

Geoestatística aplicada ao estudo da relação entre profundidade e turbidez no Lago Grande de Curuai/PA

Aline Biasoli Trentin¹
Gisieli Kramer¹
Cláudio Clemente Faria Barbosa²
Conrado de Moraes Rudorff²
Waterloo Pereira Filho¹
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo²

¹ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Departamento de Geociências
Av. Roraima, 1000, Santa Maria – RS, 97105-970, Brasil
{gisaufsm, abtrentin}@yahoo.com.br; waterloopf@gmail.com

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cmr, evlyn}@ltid.inpe.br; claudio@dpi.inpe.br

Abstract: The geostatistic methods are one of the most powerful tools to the spatial analysis in environments of Geographic Information System (SIG). The objective of this work was to evaluate the spatial behavior of the water turbidity variable correlating it with the bathymetric data in a part of the of the Curuai Lake (PA) plain. In the methodology it was used the scatter diagram showing the correlation between the bathymetric and turbidity data in the periods of flood and low waters. It was done the modeling between the bathymetric data in both periods through the triangular chart in the Spring System 4.3.2. The low waters corresponding data was corrected due to the low water level. In the Ordinary Kriging Geostatistics processed in the Spring System, it was analyzed the turbidity applying the descriptive statistics and the adjusted and validated unidirectional semivariogram of the samples (exponential model in both periods). The calculated scatter diagram for the turbidity and deepness data showed a low correlation among the data. In the low waters period the correlation is smaller and in this period the lake deepness is bigger (7 meters). The comparison of the turbidity Spatial Kriging data with the land surface modeling of the deepness one made evident that the relation between them is small during the low waters period. In the period of high deepness, the turbidity suffered no influence creating a homogenous surface.

Palavras-chave: SIG, kriging, bathymetric, correlation, SIG, krigeagem, batimetria, correlação.

1. Introdução

Os sistemas de informação geográfica (SIG) auxiliam compreender a distribuição de dados espaciais, além de permitir a aquisição de medidas de propriedades do espaço e de suas relações. Os SIGs possibilitam o tratamento computacional de dados geográficos georreferenciados. Podem ser utilizados para produção de mapas, para a análise espacial de fenômenos e com banco de dados com funções de armazenamento e recuperação das informações espaciais. Além disso, os SIGs oferecem mecanismos variados e essenciais para combinar informações (Câmara & Medeiros, 1998).

Neste enfoque, modelos inferenciais vêm sendo propostos para a modelagem de dados geográficos. A *krigeagem* é um destes modelos, e sua base conceitual está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, abordada por Matheron (1971). A Krigeagem caracteriza-se pela análise e modelagem da variabilidade espacial de um atributo, baseada na correlação espacial dos dados. Baseia-se na hipótese de estacionariedade da propriedade que está sendo modelada, considerando que os dados não possuem tendência (Câmara *et al.*, 2004). Além disso, estima uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado.

Contudo, a krigagem engloba um conjunto de métodos de estimação, dentre eles a krigagem ordinária e por indicação. Neste estudo foi utilizada apenas a krigagem ordinária para a espacialização dos dados.

A krigagem ordinária é um estimador de krigagem linear, pois estima um valor em posição espacial não observada segundo uma combinação linear dos valores de um subconjunto amostral local (Brandão, 2001). O método de estimação por krigagem é realizado em várias etapas, as quais incluem: análise exploratória dos dados, análise estrutural (modelagem da estrutura de correlação espacial) e interpolação estatística da superfície. Este método possibilita a inferência do atributo, numa posição u , sem que seja necessário conhecer a média estacionária u desde que a somatória dos ponderadores da krigagem ordinária seja igual a 1.

A questão formulada para orientar esse trabalho foi avaliar a relação entre a profundidade dos lagos de várzea e a turbidez da água. Por se tratarem de lagos em geral rasos, a ação do vento pode levar a suspensão dos sedimentos de fundo. Para responder a essa questão foram espacializados dados de turbidez coletados em estações amostrais distribuídas sobre uma região do lago e dados batimétricos. A partir da distribuição espacial dessas variáveis foi então possível avaliar a variável turbidez da água e correlacionar sua variabilidade espacial com a profundidade da coluna d'água num trecho do Lago Curuai (PA). O estudo foi realizado com dados de turbidez coletados em dois períodos: novembro (2003) e junho (2004), que representam as épocas de água baixa e cheia, respectivamente. Através da espacialização das variações de turbidez, identificou-se o período em que esta é mais afetada pela batimetria. Dados de Totais de Sólidos em Suspensão (TSS) e ventos foram utilizados na análise dos resultados.

