

Espacialização de parâmetro de qualidade da água para reservatório de Três Marias/MG.

Victor Pedroso Curtarelli¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
victor.curtarelli@gmail.com.br

Abstract: A turbidez é um parâmetro de qualidade da água relacionado com os constituintes da coluna d'água e seu comportamento óptico, muito usado no monitoramento ambiental. A sua especialização e a compreensão de seu comportamento no espaço podem ser feitas através de métodos de interpolação estatísticos. Para este estudo foram analisados dados de turbidez medidos por sondas em estações telemétricas no reservatório de Três Marias/MG, realizando interpolações dos dados e comparação dos métodos para validação do estudo, usando de tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas e linguagem de programação em R. Foram criadas superfícies da turbidez, uma através de interpolação geoestatística por krigeagem ordinária (KO), e outra por regressão linear, criando-se modelo empírico para a correlação entre a turbidez e grade numérica de reflectância para a banda 4 (vermelho) Landsat-8/OLI, e por fim comparando os resultados de krigeagem com o modelo empírico e seus resíduos. Segundo o observado em estudo este reservatório possui baixos índices de turbidez, ou seja, águas bem claras e homogêneas espacialmente.

Palavras-chave: qualidade da água, ótica da água, turbidez, métodos de interpolação, water quality, water optics, turbidity, interpolation methods.

1. Introdução

A Terra é um sistema único quanto à quantidade de água, dentre os planetas já estudados pelo ser humano, onde 74 % de sua superfície é coberta por água. Estima-se que a maior parte do volume da água do planeta Terra, cerca de 97 %, ocorre nos grandes oceanos salinos, e a parcela que de fato interessa para o consumo humano equivale a aproximadamente apenas 0,02% do volume da água da Terra, representando rios, córregos, lagos e reservatórios de água doce e reservatórios de água subterrânea que equivalem a aproximadamente 0,6 % do volume de água da Terra (JENSEN, 2009). Outra característica importante da é a qualidade, que envolve um amplo conjunto de parâmetros físicos, químicos e biológicos, imprescindíveis para o enquadramento de corpos hídricos e determinação de seus possíveis usos, desde a captação para uso em abastecimento público e dessedentação de humanos e animais até o uso recreativo e esportivo, seguindo as diretrizes das resoluções CONAMA n° 357 e 430 (BRASIL, 2005; 2011), e a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (BRASIL, 1997).

A qualidade da água em corpos hídricos está diretamente relacionada com a ação antrópica no seu entorno e proximidades, exemplos disso são aumentos na eutrofização devido à aumento na carga de nutrientes e crescimento de algas e fitoplânctons no corpo hídrico (ESTEVES, 1998). Há também aumento da turbidez devido à retirada de cobertura natural do solo no seu entorno, aumentando assim o carregamento de sólidos por escoamento superficial da água até o corpo hídrico, despejo de efluentes com carga de sólidos de forma clandestina, assim como o crescimento de algas e fitoplânctons, que também ficam suspensos na coluna d'água, medida em NTU – *nephelometric turbidity*

unity (VON SPERLING,2005). Esses parâmetros são de interesse para estudos ambientais sobre recursos hídricos (RH), podendo ser abordado por uso de ferramentas de geoprocessamento e geotecnologias como o sensoriamento remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG ou GIS em inglês) para a manipulação de dados e geração de informação, através de propriedades óticas da água e sua correlação com outros parâmetros físicos, químicos ou biológicos.

Modelos para determinação de superfícies contínuas e espacialização de dados medidos pontualmente a partir de técnicas de interpolação de dados podem ser abordados por metodologias e modelos estatísticos. Para cada ponto é estimado valor a partir da interpolação de dados medidos de amostras para efeitos locais. Métodos estatísticos para espacialização de determinado parâmetro são feitos por meio da estimativa de valores com base em valores medidos *in situ* por meio de um estimador por probabilidade, também conhecido como estimador estocástico (CAMARGO et al., 2004).

Frente ao exposto acima este estudo foi uma abordagem para um conjunto de dados adquiridos de pesquisa anterior feita por Ferreira (2014) sobre o reservatório de Três Marias/MG, na tentativa de construir um caminho para estudo futuro em dissertação de mestrado no curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo a espacialização e análise da distribuição espacial do parâmetro de turbidez para o reservatório de Três Marias/MG utilizando método estatístico de interpolação por krigagem ordinária, fazendo-se então uma verificação cruzada entre a interpolação dos dados medidos em campo e o modelo empírico por regressão linear da correlação espacial de uma grade numérica de reflectância (Level 2) do sensor OLI a bordo do satélite orbital Landsat-8 com o parâmetro em questão.

3. Metodologia

Este trabalho foi realizado com uso de tecnologias computacionais livres. Para manipulação dos dados como recortes, extração de máscaras de água, reprojeções, cálculo de diferença entre rasters foi utilizado o *software* Quantum GIS 3.0.2 (QGIS) e para a realização da interpolação estatística dos dados medidos *in situ* e modelo empírico para uma grade numérica de reflectância do sensor OLI do satélite Landsat-8, assim como a verificação do erro (ou acerto) entre modelos, foram realizados através de código de programação escrito em linguagem R versão 3.5.0, com o uso de *software* RStudio e pacotes de manipulação de dados espaciais (*geodata*) e geoestatística, como os pacotes “gdal” e “krige” respectivamente, os dados foram salvos em formatos possíveis de serem lidos pelo QGIS, podendo ser previamente visualizado usando do pacote Mapview instalado no ambiente R usado, de onde foi possível visualizar cálculos e representações de erros feitos pelo *script*.

A grade numérica obtida para o estudo foi feita para o dia 13 de junho de 2013 e a saída de campo para coleta de dados foram realizadas em dias próximos à passagem do satélite, totalizando um conjunto de 26 amostras (FERREIRA, 2014). Destas amostragens 19 foram selecionadas para este estudo, devido à ausência de medição do parâmetro de turbidez para o ponto em questão ou falta de confiabilidade no dado por erros ou

discrepâncias, considerando o modelo calibrado para os 19 pontos selecionados, estes pontos foram nomeados com o mesmo código que o usado por Ferreira (2014) em seu estudo.

