



**Universidade de Brasília - Instituto de Geociências**

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO – AMBIENTAL**

**INFERÊNCIA DE PIGMENTOS FITOPLANCTÔNICOS  
OPTICAMENTE ATIVOS PARA O ESTUDO DA  
OCORRÊNCIA DE CIANOBACTÉRIAS**

**LUCAS VIEIRA DA SILVA**

Monografia de Conclusão de  
Curso de Especialização

**ORIENTADOR:** Profa. Dra. Rejane Ennes Cicerelli

**BRASÍLIA – DF**  
2016



**Universidade de Brasília - Instituto de Geociências**

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO – AMBIENTAL**

**INFERÊNCIA DE PIGMENTOS FITOPLANCTÔNICOS  
OPTICAMENTE ATIVOS PARA O ESTUDO DA  
OCORRÊNCIA DE CIANOBACTÉRIAS**

**LUCAS VIEIRA DA SILVA**

Monografia de Conclusão de  
Curso de Especialização

**ORIENTADOR:** Profa. Dra. Rejane Ennes Cicerelli

BRASÍLIA – DF  
2016



**Universidade de Brasília - Instituto de Geociências**

**INFERÊNCIA DE PIGMENTOS FITOPLANCTÔNICOS  
OPTICAMENTE ATIVOS PARA O ESTUDO DA  
OCORRÊNCIA DE CIANOBACTÉRIAS**

**LUCAS VIEIRA DA SILVA**

Monografia de Conclusão de  
Curso de Especialização

**ORIENTADOR: Profa. Dra. Rejane Ennes Cicerelli**

**COMISSÃO JULGADORA** □

**Profa. Dra. Tati de Almeida** \_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Edson Eyji Sano** \_\_\_\_\_

BRASÍLIA – DF  
2016

Este trabalho está em formato de artigo, conforme os padrões da Revista de Geociências - ISSN 1980-900X.

## INFERÊNCIA DE PIGMENTOS FITOPLANCTÔNICOS OPTICAMENTE ATIVOS PARA O ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE CIANOBACTÉRIAS

Lucas Vieira da Silva, Rejane Ennes Cicerelli e Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo

### RESUMO

O florescimento das cianobactérias devido a eutrofização potencializada pela ação humana tem sido um grave problema. A regulamentação para o monitoramento desses organismos encontra-se defasada frente as novas tecnologias que estão surgindo. A fim de subsidiar alterações em tal legislação, este estudo pretende avaliar o comportamento do pigmento ficocianina, que é altamente associado as cianobactérias e demonstrar sua importância como parâmetro para o monitoramento da qualidade da água. Sendo assim, foi realizado, em um trecho do reservatório de Nova Avanhandava, São Paulo, a coleta de dados de clorofila-a e ficocianina por meio de fluorometria *in vivo* aliada a criação de modelos de superfície gerados pela estimação geoestatística, krigagem. Tal análise indica baixa correlação espacial entre os pigmentos ( $R^2=-0,2$ ), constatando a insuficiência da clorofila-a como indicador do florescimento de cianobactérias.

Palavras-chave: Clorofila-a, Ficocianina, Krigagem, Reservatório.

## INFERENCE OF PHYTOPLANKTON PIGMENTS OPTICALLY ACTIVE FOR THE STUDY OF THE CYANOBACTERIA OCCURRENCE

### ABSTRACT

The cyanobacterial bloom due the eutrophication enhanced by human action has been serious problem. The legislation for the monitoring of these organisms is outdated front of the new technologies that are emerging. In order to support changes in such regulation, this study aims to evaluate the behavior of phycocyanin pigment, which is highly associated with cyanobacteria, and demonstrate its importance as parameter for the water quality monitoring. Therefore, it was analyzed the concentration of chlorophyll-a and phycocyanin in a section of the Nova Avanhandava reservoir, São Paulo, by fluorometry *in vivo* combined with the creation of surface models generated by geostatistical estimation, kriging. These analyses found no spatial correlation between pigments ( $R^2= -0.2$ ), showing the insufficiency of chlorophyll-a as indicator of cyanobacterial bloom.

Key-words: Chlorophyll-a, Phycocyanin, Kriging, Reservoir.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos maiores problemas ambientais tem sido a eutrofização – aporte de nutrientes em corpos de água, sejam eles oceânicos ou continentais (TUNDISI, 2011). O efeito disso é o aumento da produtividade de algas e plantas, um fenômeno que ocorre naturalmente, mas que está sendo potencializado pela ação humana (ANDERSON et al. 2002).

A eutrofização antropogênica ou cultural ocorre por meio do despejo de esgoto urbano, descarte de resíduos industriais, refugo de abatedouros e drenagem de fertilizantes da agricultura. Entre as consequências desse evento estão: redução do oxigênio dissolvido, aumento da turbidez, produção de toxinas e substâncias carcinogênicas, perda de biodiversidade e geração de odores e sabores desagradáveis. (ESTEVES 1998; CHORUS & BARTRAM, 1999; TUNDISI, 2011). Trata-se não só de um problema ambiental, mas também de saúde pública.

Algas ou plânctons são termos genéricos para representar uma miríade de organismos que flutuam livremente na água (REYNOLDS, 1984). Dentre toda a diversidade de organismos que essa nomenclatura representa, um grupo tem recebido especial atenção, as cianobactérias. Isso porque são mais prejudiciais, responsáveis pelos problemas já citados, e mais adaptáveis que as demais algas. Elas são

menos dependentes de oxigênio, podendo algumas espécies funcionar até mesmo como anaeróbicas facultativamente. Algumas cianobactérias podem suportar condições extremas de salinidade, pH e temperatura. Podem se movimentar na coluna de água para adquirir condições mais favoráveis por meio dos vacúolos de gás. Também reduzem o oxigênio dissolvido, o que prejudica o crescimento das outras algas e ainda são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico (ESTEVES 1998; LEE, 2008; CAREY 2012).

Para a avaliação do florescimento de algas, a resolução CONAMA 357 de 2005, principal instrumento legal brasileiro referente à qualidade da água, estabelece dois parâmetros: o pigmento fluorescente clorofila-a e a contagem de cianobactérias. Este segundo parâmetro é utilizado somente se constatado valores preocupantes de clorofila-a. Essa estrutura está presente em praticamente todas as algas fotoautotróficas, incluindo as cianobactérias. Entretanto, além da clorofila-a, as cianobactérias possuem seus pigmentos próprios, as ficobiliproteínas, na qual o tipo mais comum é a ficocianina.

Esses pigmentos fluorescentes são moléculas que compõe os receptores de luz que iniciam o processo da fotossíntese. Cada tipo de pigmento apresenta absorção e emissão de luz em comprimentos de onda específicos (LEE & CARDER, 2004). A ficocianina apresenta alta absorção da radiação eletromagnética próximo ao comprimento de onda de 620 nm e emissão

em 650 nm, enquanto a clorofila-a possui dois picos de absorção referentes aos comprimentos de onda do azul e do vermelho: um próximo a 433 nm e outro próximo a 686 nm respectivamente e emitem próximo a 685 nm (RICHARDSON, 1996; MOBLEY, 2005; SEPPALA, 2009).