1.1. Área de Estudo

O Lago Grande de Curuai representa a área de estudo desse trabalho. Esse é um grande e importante ecossistema aquático da planície amazônica, responsável pela manutenção do equilíbrio natural ambiental. Ao longo do ano este lago é influenciado pelo pulso de inundação do rio Amazonas que ao romper o nível de margens plenas, introduz plumas de água com grande concentração de partículas orgânicas, o que acarreta mudanças no comportamento geoquímico da água. As partículas inorgânicas de granulação mais fina são mantidas em suspensão na água provocando um aumento da turbidez. A variação da turbidez em função do nível da água é muito importante para o funcionamento ecológico do sistema de várzeas porque controla a disponibilidade de luz na coluna de água.

A área de estudo compreende uma porção da planície brasileira do Rio Amazonas, situado mais precisamente a noroeste da cidade de Santarém, próximo à cidade de Óbidos, Estado do Pará. A Planície Amazônica é uma região plana, com aproximadamente 120 metros de desnível ao longo de toda sua extensão (Alcântara, 2006). A localização da área de estudo é ilustrada na Figura 1:

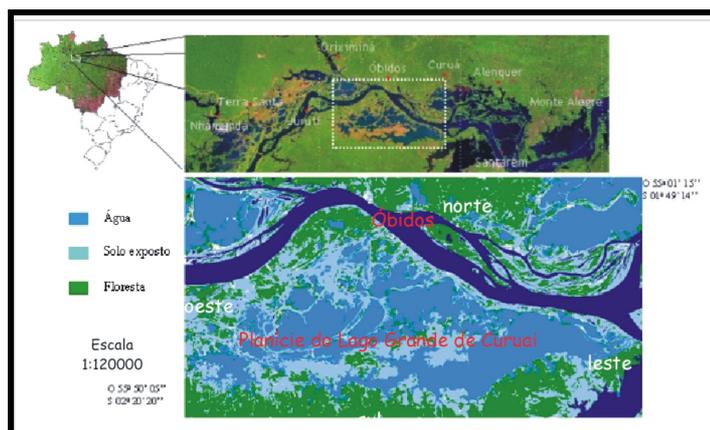


Figura 1. Localização do Lago Grande de Curuai.
 Fonte: Barbosa (2005).

2. Dados Disponíveis

Os dados de batimetria, parâmetros e variáveis limnológicas utilizados neste estudo, foram obtidos durante trabalhos de campo realizadas na planície do Lago Curuai nos períodos de vazante (setembro-2003), água baixa (novembro-2003), enchente (fevereiro-2004) e cheia (junho-2004). Esses dados fazem parte de pesquisas integrantes do Projeto GEOMA (Pesquisas de Desenvolvimento de Métodos, Modelos e Geoinformação para Gestão Ambiental) e do PROJETO FAPESP 2003/00785-3 (Barbosa, 2005).

Para a realização desse trabalho foram utilizados os dados de batimetria, os quais resultaram de uma campanha de campo no mês de junho, quando a água atinge cotas altas e é possível navegar em grande parte da planície para a coleta dos dados. O percurso foi escolhido a partir de imagem do satélite Landsat e os dados foram adquiridos por meio de um ecobatímetro (Lowrance 480-M), instalado no barco que percorreu os transectos pré-definidos. O número de amostras de batimetria coletadas para a porção do lago correspondente à área de estudo é de cerca de 50.000 pontos.

Para a coleta dos dados de turbidez, os pontos foram selecionados a partir de imagens multiespectrais do TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7, a fim de definir uma amostragem que representasse cada período de análise. Esses dados foram coletados *in situ* a partir do aparelho HORIBA – Modelo U10, medidor da qualidade da água, em pontos pré-selecionados considerando as coordenadas geográficas e a profundidade. O número de pontos coletados para este parâmetro na área de estudo foi de 33 pontos no período de cheia e 24 no período da água baixa.

