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00

Foi avaliada a razão de consistência do modelo AHP, conforme apresentado por Alphonse (1997). Sendo obtido o valor de 0,08, inferior a 0,1, atestando que não houve inconsistência na atribuição dos pesos nos julgamentos realizados.

Os pesos foram obtidos por meio do cálculo do autovetor principal de cada matriz quadrada, como apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Pesos atribuídos aos fatores qualitativos

<b>Fatores</b>	<b>Pesos</b>
OD	0,309
Nitrato	0,229
pH	0,18
Fósforo total	0,114
Clorofila a	0,075
Temperatura	0,06
Sólidos totais	0,033
<b>Soma</b>	<b>1</b>

#### NORMALIZAÇÃO

Na normalização dos fatores foram empregadas as funções fuzzy no SIG IDRISI®, adotando-se a função sigmoïdal para os fatores, pois a interferência de cada um no nível de conforto para as espécies estudadas não se dá de forma linear. Como exemplo pode-se citar o efeito da temperatura, que, segundo Morales (1986), mantendo-se todos os fatores que interferem na atividade do peixe constantes, à medida que aumenta a temperatura, produz-se um aumento na atividade até um ponto limite, sendo o incremento descrito por uma curva sigmoïdal, conforme apresentado na Figura 23.

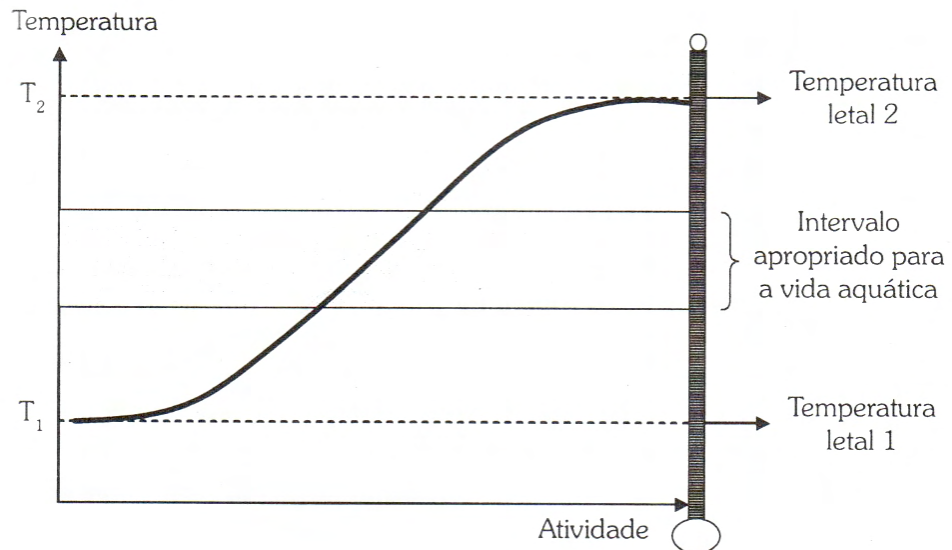


Figura 23 \_ Taxa de atividade do peixe em função da temperatura.

Fonte: MORALES, 1986.

Foram empregados dois tipos de funções sigmoidais: a monotômica decrescente (Figura 24 a) e a simétrica (Figura 24 b). Os limiares de inclusão das classes fuzzy (a, b, c e d) foram definidos para cada parâmetro, considerando-se cada espécie separadamente.

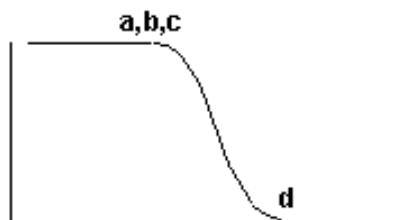


Figura 24 a –função sigmoide decrescente.

Fonte: EASTMAN, 1998.  
em que:

- a, b e c = limite superior
- d = limite superior máximo

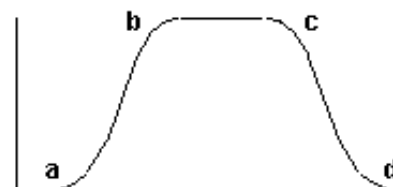


Figura 24 b – função sigmoide simétrica.

Fonte: EASTMAN, 1998.  
em que:

- a = limite inferior mínimo
- b = limite inferior
- c = limite superior
- d = limite superior máximo

Para o fator oxigênio dissolvido foi adotada a função sigmoide simétrica, com a faixa de conforto variando de 5 mg L<sup>-1</sup> para a tilápia e

piracanjuba (BARBOSA, 2008; ANDRADE, 1998; SHIMODA, 1998; FURTADO, 1995) e de 3 mg L<sup>-1</sup> para a espécie de lambari-rabo-vermelho (GARUTTI, 2003), até a saturação (limites inferior e superior respectivamente).

O limite inferior mínimo para este fator foi de 1,2 mg L<sup>-1</sup> para tilápia (MACEDO, 2007) e 0,3 mg L<sup>-1</sup> para as demais espécies (MACEDO, 2007), e o limite superior máximo foi de três vezes o teor da saturação, para as três espécies (PAVANELLI et al., 1998).

A fim de se obter o teor de saturação para a área de estudo, calculou-se a pressão atmosférica local, por meio da Equação 19 (NUNES et al., 2006), empregando-se a altitude do espelho d'água registrada pela CEMIG, do dia da coleta (812,22 m), obtendo-se uma pressão de 689,22 mmHg.

$$P_z = 760 \left( 1 - \frac{0,0065z}{288} \right)^{5,2568} \quad \text{Equação 19}$$

Sendo

P<sub>z</sub> = pressão atmosférica em uma dada altitude (mmHg); e

z = altitude (m).

A partir da pressão calculada foi possível obter o teor de oxigênio dissolvido corrigido, empregando-se a Equação 20 (ARANA, 2004), correspondente ao teor de saturação de 7,5 mgL<sup>-1</sup> para as condições locais no momento da coleta.

$$OD_c = OD_t \frac{P_o - P_w}{760 - P_w} \quad \text{Equação 20}$$

Em que

OD<sub>c</sub> \_ oxigênio dissolvido corrigido;

OD<sub>t</sub> \_ oxigênio dissolvido a 760 mmHg;

P<sub>o</sub> \_ pressão atmosférica local (mmHg); e

P<sub>w</sub> \_ pressão de vapor de água (mmHg).

Para este fator tem-se um limite inferior mínimo, abaixo do qual seria letal para as espécies, a possibilidade de teores superiores a este até o limite inferior, uma faixa entre o limite inferior e o superior (saturação), onde ter-se-ia o conforto para as espécies (máxima produção), e uma terceira faixa indo do limite superior até o limite superior máximo (supersaturação), pois entre estes últimos podem ocorrer problemas com o cultivo, podendo-se chegar à mortandade com a ocorrência de embolia.

Para o nitrato, adotou-se a função sigmoidal decrescente, sendo definido pela equipe do projeto o nível de 230 µg/L (limite superior), a fim de se assegurar que os teores de nitrito não ultrapassem 170 µg/L, que causariam alterações no comportamento de peixes.

Neste trabalho, adotou-se como limite superior máximo a concentração de 5,0 mg/L de nitrato, que, segundo Andrade (1998), é mortal para os peixes.

Para o fator pH, adotou-se a função sigmoidal simétrica. Os teores devem variar de 5 a 9 para a tilápia (BARBOSA, 2008), de 6,5 a 9 piracanjuba (ANDRADE, 1998; SHIMODA, 1998; MATOS, 2006) e de 5,5 a 8,5 para a espécie de lambari-rabo-vermelho (GARUTTI, 2003) (limites inferiores e superiores, respectivamente). Os limites inferiores mínimos e superiores máximos adotados neste trabalho para a tilápia foram de 4,5 e 10,5 (KUBITZA, 2000), e de 5 e 10 para as demais espécies (MACEDO, 2007).

Adotou-se a função sigmoidal simétrica para o fator temperatura, em que os limites inferiores e superiores devem variar de 24 a 28 °C para a tilápia e para a piracanjuba (VIEIRA (2003), FURTADO (1995) e WOYNAROVICH (1985)) e de 15 a 30 °C para a espécie de lambari-rabo-vermelho (GARUTTI, 2003). Os limites inferiores mínimos e superiores máximos adotados neste trabalho para a tilápia foram 14 °C e 38 °C (KUBITZA, 2000), e 10 °C e 32 °C para as demais espécies (MACEDO, 2007).

Para o fator sólidos totais, empregou-se a função sigmoidal decrescente, em que o limite superior para as três espécies foi de 500 mg L<sup>-1</sup> (CONAMA 357/2005) e superior máximo de 1000 mg L<sup>-1</sup>, que é a concentração máxima, normalmente encontrada em águas naturais (CERETTA, 2004; GARCIA in SILVEIRA, 2003).

O ideal seria adotar o teor máximo encontrado na represa, porém, não se dispõe de uma série histórica de monitoramento em condições que se assegure que os teores obtidos seriam provenientes de fatores naturais à bacia.

Para o fator clorofila, adotou-se a função sigmoidal decrescente para as três espécies, em que o limite superior foi 30 µg L<sup>-1</sup> (CONAMA 357/2005), e o limite superior máximo de 75 µg L<sup>-1</sup>, que corresponde ao limite de classificação como eutrófico, adotado pela OECD (TUNDISI, 1988).

Os limites superior e superior máximo do Fósforo total, adotando-se a função sigmoidal decrescente para as três espécies, foram os níveis recomendados pela Resolução CONAMA 357 (50 µg L<sup>-1</sup>) e pela CETESB (2006) (120 µg L<sup>-1</sup>, que corresponde ao limite de classificação como eutrófico).

Para a integração dos fatores qualitativos empregou-se o SIG Idrisi®, e utilizada a avaliação multicritério (*Multi Criteria Evaluation - MCE*) com o método da Combinação Linear Ponderada (WLC) para cada profundidade considerada.

Multiplicaram-se os fatores normalizados pelo seu peso correspondente (obtidos pelo método AHP) integrados por meio do método MCE-WLC no sig Idrisi. Adicionalmente foram multiplicados pelos fatores restritivos (valores 0 e 1), tendo-se como resultado um mapa de pré-identificação das áreas adequadas no braço escolhido para cada profundidade, com valores variando de "0" (classe totalmente inadequada) a "255" (classe extremamente adequada) (Figuras 25a a 25d).

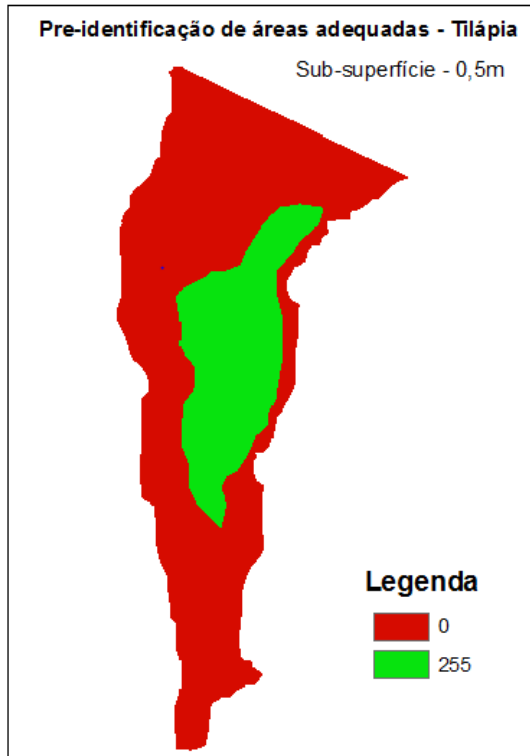


Figura 25a \_ Pré-identificação para tilápias a 0,5 m de profundidade.