A clorofila-a pode ser um parâmetro eficiente para indicação da situação fitoplanctônica, porém não permite a discriminação dos grupos taxonômicos, tal como as cianobactérias. Além disso as algas podem apresentar alta variação espacial e temporal, o que demanda amostragens frequentes e minuciosas da área de estudo, algo difícil pelos meios atualmente utilizados (BORMANS et al., 2005), pois a análise de clorofila-a tem ocorrido por meio da coleta de água e extração em laboratório, um método demorado e que exige profissionais extremamente capacitados, assim como a contagem de cianobactérias (CALIJURI et al. 2006).

Embora a ficocianina seja importante para a detecção das cianobactérias ainda não é amplamente utilizada. A partir da fluorometria *in vivo* e da geoestatística pretendeu-se analisar os pigmentos ficocianina e clorofila-a em um reservatório de São Paulo. Sendo assim, o objetivo foi demonstrar a importância da utilização do pigmento ficocianina como um parâmetro adicional de avaliação da qualidade da água bem como a importância de novas tecnologias para o monitoramento da qualidade da água.

## MATERIAL E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

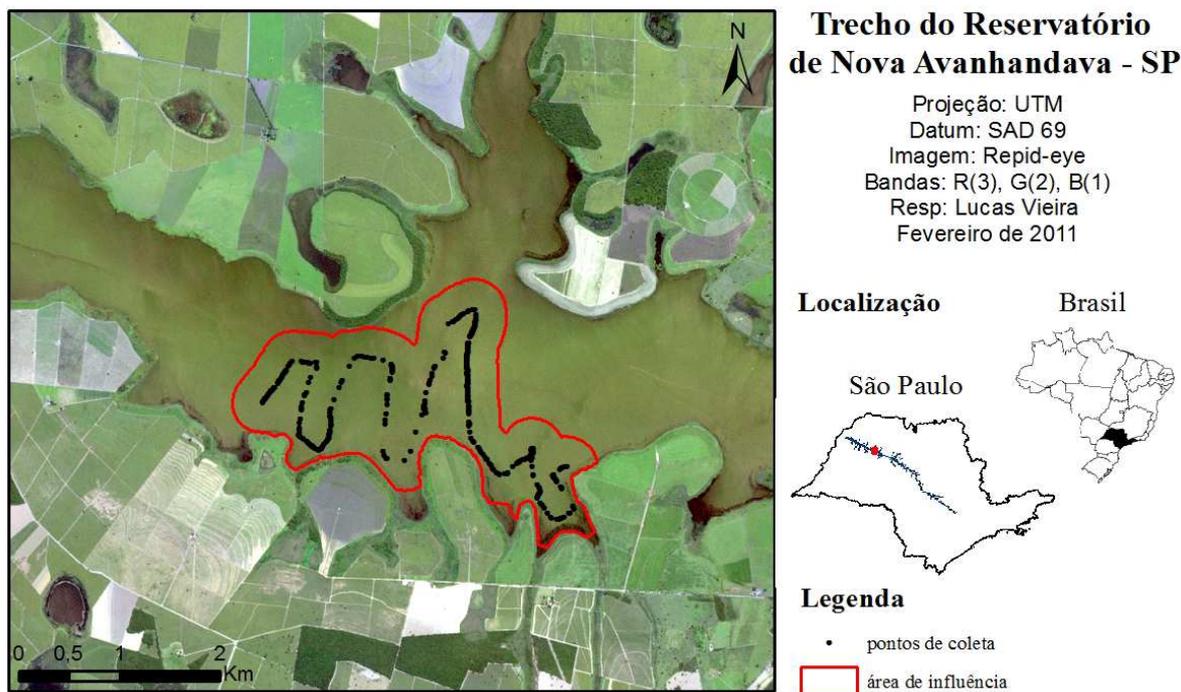
O estudo foi realizado no reservatório da usina hidrelétrica de Nova Avanhandava (21°13'36.5"S 49°58'54.2"W), localizado no baixo Tietê, município de Buritama-SP. A região apresenta clima tropical chuvoso. O reservatório cobre uma área de 210 km<sup>2</sup>, conta com um volume de 2.830 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> e está em funcionamento desde 1982 (AES TIETÊ, 2015).

A coleta foi feita no dia 13 de setembro de 2013, período de seca, por volta do meio-dia, por Cicerelli (2013), na qual escolheu a área devido o conhecimento prévio da incidência de fitoplâncton, descrito por Watanabe (2013), e também por questões de logística e acessibilidade. Para representação e análise da área onde foram coletadas as amostras, utilizou-se uma imagem RapidEye de fevereiro de 2011, gentilmente cedida pela empresa Santiago e Cintra, com resolução espacial de 5 metros, em composição colorida formada pelas bandas 3, 2 e 1 referentes as cores vermelha, verde e azul respectivamente, Figura 1.

Está presente, ao longo do curso do Rio Tietê, uma série de represamentos, que dão origem a ambientes lenticos. Aliado a isso, a bacia do Rio Tietê tem sido altamente antropizada, sofrendo com processos erosivos devido a perda de vegetação nativa, inclusive as matas ripárias. A área é cercada pela agricultura extensiva, mais precisamente de

cana-de-açúcar, e também por indústrias. Tais atividades em conjunto com a deposição de esgoto urbano geram um grave problema de

eutrofização (REPEA, 2005 apud CICERELLI, 2013).



**Figura 1: Delimitação da área de estudo baseado nos dados e na metodologia de interpolação utilizada. Os pontos são referentes as amostras utilizadas no estudo.**

### DELINEAMENTO AMOSTRAL

As amostras foram obtidas de forma sistemática alinhada ao longo de uma trajetória de barco de 10Km. No total foram adquiridas 978 amostras simultâneas de clorofila-a e ficocianina, das quais algumas apresentaram problemas na detecção das concentrações de um e/ou outro pigmento. Devido a isso, foi possível a utilização de apenas 416 pontos adequadas para ambos os pigmentos. Destes, 20 foram retirados aleatoriamente para posterior validação das superfícies geradas. Os elementos amostrais podem ser visualizados na figura 1.

Para se estabelecer as concentrações dos pigmentos recorreu-se à técnica de

fluorometria *in vivo* com os equipamentos cedidos pelas Faculdades de Ciências Agrônomicas e Ciências Tecnológicas da Unesp de Botucatu-SP: um fluorômetro Turner 10-AU-005-CE, para a análise de clorofila-a; e um fluorômetro Chelsea Unilux, para ficocianina.

Os pigmentos fluorescentes são detectados a partir da resposta espectral que apresentam ao receberem um feixe de luz. O aparelhos apresentam sensores ópticos capazes de detectar a absorção em 440nm e emissão em 680nm para clorofila-a e absorção em 610nm e emissão em 685nm para ficocianina (TURNER DESIGNS, 2004; Unilux, 2009).

