



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TURBIDEZ NA BAÍA DE SANTOS (SP) EM RELAÇÃO A VARIÁVEIS AMBIENTAIS DURANTE 2002-2018

Gabriel Lucas Xavier da Silva

Monografia apresentada ao Prof.
Antonio Miguel Vieira Monteiro
como conclusão da disciplina
SER300 - Introdução ao Geopro-
cessamento

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2020

RESUMO

Atualmente quase metade da população mundial está associada a ambientes costeiros vivendo a menos de 100 km da linha de costa. Compreender como as mudanças no uso-ocupação do solo - junto a dinâmica de variáveis ambientais - interferem na qualidade da água destes ecossistemas é muito relevante para a sociedade, especialmente para populações associadas a metrópoles costeiras e portuárias, como é o caso das que circundam a Baía de Santos no litoral do Estado de São Paulo. A turbidez - um dos índices utilizados para modelar a qualidade da água - pode ser estimada através de técnicas de sensoriamento remoto e pode ajudar a compreender a saúde destes sistemas aquáticos através de inferências simples. Desta forma, propomos neste estudo identificar o padrão de distribuição espacial da turbidez na Baía de Santos (SP) e verificar sua possível relação com as variáveis ambientais de uso-cobertura do solo, precipitação e dinâmica de ventos durante o período de 2002 a 2018. Para isso utilizamos um algoritmo de estimação da turbidez via satélite, aplicado sobre os produtos do sensor MODIS/Aqua; bem como conjuntos de imagens do banco de dados MAPBIOMAS, CHIRPS e ERA5. Na fase de análise, aplicamos um algoritmo de agrupamento a fim de realizar a regionalização do parâmetro, e posteriormente realizamos correlações estatísticas entre as séries temporais de turbidez e as variáveis ambientais relatadas. Os resultados obtidos indicam a existência de três zonas principais ao longo da Baía de Santos: Z1 - Costeira, de maior turbidez; (ii) Z2 - Intermediária, de turbidez média; (iii) Z3 - *Offshore*, de menor turbidez. Também podemos constatar uma correlação positiva entre o aumento da infraestrutura urbana e os valores de turbidez, enquanto que a diminuição das áreas de agricultura e pasto apresentaram uma correlação negativa com o parâmetro. Em última análise, a turbidez também apresentou forte correlação positiva com a tensão de cisalhamento do vento durante o outono.

Palavras-chave: Turbidez. Qualidade da água. Uso-cobertura do solo. Climatologia. MODIS.

SPATIO-TEMPORAL CHARACTERIZATION OF TURBIDITY AT SANTOS BAY (SP) IN RELATION TO ENVIRONMENTAL PARAMETERS DURING 2002-2018

ABSTRACT

Nowadays almost half of the world's population is associated with coastal environments living less than 100 km from the coastline. Understanding how the changes in land use and occupation - together with environmental dynamics - interfere in the water quality of these ecosystems is very relevant for society, especially for populations associated with coastal and port metropolises, as is the case of those surrounding the Santos Bay on the coast of the State of São Paulo. Turbidity - one of the indexes used to model water quality - can be estimated using remote sensing techniques and can help to understand the health of this aquatic systems through simple inferences. Here we propose to identify the spatial distribution pattern of turbidity at the Santos Bay (SP) and to verify its possible relation with the environmental variables of land cover, precipitation and wind dynamics during the period from 2002 to 2018. Therefore, we use an algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data applied to the MODIS/Aqua sensor products; as well as image collections from the MAPBIOMAS, CHIRPS and ERA5 database. In the analysis phase, we applied a clustering algorithm in order to regionalize the parameter, and then performed statistical correlations between the turbidity time series and the environmental variables already reported. The results obtained indicate the existence of three main zones along the Santos Bay: Z1 - Coastal, with higher turbidity values; (ii) Z2 - Intermediate, with medium turbidity values (iii) Z3 - Offshore, with lower turbidity values. We could observe a positive correlation between the increase in urban infrastructure and turbidity, while the decrease in agriculture and pasture had a negative correlation with the parameter. Ultimately, turbidity also showed a strong positive correlation with wind shear stress during autumn.

Keywords: Turbidity. Water Quality. Land cover. Climatology. MODIS.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Complexo estuarino da Baixada Santista, com ênfase em seus canais e na Baía de Santos.	3
2.1 Mapa das regiões de interesse evidenciando os polígonos do Polo Central da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista (em amarelo) e da Baía de Santos (em vermelho).	5
2.2 Mapa de uso-cobertura do solo no Polo Central BHBS para os anos 2002 e 2018, considerando as principais classes analisadas no estudo: Formação Florestal, Mangue, Agricultura/Pasto e Infraestrutura Urbana.	9
3.1 Número óptimo de clusters encontrados para média das 198 imagens de turbidez analisadas, de acordo com o método Silhouette (a) e a função NbClust (b).	11
3.2 Mapa da regionalização da turbidez na Baía de Santos entre 2002-2018. Os valores médios encontrados para Z1, Z2 e Z3 são, respectivamente: 8,3 6,2 e 5,5 NTU.	11
3.3 Série temporal da turbidez entre Z1 (em verde escuro), Z2 (em verde claro) e Z3 (em azul), bem como os resultados obtidos pelo teste de Mann-Kendall e sua linha de tendência (em preto).	12
3.4 Variação das áreas de uso-cobertura do solo sobre o Polo Central BHBS durante 2002-2018 considerando as classes de infraestrutura urbana (em cinza); agricultura e pasto (em bege); mangue (em verde escuro) e formação florestal (em verde claro).	13
3.5 Climatologias mensais dos valores de turbidez para cada região (Z1, Z2 e Z3) e de precipitação.	14
3.6 Climatologias mensais dos valores de turbidez para cada região (Z1, Z2 e Z3) e de tensão de cisalhamento do vento.	16
1 Diagrama OMT-G referente ao estudo.	23

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Correlação de Pearson entre as médias anuais de Turbidez e valores anuais de Uso-cobertura do solo. Em vermelho destacam-se as correlações consideradas significativas à 5% (Valor-p < 0.05).	14
3.2 Correlação de Pearson entre os valores de Turbidez e Precipitação para cada mês. Em vermelho destacam-se as correlações consideradas significativas à 5% (Valor-p < 0.05).	15
3.3 Correlação de Pearson entre os valores de Turbidez e Tensão de Cisalhamento do Vento para cada mês. Em vermelho destacam-se as correlações consideradas significativas à 5% (Valor-p < 0.05).	16

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Área de Estudo	2
1.2 Perguntas Científicas	4
1.3 Objetivo	4
2 METODOLOGIA	4
2.1 Turbidez	5
2.1.1 Algoritmo de estimação	6
2.1.2 Algoritmo de agrupamento	7
2.2 Variáveis ambientais	8
2.3 Análise dos dados	10
3 RESULTADOS	10
3.1 Regionalização da turbidez	10
3.2 Turbidez vs Variáveis Ambientais	13
4 DISCUSSÃO	17
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas costeiros ocorrem na estreita interface entre o continente e o oceano, possuindo cerca de 400.000 km de extensão ao redor do globo e constituindo 0.5% da massa continental existente. Dentro destes ecossistemas ocorrem diversos processos físicos, climáticos e geológicos que modificam estes ambientes e a maneira com a qual a sociedade interage com eles. Sabendo-se que quase metade da população mundial está associada diretamente aos ecossistemas costeiros vivendo a menos de 100 km da linha de costa, compreender como as dinâmicas de uso-ocupação do solo - junto à variações nas condições ambientais - interferem na qualidade da água destes sistemas se faz de extrema importância para a sociedade como um todo (JR; FITZGERALD, 2009).