A figura 1 apresenta as etapas propostas para o estudo, representadas pelo fluxograma OMT-G do problema.

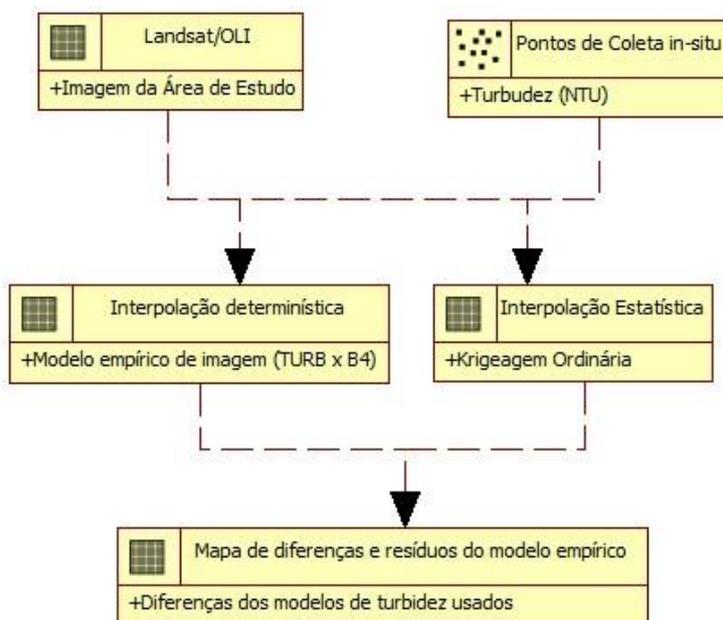


Figura 1 – Fluxograma OMT-G do problema proposto.

3.1. Área de estudo

O reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias está localizada nas coordenadas 18°08'54" sul e 45°41'15" oeste, datum WGS 84, sendo contida dentro da faixa 23 sul da projeção planimétrica Universal Transversa de Mercator (UTM) optada para esta para representação da área em um plano cartesiano. Esta usina foi inaugurada em 1962, estando localizada na região central do estado de Minas Gerais, localizada no alto curso do rio São Francisco (Figura 2).

Este reservatório possui uma área aproximada de 927,10 km² e forma dendrítica (ramificada), caracterizada por grande quantidade de afluentes e subafluentes, formado pelo barramento do rio São Francisco, possuindo volume útil de água de aproximadamente 15 bilhões de m³. A UHE possui potência instalada de 396 megawatts, sendo responsável por 80 % da energia consumida pela região norte de Minas Gerais (CEMIG).

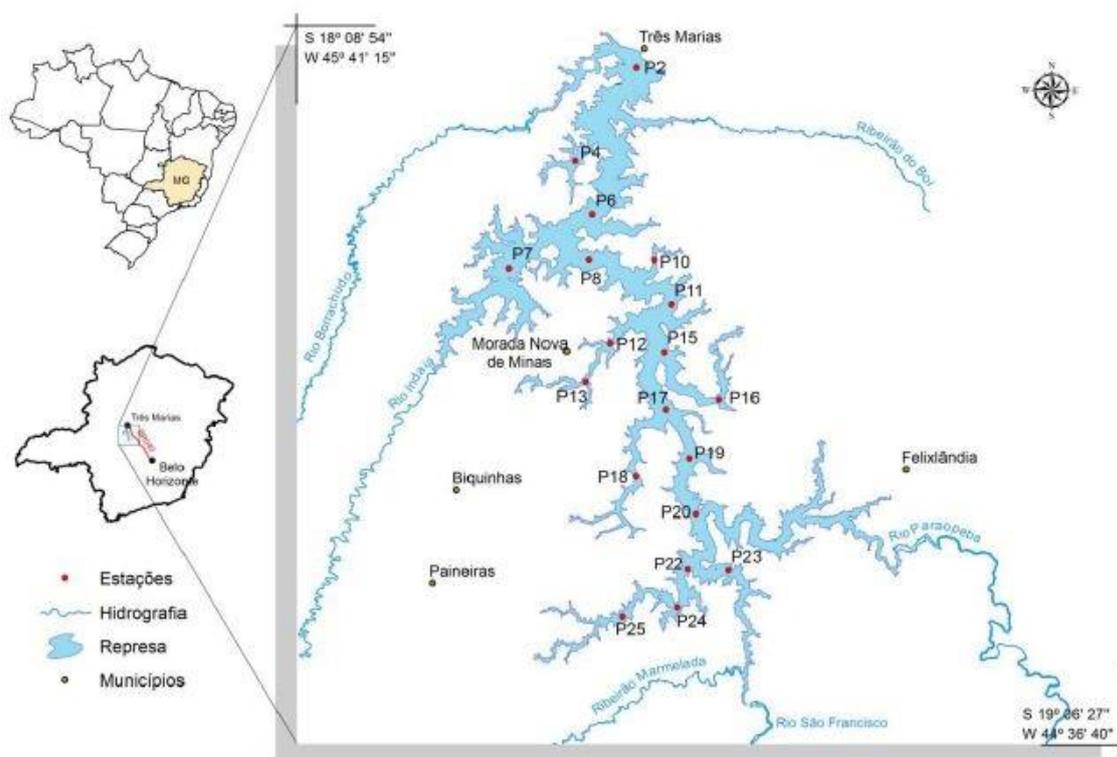


Figura 2 – Reservatório de Três Marias e estações medidoras. Fonte: Adaptado de Ferreira (2014).

A figura 2 apresenta a localização do reservatório, seus principais afluentes, municípios no entorno e as 19 estações de medição de parâmetros de qualidade usados neste estudo, obtidos do estudo de Ferreira (2014).

O rio São Francisco é um rio de importância histórica para o Brasil, e as principais atividades antrópicas desenvolvidas no entorno do reservatório potenciais, geradoras de impactos na qualidade da água do reservatório, destacam-se: a expansão urbana e aumento no volume da carga de esgoto despejada nos recursos hídricos, atividades de extração mineral, silvicultura e o garimpo (ALMEIDA, 2010).