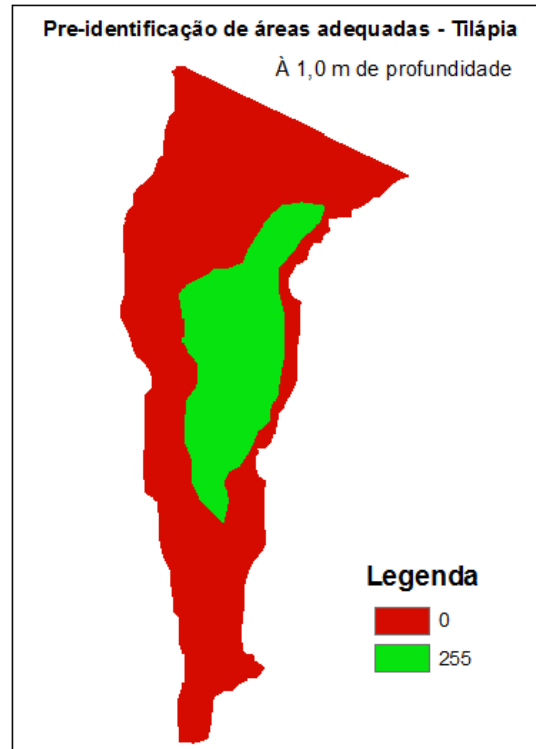


Figura 25b \_ Pré-identificação para tilápias a 1,0 m de profundidade.

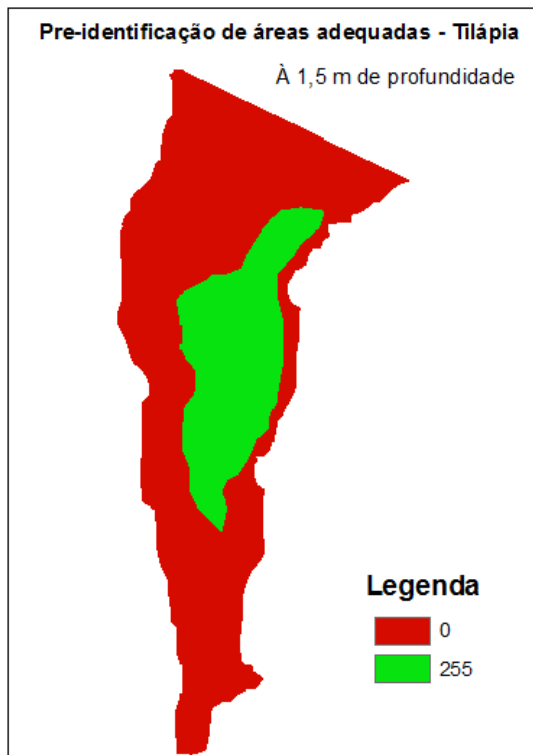


Figura 25c \_ Pré-identificação para tilápias a 1,5 m de profundidade.

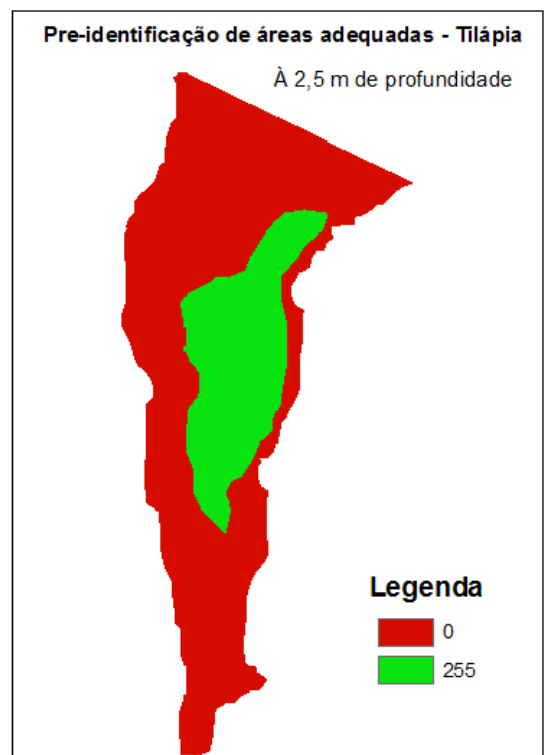


Figura 25d \_ Pré-identificação para tilápias a 2,5 m de profundidade.

Para a obtenção de um único mapa contendo o resultado final das análises os quatro mapas correspondentes às profundidades de 0,5 m, 1 m, 1,5 m e 2,5 m, foram submetidos novamente à análise MCE-WLC, sendo agora adotado o peso 0,25 para todos os mapas (mesmo grau de importância), obtendo-se assim o mapa final de pré-identificação das áreas adequadas para a tilápia (Figura 26).

No mapa de pré-identificação das áreas adequadas do braço selecionado, 25,34% delas foram classificadas como adequadas ao cultivo de tilápias em tanques-rede, correspondentes à área classificada com o valor 255 (em verde), conforme Figura 26.

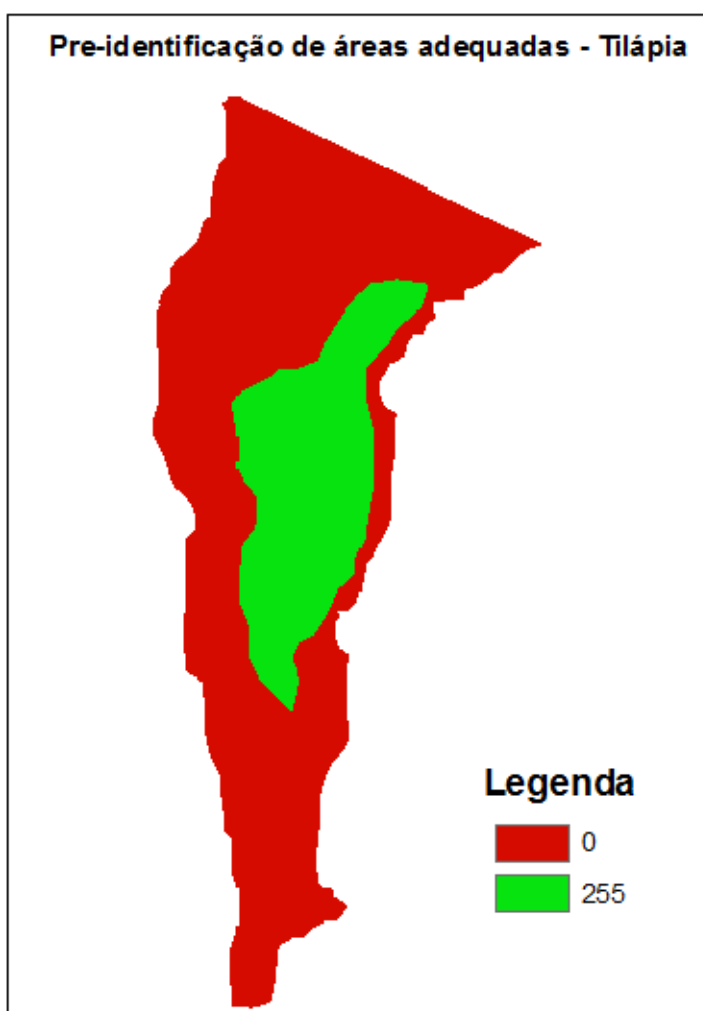


Figura 26 \_ Pré-identificação das áreas adequadas para a espécie tilápia.

Tanto para a piracanjuba como para o lambari-do-rabo-vermelho o resultado foi o mesmo para as quatro profundidades consideradas,

sendo o resultado final da pré-identificação para estas espécies apresentado nas Figuras 27 e 28.

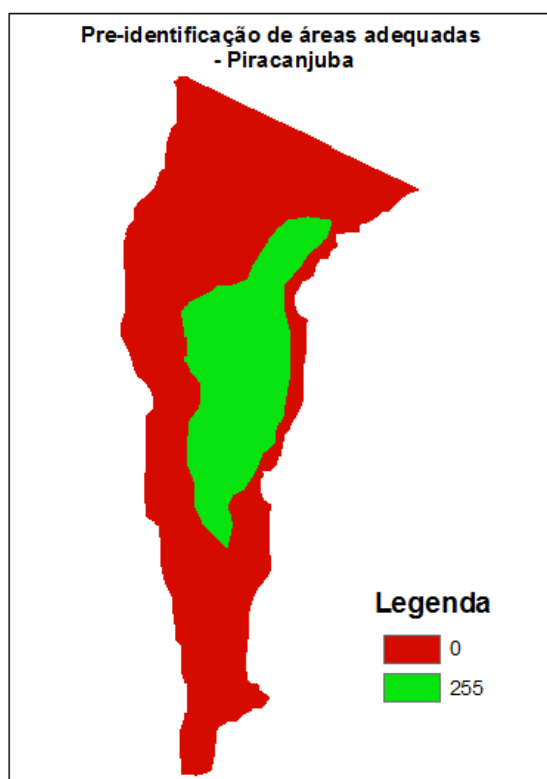


Figura 27 \_ Pré-identificação das áreas adequadas para a espécie piracanjuba.

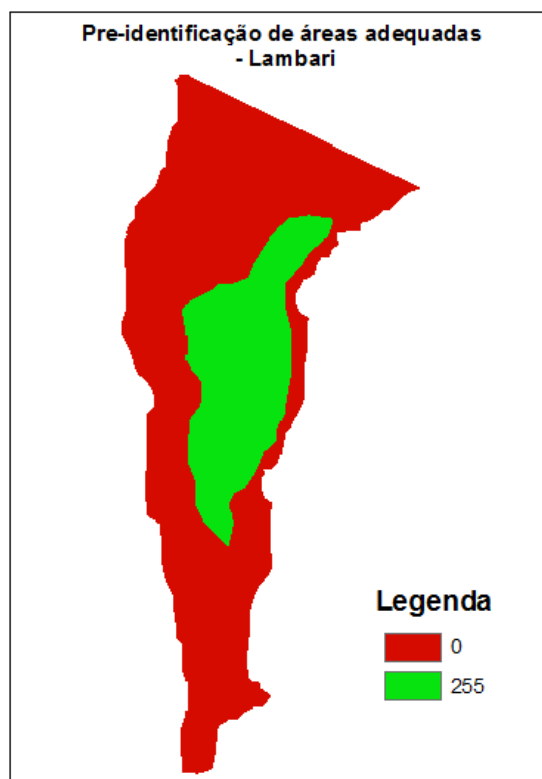


Figura 28 \_ Pré-identificação das áreas adequadas para a espécie lambari.

No braço adotado, a variabilidade de todos os fatores qualitativos, para as quatro profundidades adotadas, encontrava-se dentro dos limites de conforto para as três espécies, o que ocasionou a classificação de todo o braço como o valor 255. Assim, ao se proceder ao MCE-WLC, todas as áreas não excluídas pelos fatores restritivos foram classificadas como adequadas ao cultivo das espécies.