A análise foi feita a uma profundidade de 20 cm a fim de se evitar a interferência das bolhas de ar geradas pelo movimento do barco. O fluorômetro Turner 10-AU-005-CE faz a leitura das concentrações dos pigmentos em valores relativos, sendo necessário convertê-los para valores absolutos. Para isso, realizou-se uma curva de regressão a partir das concentrações de clorofila-a, extraídas em laboratório pela técnica de espectrofotometria (GOTERMAN, 1978), de 10 amostras de água coletadas em pontos diferentes. Os dados foram registrados em valores absolutos em  $\mu\text{g/L}$ .

Simultaneamente à coleta dos dados de fluorescência, foram adquiridas, com receptor GNSS L1, as coordenadas geográficas, que foram posteriormente integradas por meio do software Windmill 7. Isso devido a necessidade dos dados estarem georreferenciados para criação do modelo de superfície.

Os processos de interpolação e inferência geoestatística apresentam maior erro conforme a superfície gerada se afasta das amostras, a fim de se excluir as áreas com maior erro associado, foi feito um buffer de 300 metros ao longo do transecto e também delimitado as margens do reservatório com a utilização do software ArcGIS.

## ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Inicialmente foram realizadas algumas análises estatísticas básicas, como a correlação de Pearson, que se dá pela razão

entre a covariância dos pigmentos e a raiz do produto de suas variâncias, equação 1:

$$R^2 = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X) \text{var}(Y)}} \quad (1)$$

Para a criação dos modelos de superfície, os valores desconhecidos foram estimados por meio da geoestatística a partir da técnica de krigagem ordinária (MITAS & MITASOVA, 1999), pelo software ArcGIS, equação 2, na qual  $Z(x_0)$  é uma função aleatória dos valores a serem estimados, nessa operação realiza-se o somatório de  $Z(x_i)$ , médias conhecidas, associada a  $\lambda_i$ , que são os pesos associados aos  $n$  dados. Tal método se diferencia das estimativas tradicionais por apresentar menor variância associada ao valor estimado e uma predição menos tendenciosa (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Outros métodos de interpolação foram testados, mas o Kriging foi o que respondeu melhor.

$$Z_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

Para a escolha da melhor técnica de krigagem, é necessário uma análise exploratória dos dados (CÂMARA, 2004). Tanto para clorofila-a quanto para ficocianina, os dados apresentaram uma distribuição assimétrica positiva (assimetria de 1,536 para ficocianina e 1,514 para clorofila-a) e de acordo com Yamamoto e Landim (2013), antes de se aplicar a krigagem

ordinária, os dados devem ser transformados para que os poucos valores altos não afetem assim a estimativa. No presente estudo, optou-se pela transformação logarítmica, equação 3, que torna a distribuição próxima de uma curva normal e evita a presença de valores negativos.

$$y = \ln(x) \quad (3)$$

Parte essencial da geoestatística é o cálculo dos variogramas experimentais, que é a variância do incremento, dado pela equação 4, em que  $h$  é o vetor de distância e  $Z(x)$  é uma função aleatória. Costuma-se utilizar o semivariograma que nada mais é que o variograma ( $2\gamma$ ) dividido por dois.

$$\begin{aligned} Var &= [Z(x+h) - Z(x)] \\ &= E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \\ &= 2\gamma \end{aligned} \quad (4)$$

A partir do estudo dos variogramas foi possível reconhecer a anisotropia geométrica dos dados, no qual apresentam um único patamar e alcances diferentes. Para ficocianina os variogramas demonstraram maior continuidade na direção de 18 graus, já para clorofila-a há maior continuidade em 180 graus. Outro ponto importante a se observar em um variograma é o comportamento próximo a origem, no qual os dados em estudo não apresentaram descontinuidade, o que demonstra que não há a presença de efeito pepita.

Após a criação das superfícies, foi calculado, a partir dos 20 pontos retirados anteriormente, o Erro Médio Quadrático (EMQ), equação 5, para a validação das superfícies estimadas. O EMQ nada mais é que raiz do somatório do quadrado das diferenças entre os valores esperados e os valores observados dividido pelo número de elementos de validação.

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Com os modelos de superfície criados, a correlação espacial dos dois tipos de pigmentos foi analisada por meio da ferramenta Scatter Plot do software ENVI.

Os histogramas, curvas de distribuição, gráficos e mapas do variograma, assim como outros dados estatísticos que auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa estão presentes em anexo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras coletadas em setembro de 2013 no Reservatório de Nova Avanhandava demonstraram concentrações de ficocianina variando de 0,0014 a 9,95  $\mu\text{g/L}$ , com uma média de 2,67 e um desvio padrão de 2,08. A partir disso é possível deduzir que os dados apresentaram alta variação. A assimetria foi de 1,536, o que significa uma distribuição assimétrica positiva, alguns valores muito altos distanciando de uma curva normal. Isso justifica o método de transformação

logarítmica para realização da krigagem ordinária, método conhecido como krigagem lognormal. Já a clorofila-a variou de 4,16 a 21,55 µg/L, com uma média de 9,06 e um desvio padrão de 2,22. Apesar do intervalo de distribuição maior, os dados se mostraram concentrados em valores relativamente baixos, com baixa variação. A clorofila-a apresentou assimetria de 1,514, também assimétrica positiva.