A construção do reservatório teve como objetivos a regularização do curso de água para a melhoria da navegabilidade do rio, a produção hidrelétrica e o fomento da indústria de irrigação na região. Tem como principais afluentes os rios: São Francisco, Paraopeba, Pará e Indaiá (EUCYDES, 2007).

A região da Terra na qual a área de estudo está inserida possui clima tropical quente semiúmido com 2 estações definidas e distintas, onde as maiores precipitações ocorrem nos meses de outubro a abril e o mês de maior seca sendo em setembro. A temperatura na região é, na sua média anual, de aproximadamente 20 a 28 °C, enquanto a média anual de pluviosidade é de aproximados 1500 mm/ano.

Considerando a exutória na barragem do reservatório, a área de drenagem de sua bacia hidrográfica é de 57.097 km², compreendendo uma topografia moderadamente acidentada, com serras e terrenos ondulados, onde a altitude dentro da bacia varia dos 600 aos 1600 metro. Além do bioma do cerrado a bacia contempla fragmentos de mata atlântica, em especial nas cabeceiras dos rios afluentes.

3.2. Coleta de dados *in situ*

A campanha de coleta de dados foi realizada por Ferreira (2014) entre os dias 17 a 21 de junho de 2013, onde foram medidas amostras de água em 26 pontos dentro do reservatório de Três Marias, de montante para jusante, destas 19 amostras foram utilizadas neste estudo devido à falta ou discrepância das informações sobre os parâmetros em questão.

Ferreira (2014) coletou uma serie de dados para os pontos amostrados usando equipamentos quem mede radiação eletromagnética para seu estudo, além da aquisição de dados de parâmetros de qualidade da água com feitas por sondas multiparametricas YSI 6600 instaladas nas estações. Esta sonda permite analisar a qualidade da água por meio de sensores que medem parâmetros como: oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, resistividade, pH, potencial de oxido redução, salinidade e temperatura. De onde foram retirados os dados de turbidez para este estudo.

3.3. Espacialização de parâmetros

Uma análise estatística exploratória dos dados de turbidez é feita inicialmente correlacionando sua distribuição com a banda 4 (vermelho) de grade numérica Landsat-8/OLI, o que demonstrou uma boa correlação e ajuste à uma reta, ou seja, um bom valor de R^2 de forma a validar as estimativas a serem feitas.

Para a espacialização do parâmetro de turbidez através da interpolação de superfícies foram utilizados um modelo empírico da reflectância com base em grade numérica Landsat-8/OLI para banda 4 (vermelho), que consiste num método de regressão linear da correlação desta grade numérica com o parâmetro de turbidez medido *in situ*, e modelo geoestatístico para espacialização dos dados de turbidez medidos *in situ* usando metodologia de krigeagem orfinária (KO) (ANDRIOTTI, 2003; CAMARGO et al., 2004; CHILÉS e DELFINER, 2012; CHUN, 2013).

3.3.1. Método geoestatístico

Uma forma de tratar problemas de espacialização de superfícies com base em parâmetros medidos pontualmente *in situ* está na abordagem por métodos probabilísticos de modelagem, contemplando um conjunto de métodos estatísticos. A geoestatística nada mais é que estatística aplicada a dados espaciais (dados que possuem posição geográfica associada a eles).

Para modelagem estatística, parâmetros (coeficientes) usados para derivar produtos de saída são estimados de maneira objetiva seguindo a teoria da probabilidade. Diferentemente de modelos mecânicos, no caso dos modelos estatísticos e necessário seguir-se diversos passos de análises estatísticas dos dados antes de ser possível a geração de um mapa, o que faz com que todo o processo de mapeamento se torne mais complexo, porém auxilia na produção de mapas mais confiáveis, na compreensão das fontes de erros nos dados assim como retratar dados problemáticos que precisam ser revistos (HENGL, 2009).

Uma das principais vantagens da geoestatística está na sua facilidade de diferenciar bem e atribuir valores de variância de estimação e dispersão, sendo necessária a distinção

entre os dois tipos. A variância de estimação avalia o erro cometido ao avaliar uma variável medida por meio de um estimador, dado determinado nível de significância, ela é representada pela diferença quadrática entre valor medido e valor estimado. A variância por dispersão mede a dispersão dos valores das amostras, o que tem significado físico, avaliando a dispersão ou flutuação dos dados, como pode ser feito pela mudança no suporte de amostragem (ANDRIOTTI, 2003).

Para este trabalho foi escolhido o método geoestatístico de interpolação por krigeagem ordinária (*ordinary kriging – OK*). Durante muitas décadas a krigeagem era usada como sinônimo de interpolação geoestatística, originada da indústria mineira se traduzindo como melhoria na estimativa de reservas de minérios. A primeira publicação deste método foi feita no início da década de 1950 e rapidamente este método se desenvolveu durante a década seguinte, desde então essa técnica vem sendo redescoberta, por diversas vezes, sendo implementada usando novos tipos de aproximações (HENGL, 2009). A krigeagem visa determinar ponderadores das amostras envolvidas na estimativa, de forma a minimizar os valores da variância de estimação, estabelecendo que a soma desses ponderadores seja igual a um, ou 100 % (ANDRIOTTI, 2003).

O método de krigeagem ordinária (OK) é uma versão padrão de krigeagem, segundo Hengl (2009) suas principais previsões baseadas no modelo são descritas pelas equações 1 a 11 abaixo:

$$\sigma_e^2 = \text{valor esperado para } (Z - Z^*)^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Z(x) = \mu + \varepsilon'(x) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde σ_e^2 é a variância esperada, μ é a função da constante estacionária (média global) e $\varepsilon'(x)$ é a parte da variação relacionada com a correlação espacial estocástica. Suas previsões são feitas como na interpolação pelo inverso do quadrado da distância:

$$\hat{Z}_{OK}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i(x_0) * Z(x_i) = \lambda_0^T * Z \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde λ_0 é o vetor dos pesos de krigeagem w_i , Z é o vetor de n observações nos locais primários. De certa maneira a krigeagem pode ser considerada como uma sofisticação do método de interpolação pelo inverso do quadrado das distâncias. Intuitivamente, deve existir um meio de estimar os pesos de maneira objetiva, assim os pesos representem uma estrutura de auto correlação espacial mais próxima da realidade.