3. Metodologia

De modo a avaliar a correlação entre profundidade e turbidez foi preciso espacializar os dados de turbidez cuja frequência de aquisição no espaço era muito mais baixa do que a dos dados de batimetria. Os dados de batimetria também precisaram ser espacializados porque foram obtidos para seções discretas.

A metodologia geral empregada neste trabalho compreende procedimentos de espacialização e comparação entre os dados de turbidez e batimetria para as datas de água baixa e cheia. Os dados de turbidez foram tratados por krigeagem ordinária e a batimetria por meio da grade TIN.

3.1. Diagrama de Dispersão

A utilização dos dados de batimetria do período da cheia possibilitou estimar a profundidade para o período da água baixa. Estas profundidades foram estimadas selecionando-se no dado completo de batimetria (período da cheia), os pontos amostrais com

coordenadas planas semelhantes aos pontos amostrais das medidas de turbidez em novembro. A partir daí calculou-se o nível médio da água para o período em que foram realizadas as medidas da turbidez no mês de novembro. Logo estimou-se por diferença a profundidade de cada ponto.

Como no período de água baixa a turbidez é muito grande, devido à ressuspensão, em alguns pontos de medida, a turbidez ultrapassou o limite de medida do aparelho. Entretanto, para estes pontos havia medidas de TSS (total de sedimentos em suspensão). Um modelo de regressão entre TSS e Turbidez, construído com pontos dentro da faixa do equipamento, resultou num modelo com R^2 de 0,99. Ou seja, conforme descrito na literatura (Barbosa, 2007), a correlação entre TSS e turbidez, é quase 1. Utilizando este modelo de regressão, foi possível estimar a turbidez naqueles pontos que ultrapassaram o limite do equipamento.

Para que os dados de turbidez e de profundidade tivessem na mesma localização, utilizou-se grade batimétrica gerada e corrigida anteriormente para o período de água baixa. A partir das coordenadas dos pontos de medida de turbidez, encontraram-se as correspondentes profundidades.

3.2. Grade Triangular

A modelagem dos dados de batimetria foi determinada por meio da grade triangular (TIN) no Spring. Os vértices dos triângulos gerados são os pontos amostrados e permitem que informações como as discontinuidades e feições do terreno sejam representadas. A fim de gerar a grade triangular para o período de água baixa, em novembro de 2003, os dados da batimetria coletados em junho foram corrigidos considerando o nível da água.

3.3. Krigeagem Ordinária

Para a análise Geoestatística de Krigeagem Ordinária processada no Spring 4.3.2, são apresentadas cinco etapas, as quais foram seqüencialmente aplicadas ao conjunto de dados disponível. O resultado desta aplicação resultou na espacialização de dados da variável turbidez na área de estudo.

Foram analisados dados de turbidez por geoestatística, a partir da interpolação pelo método da krigeagem nos dois períodos considerados (água baixa e cheia). As etapas iniciaram com a estatística descritiva e logo após gerou-se o semivariograma unidirecional das amostras, sendo este ajustado e validado. Na fase de validação do semivariograma, verificou-se o modelo ajustado e observaram-se as incertezas amostrais a partir das estatísticas de erro que podem ocorrer devido ao baixo número de pontos na área. Na krigeagem, não requerendo conhecimento prévio da média dos valores, se determinou a escolha da krigeagem ordinária e a interpolação da grade seguiu o valor *default* do sistema.

Ao iniciar as fases da interpolação para o período da água baixa com dados de turbidez, utilizou-se no semivariograma uma distância *lag* (distância pré-definida para o cálculo) igual a 2, com incremento de 4.510 metros. Na fase de ajuste optou-se pelo modelo exponencial devido adequar-se melhor em relação ao semivariograma gerado, sendo que os parâmetros utilizados para a validação do modelo (efeito pepita, contribuição e alcance) seguiram o valor de *Akaike* mais próximo de zero. Após a validação selecionou-se a opção krigeagem tipo ordinária utilizando-se valores *default* para a resolução e parâmetros da interpolação, gerando-se assim a imagem de pontos interpolados.