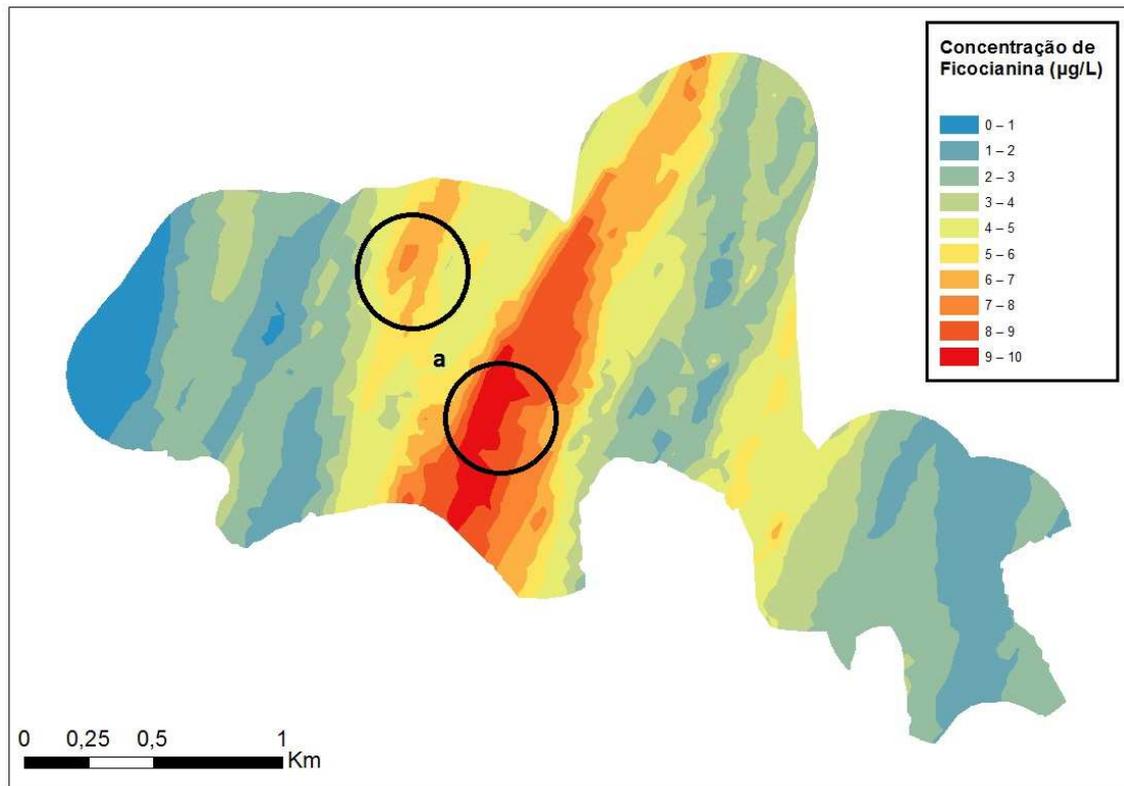
A criação dos modelos foi bem sucedida, contando com um índice EMQ=1,329 para ficocianina e EMQ=0,666 para clorofila, que são satisfatórios. A utilização da krigagem com o software ArcGIS oferece além da precisão, um resultado visualmente agradável, Figuras 2 e 3. Apenas com a simples aplicação da correlação de Pearson é possível perceber que os dois pigmentos não são correlacionados ( $R^2=-0,2$ ). Pela visualização dos modelos criados e do gráfico de dispersão, essa leve correlação inversa fica evidente.

O gráfico de dispersão criado pelo software ENVI nos permite visualizar como os dados variam. Há uma concentração dos valores na área azul clara do gráfico, valores baixos tanto para ficocianina (entre 2 e 4 µg/L) quanto para clorofila-a (entre 7 e 10 µg/L). Embora não haja um padrão inverso de distribuição claramente estabelecido, a correlação encontra-se próxima de zero, sendo possível observar regiões com altas concentrações de ficocianina associadas a

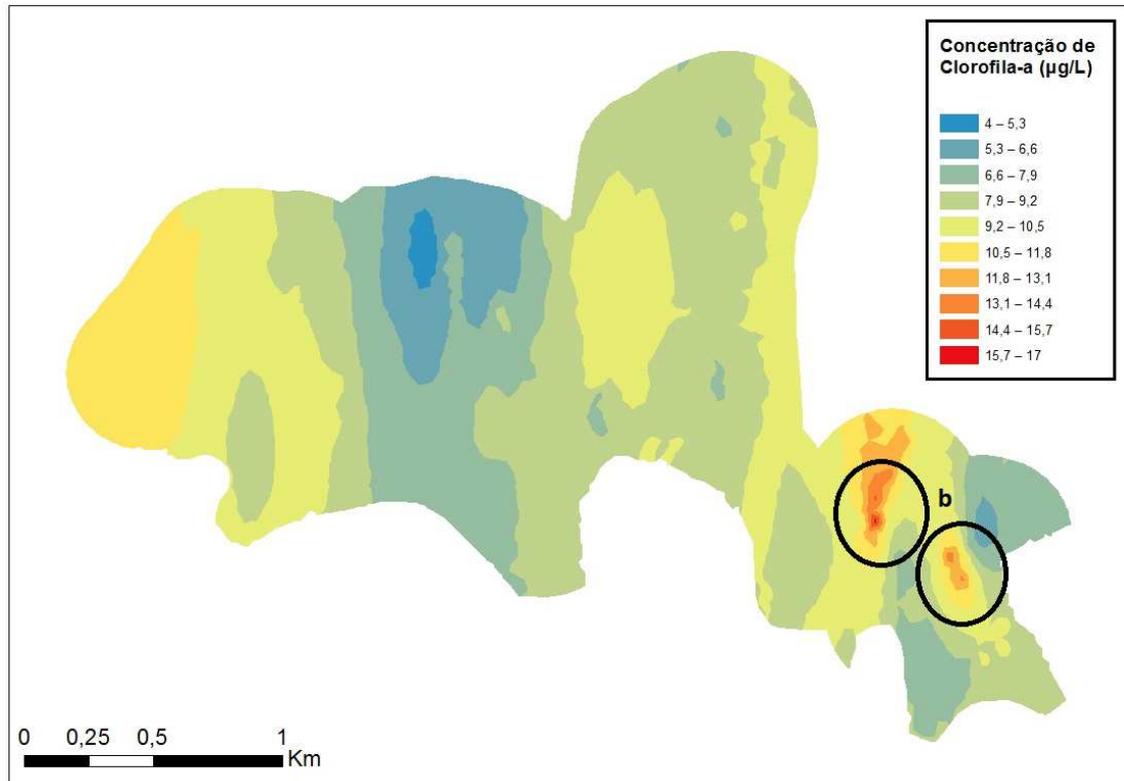
baixas concentrações de clorofila-a e vice-versa, como demonstrado pelas regiões destacadas pelos círculos a e b nas figuras 2, 3 e 4.

A análise no reservatório de Nova Avanhandava nos sugere que a concentração de clorofila-a não pode ser usada diretamente como indicador da presença de cianobactérias, o que corrobora com Brient et al. (2008), em sua análise realizada em corpos hídricos do oeste da França, onde observou uma alta correlação entre as concentrações de ficocianina e a biomassa de cianobactérias e baixa correlação entre clorofila-a e cianobactérias. A clorofila-a só avalia a presença de algas como um todo. O conteúdo de pigmentos nas células varia de acordo com a espécie e também pode variar com a qualidade e a intensidade de luz recebida (KORBEE et al., 2005; CHEN et al. 2010).

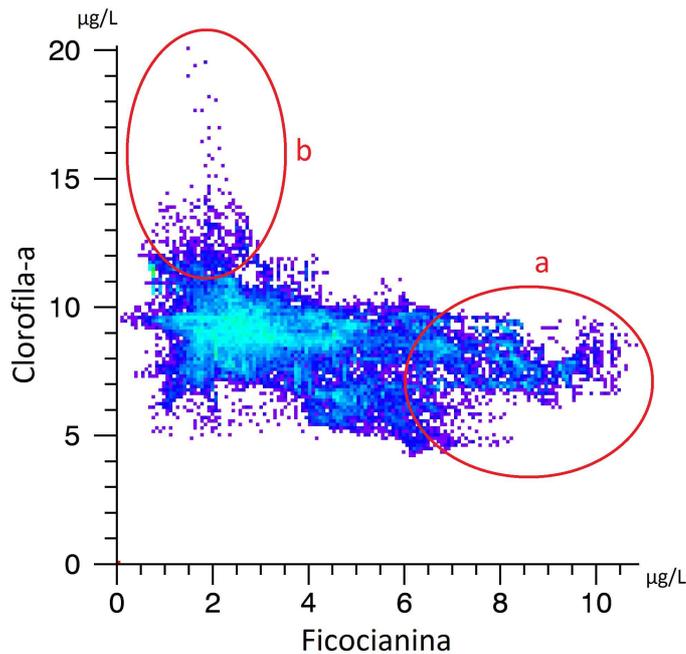
A baixa correlação entre os pigmentos ou variação independente entre eles pode ser explicada ainda pela diferenciação na composição de espécies de acordo com as condições ambientais, como a concentração de cada nutriente, principalmente fósforo e nitrogênio, temperatura da água, estratificação do corpo hídrico, pH e salinidade (MUTSHINDA et al., 2013; PAERL & OTTEN, 2013). Há ainda a complexidade das interações ecológicas interespecíficas, na qual as diferentes espécies podem alterar seu crescimento e consumo de nutrientes conforme as concentrações (ZHU et al, 2010).