Tendo em vista que a qualidade da água de ecossistemas costeiros está em função de forçantes ambientais e antropogênicas, sua avaliação é feita baseada em diversos parâmetros que tornam possível modular um índice de qualidade global. O Índice de Qualidade da Água (IQA) utilizado pela Agência Nacional de Águas, por exemplo, é obtido através da ponderação de diversos parâmetros como oxigênio dissolvido; demanda bioquímica de oxigênio; coliformes totais; termotolerantes; nitrogênio total; fósforo total; sólidos totais; pH; turbidez e temperatura (SANTOS et al., 2018). Dentro desses parâmetros, a turbidez se mostra uma alternativa simples e eficaz para ajudar a compreender a saúde de um sistema aquático de uma maneira mais superficial (GUPTA et al., 2003), e que pode ser estimada através do uso de técnicas de sensoriamento remoto.

A turbidez é um parâmetro de medida relacionado a transparência da água, controlada pela existência de matéria orgânica, partículas ou sedimentos em suspensão, que interferem na penetração de luz ao longo da coluna d'água (FEDERATION et al., 2005). Tais variáveis são influenciadas por fenômenos hidrológicos; meteorológicos; oceanográficos e antropogênicos; de forma que quanto maior a turbidez, pior tende a ser a qualidade da água analisada. Embora alterações nas taxas de turbidez de um ecossistema aquático tragam implicações evidentes para as populações associadas a este sistema, estes não são os únicos afetados. A redução na quantidade de luz disponível na coluna d'água ocasionada por uma alta turbidez, por exemplo, resultam na diminuição produtividade primária e podem impactar seriamente a cadeia trófica do ecossistema associado (MCCARTHY et al., 2018).

Desta forma, as mudanças no uso-cobertura do solo em regiões costeiras podem contribuir para a variação da turbidez das águas - devido principalmente as mo-

dificações nas áreas de infraestrutura urbana e agricultura - assim como as taxas de precipitação e dinâmica de ventos também podem atuar no aumento do escoamento continental e ressuspensão de sedimentos marinhos (MCCARTHY et al., 2018). Portanto, propomos neste estudo realizar uma caracterização espaço-temporal da turbidez a fim de melhor compreender sua relação com estas variáveis ambientais na região da Baía de Santos.

1.1 Área de Estudo

A Baía de Santos, situada na Bacia Hidrográfica da Baixada Santista (SP) em torno de 24.00°S 46.20°W, é uma região de extrema importância geográfica para o país. Tanto por estar localizada em uma das principais regiões portuárias do Brasil - com um intenso tráfego marítimo - como por também estar associada a um complexo sistema estuarino que passa por grandes cidades litorâneas do estado de São Paulo. Este sistema estuarino é formado por três grandes canais - Santos, São Vicente e Bertioga - dos quais os dois primeiros desembocam diretamente na Baía de Santos (Figura 1.1). A qualidade da água nesta região está intimamente ligada a estes fatores, sendo uma das zonas costeiras mais impactadas pela atividade antrópica do litoral brasileiro. Segundo o último Relatório da Qualidade das Águas Litorâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2008), o local é afetado por diversos fatores como descarte de esgoto doméstico não tratado, resíduos industriais e lixo sólido.

Do ponto de vista oceanográfico, a área de estudo trata-se de uma baía semi-abrigada, com abertura voltada para Sul, em uma área total de 30 km² e profundidade média variando entre 5 e 10 m (DNH, 2003). Estudos climatológicos indicam que a baía apresenta alta estratificação durante o verão; com temperaturas entre 21,58 - 28,40°C e salinidade entre 29,09 - 35,08; e um padrão mais homogêneo durante o inverno; com temperaturas entre 17,56 - 22,85°C e salinidade entre 32,40 - 34,89 (GREGORIO, 2009).

A baía também possui um emissário submarino localizado em seu centro, responsável por liberar ao mar os efluentes pré-tratados da região ao longo dos seus 4km de extensão e à uma vazão de 5,3 m³/s. O esgoto coletado é pré-condicionado pelas estações de tratamento, retirando-se os sólidos e parte do material suspenso, seguido pela adição de cloro para desinfecção das águas. Após estas etapas, os efluentes resultantes são encaminhados para disposição final na Baía de Santos (CETESB, 2008). Segundo Ortiz et al. (2006), a construção de emissários submarinos como forma de mitigar o impacto do descarte de esgoto em zonas costeiras é uma das melhores alternativas existentes, mas exige que o sistema seja muito bem dimensionado e