Este fato também justifica a opção de se proceder apenas ao WLC, pois a variação da ponderação ou do risco permitidos pelo OWA não acarretaria alterações no resultado encontrado.

Contudo, em represas onde a variação dos fatores é maior pode haver variações nos valores atribuídos a cada pixel, podendo ocorrer

áreas desde extremamente adequadas (255) a totalmente inadequadas (0), para uma mesma espécie. Além disso, regiões que são adequadas para algumas espécies podem não o ser para outras.

Ao se proceder à análise MCE-WLC, pela segunda vez com o mesmo peso para todas as profundidades, assegura-se que os locais com um grau de adequabilidade maior em todas as camadas seriam mantidos, bem como a variação desta adequabilidade ao longo de toda a área.

Os pixels com valores nulos correspondem aos locais excluídos pelos fatores restritivos.

A metodologia aplicada para o braço escolhido pode ser replicada para todas as áreas da represa, não excluídas pelos fatores restritivos, com o objetivo de se obter o mapa de pré-identificação de áreas adequadas para as espécies.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Segundo o monitoramento realizado pelo IGAM, pode-se concluir que o IQA das águas da represa se encontra entre bom e médio, ao longo dos anos, o que demonstra que há grandes possibilidades de se estabelecer nela o cultivo de peixes em tanques-rede, em relação à qualidade da água.

Ao avaliar a influência da precipitação na variação do volume da represa empregando uma defasagem de oito meses nos dados de precipitação das estações de monitoramento da ANA ao redor da represa, verificou-se um p-valor admissível e correlações positivas. Porém, analisando visualmente os gráficos de dispersão dos dados de volume e as precipitações de cada estação, pôde-se perceber que não há uma tendência clara nos dados, o que levou a se adotarem os registros mínimos e máximos da cota da represa, realizados pelo monitoramento do nível desta pela CEMIG, para a definição da área de deplecionamento da represa.

Os dois métodos de interpolação empregados para os parâmetros qualitativos, krigagem ordinária e universal, apresentaram resultados muito próximos para a validação cruzada, provavelmente em virtude do reduzido número de pontos amostrais.

Os erros de estimação, ou seja, as diferenças entre os valores observados e os valores estimados demonstram que os interpoladores IDW com ponderação 2 e a função de base radial – spline (SPL) foram satisfatórios para todos os parâmetros interpolados para a área de estudo, mesmo para fator nitrato, que apresenta maior variação espacial.

As diferenças obtidas com o interpolador IDW foram ligeiramente menores que o SPL, sendo que ambos apresentaram erros médios relativamente baixos diante da variação desses parâmetros na área

de estudo, demonstrando que ambos seriam adequados para a área de estudos.

O emprego da metodologia proposta também permitiu o registro de cada um dos fatores restritivos para cada área da represa. Este registro não é observado nas metodologias adotadas até então.

A metodologia proposta mostrou-se condizente com o fim a que se propõe, pois apenas com a integração dos fatores considerados restritivos conseguiu direcionar o levantamento dos fatores qualitativos para cerca de 24,75% da área da represa de Nova Ponte.

Permitiu também a definição de regiões no braço escolhido, em que a possibilidade de se obter maior desempenho da produção de peixes em tanques-rede seria maior, permitindo o direcionamento do monitoramento dos fatores qualitativos para estes locais.

Deve-se ressaltar que sendo o braço parte de um sistema maior, composto pela represa e os rios que a alimentam, estudos hidrodinâmicos devem ser aprofundados de maneira que o monitoramento do cultivo seja realizado de forma eficiente.

Neste trabalho, apenas os parâmetros indicativos da qualidade do meio foram avaliados. Portanto, recomenda-se que todos os propostos pela resolução CONAMA 357/2005 sejam atendidos no monitoramento dos locais destinados à implantação do cultivo em tanques-rede, seja de uma espécie exótica, seja nativa.

A pré-identificação das áreas foi baseada em uma coleta em setembro de 2009 correspondente à época de seca na região. Portanto, recomenda-se um monitoramento da área durante um ano hidrológico, de forma a acompanhar possíveis alterações nos fatores qualitativos, por exemplo a alteração da concentração dos sólidos totais no período chuvoso.

É de grande importância que se defina a capacidade de suporte de cada braço indicado, pois esta balizará a sustentabilidade financeira e ambiental do cultivo no local.

Outro ponto muito importante é o monitoramento dos fatores avaliados, tanto os restritivos como os qualitativos, pois a alteração de qualquer um desses fatores pode implicar alteração dos locais adequados à implantação do cultivo.

Porém, sempre que possível, recomenda-se coletar um número superior a 30 pontos amostrais, segundo proposto por Landim (2003), para que se possa empregar a krigagem quando houver dependência espacial, visto que esta busca assegurar que um erro máximo de estimativa não seja excedido, e avalia os erros estimados, estabelecendo-se o grau de segurança em previsões e padrões ótimos de amostragem.

A literatura não apresenta muitos estudos que definem os limites dos parâmetros utilizados para a escolha dos locais em ecossistemas similares, que, muitas vezes, são determinados em viveiros de pisciculturas com condições diferentes das encontradas nas represas. Esta lacuna deverá ser sanada com o direcionamento de pesquisas com as espécies em condições similares, a fim de se buscar a sustentabilidade do empreendimento.

## 8. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. R.; SHIMODA, E.; e OKANO, W. Y. (1998). Limnologia aplicada à piscicultura. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias – CCTA. Universidade Estadual do Norte Fluminense. 24 p.
- ALPHONCE, C.B. (1997). Application of the analytic hierarchy process in agriculture in developing countries. *Agricultural Systems*. v. 53. p.97-112.
- ARANA, L. V. (2004). Princípios químicos de qualidade da água em Aquicultura: uma revisão para peixes e camarões. Tradução Marlene Alano Coelho. 2ª ed.. Florianópolis, UFSC. 231 p.
- BORBA, M. R.; FRACALOSSI, D. M.; PEZZATO, L. E.; MENOYO, D.; BAUTISTA, J. M. (2003). Growth, lipogenesis and body composition of piracanjuba (*Brycon orbignyanus*) fingerlings fed different dietary protein and lipid concentrations. *Aquatic Living Resources*, 16: 362-369.
- BARBOSA, A. C. A. (2008). Circuito de tecnologias adaptadas para a agricultura familiar, 4. Natal: EMPARN, p. 24.
- BARROS, M. A.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T. (2007). Processo analítico hierárquico na identificação de áreas favoráveis ao agroecossistema cafeeiro em escala municipal. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília. v. 42. n.12. p. 1769-1777.
- BALDISSEROTTO, B.; ZANIBONI FILHO, E.; RADÜNZ NETO, J.; VIEIRA, V., BAUERMANN, L.; EMANUELLI, T.; KUBOTA, E. H. (2004). Aprimoramento da criação de jundiá, *Rhamdia quelen*, e dourado, *Salminus brasiliensis*. Acesso: <http://www.canalciencia.ibict.br> em 10/11/2008.
- BOZANO, G. L. N. (1998). Avaliação do desempenho da Tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus* (L.) em gaiolas de pequeno volume.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 40 p.

CAMARGO, E. C. G., MONTEIRO, A. M. V., FELGUEIRAS, C. A., FUKS, S. D. (2008). Integração de geoestatística e sistemas de informação geográfica: uma necessidade. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F & KONOPKA, A. E. (1994). Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58 : 1501-1511.

CARDOSO, L. E.; FERREIRA, R. M. A. (2005). Cultivo de peixes em tanques-rede: desafios e oportunidades para um desenvolvimento sustentável. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG. Belo Horizonte – MG. 104 p.

CECCARELLI, P.S.; SENHORINI, J.A.; VOLPATO, G. (2000). Dicas em Piscicultura. Botucatu: Santana. 247 p.

CEMIG. Acesso: [www.cemig.com.br](http://www.cemig.com.br) em 03/2007.

CERETTA, M. C. (2004). Avaliação dos aspectos da qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena – Município de Santa Maria – RS. Dissertação de mestrado Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 146 p.

CETESB (2006). Águas – Rios e Reservatórios. Acesso <http://www.cetesb.sp.gov.br> em 05/2006.

COCHE, A. G. (1982). Cage culture of tilapias. In: Pullin R.S. V. and Lowe-McConnel, R. H.. Biology and culture of tilapias. Manila: ICLARM. P. 205 – 246.

CODEVASF (2008). Manual de Criação de Peixes em Tanques-rede. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF. 34 p.

- CONAMA (2005). Resolução N° 357. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 23p.
- CORDEIRO, J. P.; BARBOSA, C. C. F.; CÂMARA, G. (2007). Cap. 8 - Álgebra de Campos e Objetos, in Análise Espacial de Dados Geográficos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- DHN, (2008). Diretoria de Hidrografia e Navegação. Acesso: <https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html> em 19/08/2008.
- DUMOND-NETO, R.; PELLI, A.; COSTA, C. L.; FREITAS, A. E.; BARBOSA, N. D. C. (1997). Reprodução induzida da piracanjuba (*Brycon orbignyanus Valenciennes, 1903*) durante a primeira maturação sexual, cultivada em cativeiro na Estação de Pesquisa e Desenvolvimento Ambiental de Volta Grande – CEMIG. B. Inst. Pesca, 24 (especial). 105 – 107 p.
- EASTMAN, J.R. (1998). Idrisi for Windows: Introdução e Exercícios Tutoriais. Editores da versão em português Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre, UFRGS. Centro de Recursos Idrisi.
- ESCALA, M. I. S. (1998). Aplicação de técnica *fuzzy* em SIG como alternativa para o zoneamento ecológico econômico (ZEE). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 26 p.
- ESRI, 2008. Acesso: <http://www.esri.com/> em 25/10/2008.
- ESTEVES, F. A. (1998). Fundamentos de limnologia. Interciências, Rio de Janeiro, 606 p.
- FEIDEN, A.; HAYASHI, C. (1999). Desenvolvimento de alevinos de piracanjuba (*Brycon orbignyanus Valenciennes, 1849*), em tanques experimentais com diferentes adubações orgânicas. In: Encontro Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 36. 1999, Porto Alegre. UFRGS, p. 26-29.
- FERNANDES, J. B. K. (1993). Consorciação Tilápias do Nilo/ Suínos em baias suspensas. Dissertação de mestrado Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 71p.

- FURTADO, J. F. R. (1995). Piscicultura: uma alternativa rentável. Guaíba: Agropecuária. Guaíba, RS. 180 p.
- GARUTTI, V. (2003). Piscicultura ecológica. São Paulo, Universidade Estadual Paulista. 332p.
- GANECO, L. N.; NAKAGHI, L. S. O. (2003). Morfologia da micrópila e da superfície dos ovócitos de piracanjuba, *Brycon orbignyanus* (Osteichthyes, Characidae), sob microscopia eletrônica de Varredura. *Acta Scientiarum: Biological Sciences*, 25 (11): 227-231.
- GOOVAERST, P. (1997). Geostatistical for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 481 p.
- HIDROWEB. Acesso: <http://www.hidroweb.com/> em 11/2008.
- IGAM (2004). Relatório: Monitoramento das águas superficiais na Bacia do Paranaíba em 2003. Acesso: <http://www.igam.mg.gov.br/> em 02/2009.
- IGAM (2005). Relatório: Monitoramento das águas superficiais na Bacia do Paranaíba em 2004. Acesso: <http://www.igam.mg.gov.br/> em 02/2009.
- IGAM (2006). Relatório: Monitoramento das águas superficiais na Bacia do Paranaíba em 2005. Acesso: <http://www.igam.mg.gov.br/> em 02/2009.
- KUBITZA, F. (2000). Tilápias: Qualidade da água, sistemas de cultivo, planejamento da produção, manejo nutricional e alimentar e sanidade. *Panorama da Aquicultura*. Vol 10, N 59, maio/junho 2000. pág 44 a 53.
- LANDIM, P. M. B. (2003). Análise estatística de dados geológicos. São Paulo. Editora UNESP. 2 ed. Ver. E ampl. 253 p.
- LANDIM, P. M. B. (2006). Sobre Geoestatística e mapas. *Terraedidática*, 2(1): 19-33. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>.