A interpolação dos pontos de turbidez para o período de cheia iniciou com a geração do semivariograma, com n° de *lag* 2 e incremento 2.290 metros. No ajuste do semivariograma, também se optou pelo modelo exponencial e os parâmetros utilizados para a validação do modelo (efeito pepita, contribuição e alcance) seguiram o valor de *Akaike* mais próximo de zero. Validou-se o modelo e por fim fez-se a krigeagem tipo ordinária, utilizando-se valores *default* para a resolução e parâmetros da interpolação, gerando-se assim a interpolação.

4. Resultados

4.1. Diagrama de Dispersão

O diagrama de dispersão calculado para os dados de turbidez e profundidade no período da água baixa (Figura 5) mostra uma baixa correlação entre as variáveis, porém apresenta uma tendência inversa pois quanto maior a profundidade, menor tende a ser a turbidez. Esta baixa correlação pode ser explicada pelo fato de que nesse período o lago apresenta uma profundidade muito baixa. Esta característica faz com que o efeito da ressuspensão, causado pelo vento, seja praticamente igual em toda a sua extensão, devido às pequenas diferenças entre máximas e mínimas na profundidade (de 0m até 0,87m). Para esta condição o efeito do vento é dominante, ou seja, a profundidade não interfere muito.

No diagrama de dispersão com dados de turbidez e profundidade para o período da cheia (Figura 6) a correlação é ainda menor. A linha de tendência dos dados permite inferir que quanto maior o valor da profundidade (máximo de 7,44m), maior o valor da turbidez, ocorrendo o processo inverso do período da água baixa.

Neste período, a profundidade do lago é muito maior, apresentando diferenças em relação ao período de água baixa de até 7,44 metros (valor máximo). Essa característica faz com que o efeito da ressuspensão seja praticamente nulo, não interferindo na turbidez, pois a velocidade do vento é menor do que no período da água baixa e não é suficiente para movimentar o grande volume e espessura da camada de água. Neste contexto, a turbidez não tem interferência desses agentes que a modificam, sendo influenciada somente pela própria composição da água que está atingindo a planície.

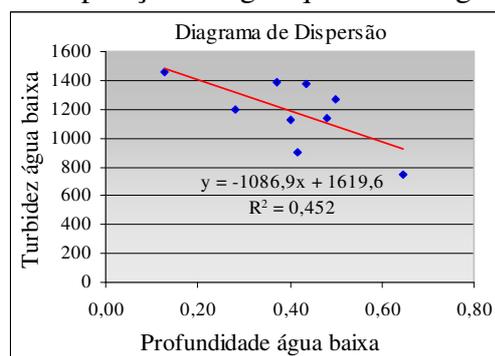


Figura 5. Diagrama de dispersão no período de água baixa para os dados de profundidade e turbidez.

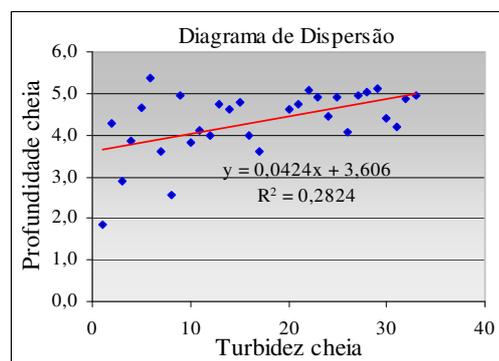


Figura 6. Diagrama de dispersão no período de cheia para os dados de profundidade e turbidez.

4.2. Grade Triangular

A grade triangular gerada para o período da cheia pode ser observada na Figura 7, juntamente com as estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 1. Na época do ano (junho) que compreende o nível de cheia no lago, a profundidade medida apresenta valores altos, com média aproximada de 3,7 metros. A partir da grade triangular é gerada uma imagem que apresenta maior suavidade em relação à tonalidade devido à quantidade de pontos representados, sendo possível maior proximidade entre eles.

No período de água baixa, em novembro de 2003, os dados apresentam valores de batimetria baixos. A média de profundidade é de apenas 0,2 metros, sendo o valor máximo encontrado no local 0,87 metros. Assim, na Figura 8 destacam-se extremos de tonalidade, onde podem ser observadas regiões que apresentam tonalidade mais clara, identificando valor de batimetria maior, e ao contrário, ocorre em regiões mais escuras. Na tabela 2 podem ser observadas as estatísticas descritivas das amostras.