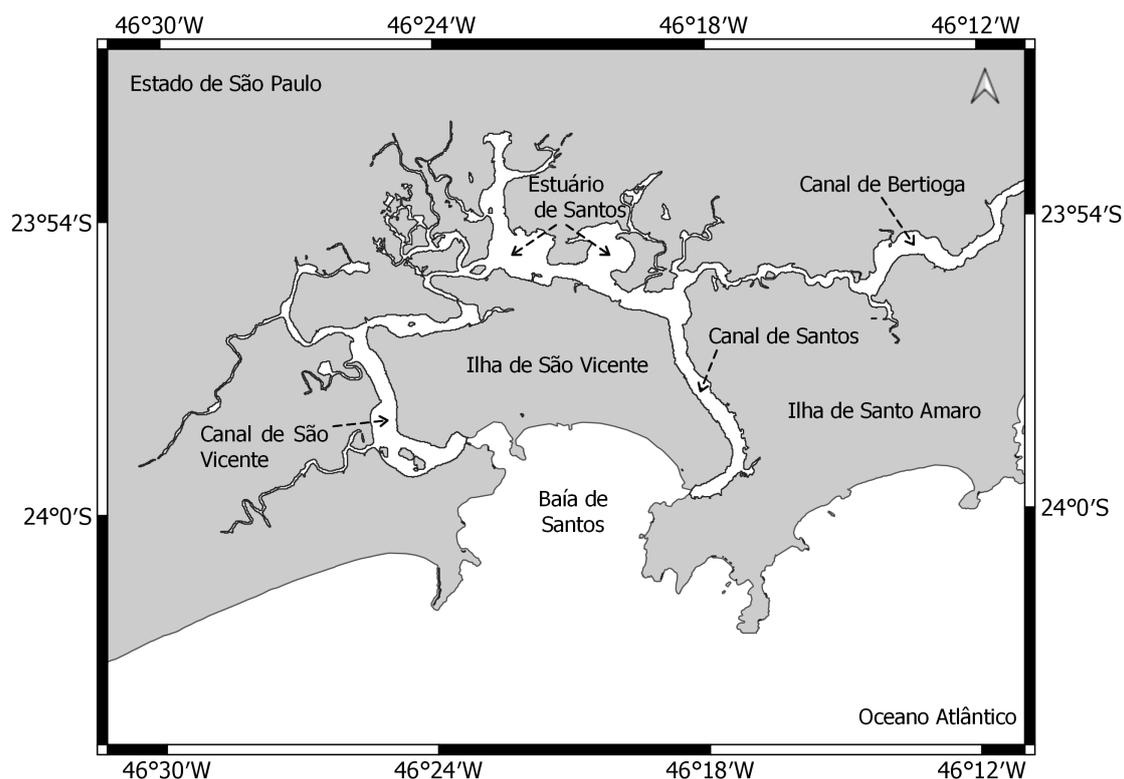


Figura 1.1 - Complexo estuarino da Baixada Santista, com ênfase em seus canais e na Baía de Santos.

controlado. Estudos sobre a hidrodinâmica e dispersão dos efluentes associados ao emissário foram desenvolvidas por Harari et al. (2013) e comprovam que a qualidade da água na Baía está mais associada ao material provindo dos canais de drenagem do que por estas fontes submarinas.

De acordo com o último relatório elaborado pelo Comitê da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista (CBH-BS, 2019), a região vem lutando para alcançar bons índices de coleta e tratamento de esgoto nas últimas décadas. Embora certos municípios possuam índices considerados adequados, com cerca de 95% do esgoto tratado - à exemplo da cidade de Santos - outros encontram-se em situação de qualidade regular. Estima-se que, para Bacia Hidrográfica da Baixada Santista, 80% do esgoto seja coletado e menos de 20% devidamente tratado. Valores muito abaixo da meta estimada pelo governo para daqui dez anos, de acordo com o Programa Onda Limpa.

A crescente expansão urbana e populacional na região também é responsável por degradar florestas nativas, manguezais e pelo aumento do número de fontes difusas não controladas, que contribuem para piores condições de qualidade da água

na Baía (CBH-BS, 2019). Segundo o Censo Demográfico do IBGE, a população da Baixada Santista contabilizava 1,65 milhões de habitantes no ano de 2010. Outro ponto a ser destacado está relacionado com o aumento das ocupações e assentamentos irregulares ao longo do complexo estuarino, locais impossibilitados de terem um devido acesso a saneamento básico e que agravam a qualidade da água deste sistema devido ao descarte de esgoto direto. Como discutido por CARRIÇO (2006), as regiões metropolitanas dos municípios entorno da Baía de Santos possuem taxa de crescimento inferior em relação aos municípios mais distantes, que crescem em ritmo mais acelerado e propensos a criação de zonas periféricas.

Todos estes fatores discutidos ao longo dos últimos parágrafos fazem da Baía de Santos uma peça chave para compreender como as dinâmicas de ocupação populacional podem influenciar nas taxas de turbidez de um complexo estuarino. Desta forma, o estudo das alterações no uso-cobertura do solo - em conjunto de variáveis ambientais como precipitação e ventos - podem ajudar a construir uma narrativa sobre a distribuição espaço-temporal deste parâmetro na região ao longo dos anos.

1.2 Perguntas Científicas

- Podemos identificar um padrão de distribuição da turbidez na Baía de Santos, de forma que seja possível realizar a regionalização deste parâmetro?
- Esta distribuição está relacionada com alguma variável ambiental, tais como o uso-cobertura do solo, precipitação ou dinâmica de ventos?

1.3 Objetivo

Identificar o padrão de distribuição espacial da turbidez na Baía de Santos e verificar sua possível relação com as variáveis ambientais de uso-cobertura do solo, precipitação e dinâmica de ventos durante o período de 2002 a 2018.

2 METODOLOGIA

A fim de cumprir o objetivo proposto foram consideradas duas regiões de interesse para coleta de dados: (i) O Polo Central da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista - composto pelos municípios de Cubatão, Guarujá, Santos, São Vicente e Praia Grande - de onde foram extraídos os dados de uso-cobertura do solo e precipitação; (ii) A Baía de Santos delimitada pelo polígono de extensão entre as coordenadas 46.442°W 24.064°S e 46.257°W 23.969°S, de onde foram extraídos os dados de turbidez e

dinâmica de ventos (Figura 2.1).