**Figura 2: Concentração de Ficocianina. a) picos de ficocianina associado a baixas concentrações de clorofila-a.**



**Figura 3: Concentração de Clorofila-a. b) Picos de clorofila-a associados a baixas concentrações de ficocianina**



**Figura 4: Gráfico de dispersão das concentrações de Ficocianina e Clorofila-a. A) e b) representam regiões com valores inversos dos pigmentos**

Kowalewska et al. (2014), propõem que a análise do pigmento ficocianina, pela facilidade, rapidez e cobertura de grandes áreas seja utilizado de forma a prevenir grandes florescimentos de cianobactérias. Bastien et al. (2011), propõe, porém, que a análise de ficocianina deva ser complementar a outros parâmetros, como concentrações de nutrientes, turbidez, oxigênio dissolvido, temperatura, pH e matéria orgânica.

É importante ressaltar que a coleta foi realizado no mês de setembro, no qual a presença de algas é pouco pronunciada. Mesmo assim é possível observar, a partir da inferência, concentrações de ficocianina ultrapassando 10 µg/L, considerado alarmante, enquanto a clorofila-a permanece baixa, distante de 30 µg/L, estando dentro dos

limites aceitáveis segundo Brient et al. (2008) e a resolução CONAMA 357 de 2005. Se o estudo tivesse sido realizado em janeiro ou fevereiro, meses de maior incidência de algas como demonstrado por Cicerelli (2013) na mesma área de estudo, provavelmente, a variação espacial dos pigmentos fosse ainda mais significativa, indicando talvez uma correlação menor dos dados. Complementando essa hipótese, é importante ressaltar que mesmo em regiões tropicais, há variação sazonal da comunidade fitoplanctônica, com diferentes espécies dominando o ambiente ao longo do ano (FIGUEREDO & GIANI, 2001).

Devido às características ópticas dos pigmentos, é possível a utilização de sensoriamento remoto, que vem avançando

rapidamente, tornando a investigação do processo de eutrofização e florescimento de algas cada vez mais simples. Vincent et al., (2004) avalia a detecção do florescimento de cianobactérias por meio de imagens Landsat TM, porém Kutser (2006) compara diversos sensores multiespectrais e conclui que apenas o sensor MERIS, presente no satélite ENVISAT, seria capaz de detectar a presença de cianobactérias. Apesar disso o sensor, que já foi desativado em 2012, possuía uma resolução espacial muito baixa (300x300m) e não era capaz de detectar baixas concentrações de ficocianina. O ideal seriam os sensores hiperespectrais. Randolph (2008) por meio do desenvolvimento de algoritmos atesta a viabilidade da inferência de cianobactérias a partir da análise dos pigmentos fluorescentes por sensoriamento remoto hiperespectral. Mais estudos devem ser feitos integrando dados de fluorimetria coletados em campo e por sensoriamento remoto.

## CONCLUSÕES

A utilização de fluorimetria in vivo para coleta simultânea das concentrações de ficocianina e clorofila-a foi bem sucedida, sendo capaz de detectar baixas concentrações para ambos pigmentos. A estimação de valores desconhecidos para a criação de um modelo de superfície pela técnica de krigagem ordinária lognormal também se mostrou bem sucedida de acordo com os baixos EMQ encontrados, além de um resultado visualmente satisfatório.

A análise dos dados demonstrou, assim como era esperado, que os pigmentos não são espacialmente correlacionados. Sendo assim a utilização apenas da clorofila-a pode gerar resultados enganosos. É possível que altas concentrações de clorofila representem um alarme falso quanto ao florescimento de cianobactérias assim como o contrário também pode ser verdade. Até mesmo porque de acordo com Brient et al. (2008), concentrações acima de 10 µg/L podem indicar dominância de cianobactérias, valores estes encontrados nos dados de campo. Enquanto que para clorofila-a, as concentrações foram abaixo do que possa ser considerado um ambiente eutrofizado.

Devido a falhas na leitura de alguns pontos de coleta tanto para ficocianina como para clorofila-a, foi necessário a retirada destes. Dos 978 pontos coletados, apenas 416 foram utilizados, o que torna a amostra menos robusta. Além dessas lacunas no transecto, a própria estratégia amostral bem como as dificuldades relacionadas a locomoção no ambiente podem interferir no sucesso da inferência dos pigmentos e no subsequente mapeamento das algas. É necessária a realização de trabalhos futuros com diferentes estratégias de coleta e delineamentos amostrais para aprimoramento além de outras abordagens geoestatísticas com outros softwares.

Para melhor compreensão das especificidades das algas, investigações posteriores podem ser feitas a partir da coleta

e interpolação não só de pigmentos mas também dos diferentes nutrientes e fatores ambientais que influenciam no crescimento de algas. Interessante também seria a utilização concomitante de sensoriamento remoto.

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças ao suporte do programa de pós-graduação em geo-processamento ambiental do Instituto de Geociências da UnB, em especial pela professora Rejane.

A ESRI pela disponibilização do Pacote de ferramentas do ArcGis 10.2 por intermédio do contrato nº 2011 MLK 8733 e a IMAGEM pelo apoio e viabilidade da concretização do termo de uso entre o IG e a ESRI e pelo suporte aos softwares.

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AES TIÊTE Nova Avanhandava. Informações sobre o reservatório. Disponível em: <<http://www.aestiete.com.br/usinas/paginas/novaavanhandava.aspx>>. Acesso em 10 de julho de 2015.

ANDERSON, D.M.; GLIBERT, P.M.; BURKHOLDER, J.M. Harmful algal blooms and eutrophication: 13iferente sources, composition, and consequences. **Estuaries**, v. 25, p. 704-726, Ago. 2002.

BASTIEN, C.; CARDIN, R.; VEILLEUX, E.; DEBLOIS, C.; WARREN, A.; LAURION, L. Performance evaluation of phycocyanin probes for

the monitoring of cyanobacteria. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 13, p. 110–118, out. 2010.