- MACEDO, J. A. B. (2007). *Águas & Águas*. Belo Horizonte. 3ª edição. Editoração Jorge Macedo. 1043 p.
- MACIEL JUNIOR, A. (2006). Efeitos da temperatura no desenvolvimento e na morfometria de tilápia *Oreochromis niloticus*, de Linhagem Tailandesa. Tese apresentada a Universidade Federal de Viçosa. Pos-Graduação em Zootecnia, 69 p.
- MAINARDES PINTO, C. S. R.; MERCANTE, C.T. (2003). Avaliação de variáveis limnológicas e suas relações com uma floração de Euglenaceae pigmentada em viveiro povoado com tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus* Linnaeus), São Paulo, Brasil. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*. Maringá, v. 25, no 2, p. 323-328.
- MATOS, A. T. (1994). Qualidade do meio físico ambiental. Caderno didático 34 Viçosa, MG, Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. 420 p.
- MATOS, A. T. (2006). Matéria orgânica no solo. Roteiro de aula prática ENG 525 (Qualidade do Meio Físico Ambiental). Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.
- MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (2007). *Geomática – Modelos e aplicações ambientais*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica.
- MENESES, J. (2008). Criação de Peixes em Tanques-Rede. Acesso: <http://www.jundiai.com.br/abrappesq/materia1.htm>. em 07/08/2008.
- MURGAS, L. D. S.; MILIORINI, A. B.; FRANCISCATTO, R. T.; SANTIS, A. G. O. (2003). Avaliação espermática pós-congelamento em piracanjuba (*Brycon orbignyianus* Valenciennes, 1849). *Revista Brasileira de Zootecnia*, 32 (6): 1810-1814 (supl.2).
- MURGAS, L. D. S.; MILIORINI, A. B.; FRANCISCATTO, R. T.; MARIA, A. N. (2004). Viabilidade espermática do sêmen de piracanjuba (*Brycon*

- orbignyanus) resfriado a 4 °C. Revista Brasileira de Zootecnia, 33 (6): 1361-1265.
- MORALES, J. (1986). Acuicultura marina animal. Madrid: Mundi Prensa, 670p.
- NORMAM 11/2007. Procedimentos para solicitação de parecer para realização de obras sob, sobre e às margens das águas jurisdicionais brasileiras. Acesso: <https://www.dpc.mar.mil.br> em 11/03/2008.
- NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. (2006). Especificação de um Sistema Computacional Integrado de Controle de Incêndios Florestais. Floresta, Curitiba, PR, v. 36, n. 2, mai./ago.
- PAVANELLI, G. C.; EIRAS, J. C.; TAKEMOTO, R. M. (1998). "Doenças de peixes: profilaxia, diagnóstico e tratamento". Maringá: EDUEM, 264p.
- PORTO, L. L.; BRANCO, S.M.; CLEARY, R. W.; COIMBRA, R. M.; EIGER, S.; LUCA, S. J.; NOGUEIRA, V. P. Q. e PORTO, M. F. A. (1991). Hidrologia Ambiental. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora da Universidade de São Paulo, SP.
- PEARSON, T.H.; GOWEN, R.J. Impact of caged farming on the marine environment. In: OLIVER, P.; COLLERAN, E. (Ed.) (1990). Interaction between aquaculture and environment. Dublin: The National Trust for Ireland. p. 13.
- PULATSÜ (2003), IN ZANIBONI FILHO, E.; NUÑER, A. P. O.; GUERESCHI, R. M.; SILVA, S.H. (2005). Cultivo de peixes em tanques-rede e impactos ambientais. In: Cultivo de peixes em tanques-rede: desafios e oportunidades para um desenvolvimento sustentável. EPAMIG. Belo Horizonte, 104 p.
- RITCHER, C. A. & NETTO, J. M. A. (1998). Tratamento de água. São Paulo. 332 p.
- SAATY, T.L. (1986). Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. Management Science, v.32, p.841-855.

- SANTOS, A. C. (2000). Noções de Hidroquímica. In. FEITOSA, F. A . C.; MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM: LABHID-UFPE. cap.5, p. 81-108.
- SEIXAS FILHO, J. T. (1998). Anatomia funcional comparativa e sistemas enzimáticos de Teleostei (Pisces) de água doce com hábitos alimentares diferentes. Viçosa: UFV, 1998. Tese (Doutorado em Zootecnia) Universidade Federal de Viçosa, 189 p.
- SHIMODA, E., AMDRADE, D. R. (1998). Piscicultura: monitoramento e práticas de controle da qualidade da água. Boletim técnico, Universidade Estadual do Norte Fluminense, v. 3, nº 3, Abril. p.24.
- SILVA, N. A. (2007a). Caracterização de impactos gerados pela piscicultura na qualidade da água: estudo de caso na bacia do rio Cuiabá/MT. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT.
- SILVA, R. M. (2007b). Introdução ao geoprocessamento – conceitos, técnicas e aplicações. Novo Hamburgo: Feevale, 176 p.
- SILVA, V. K., FERREIRA, M. W., LOGATO, P. V. R. (1994). Qualidade da água na Piscicultura. Boletim de Extensão, Universidade Federal de Lavras.
- SILVEIRA, A. A. (2003). Remoção de algas da água da lagoa do Peri através de filtração direta descendente com pré-filtração mecânica em micropeneiras. Dissertação Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 117 p.
- SIPAÚBA-TAVARES, L.H. (1994). Limnologia aplicada à Aquicultura. Boletim Técnico FUNEP, São Paulo, 1: 1-72.
- SOARES, A. (2000). Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. Lisboa: IST Press – Instituto Superior Técnico. 206 p.
- TUNDISI, J.G. (1988). Impactos Ecológicos da Construção de Represas, Aspectos Específicos e Problemas de Manejo. J.G. Tundisi (Ed.),

Limnologia e Manejo de Represas. Série Monografias em Limnologia. EESC – USP/CRHEA/ACIEP v. I, Tomo 1.

VIEIRA, J. S., GOMIERO, J. S. G., DIONÍZIO, M. A., LOGATO, P. V. R. (2003). Aspectos Gerais da Piscicultura. Boletim de Extensão - 04, Universidade Federal de Lavras. 28 p.

VIEIRA, S. R. (2000). Geoestatística em Estudos de Variabilidade Espacial do Solo. In Tópicos em Ciência do Solo, v. 1, p. 1 – 54.

WERNECK, M. S., FRANCESCHINELLI, E. V., TAMEIRÃO-NETO, E. (2000). Mudanças na florística e estrutura de uma floresta decídua durante um período de quatro anos (1994-1998), na região do Triângulo Mineiro, MG. Revista Brasileira de Botânica vol.23 nº.4. São Paulo.

WOYNAROVICH, E. (1985). Manual de Piscicultura – Tradução Marcelo José de Melo. CODEVASF/MINTER. Brasília, DF. 71 p.

YANCEY, D. R.; MENEZES, J. R. R. (1982). Manual de Criação de Peixes. Fundação CARGILL. 110 p.

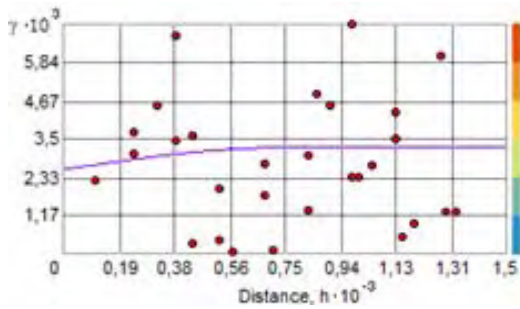
ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. (2005). Análise de Decisão Multicritério na localização de Usinas Termoelétricas Utilizando SIG. Pesquisa Operacional, v.25, n.2, p.183-199.

ZANIBONI FILHO, E.; NUÑER, A. P. O.; GUERESCHI, R. M.; SILVA, S.H. (2005). Cultivo de peixes em tanques-rede e impactos ambientais. In: Cultivo de peixes em tanques-rede: desafios e oportunidades para um desenvolvimento sustentável. EPAMIG. Belo Horizonte, 104p.

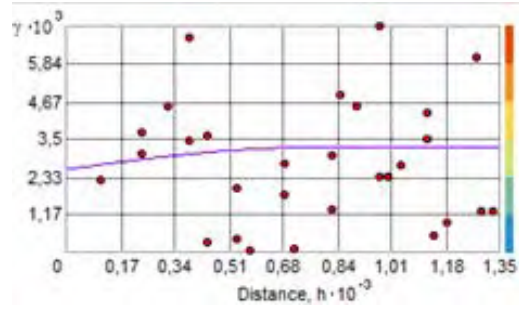
# Anexo I

Semivariogramas

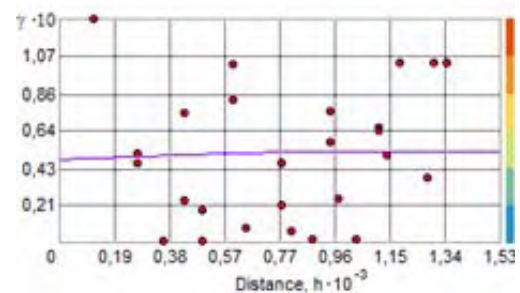
Semivariogramas ajustados para cada fator qualitativo nas profundidades consideradas.