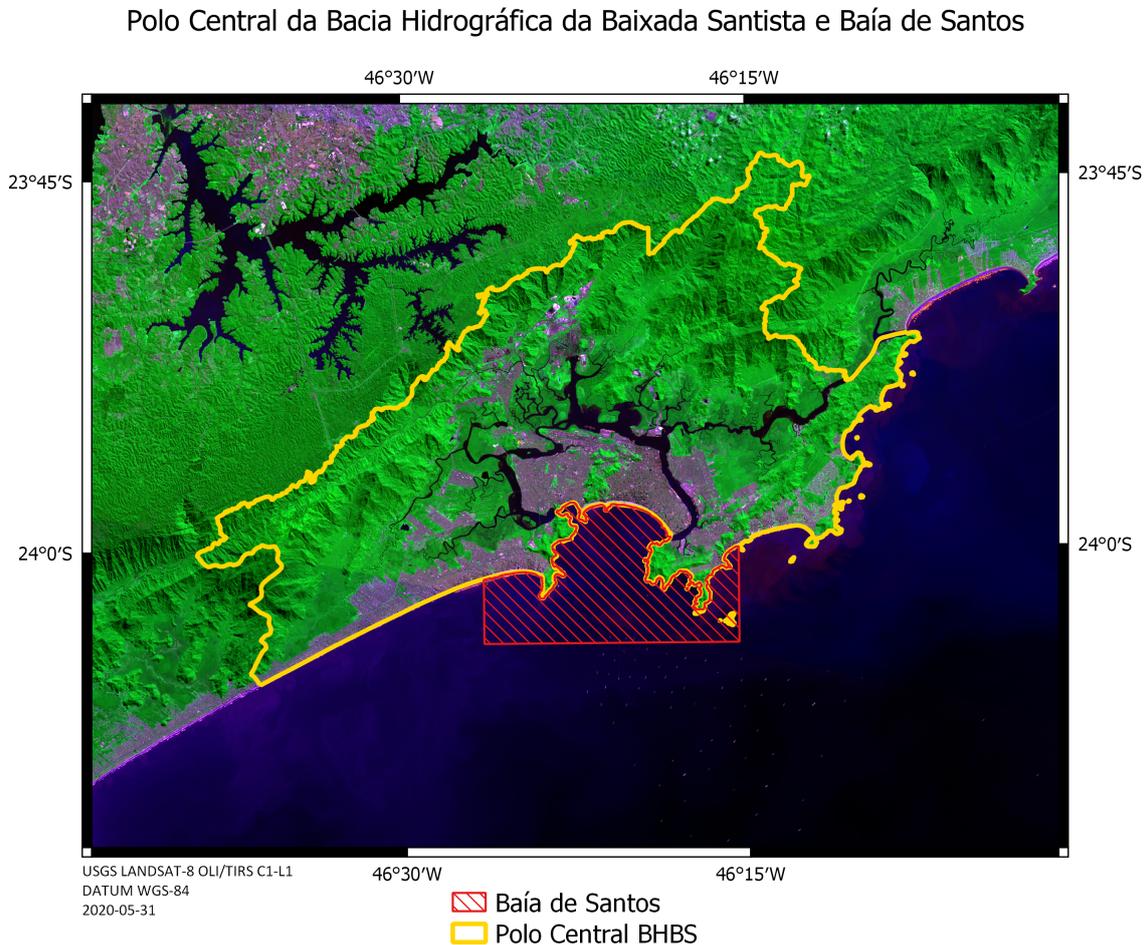


Figura 2.1 - Mapa das regiões de interesse evidenciando os polígonos do Polo Central da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista (em amarelo) e da Baía de Santos (em vermelho).

2.1 Turbidez

Para obtenção dos dados de turbidez na Baía de Santos utilizamos um algoritmo de estimação indireto aplicado sobre imagens do sensor MODIS/Aqua coletadas durante 2002 a 2018. Os valores foram estimados em nível pixel-a-pixel sobre o polígono delimitado pela Baía de Santos retratado na Figura 2.1, os quais foram posteriormente submetidos ao algoritmo de agrupamento K-Médias a fim de realizar a regionalização do parâmetro na região. Todas as etapas de processamento, análise de imagens e aplicação dos algoritmos foram desenvolvidos em código de programação na plataforma *Google Earth Engine*. O script foi inicialmente elaborado

por Philippe Leal (Doutorando SER-INPE) e adaptado para este estudo.

2.1.1 Algoritmo de estimação

O algoritmo utilizado para estimar a turbidez foi proposto por Dogliotti et al. (2015), sendo um método semi-analítico baseado nos produtos de reflectância das bandas em torno de 645 e 859 nm. A utilização destas duas bandas em conjunto torna o algoritmo apropriado para ser aplicado em diferentes condições de transparência da água, podendo ser utilizado em regiões de baixa e alta turbidez. Os valores de reflectância do meio aquático são equalizados com dois coeficientes de calibração a fim de obter-se o valor estimado de turbidez, de acordo com a equação:

$$T = \frac{A_T^\lambda \rho_w(\lambda)}{1 - \rho_w(\lambda)/C^\lambda}$$

Onde T = Turbidez (NTU); A_T e C = Coeficientes de calibração em determinado comprimento de onda λ ; ρ_w = Reflectância do meio aquático em determinado comprimento de onda λ .

Segundo a autora, o coeficiente C foi calibrado usando propriedades ópticas padrão da água do mar (IOPs), de acordo com os valores obtidos pelo sensor MODIS Aqua e Terra. Já o coeficiente A_T foi obtido por através de análises de regressão não-lineares, considerando medições empíricas para os cálculos. Cada parâmetro é dependente do respectivo comprimento de onda da reflectância, possuindo diferentes valores entre 645 e 859 nm. Quando $\rho_w(645) < 0.05$ usamos apenas os valores de reflectância obtidos neste comprimento de onda para estimar a turbidez, assim como seus respectivos coeficientes. Já quando $\rho_w(645) > 0.07$ aplicamos apenas os valores referentes a banda de 859 nm. Em casos onde $0.05 < \rho_w(645) < 0.07$ uma nova fórmula é aplicada, levando em consideração o parâmetro w de acordo com as equações:

$$w = (\rho_w(645) - 0.05)/0.02$$

$$T = (1 - w) \cdot T_{645} + w \cdot T_{859}$$

Onde T = Turbidez (NTU); w = Parâmetro de correlação; T_{645} e T_{859} = Turbidez estimada para quando $\rho_w(645) < 0.05$ e $\rho_w(645) > 0.07$, respectivamente.

Os valores estimados pelo algoritmo foram comparados com dados in-situ obtidos através de uma sonda multiparamétrica durante os anos de 2011 e 2012. Devido a resolução espacial do sensor MODIS ser superior ao espaçamento entre as estações

oceanográficas, foi possível comparar apenas o valor médio estimado para o pixel em relação aos pontos de coleta. A diferença encontrada foi da ordem de décimos e portanto o algoritmo se mostrou apropriado.

Após o cálculo da turbidez pixel-a-pixel através do algoritmo descrito a cima, realizamos uma redução temporal dos produtos obtidos a fim de diminuir o tempo de processamento. Novas imagens da distribuição da turbidez foram geradas, contabilizando um total de 198 imagens mensais entre 2002-2018, através da média dos valores diários de cada pixel. Os produtos encontrados foram então submetidos a um segundo algoritmo com o intuito de obter um padrão de regionalização da turbidez para Baía de Santos.

2.1.2 Algoritmo de agrupamento

A análise de agrupamento corresponde a utilização de diversos métodos particionais e aglomerativos com o objetivo de separar um conjunto de dados em diferentes grupos de acordo com a similaridade entre seus elementos. Esta ação é conhecida como *clustering*, sendo um importante método para compreender pacotes de dados multidimensionais, onde muitas vezes a comparação estatística univariada entre seus elementos não é viável. No geoprocessamento, os métodos de agrupamento são empregados com o intuito de classificar unidades geoespaciais e pixels de acordo com sua similaridade, tornando possível também obter padrões de distribuição de um determinado parâmetro de acordo com sua variabilidade espacial. Estudos desenvolvidos por [Carvalho et al. \(2016\)](#) e [Zhang et al. \(2016\)](#) evidenciam a potencialidade da análise de agrupamento - e em especial do algoritmo K-Means - para regionalizar parâmetros ambientais contínuos tais como a turbidez.

Desta forma, aplicamos um algoritmo de agrupamento do tipo K-Means existente na própria biblioteca do *Google Earth Engine* ([Acessar GEE Unsupervised Classification](#)). Os algoritmos do tipo K-Means representam o método mais comum de partição de pacotes de dados em diferentes k *clusters* ou k grupos (onde k representa um número de cluster pré-determinado pelo analista). O princípio deste método reside em definir os grupos particionais de forma que a variação *intra-cluster* seja minimizada. O algoritmo padrão para realizar uma análise K-Means trata-se do [Hartigan et al. \(1979\)](#), capaz de definir a variação *intra-cluster* através da soma das distâncias euclidianas entre os elementos em análise. Este foi o mesmo algoritmo aplicado neste estudo, com algumas modificações posteriores feitas por [Arthur e Vassilvitskii \(2007\)](#) a fim de otimizar a acurácia e velocidade do método.