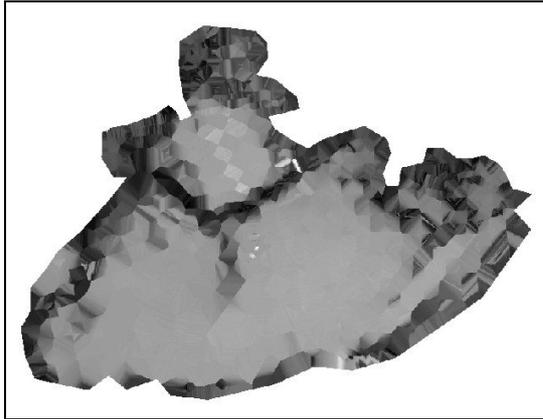


Figura 7. Imagem gerada por meio da grade TIN para os dados de batimetria do período de cheia.

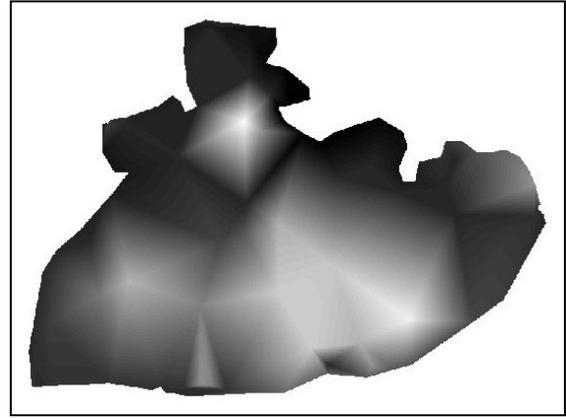


Figura 8. Imagem gerada por meio da grade TIN para os dados de batimetria do período de água baixa.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das amostras de batimetria do período de cheia.

Número de Pontos	49801
Média	3.678
Variância	1.621
Desvio Padrão	1.273
Valor Mínimo	0.560
Quartil Inferior	2.599
Mediana	3.950
Quartil Superior	4.860
Valor Máximo	7.440

Tabela 2. Estatísticas descritivas das amostras de batimetria do período de água baixa.

Número de Pontos	45
Média	0.200
Variância	0.071
Desvio Padrão	0.267
Valor Mínimo	0.000
Quartil Inferior	0.000
Mediana	0.000
Quartil Superior	0.428
Valor Máximo	0.869

4.3. Krigagem Ordinária

A partir da metodologia utilizada para o método de krigagem ordinária, as Figuras 9 e 10 demonstram a espacialização da interpolação dos pontos amostrais de turbidez no período da água baixa e cheia. Nas porções da área de estudo onde a tonalidade apresenta-se mais clara, a turbidez do lago é maior, e inversamente, nas partes mais escuras os valores alcançaram médias menores, ainda assim apresentam poucas variações entre elas.

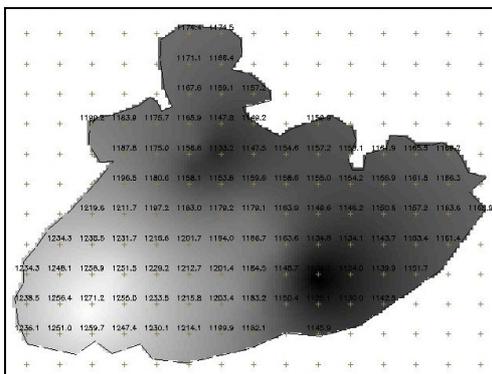


Figura 9: Espacialização da interpolação por krigagem da turbidez no período da água baixa.

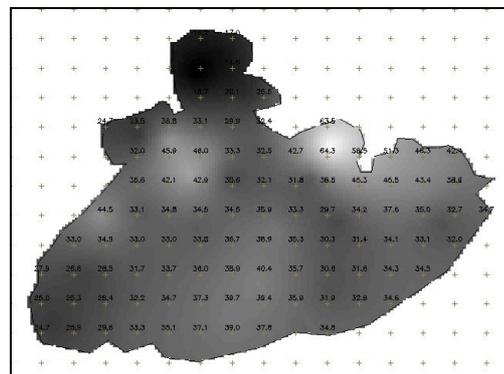


Figura 10: Espacialização da interpolação por krigagem da turbidez no período da cheia.