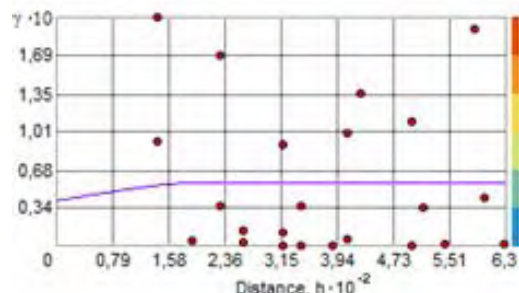
T-0,5 m  
Krigagem Ordinária



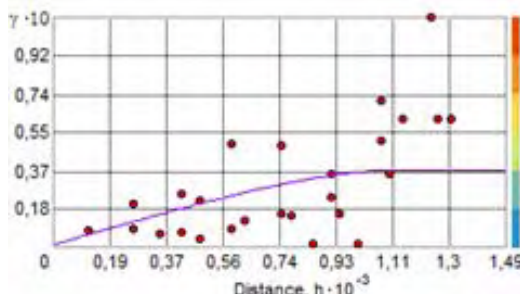
T-0,5 m  
Krigagem Universal



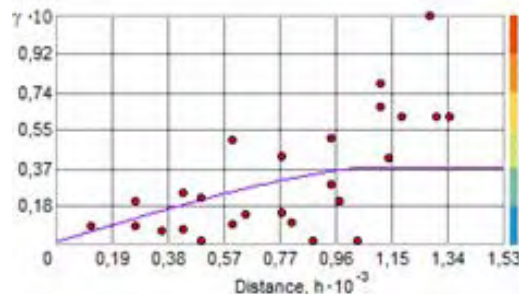
T-1,0 m  
Krigagem Ordinária



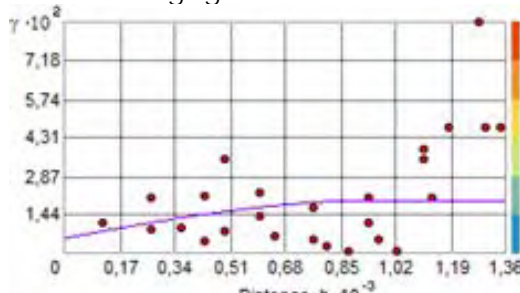
T-1,0 m  
Krigagem Universal



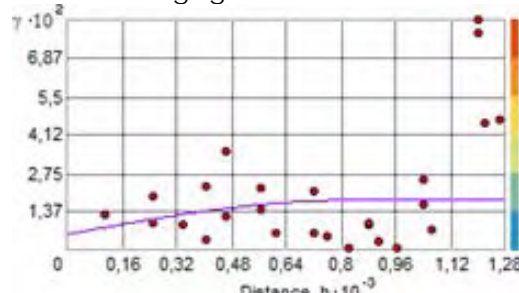
T-1,5 m  
Krigagem Ordinária



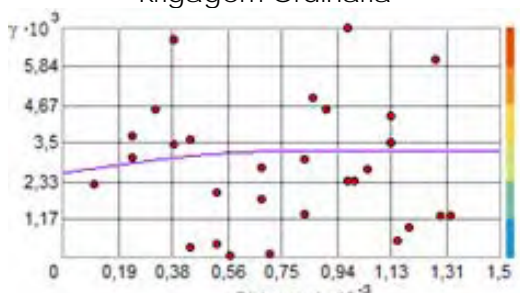
T-1,5 m  
Krigagem Universal



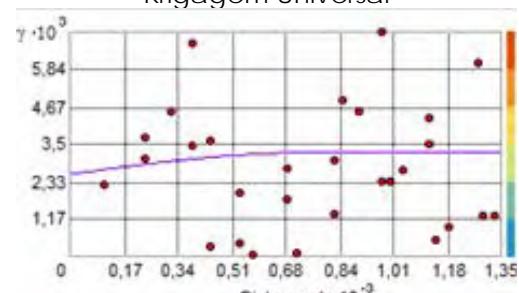
T-2,5 m  
Krigagem Ordinária



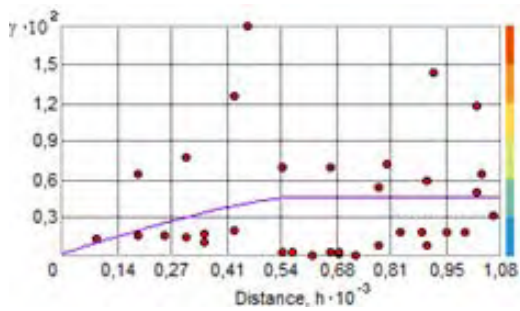
T-2,5 m  
Krigagem Universal



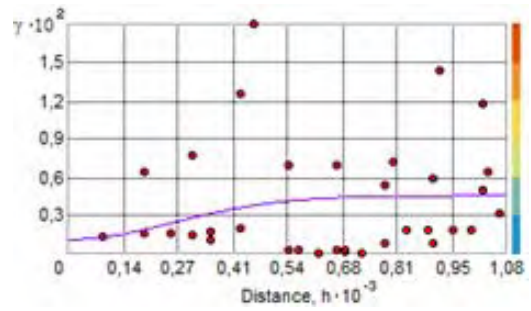
OD-0,5m  
Krigagem Ordinária



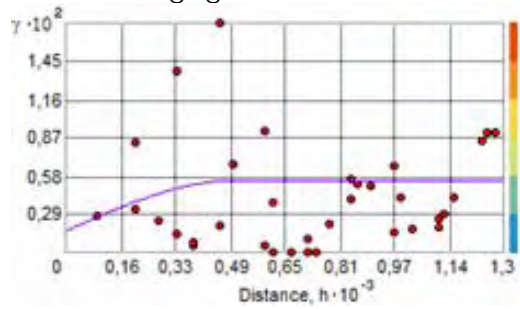
OD-0,5m  
Krigagem Universal



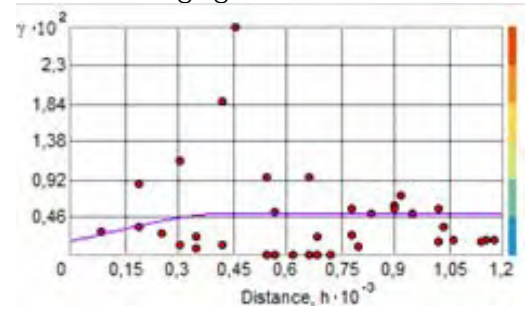
OD-1,0m  
Krigagem Ordinária



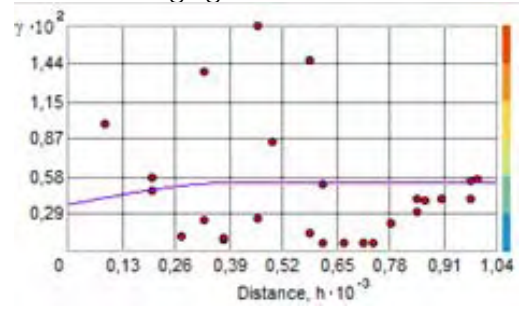
OD-1,0m  
Krigagem Universal



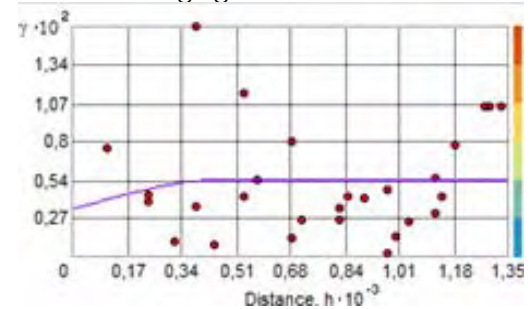
OD-1,5m  
Krigagem Ordinária



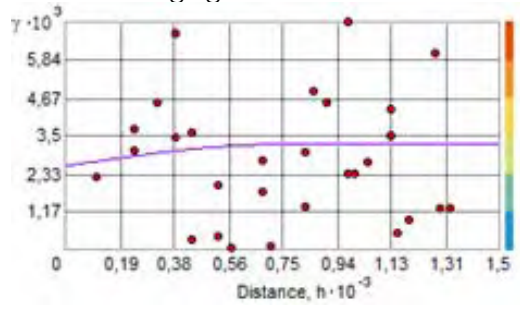
OD-1,5m  
Krigagem Universal



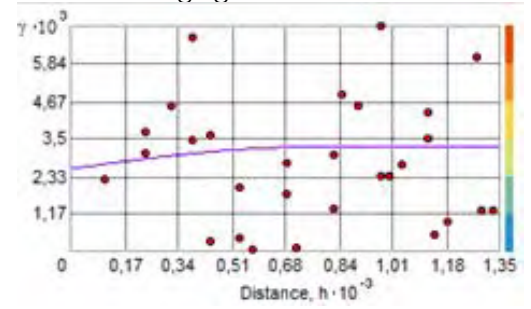
OD-2,5m  
Krigagem Ordinária



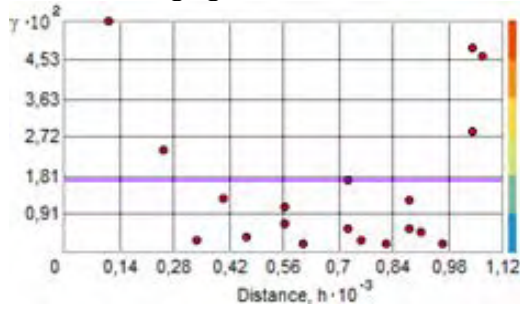
OD-2,5m  
Krigagem Universal



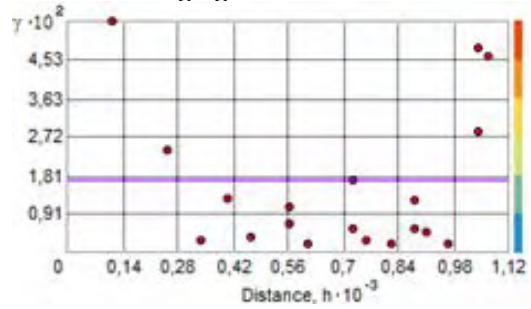
pH-0,5m  