Considerando este fenômeno como estacionário e de segunda ordem, desta forma a covariância entre dois pares quaisquer, separados por vetor distância h , $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ existe e depende apenas de h , conforme equação 4 e 5 abaixo:

$$C(h) = COV[Z(x_i), Z(x_i + h)] = E[Z(x_i) * Z(x_i + h)] - m^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$E[Z(x_i) * Z(x_i + h)] = C(h) + m^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

A estacionaridade da covariância implica na estacionaridade da variância, como descrito na equação 6 e 7 abaixo:

$$Var(Z(x_i)) = E[Z^2(x_i)] - 2m * m + m^2 = E[Z^2(x_i)] - m^2 = C(0) \quad (\text{Eq. 6})$$

$$E[Z^2(x_i)] = C(0) + m^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Dessa maneira as hipóteses de média constante e estacionariedade da covariância fazem com que $C(h)$ seja suficiente para se caracterizar a variável regionalizada, permitindo-se caracterizar o termo estocástico $\varepsilon'(x)$ da equação 2. Para determinar $C(h)$ é usada uma função conhecida como variograma ($2\gamma(h)$), definida a seguir.

$$2\gamma(h) = E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$2\gamma(h) = E[Z^2(x_i)] - 2E[Z(x_i) * Z(x_i + h)] - E[Z^2(x_i + h)] \quad (\text{Eq. 9})$$

Substituindo-se as equações 5 e 7 na equação 9 obtém-se a equação 10 a seguir:

$$2\gamma(h) = 2C(0) - 2C(h) \text{ ou } \gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (\text{Eq. 10})$$

Uma maneira para a análise dos dados pontuais está na derivação e representação gráfica da chamada de diferença das semivariâncias entre valores vizinhos, conforme:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 = C(0) - C(h) \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde $z(x_i)$ é o valor da variável alvo em certo local amostrado e $z(x_i + h)$ é o valor de um vizinho à distância $x_i + h$, $C(0)$ é chamado de efeito pepita, valor do semivariograma para distância h igual a zero, e $C(h)$ a covariância dada a distância h . Supondo que existem n pontos observados, isso produz $n * (n - 1)/2$ pares para os quais a semivariância pode ser calculada. Desta forma pode-se plotar todas as semivariâncias por suas distâncias de separação, o que produz um variograma em nuvem de difícil visualização da informação gerada, por isso os valores são calculados como médias para uma distância padronizada, de onde se pode representar uma amostra de variograma experimental. O que é esperado como visualização é que as semivariâncias são menores quanto menor a distância, de onde pode ser interpretado que os valores de uma variável alvo são mais similares à menores distâncias, até certa distância onde as diferenças entre os pares de variáveis medidas e estimadas são muito próximas da variância global.

O semivariograma pode ser determinado assumindo-se uma hipótese de que o fenômeno em questão é isotrópico, ou seja, varia de forma igual em qualquer direção no plano da superfície, ou anisotrópica, variando de forma desigual segundo a direção. Para a hipótese isotrópica o semivariograma depende apenas da distância entre amostras, já em casos anisotrópicos o semivariograma depende da distância e direção, como o exemplo da dispersão de uma pluma de efluentes em um lago ou em águas subterrâneas.

O semivariograma é apresentado na figura 3, seus parâmetros mais importantes são: o raio de alcance simbolizado pela letra a , distância dentro da qual as amostras estão correlacionadas entre si espacialmente, e a partir da qual não existe mais correlação das amostras; o patamar simbolizado por C , valor do semivariograma correspondente à distância igual ao raio de alcance, sendo que acima deste valor não há mais correlação espacial das amostras; e o efeito pepita, simbolizado por $C(0)$ (ou C_0), componente caótica, o valor do semivariograma para uma distância h igual a zero, um ruído que não explica nada sobre os dados. Esse semivariograma é ajustado então para um modelo

teórico que melhor se ajuste ao semivariograma, podendo ser esférico, exponencial ou gaussiano, considerando também seus parâmetros acima expostos.

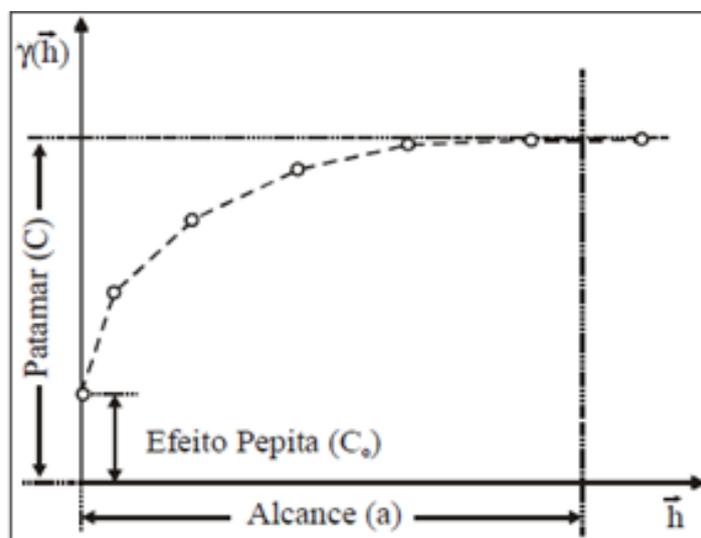


Figura 3 – Exemplo da representação de um semivariograma e seus parâmetros. Fonte: adaptado de Camargo et al. (2004)

Sempre haverá um certo grau de incerteza (erro de estimativa) quando aos parâmetros utilizados, mesmo após a geração de semivariograma experimental para a turbidez e seu modelo de ajuste, este grau de incerteza pode ser obtido por um método de validação cruzada, o que envolve estimativa dos valores já conhecidos por meio de parâmetros do modelo de ajuste. Este semivariograma pode ser realizado levando-se em conta o sentido da estimativa, considerando então características de isotropia ou anisotropia da distribuição do fenômeno estudado no espaço.

Por fim a interpolação estatística por krigeagem é realizada, criando-se uma grade regular de células de valores estimados a partir dos dados amostrados *in situ* e superfície da variância da estimativa.