BORMANS, M.; FORD, P. W.; FABRO, L. Spatial and temporal variability in cyanobacterial populations controlled by physical processes. **Journal of plankton research**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 61–70, set. 2005.

BRASIL. Resolução nº 357, de março de 2005. Conselho nacional do meio ambiente – CONAMA. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRIENT, L., LENGRONNE, M., BERTRAND, E., ROLLAND, D., SIPEL, A., STEINMANN, D.; BAUDIN, I.; LEGEAS, M.; LE ROUZIC, B. E.; BORMANS, M. A phycocyanin probe as a tool for monitoring cyanobacteria in freshwater bodies. **Journal of environmental monitoring**, v. 10, n. 2, p. 248–255, jan. 2008.

CALIJURI, M.C.; ALVES, M.S.A.; SANTOS A.C.A. **Cianobactérias e cianotoxinas e água continentais**. São Carlos: RiMa, 2006. P. 118.

- CÂMARA, G.; DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; MONTEIRO, A.M.V. (eds). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004.
- CAREY, C.C.; IBELINGSC, B.W.; HOFFMANND, E.P.; HAMILTON, D.P.; BROOKES, J.D. Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. **Water Research**, v. 46, p. 1394-1407, dez. 2012.
- CHEN, H.B.; WU, J.Y.; WANG, C.F.; FU, C.C.; SHIEH, C.J.; CHEN, C.I.; WANG, C.Y.; LIU, Y.C. Modeling on chlorophyll a and phycocyanin production by *Spirulina platensis* under various light-emitting diodes. **Biochemical Engineering Journal**, v. 53, n.1, p. 52-56, dez. 2010.
- CHORUS I. & BARTRAM J. (eds). Toxic cyanobacteria in water: **A guide to their public health consequences, monitoring and management**. London: WHO, 1999. P. 400
- CICERELLI, R. E. Estudo da ocorrência de cianobactérias em ambiente aquático continental por meio da inferência espacial do pigmento ficocianina. 2013. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) Faculdade de Ciência e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente. P. 69
- ESTEVEVES, F.A. Comunidade fitoplanctônica. In \_\_\_\_\_. **Fundamentos de limnologia**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. P. 134-171.
- FIGUEREDO, C.C. & GIANI, A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. **Hydrobiologia**, Holanda, v. 445, n. 1, p. 165–174, fev. 2001.
- KORBEE, N.; FIGUEROA, F. L.; AGUILERA, J. Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments, proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticta* (Bangiales, Rhodophyta). **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v. 80, n. 2, p. 71–78, abr. 2005.
- KOWALEWSKA, G.; LUBECKI, L.; SZYMCZAK-ŻYŁA, M.; BUCHOLC, K.; FILIPKOWSKA, A.; GOGACZ, R.; ZAMOJSKA, A. Eutrophication monitoring system near the Sopot beach (14 iferent Baltic). **Ocean & Coastal Management**, v. 98, p. 51–61, set. 2014.
- KUTSER, T.; METSAMAA, L.; STRÖMBECK, N.; VAHTMÄE, E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Estuarine, Coastal and Shelf**

- Science*, v. 67, n. 1-2, p. 303–312, mar. 2006.
- LEE, R. **Phycology**. 4ed, Cambridge: Cambridge University Press, p. 31-74, 2008
- LEE, Z. & CARDER, K. L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 3, p. 361–368, fev. 2004.
- LONDE, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) INPE, São José dos Campos.
- MITAS, L. & MITASOVA, H. Spatial interpolation. In: LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND D.W. **Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications**. Abridge, 2. Ed, 1999, v. 2, c. 34, p. 481-492.
- MOBLEY C. D, et al. Interpretation of hyperspectral remote-sensing imagery via spectrum matching and look-up tables. *Applied Optics*, v.44, n.17,p.3576-3592, 2005.
- MÔNICA P.B.; PATRICIA, O.; CYNTIA, H.R.P. REPEA – Rede Paulista de Educação Ambiental. Orientação para educação ambiental nas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo: origem e caminhos. In: CICERELLI, R. E. Estudo da ocorrência de cianobactérias em ambiente aquático continental por meio da inferência espacial do pigmento ficocianina. 2013. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) Faculdade de Ciência e Tecnologia – UNESP, Presidente Prudente. P. 69
- MUTSHINDA, C. M.; FINKEL, Z. V.; IRWIN, A. J. Which environmental factors control phytoplankton populations? A Bayesian variable selection approach. **Ecological Modelling**, v. 269, 1–8. .2013.
- PAERL, H. W. & OTTEN, T. G. Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls. **Microbial Ecology**, v. 65, n. 4, p. 995–1010, set. 2013.
- RANDOLPH, K., WILSON, J., TEDESCO, L., LI, L., PASCUAL, D. L.,; SOYEUX, E. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 11, 4009–4019, jun. 2008.
- REYNOLDS, C.S. What is phytoplankton? In \_\_\_\_\_. **The ecology of freshwater phytoplankton**. Cambridge:

Cambridge University Press, 1984.

P. 1-40.

RICHARDSON, L. Remote sensing of algal bloom dynamics. **Bioscience**, v. 46, n. 7, p. 492 -501, ago. 1996.

SEPPALA, J. Fluorescence properties of Baltic Sea phytoplankton. 2009. 83 f. Monographs of the boreal environment research. Edita Prima Ltd. Helsinki.

TUNDISI, J.G. e TUNDISI, T.M. A crise da água: eutrofização e suas consequências. In: \_\_\_\_\_. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de textos, 2014. P. 101-121

TURNER DESIGNS. Fluorometer Calibration for in vivo detection of Cyanobacterial Pigments. 2004. Disponível em: <http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/cyano.html>. Acesso em: 16 de junho de 2010. TURNER

Unilux

Fluorimeter:Handbook.ChelseaTechnologies.2009. p.20. Uhelinger.

VINCENT, R. K.; QIN, X.; MCKAY, R. M. L.; MINER, J.; CZAJKOWSKI, K.; SAVINO, J.; BRIDGEMAN, T. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 3, p. 381–392, jul. 2004.

YAMAMOTO, J.K. & LANDIM, P.M.B.