Krigagem Ordinária



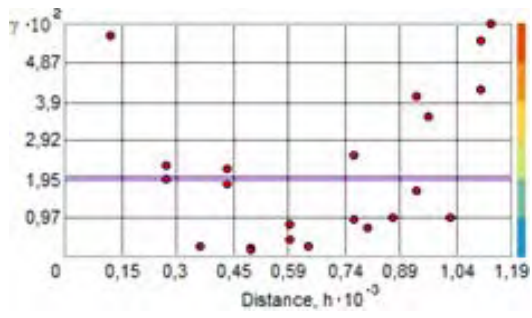
pH-0,5m  
Krigagem Universal



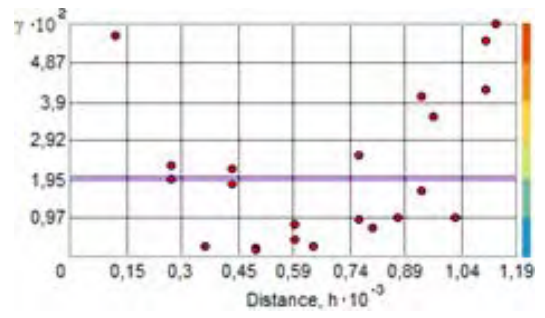
pH-1,0m  
Krigagem Ordinária



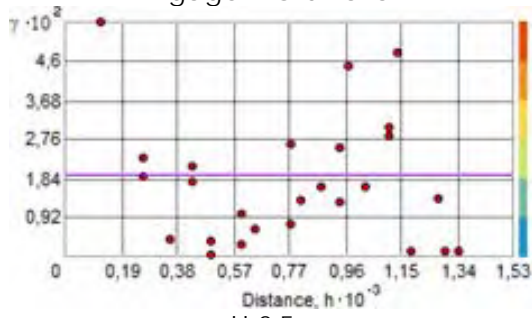
pH-1,0m  
Krigagem Universal



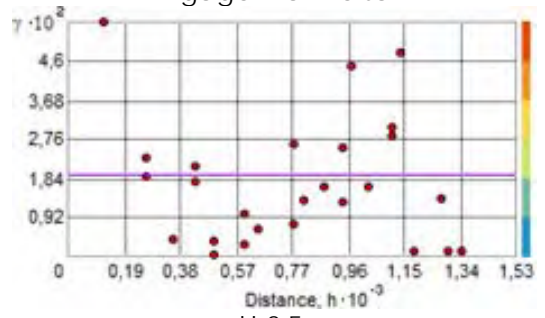
pH-1,5m  
Krigagem Ordinária



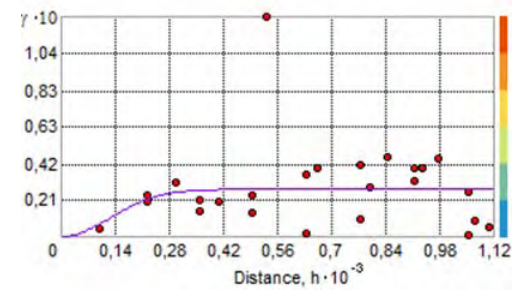
pH-1,5m  
Krigagem Universal



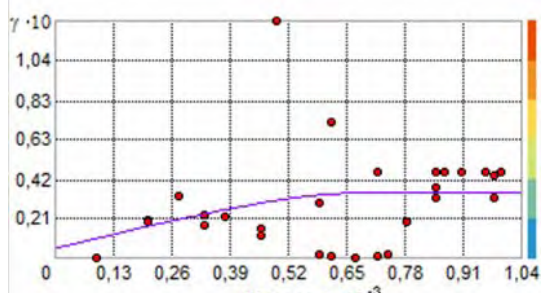
pH-2,5m  
Krigagem Ordinária



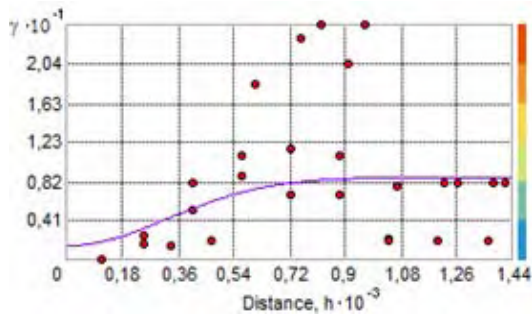
pH-2,5m  
Krigagem Universal



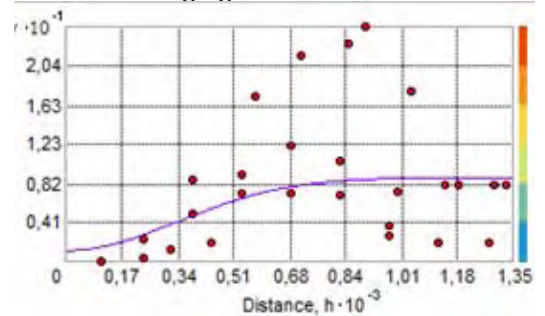
St-0,5m  
Krigagem Ordinária



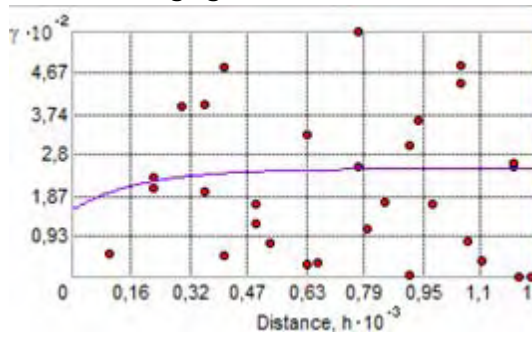
St-0,5m  
Krigagem Universal



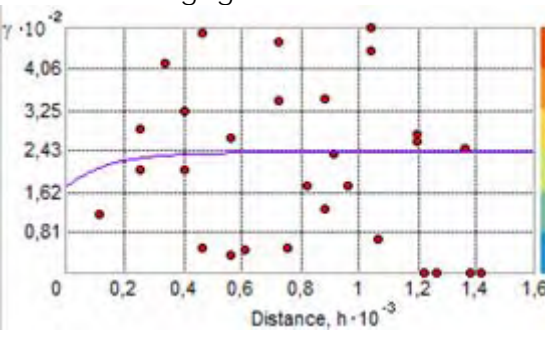
Pt-0,5m  
Krigagem Ordinária



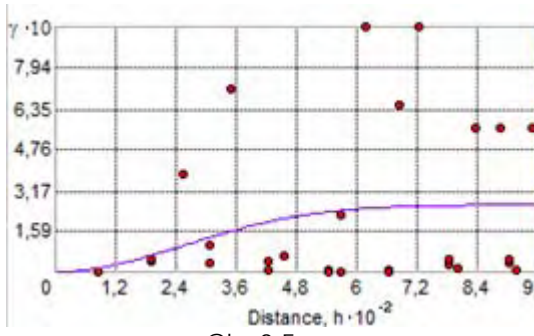
Pt-0,5m  
Krigagem Universal



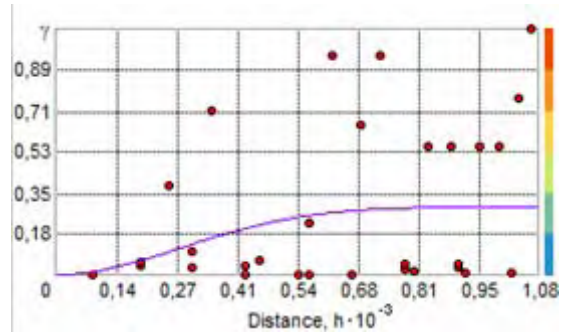
N-0,5 m  
Krigagem Ordinária



N-0,5 m  
Krigagem Universal



Cla-0,5m  
Krigagem Ordinária

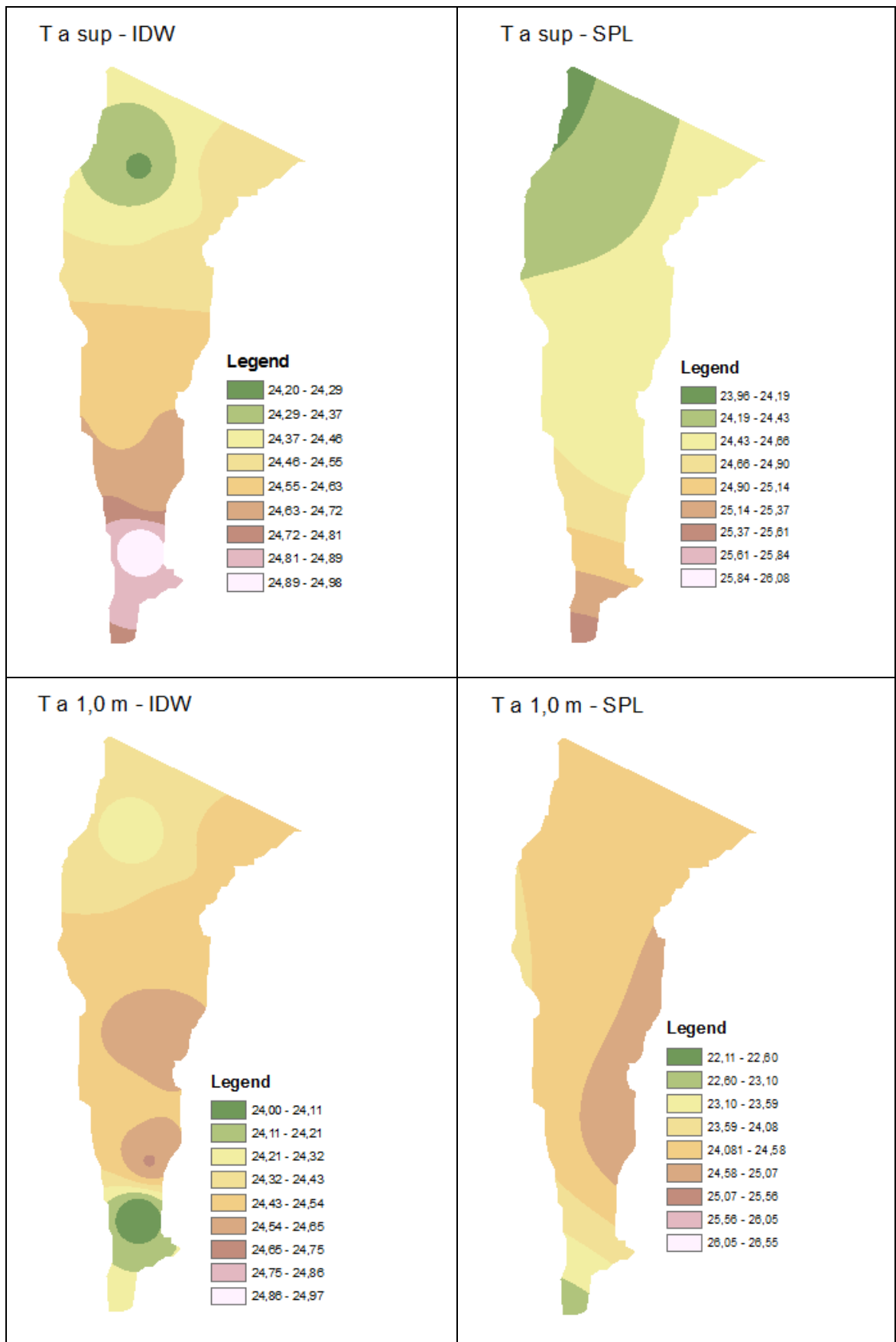


Cla-0,5m  
Krigagem Universal

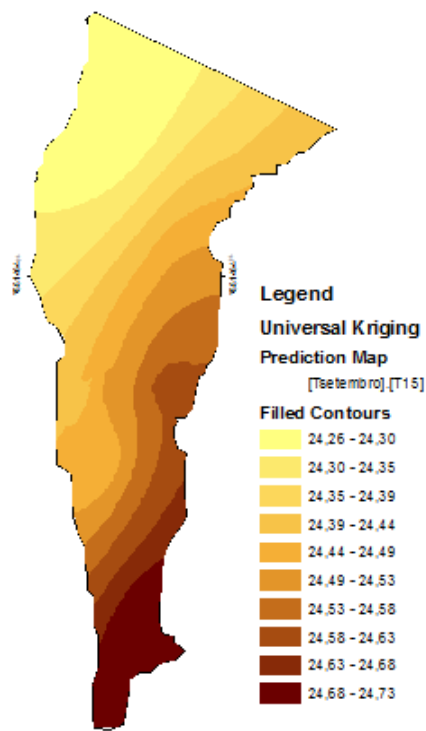
## **Anexo II**

Mapas interpolados

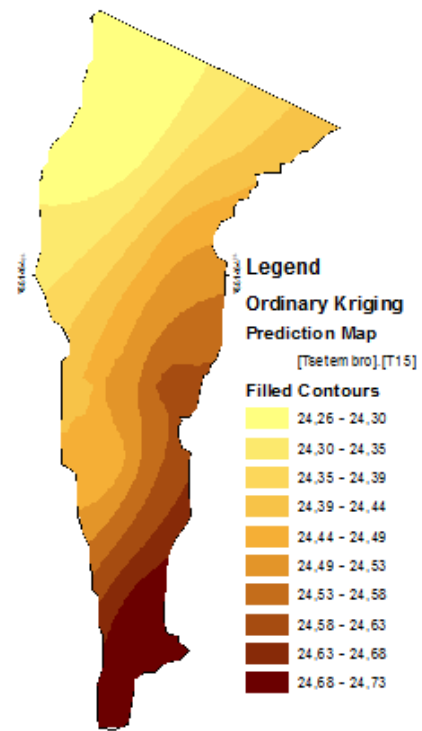
Mapas interpolados para cada fator qualitativo nas profundidades consideradas.