3.3.2. Modelo empírico da grade numérica Landsat-8/OLI

O modelo empírico da grade numérica Landsat-8/OLI para a cena do reservatório de Três Marias em data próxima à coleta de dados *in situ* é uma forma de especializar o dado de turbidez no reservatório através de uma regressão linear de sua correlação espacial com a reflectância para da grade numérica para banda 4 (vermelho), validando-a por meio do cálculo do erro de R^2 e os resíduos do modelo.

Para a espacialização da turbidez é feita a regressão acima citada usando código em linguagem R e a partir dos coeficientes gerados para a reta de ajuste são usados para cálculo do parâmetro de turbidez pixel a pixel, através da equação:

$$Turbidez = c1 + c2 * B4 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde $c1$ e $c2$ são os coeficientes de linear e angular da reta e $B4$ o valor da reflectância para a banda 4 no pixel em questão.

3.3.3. Estimativa de erro e diferença entre krigeagem e modelo empírico

Através da geração de rasters (GeoTIFF) para a modelagem por interpolação geoestatística de krigeagem e do modelo empírico da grade numérica Landsat-8/OLI por regressão linear, é feito o cálculo da diferença entre os valores, registrados em um raster das diferenças entre os modelos representando as diferenças entre as estimativas.

Como já mencionado o modelo por regressão linear da grade numérica pode ser validado quanto seu erro e resíduos seguindo o cálculo do R^2 , que pode ser comparado com a diferença entre o modelo empírico da grade numérica e a interpolação por krigeagem, de forma a avaliar se em pixels onde há diferença entre os modelos estão associados a resíduos altos ou baixos para o modelo empírico, validando o mapa de diferenças.

4. Resultados e discussão

Através deste trabalho foi gerado um *script* de programação em linguagem R usando o *software* RStudio, conforme figura 4 abaixo, onde se destaca na janela inferior direita o visualizador do pacote Mapview.

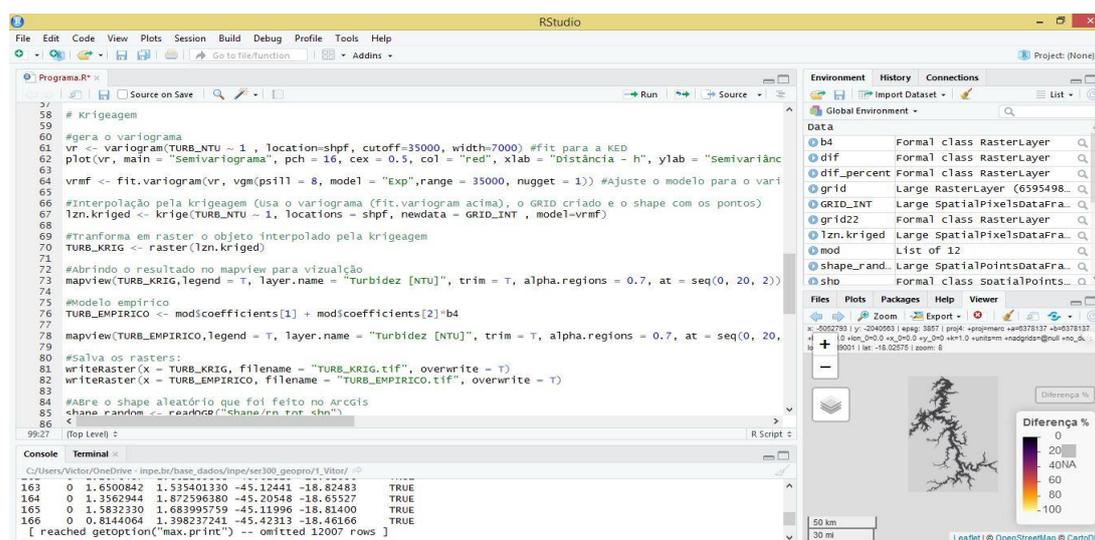


Figura 4 – Programação em RStudio para parte da resolução do problema.

A correlação da distribuição da turbidez medida em campo com a banda 4 (vermelho) do Landsat-8/OLI foi satisfatória para o modelo, atingindo um valor de R^2 de 0,9023, valor de alta confiabilidade (Figura 5). A equação da reta que melhor se ajusta à correlação dos dados medidos com os dados de reflectância para a banda 4 é a apresentada na equação 13.

$$y = 161,8 * x + 6019 \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde y é o valor de reflectância dado valor x de turbidez, 161,8 é o coeficiente angular e 6019 o coeficiente linear da reta.

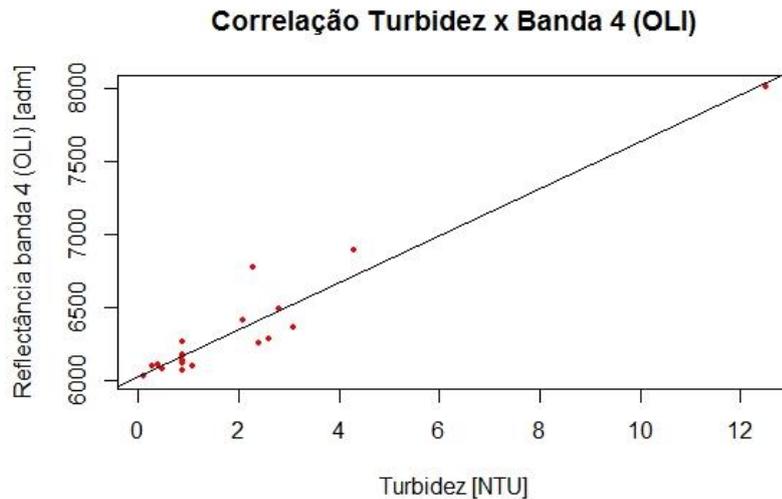


Figura 5 – Correlação dos dados entre turbidez medida e reflectância para o estudo.