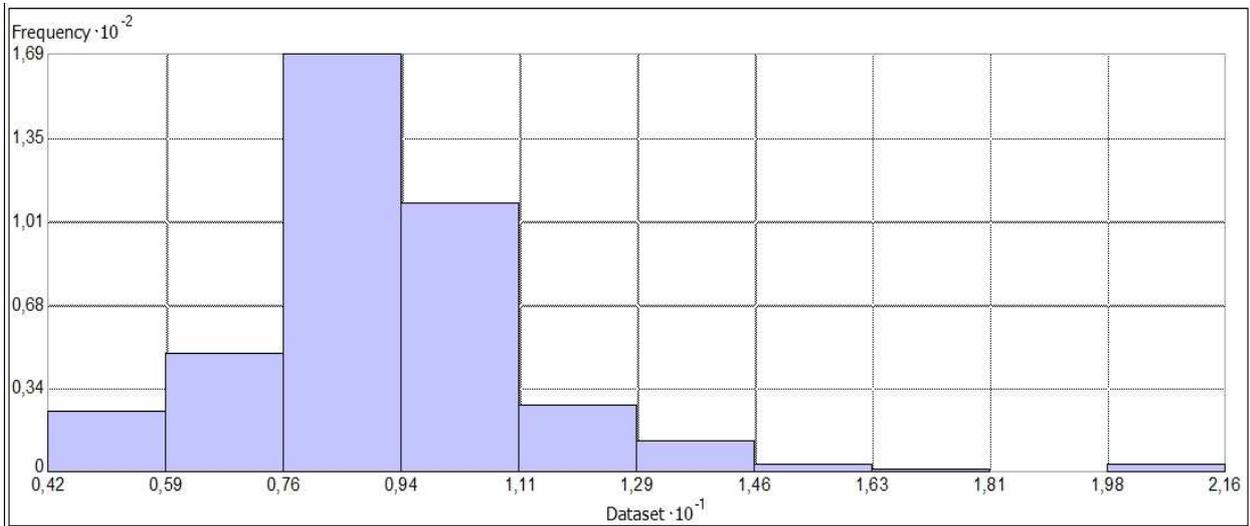
**Geoestatística: Conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. P. 215.

ZHU, W.; WAN, L.; ZHAO, L. Effect of 16 iferente level on phytoplankton community structure in 16 iferente water bodies. **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 1, p. 32–39, jan. 2010.