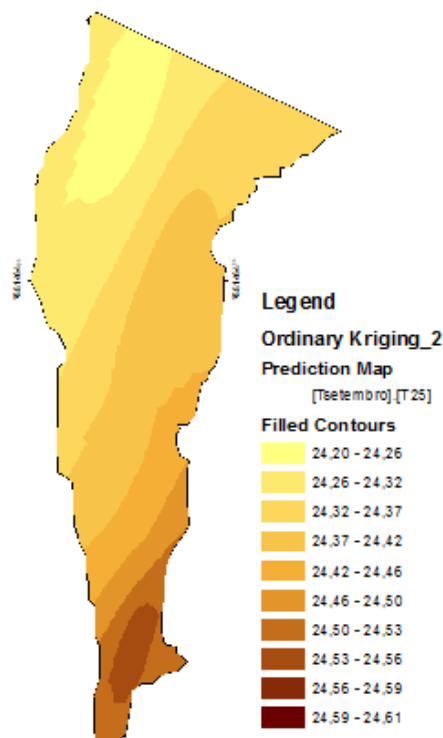
T a 1,5 m - Krigagem universal



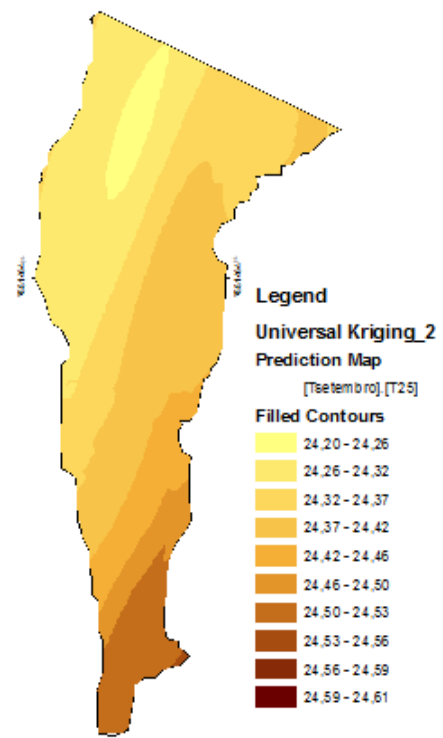
T a 1,5 m - Krigagem ordinária



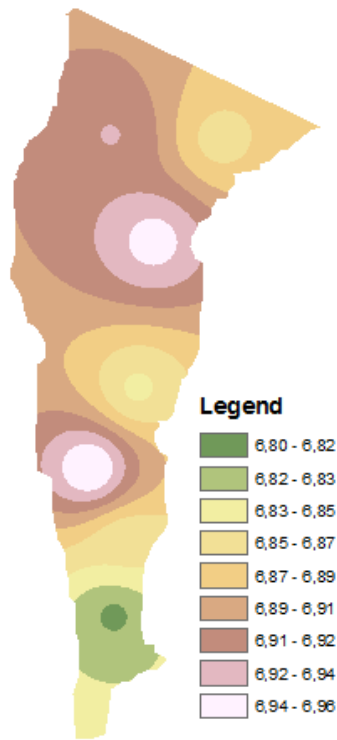
T a 2,5 m - Krigagem ordinária



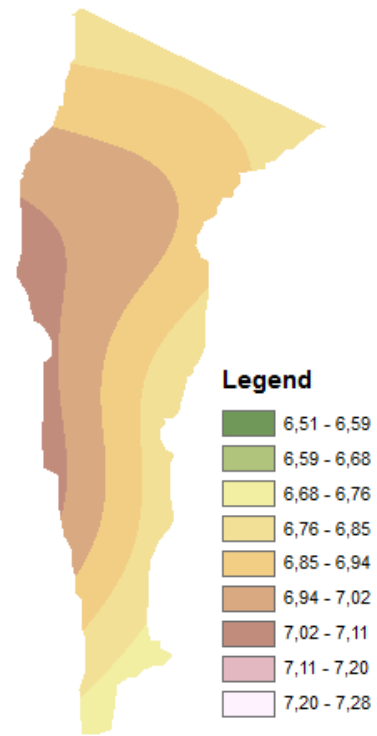
T a 2,5 m - Krigagem universal



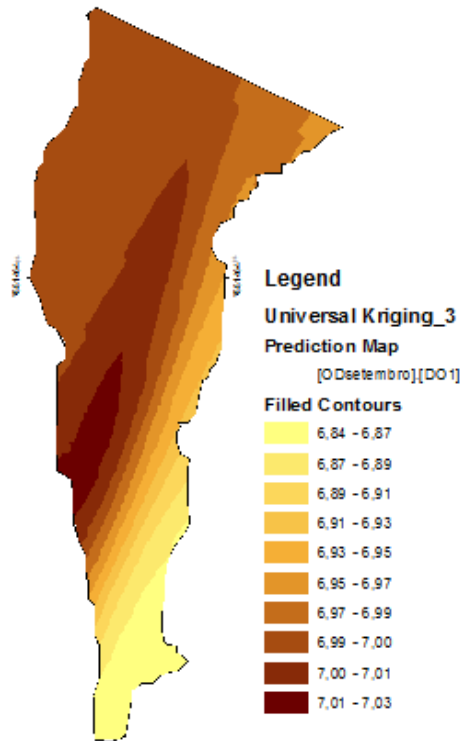
OD a sup - IDW



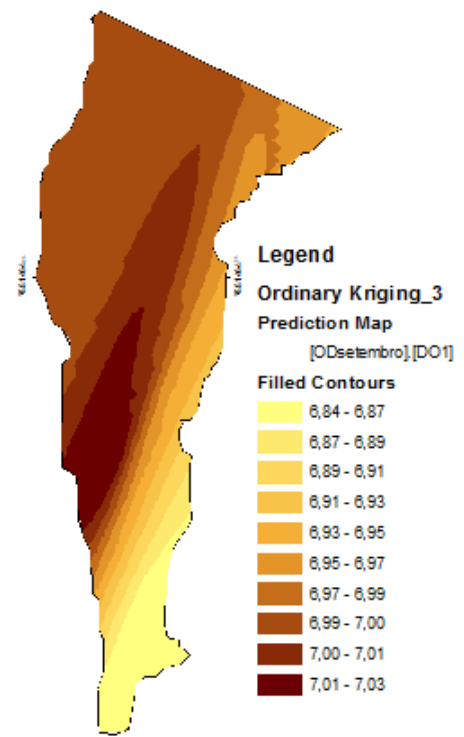
OD a sup - SPL



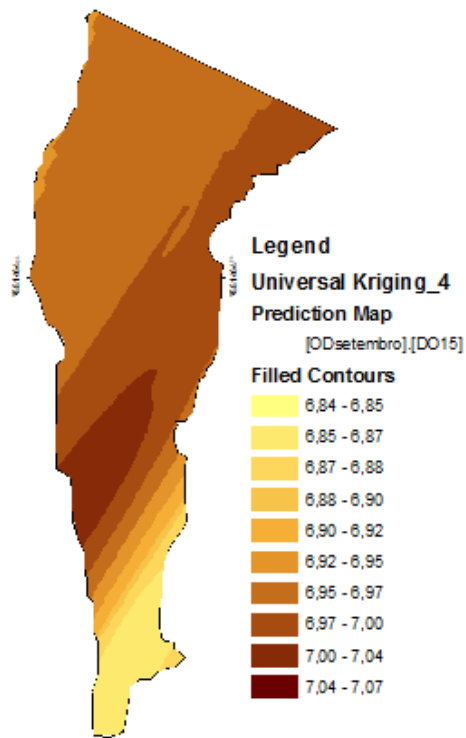
OD a 1,0 m - Krigagem universal



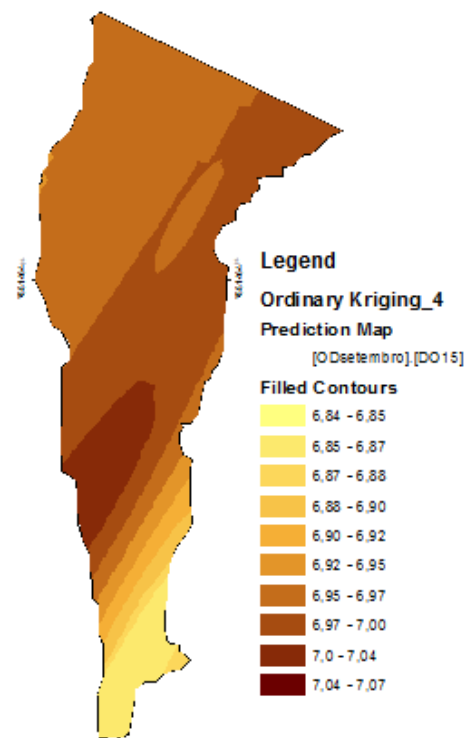
OD a 1,0 m - Krigagem ordinária



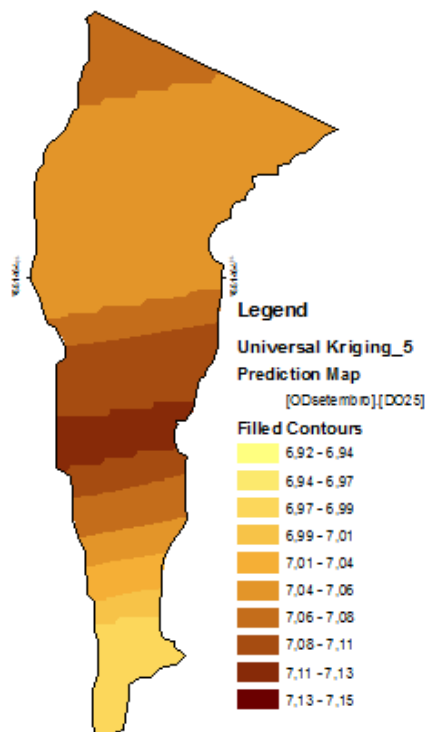
OD a 1,5 m - Krigagem universal



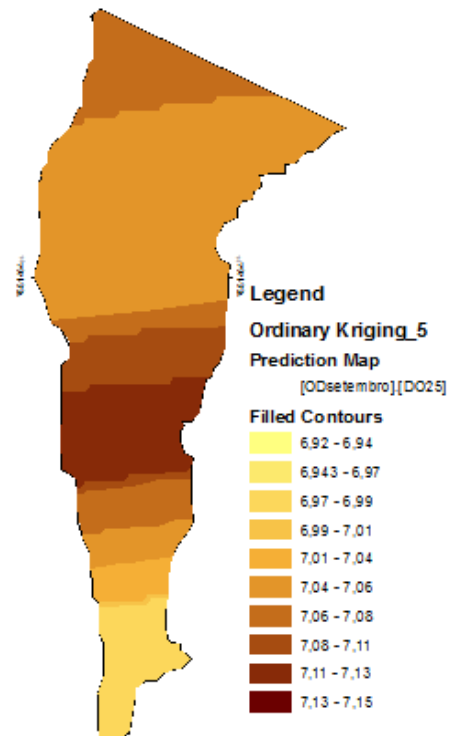
OD a 1,5 m - Krigagem ordinária



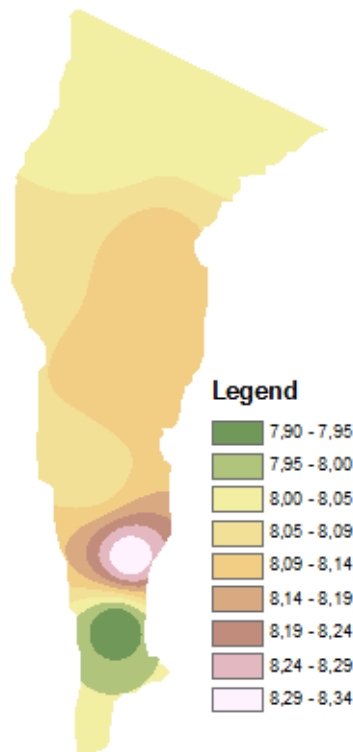