Após a avaliação da correlação dos dados medidos *in situ* com os dados da grade numérica de reflectância foi gerado e analisado o semivariograma de forma a ajusta-lo para os dados utilizados no estudo (Figura 6). O semivariograma foi ajustado de maneira manual com uso de comando do pacote krige (RStudio) onde sua curva foi melhor ajustada pelo modelo esférico, atingindo um alcance de aproximadamente 20000 m, máxima distância onde ainda há correlação espacial dos dados, onde foi atingido valor máximo de variância (paratamar) no valor de aproximadamente 6,15 e efeito pepita muito próximo de zero (assumido como zero), levando à uma contribuição muito significativa do modelo de krigeagem. Foram geradas as superfícies por krigeagem ordinária, assumindo-se o fenômeno distribuído de forma isotrópica, e pelo modelo empírico da grade numérica por regressão linear (Figura 7 e 8).

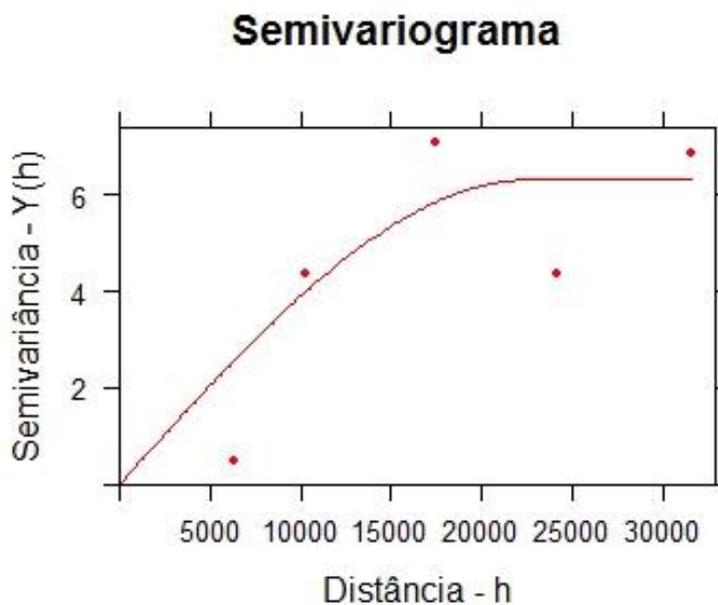


Figura 6 – Semivariograma para os dados do estudo, ajustado para modelo esférico.

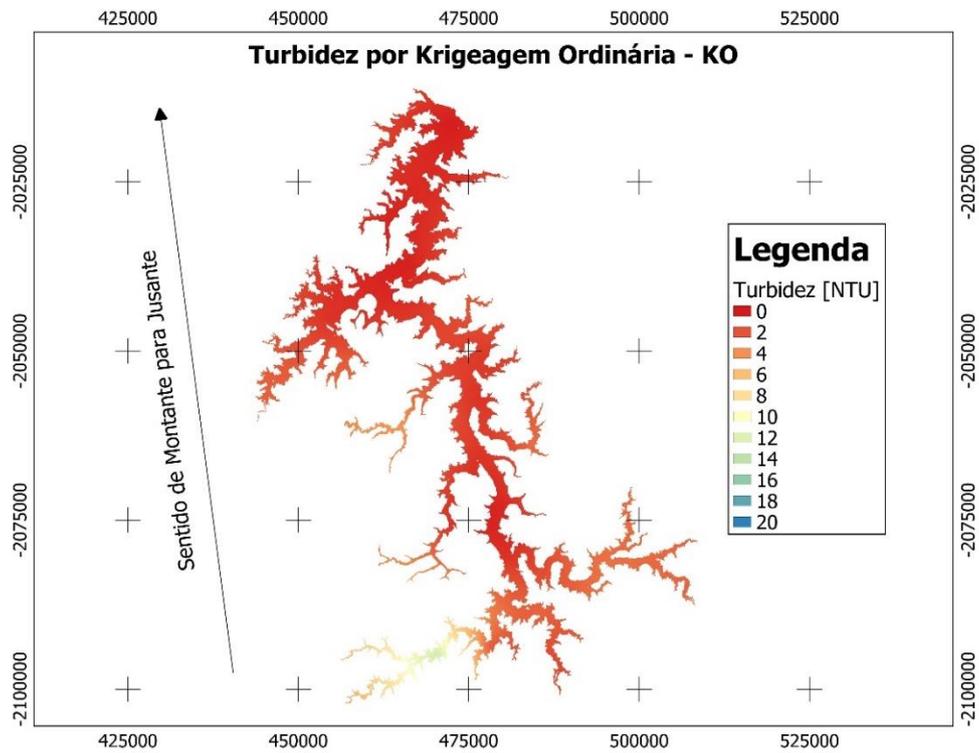


Figura 7 – Superfícies do modelo de interpolação por krigeagem ordinária.

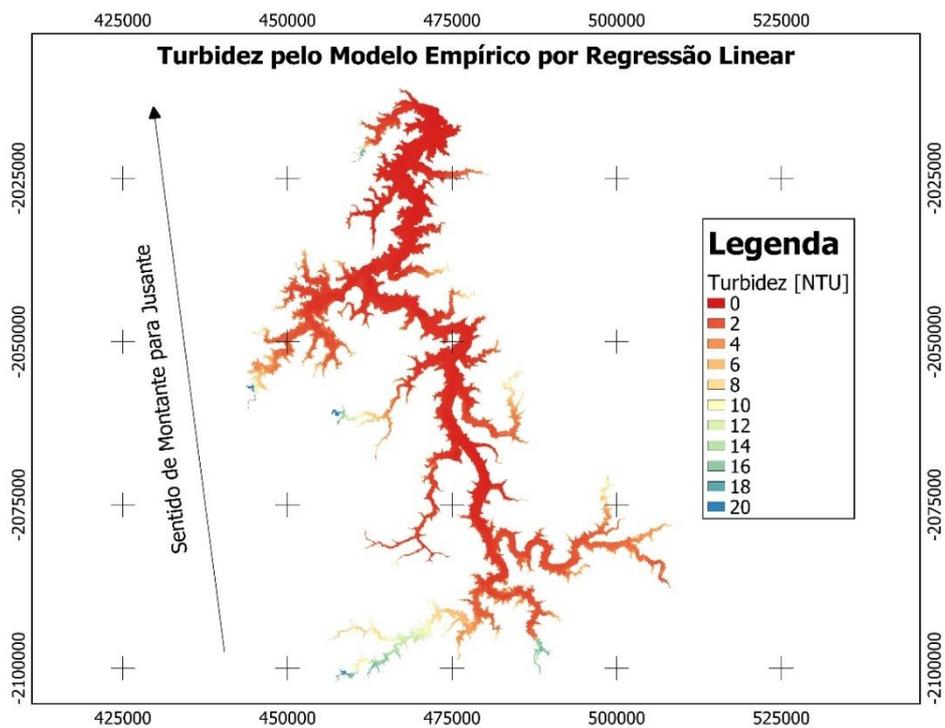


Figura 8 – Superfícies do modelo empírico de grade numérica Landsat-8/OLI da banda 4.