Para que o *clustering* seja possível, os dados a serem analisados devem ser padronizados de acordo com sua ordem de grandeza e dimensão. Então diversos algoritmos estatísticos devem ser empregados, levando em consideração o resultado final desejado pelo analista. Estes podem ser divididos em dois grupos principais: **hierárquicos** e **particionais**. Algoritmos hierárquicos não necessitam de um número de clusters pré-definido, fornecendo informações a respeito da similaridade entre os elementos do conjunto de dados através de um dendograma, por exemplo. Algoritmos particionais, por sua vez, irão separar os elementos em k clusters (ou grupos) distintos e fornecerem informações composicionais sobre os grupos gerados, porém necessitam de um número (k) de clusters pré-definido pelo analista (KASSAMBARA, 2017).

Como mencionado acima, a análise de agrupamento particional (a exemplo da K-Means) requer que o número determinado de grupos seja informado *a priori* pelo analista. Este número pode ser atribuído de maneira genérica, ou obtido com o auxílio de funções matemáticas que identificarão o número mais adequado de grupos em que podemos regionalizar os pixels existentes em uma imagem. Estas funções matemáticas são conhecidas como *índices*, sendo importantes ferramentas para realizar o *clustering* de maneira adequada. Podemos dividir os índices em duas abordagens diferentes: **direta** ou **estatística**. Os índices de abordagem direta são baseados em um critério de otimização (e.g. *elbow* e *silhouette*), enquanto que os estatísticos (e.g. *gap statistic*) são baseados em uma modelagem amostral de acordo com o desvio padrão do conjunto. Neste estudo utilizamos a função **NbClust** proposta por Kassambara (2017), a qual consiste de diferentes índices aplicados em conjunto para um mesmo conjunto de dados, aumentando a precisão e confiabilidade do método.

2.2 Variáveis ambientais

Os dados de uso-cobertura do solo e precipitação foram obtidos sobre o polígono do Polo Central BHBS, enquanto que os dados de ventos foram obtidos sobre o polígono da Baía de Santos (Figura 2.1). Para extração dos valores de uso-cobertura utilizamos as imagens disponibilizadas pelo banco MAPBIOMAS no *GEE*. As imagens foram processadas ano a ano utilizando o software QGIS, seguindo o procedimento de vetorização, classificação e dissolução dos polígonos de acordo com seu valor de pixel. Uma vez processadas, foram extraídas as áreas referentes a cada tipo de uso do solo com a aplicação da calculadora de dados geométricos do software e posteriormente normalizadas pela área total do polígono, obtendo a porcentagem de cada classe para cada ano. A fim de verificar a influência de fenômenos relacionados ao

aumento da turbidez em zonas costeiras determinamos quatro classes principais a serem analisadas: infraestrutura urbana; agricultura/pastagem; mangue e formação florestal (Figura 2.2).

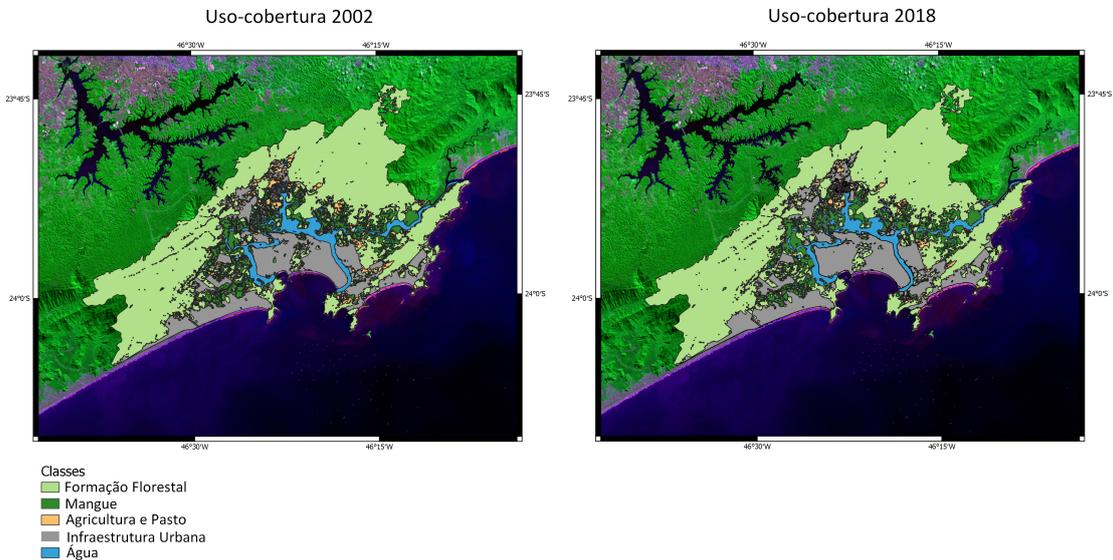


Figura 2.2 - Mapa de uso-cobertura do solo no Polo Central BHBS para os anos 2002 e 2018, considerando as principais classes analisadas no estudo: Formação Florestal, Mangue, Agricultura/Pasto e Infraestrutura Urbana.

Já os dados de precipitação foram obtidos através do banco de dados CHIRPS (FUNK et al., 2015) e calculada a média espacial do parâmetro sobre o polígono do Polo Central BHBS, obtendo-se assim valores médios diários da precipitação sobre o local. O interesse em trabalhar com a precipitação sobre o continente adjacente à Baía de Santos foi observar a possível relação entre esses parâmetros devido ao aumento na descarga fluvial subsequente aos períodos de chuva, carregando partículas e nutrientes para a baía.

Este mesmo procedimento foi analogamente realizado para obtenção dos dados de ventos, com a exceção de serem coletados sobre o polígono delimitado para Baía de Santos (Figura 2.1) e através do banco de dados ERA5 em nível horário (HERSBACH et al., 2020). O parâmetro do vento escolhido para a análise foi a Tensão de Cisalhamento (*Windstress*), que descreve a força exercida pelo vento sobre a superfície de grandes corpos d'água (e.g. oceanos e estuários) e possivelmente relacionada a ressuspensão de sedimentos e partículas. Por fim, foram então calculadas as médias mensais entre 2002-2018 destes parâmetros, a fim de correlacioná-los com a turbidez.

2.3 Análise dos dados

As análises empregadas basearam-se principalmente na comparação entre as séries temporais obtidas para cada parâmetro através dos testes de Correlação de Pearson e Tendência de Mann-Kendall, a fim de identificar um padrão de variação similar entre as variáveis. A Correlação de Pearson mede o grau de relação entre duas variáveis e retorna um fator R como resultado da correlação, sendo que quanto mais próximo de 1 ou -1, maior é a correlação entre estas variáveis. Neste estudo trabalhamos um erro em torno de 5%, logo o valor-p deverá ser menor que 0.05 para que a correlação seja significativa. Além disso, neste teste alguns pressupostos devem ser levados em consideração, como por exemplo a normalidade dos dados e relação linear entre as variáveis. Vale ressaltar que para os dados aqui trabalhados - devido ao grande número de variáveis - alguns pressupostos não foram totalmente testados e portanto podem apresentar certos resultados tendenciosos.