OD a 2,5 m - Krigagem universal



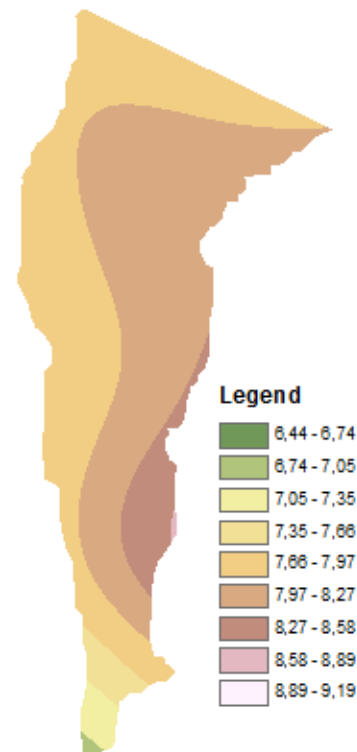
OD a 2,5 m - Krigagem ordinária



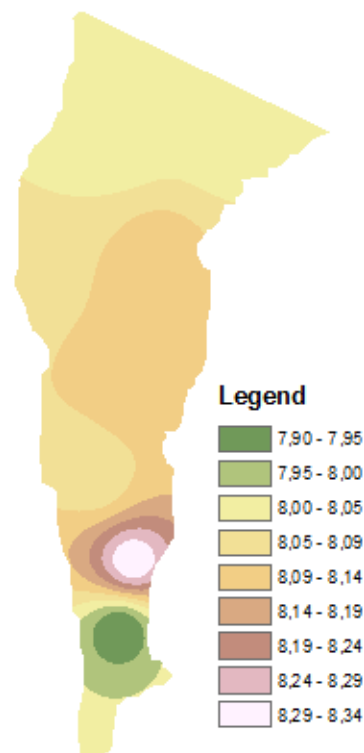
pH a sup - IDW



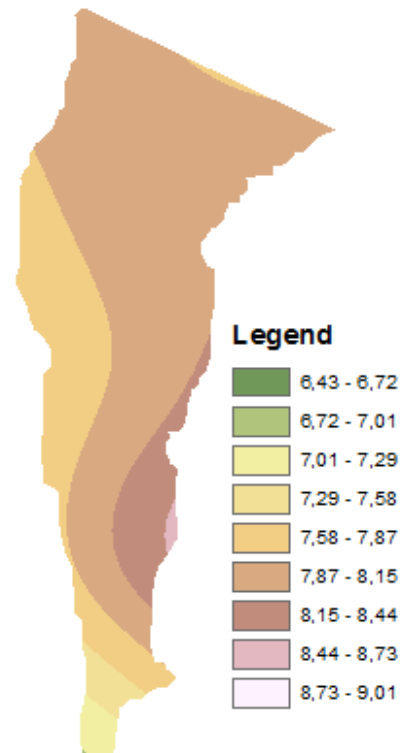
pH a sup - SPL



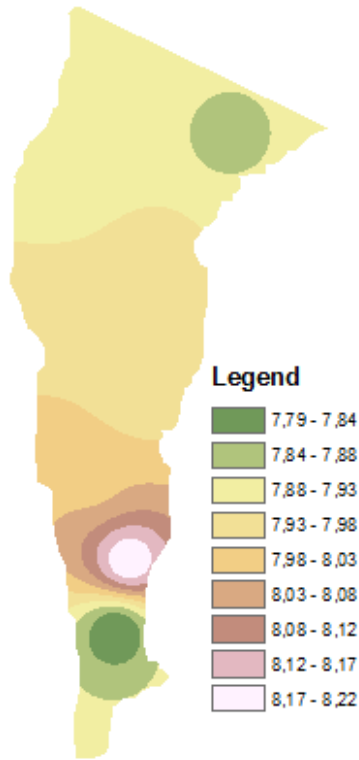
pH a 1,0 m - IDW



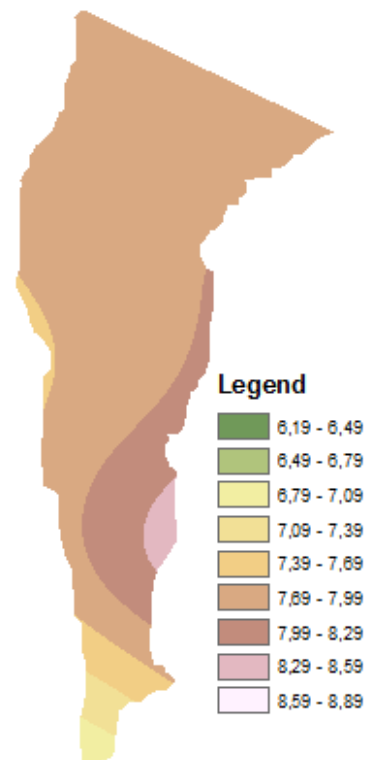
pH a 1,0 m - SPL



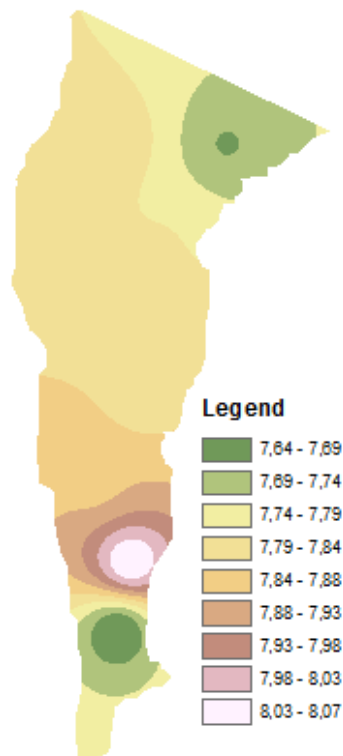
pH a 1,5 m - IDW



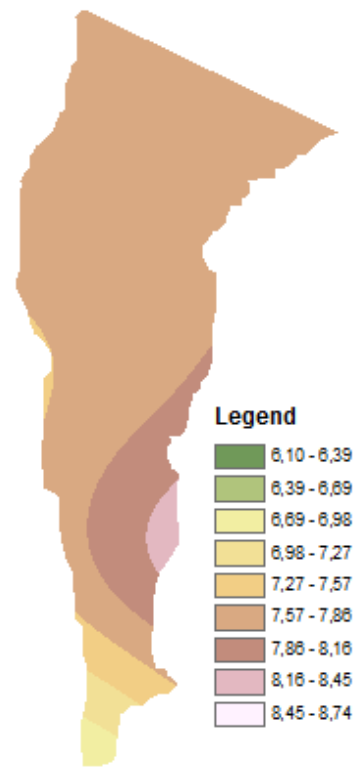
pH a 1,5 m - SPL



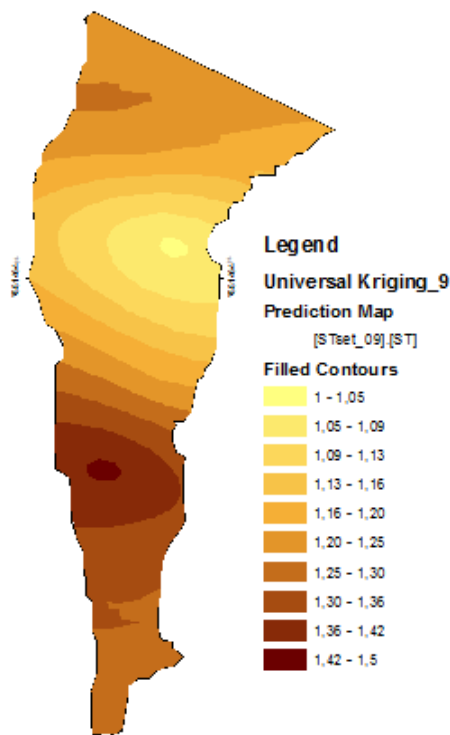
pH a 2,5 m - IDW



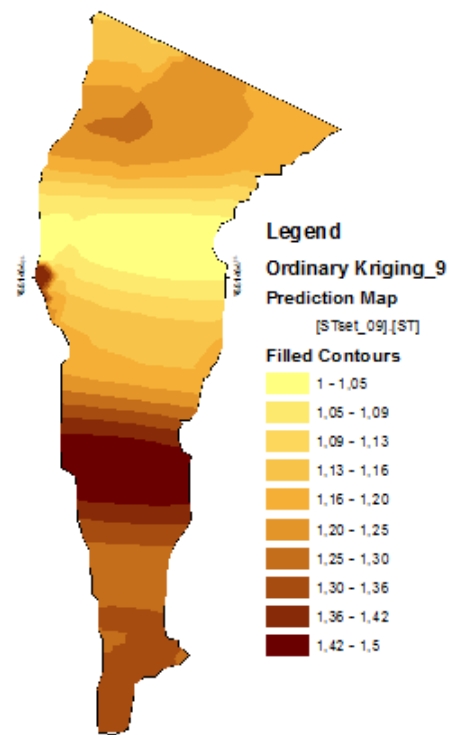
pH a 2,5 m - SPL



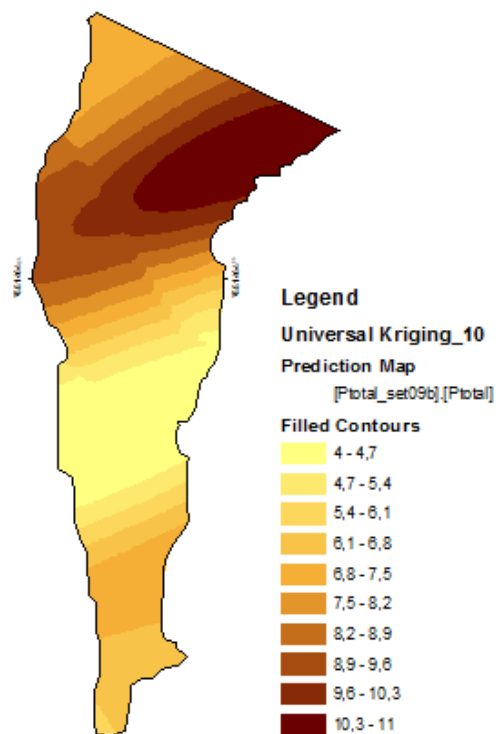
St a sup Krigagem universal



St a sup Krigagem ordinária



Pt a sup Krigagem universal



Pt a sup Krigagem ordinária