Pode-se observar que os dois modelos são bem parecidos evidenciando a correlação dos dados e validando a krigagem, uma vez que o modelo apresenta um bom índice de acerto e baixos resíduos (Figura 9 e 10).

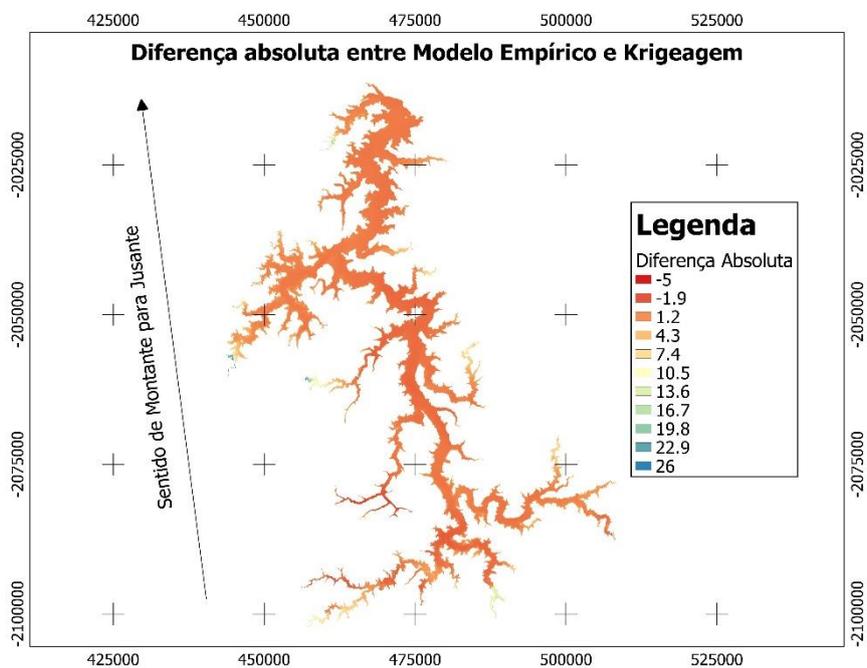


Figura 9 – Representação do raster de diferença absoluta entre modelos do estudo.

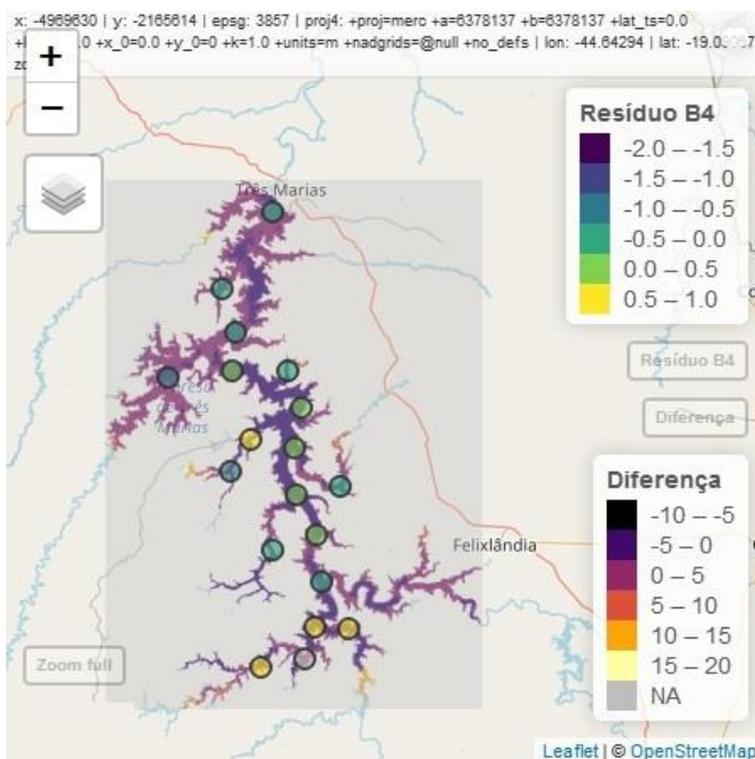


Figura 10 – Comparação da diferença absoluta entre modelos e os resíduos para a relação dos dados como visualizado no *software* RStudio pelo pacote Mapview.

Após da criação dos dois arquivos rasters (GeoTIFF) do modelo empírico e da interpolação por krigeagem (Figura 7), foi realizada operação de subtração de um em relação ao outro, criando assim um raster da diferença entre os dois modelos e shape de pontos dos resíduos do modelo empírico (Figura 8) e possível comparação entre ambos (Figura 9). Além da diferença absoluta foi realizado cálculo da diferença percentual entre ambos os modelos para melhor visualização de como a diferença entre os modelos é muito baixa, levando a crer que a turbidez realmente se correlaciona muito bem com a reflectância para a banda 4 do Landsat-8/OLI para este estudo de caso e o modelo empírico da grade numérica auxilia na validação da interpolação por krigeagem ordinária proposta (Figura 11).