4.4. Discussão dos Resultados

Os dados de turbidez espacializados através da krigagem em relação à modelagem da superfície do terreno com os dados da profundidade evidenciaram no período da água baixa

que a relação destes é pequena, em função de não existirem muitas variações na profundidade do lago. Porém em algumas porções onde a profundidade é superior (Figura 11a), a turbidez é menor (Figura 11b), como se observa na porção leste da área de estudo, representado por um círculo nas figuras.

No período de cheia a relação entre essas variáveis é menor. A profundidade é alta e não influencia a turbidez, formando uma superfície praticamente homogênea para ambas variáveis. Na Figura 12a, observa-se que há um canal mais profundo ligando a porção superior à porção inferior dentro do lago. Além disso, nota-se claramente que a entrada de água externa vinda dos canais dos rios que se ligam ao lago, fazendo com que a turbidez nesta área seja maior (Figura 12b). Pode-se observar a representação em círculo nas Figuras.

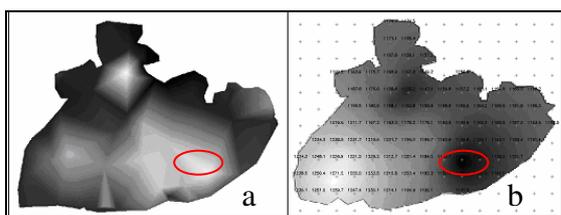


Figura 11. Relação entre a profundidade (a) e turbidez (b) no período da água baixa.

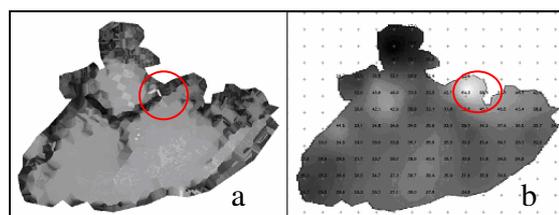


Figura 12. Relação entre a profundidade (a) e turbidez (b) no período da água baixa.

Para estas análises consideramos dados de vento do local (Figura 13), os quais influenciam diretamente na variável turbidez em período de água baixa (coleta realizada entre 19/11 a 01/12/2003), época em que a velocidade do vento é maior (semelhante a 2004, atinge média de 3 m/s) e a profundidade é menor. Esse mesmo agente, não tem muita significância no período de cheia (coleta realizada entre 01 a 18/06/2004), uma vez que a velocidade é menor (2 m/s) e o volume de água é maior, tornando a movimentação da massa de água mais difícil.

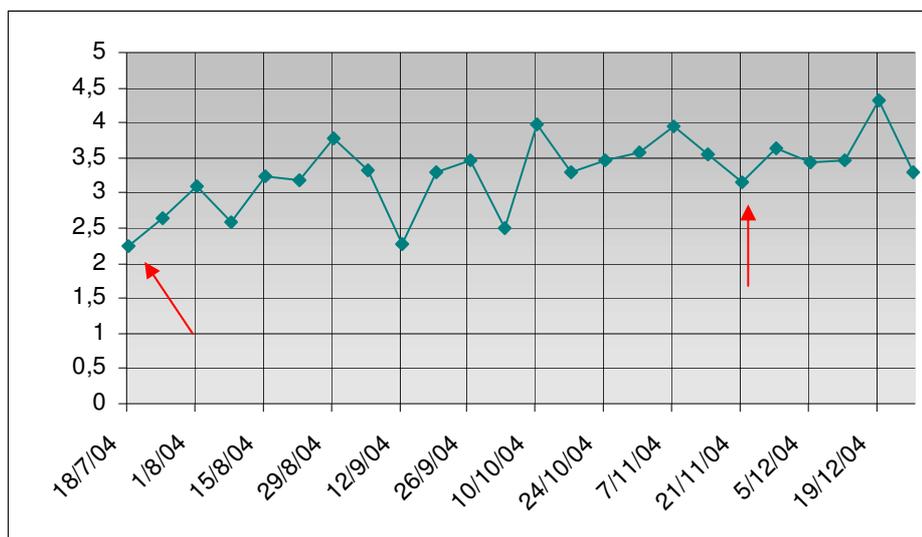


Figura13: Dados de vento coletados em alguns períodos do ano.