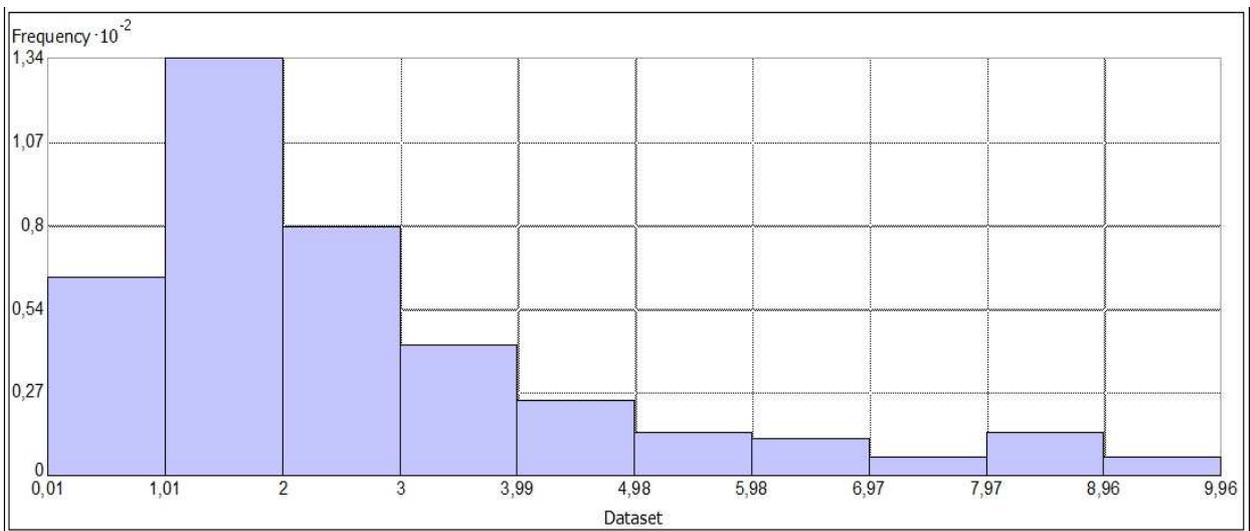
## Anexo I

### Histogramas com assimetria positiva

#### Clorofila-a



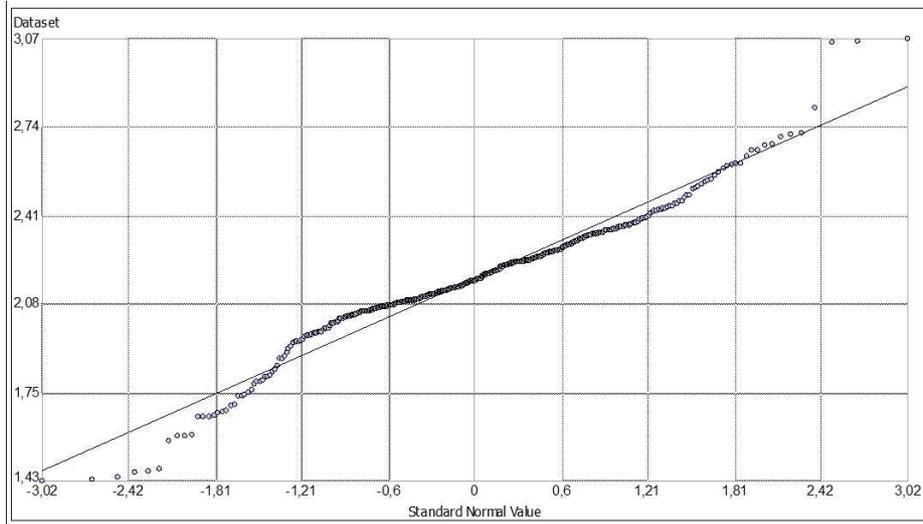
#### Ficocianina



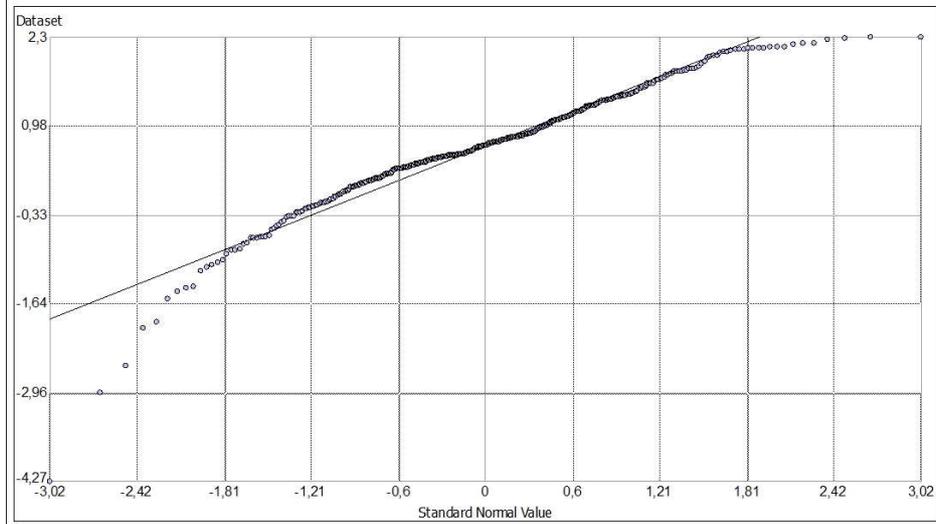
## Anexo II

### Curvas de Distribuição dos pontos em log

#### Clorofila-a



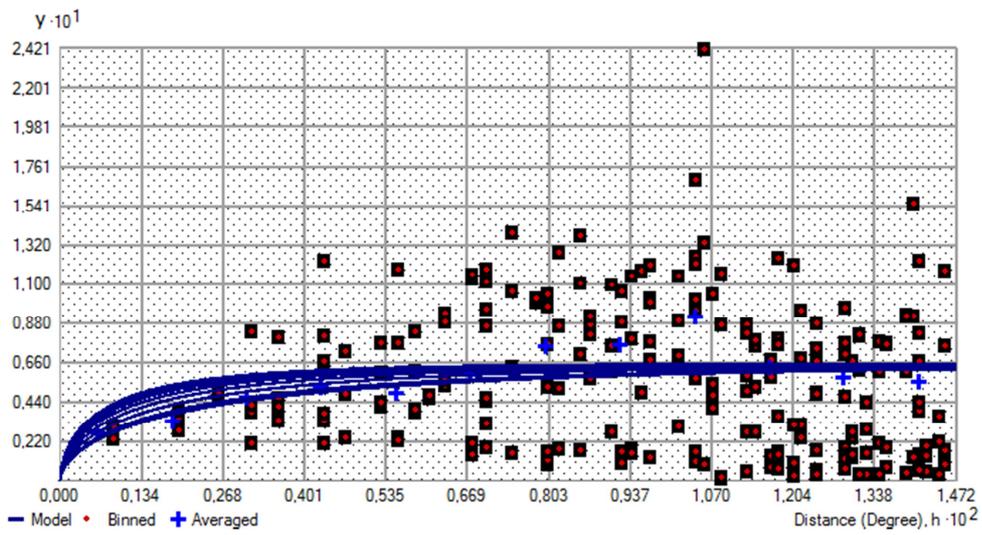
#### Ficocianina



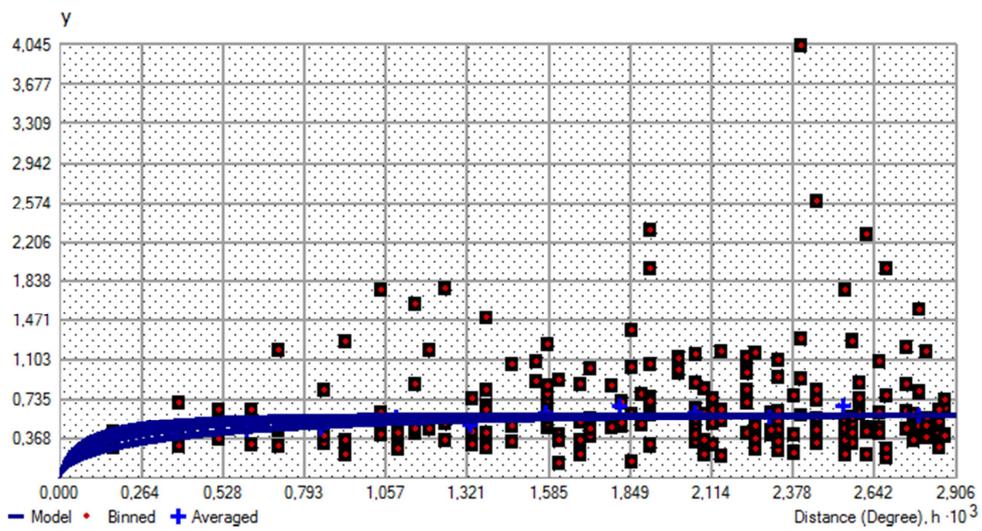
## Anexo III

### Gráficos de semivariograma

#### Clorofila-a



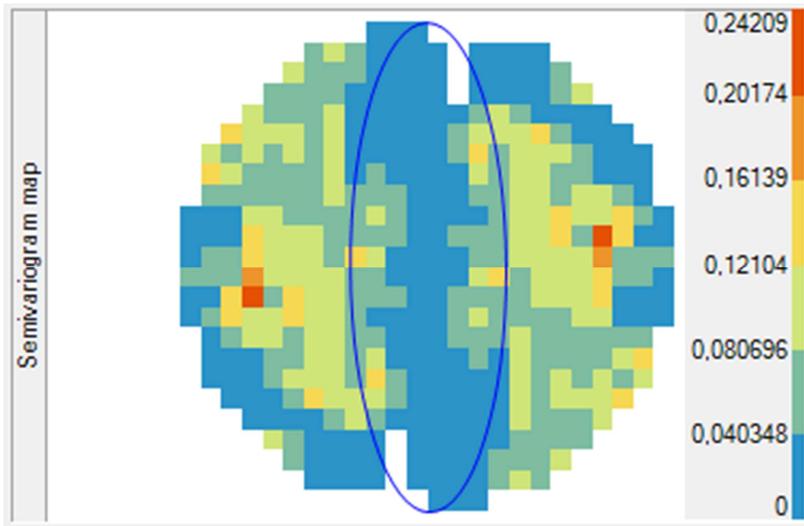
#### Ficocianina



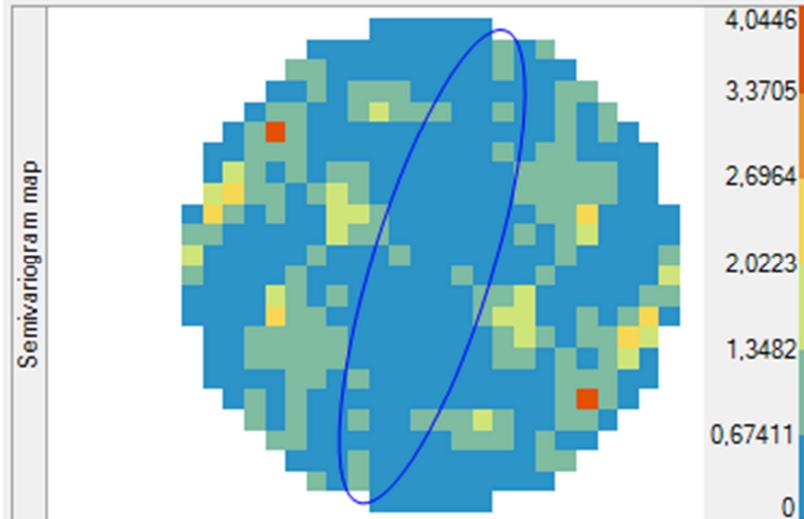
## Anexo IV

### Mapas de semivariograma

Clorofila-a



Ficocianina



## Anexo V

### Dados Estatísticos

	FICOCIANINA	CLOROFILA-A
N	396	396
MÉDIA	2,672	9,064
MEDIANA	2,006	8,77
MÍNIMO	0,0014	4,16
MÁXIMO	9,956	21,552
1º QUARTIL	1,33	7,918
3º QUARTIL	3,422	10,053
DES. PADRÃO	2,083	2,222
VARIÂNCIA	4,339	4,937
ASSIMETRIA	1,536	1,514
CURTOSE	4,989	9,663
EMQ	1,329	0,666