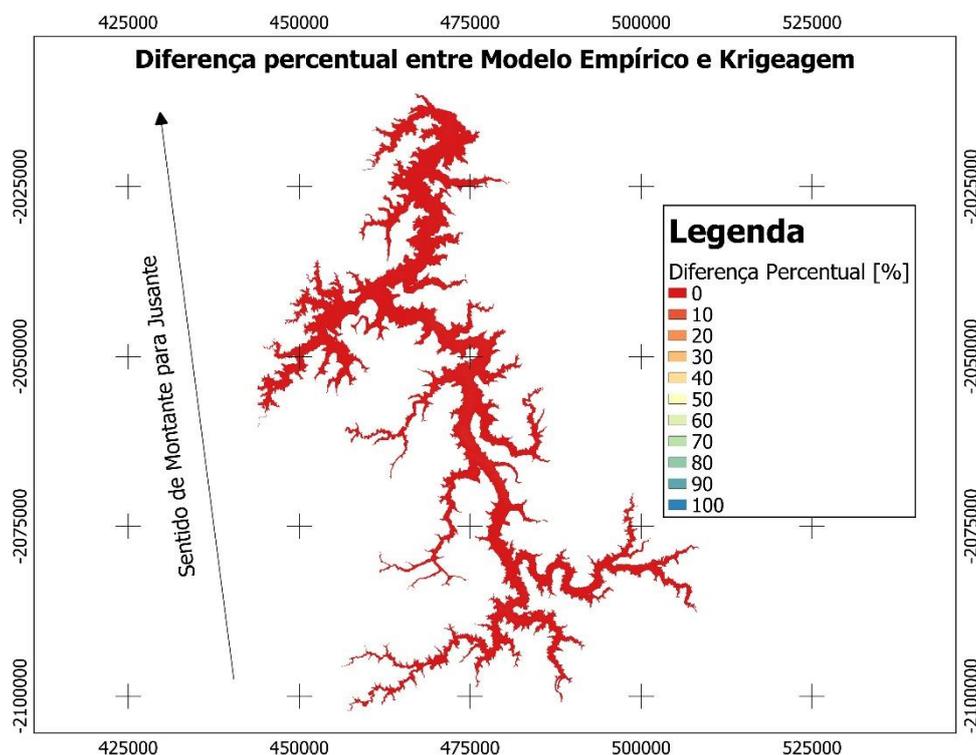


Figura 11 – Diferença percentual entre modelo empírico e interpolação por krigeagem ordinária.

Cabe ressaltar que todas as imagens foram plotadas com uso de RStudio para visualização dos resultados, porém a escala gráfica das imagens não surte efeito uma vez que essas são imagens JPG inseridas em texto, esta escala é automática, pois o RStudio gera um mapa interativo onde é possível a mudança de escala e zoom.

A base de dados do plano de fundo se encontra embutida ao *software* RStudio, atualizada e adquirida pela nuvem, ela é disponibilizada de forma automática pelo pacote de plotagem usado, para este estudo foi usada a base do Open Street Maps.

5. Conclusões

Devido aos baixos e homogêneos valores de turbidez, tanto medidos quanto simulados, podemos dizer que o reservatório de Três Marias possui águas claras e bem homogêneas espacialmente.

Modelos estatísticos são ferramentas muito valiosas em estudos prévios para a tomada de decisões sobre o gerenciamento de recursos hídricos como reservatórios de água de UHE.

O presente estudo é uma tentativa de compreender processos e ferramentas inerentes ao geoprocessamento, de forma a auxiliar estudo futuro em área similar ou distinta. Apesar de um simples método de krigagem ordinária este estudo encoraja novas pesquisas a serem feitas.

Uma vez que a turbidez é distribuída espacialmente no reservatório de Três Marias de forma anisotrópica, tendo sentido de preferência seguindo o eixo longitudinal do reservatório é importante se avaliar características de anisotropia do fenômeno no reservatório.

Em vista disso avanços nestes estudo devem ser realizados no sentido de testar métodos de krigagem que levem em conta anisotropia do fenômeno, busca de correção de outros dados medidos in situ e dados medidos por SR, dentre outros modelos de krigagem mais complexas, como co-krigagem, krigagem uni e bidimensional, uni e bidirecional, por regressão, dentre outras, sempre se levando em consideração distância entre pontos para estimativa de valores como uma distância dentro do corpo d'água e não distância euclidiana.

6. Referências bibliográficas

ALMEIDA, D. F. **Gestão ambiental dos sedimentos de corrente do rio São Francisco na região de Três Marias/Minas Gerais**. 2010. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – UFMG, Belo Horizonte, 2010.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora Unisinos. 2003. ISBN 85-7431-171-5

BRASIL. Lei Federal n. 9433, de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH**. Brasília, DF, janeiro de 1997

BRASIL. Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. 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. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Brasília, DF, 2011.

CAMARGO, E.; DRUCK, S.; CAMARA, G. Análise espacial de superfícies. Cap 3. In: **Análise espacial de dados geográficos**. DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (eds). Brasília, EMBRAPA, 2004.

CHILÉS, J. P.; DELFINER, P. **Geostatistics: Modeling spatial uncertainty**. John Wiley and Sons, ed.2. 2012. ISBN 978-0-470-18315-1

CHUN, Y. **Spatial statistics and geostatistics**. SAGE Publications. 2013. ISBN 978-1-4462-0173-2

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 264p.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro. Interciência. 2ª Ed. 602 p. 1998.

EUCLYDES, H. P. (Coord.). Atlas digital das águas de Minas: Uma ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. 2ª Ed. Belo Horizonte: RURALMINAS/Viçosa, MG, UFV, 2007.

FERREIRA, R. M. P. **Caracterização da óticae do carbono orgânico dissolvido no reservatório de Três Marias/MG**. 2014. 128 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE. São José dos Campos, 2014.

GECE, P. Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters – Chapter 2: Radiative transfer theory for inland waters. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-804644-9.

HENGL, T. **A practical guide to geostatistical mapping**. November, 2009. ISBN 978-90-9024981-0

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da segunda edição, 2009. ISBN 978-85-60507-06-1.

LORENZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Edgar Blücher, 2015.

LIM, J.; CHOI, M. Assessment of water quality based on Landsat 8 operational land imager associated with human activities in Korea. **Environmental Monitoring And Assessment**. [s.l.], v. 187, n. 6, p.1-17, 29 mai. 2015.

MISHRA, D. R.; OGASHAWARA, I.; GITELSON, A. A. **Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters**. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-804644-9.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações**. São Paulo: Edgar Blücher, 1989, 308 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v. 1, 3 ed, 2005. 452 p.