5. Conclusões

O trabalho apontou formas que podem ser utilizadas para a comparação de dados em locais com características semelhantes ao de parte da planície de inundação do Lago Curuai. Ou seja, que possuem durante apenas um ano, diferentes estados de configuração no ambiente. Para atingir esta conclusão a análise comparativa das variáveis turbidez e batimetria nos períodos de água baixa em 2003 e cheia em 2004 foi importante. Além disso, a fim de

complementar os resultados, os dados de vento inseridos no trabalho demonstraram a importância desse elemento na dinâmica do local.

Com os resultados pode-se inferir que em épocas de água baixa, o local atinge níveis de grande modificação nas características da água, principalmente causadas pelo vento. Essas mesmas mudanças ocorrem no período da cheia em função da entrada de água dos canais dos rios, porém em menor escala.

A partir das técnicas e dos métodos utilizados, os objetivos do trabalho foram alcançados, uma vez que as características estudadas possuem relações entre elas. A interpolação dos dados de profundidade pela grade triangular (Figuras 7 e 8) mostrou-se confiável para o período de cheia, uma vez que nesta época foi possível coletar maior número de pontos. No período de água baixa, essa triangulação permitiu a análise desejada, porém, em função do pequeno número de pontos, não foi possível gerar uma superfície mais suavizada que condiz com a realidade *in situ*. A interpolação dos dados de turbidez por krigeagem (Figuras 9 e 10) mostrou que a técnica é eficiente e o modelo empregado é adequado para este tipo de análise em ambos os períodos.

Desta forma, conclui-se que a aplicação da geoestatística para melhorar a qualidade dos dados, quando integrada aos Sistemas de Informação Geográfica é conveniente para realização de análises espaciais, possibilitando inferências sobre o conjunto de dados utilizando parâmetros básicos.

Referências Bibliográficas

Alcantara, E. H. **Análise da Turbidez na Planície de Inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados Telemétricos de Imagens MODIS/TERRA**. São José dos Campos: INPE, 2006. 217p.

Assad, E. D. et al. Uso de Modelos Numéricos de Terreno na espacialização de épocas de plantio. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistemas de informações geográficas. Aplicações na agricultura**. Embrapa-SPI/Embrapa Cerrados, Brasília, 1998.

Barbosa, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuaí/Rio Amazonas**. (Tese de doutorado) – São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005. 282 p.

Bailey, T. C.; Gatrell, A.C. **Interactive spatial data analysis**. Essex: Longman Scientific & Technical, 1995.

Câmara, G.; Medeiros, J. S. de. Princípios Básicos em Geoprocessamento. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistema de Informação Geográfica**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA – SPI/EMBRAPA – CPAC, 1998. 03 – 11 p.

Camargo, C. G. E. et al. Análise de Superfícies por Geoestatística Linear. In: Camargo, C. G. E. et al. (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p.79-122.

Freitas, R. M. de Novo, E. M. L. de M. **Mapeamento de Áreas Alagáveis na Planície do Rio Amazonas a partir de Dados do Sensor MODIS – Região do Lago Curuaí – PA**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 533-540.

Lago Grande de Curuaí – **Prefeitura Municipal de Santarém**. Disponível em: <http://www.santarem.pa.gov.br/conteudo/?item=89&fa=6&cd=14&cod_tema=3> Acesso em: 02/12/2007.

Macedo, M. A. de, et. al. **Análise comparativa da espacialização do risco climático pela média ponderada, krigeagem ordinária e krigeagem por indicação**. Disponível em: <http://br.monografias.com/trabalhos/analise-comparativa-espacializacao-risco-climatico/analise-comparativa-espacializacao-risco-climatico2.shtml>. Acesso em: 02/12/2007.

Novo, E. M. L. de M., et al. **Distribuição sazonal de fitoplâncton no Lago Grande de Curuaí em resposta ao pulso de inundação do Rio Amazonas a partir da análise de imagens MODIS**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3175-3182.