Já o teste de Mann-Kendall nos informa sobre a possibilidade da existência de uma tendência (positiva ou negativa) em uma série temporal, tornando possível inferir se determinado parâmetro está crescendo ou diminuindo ao longo do tempo. Seu resultado gira em torno de dois valores: (i) o coeficiente *tau*, que descreve a tendência de comportamento do parâmetro; (ii) o valor-p, que deve ser sempre menor de 0,05 para que o teste seja considerado significativo.

Logo as classes de uso-cobertura e turbidez foram comparadas através da sua tendência de crescimento entre 2002-2018 e a correlação entre seus valores anuais. Já para a comparação da turbidez com os dados de precipitação e tensão de cisalhamento do vento - devido ao caráter sazonal destas variáveis ambientais - foram calculadas as médias climatológicas para cada mês do ano entre 2002-2018. Desta forma, o teste de correlação foi aplicado entre todos os valores de cada mês, a fim de identificar os períodos onde estes parâmetros possuem maior influência sobre a turbidez na baía.

3 RESULTADOS

3.1 Regionalização da turbidez

Ambos os métodos de identificação do número ótimo de *clusters* em que podemos regionalizar a turbidez na Baía de Santos apresentaram resultados semelhantes, identificado a existência de três grupos em nosso conjunto de dados (Figura 3.1). Aplicando o algoritmo K-Means para estes valores encontrados foi possível delimitar

três zonas diferentes para área de estudo: **Z1** - de uma espacialização mais costeira e limitada à porção norte da baía - com um valor médio de turbidez em torno de 8,3 NTU; **Z2** - que preenche a maior parcela da baía e tem um caráter intermediário - com um valor médio de turbidez em torno de 6,5 NTU; **Z3** - predominantemente offshore mas possuindo uma parcela significativa ao sudeste da baía - com um valor médio de turbidez em torno de 5,2 NTU (Figura 3.2).

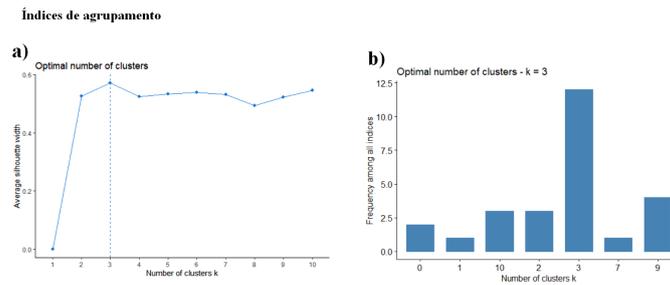


Figura 3.1 - Número óptimo de clusters encontrados para média das 198 imagens de turbidez analisadas, de acordo com o método Silhouette (a) e a função NbClust (b).

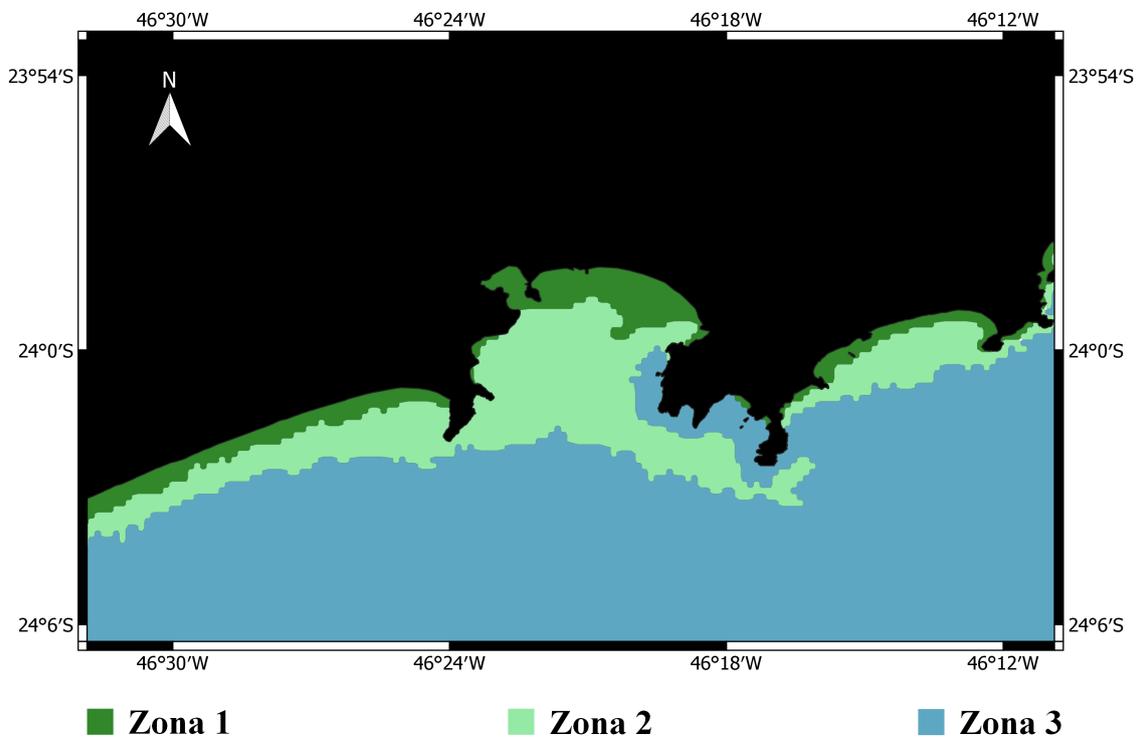


Figura 3.2 - Mapa da regionalização da turbidez na Baía de Santos entre 2002-2018. Os valores médios encontrados para Z1, Z2 e Z3 são, respectivamente: 8,3 6,2 e 5,5 NTU.

A Figura 3.3 apresenta as séries temporais extraídas para as três zonas. Podemos identificar que Z1 possui os maiores valores de turbidez ao longo do tempo e com uma menor variação entre seus máximos e mínimos. Seguida por Z2 e Z3 - que aparentam possuir uma variação temporal muito similar - mas com diferentes valores médios. O teste de Mann-Kendall aplicado apresentou coeficientes positivos significativos para Z1 e Z2 ($\tau = 0.1$ e $\text{valor-p} = 0.02$ e 0.35 , respectivamente) confirmando a tendência de crescimento da turbidez entre os anos de 2002 e 2018. Também podemos ressaltar que a tendência de crescimento aparenta ter se intensificado a partir do ano de 2013.

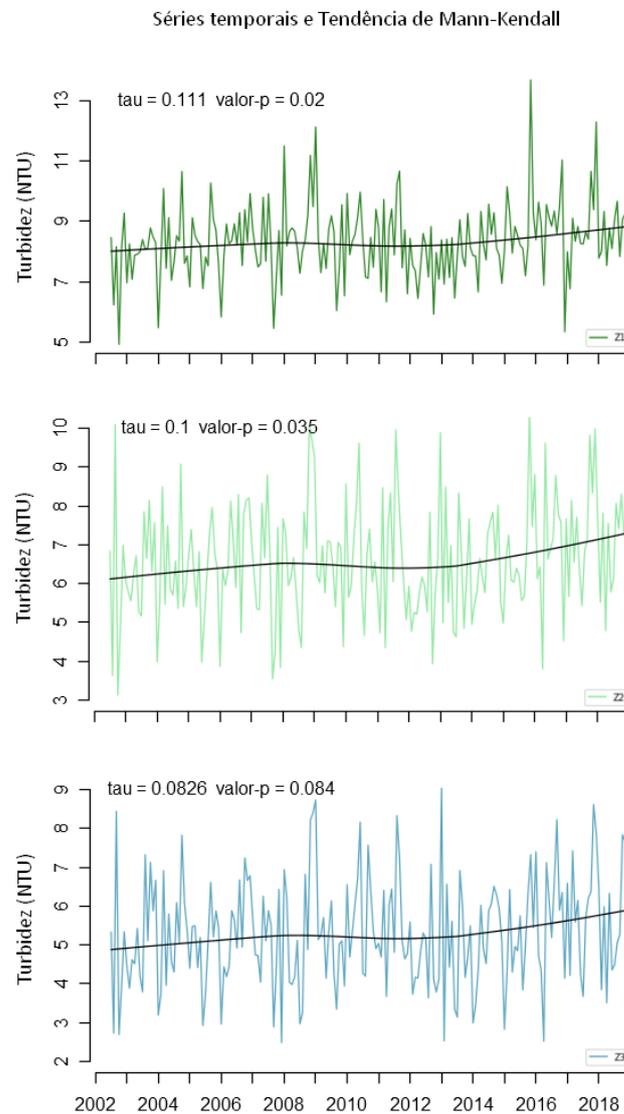


Figura 3.3 - Série temporal da turbidez entre Z1 (em verde escuro), Z2 (em verde claro) e Z3 (em azul), bem como os resultados obtidos pelo teste de Mann-Kendall e sua linha de tendência (em preto).

3.2 Turbidez vs Variáveis Ambientais

Na Figura 3.4 temos a variação das áreas de uso-cobertura do solo durante 2002-2018. É possível identificar uma tendência de crescimento para a classe de Infraestrutura Urbana, aumentando cerca de 2% em relação a área total durante o período estudado. Esta mesma porcentagem de variação é observada para a classe de Agricultura & Pasto, mas que neste caso apresenta uma tendência de diminuição. Também podemos destacar que esta variação aparenta ter se intensificado após o ano de 2013 para ambos os casos. Já as áreas de Mangue e Formação Florestal apresentam-se praticamente constantes ao longo do período, sem uma tendência de crescimento ou diminuição evidente e possuindo variações de menos de 1% em relação a área total. Analisando a Tabela 3.1 podemos identificar que apenas as classes de Infraestrutura Urbana e Agricultura & Pasto apresentaram correlações moderadas mas significativas com as médias anuais de turbidez, sendo que esta correlação tende a ser maior para as regiões mais próximas da linha de costa.

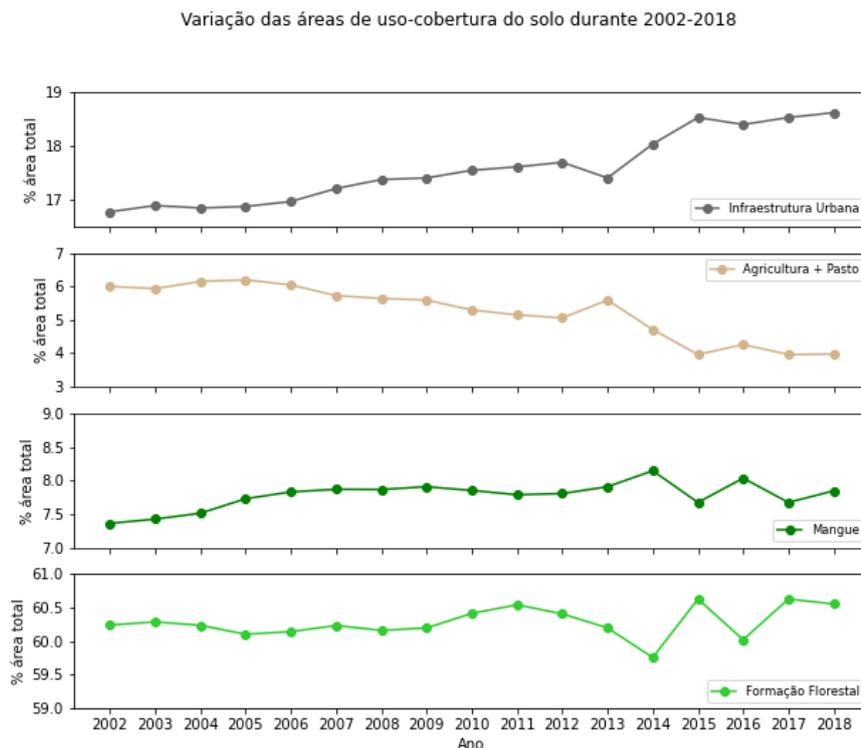


Figura 3.4 - Variação das áreas de uso-cobertura do solo sobre o Polo Central BHBS durante 2002-2018 considerando as classes de infraestrutura urbana (em cinza); agricultura e pasto (em bege); mangue (em verde escuro) e formação florestal (em verde claro).

Tabela 3.1 - Correlação de Pearson entre as médias anuais de Turbidez e valores anuais de Uso-cobertura do solo. Em vermelho destacam-se as correlações consideradas significativas à 5% (Valor-p < 0.05).

Classe	Z1		Z2		Z3	
	R	Valor-p	R	Valor-p	R	Valor-p
Infraestrutura Urbana	0.612	0.009	0.574	0.016	0.488	0.047
Agricultura e Pasto	-0.574	0.016	-0.542	0.024	-0.470	0.050
Formação Florestal	0.276	0.282	0.259	0.315	0.283	0.270
Mangue	0.288	0.262	0.293	0.252	0.211	0.414

Observando a Figura 1 temos as climatologias mensais (i.e. média de cada mês entre 2002-2018) para a turbidez e precipitação. É possível identificar uma variação semelhante destes parâmetros - principalmente para Z1 e Z2 - durante os primeiros meses do ano (Janeiro, Fevereiro, Março e Abril) mas que se encerra após o mês de Maio. Já de acordo com Tabela 3.2 nenhuma correlação entre os valores de turbidez e precipitação para cada um destes meses se mostrou significativa.

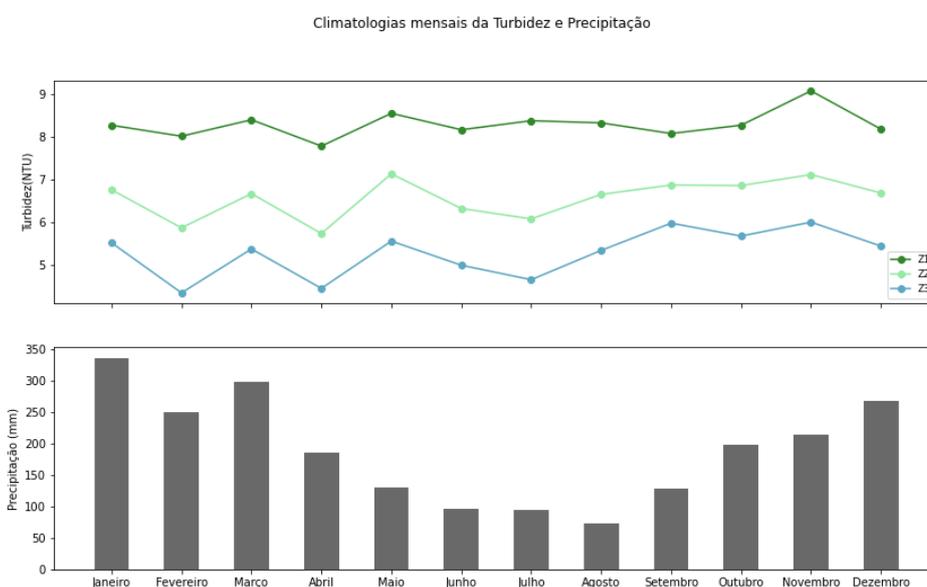


Figura 3.5 - Climatologias mensais dos valores de turbidez para cada região (Z1, Z2 e Z3) e de precipitação.

Tabela 3.2 - Correlação de Pearson entre os valores de Turbidez e Precipitação para cada mês. Em vermelho destacam-se as correlações consideradas significativas à 5% (Valor-p < 0.05).

Mês	Z1		Z2		Z3	
	R	Valor-p	R	Valor-p	R	Valor-p
Janeiro	0.400	0.124	0.253	0.343	0.222	0.407
Fevereiro	-0.053	0.845	-0.159	0.555	-0.262	0.326
Março	0.132	0.623	0.110	0.684	-0.046	0.863
Abril	0.045	0.867	0.249	0.350	0.367	0.161
Maiο	0.206	0.442	0.128	0.635	0.104	0.699
Junho	-0.184	0.492	-0.260	0.328	-0.172	0.523
Julho	0.362	0.152	0.361	0.153	0.482	0.056
Agosto	0.430	0.084	0.154	0.554	-0.070	0.788
Setembro	-0.241	0.351	-0.163	0.529	-0.198	0.445
Outubro	0.052	0.842	0.108	0.679	-0.207	0.423
Novembro	0.374	0.139	0.267	0.300	0.074	0.776
Dezembro	-0.178	0.493	-0.277	0.280	-0.370	0.143

Assim como para precipitação, na [Figura 3.6](#) temos as climatologias mensais para turbidez e tensão de cisalhamento do vento. É possível identificar uma variação similar entre praticamente todos os meses climatológicos - mais evidentes em Z1 e Z2 - com exceção ao mês de Maio. Já de acordo com a [Tabela 3.3](#) temos que as correlações entre os parâmetros foram moderadas/fortes e significativas durante os meses de Março (apenas Z2 e Z3); Abril; Maio (apenas Z1) e Junho.

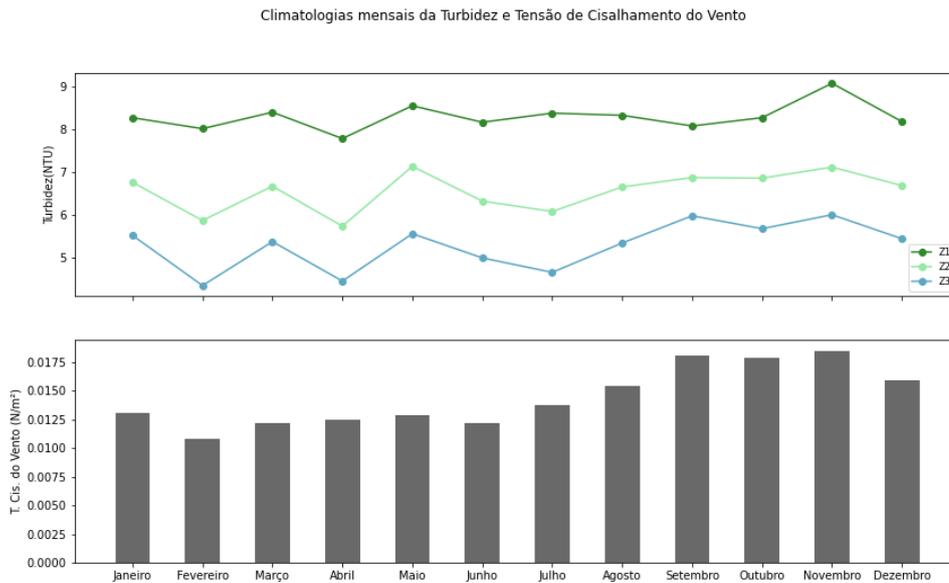


Figura 3.6 - Climatologias mensais dos valores de turbidez para cada região (Z1, Z2 e Z3) e de tensão de cisalhamento do vento.

Tabela 3.3 - Correlação de Pearson entre os valores de Turbidez e Tensão de Cisalhamento do Vento para cada mês. Em vermelho destacam-se as correlações consideradas significativas à 5% (Valor-p < 0.05).

Mês	Z1		Z2		Z3	
	R	Valor-p	R	Valor-p	R	Valor-p
Janeiro	0.283	0.286	0.475	0.062	0.470	0.066
Fevereiro	0.083	0.759	0.381	0.144	0.102	0.704
Março	0.414	0.110	0.694	0.002	0.518	0.040
Abril	0.747	0.000	0.795	0.000	0.689	0.003
Mai	0.534	0.033	0.332	0.209	0.324	0.220
Junho	0.578	0.019	0.650	0.006	0.545	0.0289
Julho	-0.030	0.906	-0.106	0.684	-0.072	0.782
Agosto	0.325	0.201	0.318	0.212	0.469	0.057
Setembro	0.456	0.065	0.091	0.726	0.260	0.313
Outubro	0.443	0.074	0.288	0.260	0.305	0.232
Novembro	0.140	0.590	0.308	0.228	0.366	0.148
Dezembro	0.073	0.778	0.074	0.776	0.221	0.392

4 DISCUSSÃO

A regionalização da turbidez na Baía de Santos (Figura 3.2) apresenta um padrão de distribuição típico de ecossistemas costeiros, onde é possível observar o decréscimo nos valores de turbidez conforme o distanciamento da linha de costa. A região Z1 - *Costeira* deve receber uma maior influência da descarga fluvial e dinâmica de ondas, que atuam despejando e ressuspensando sedimentos e partículas na coluna d'água, justificando seus maiores valores de turbidez (JR; FITZGERALD, 2009). No outro extremo temos Z3 - *Offshore*, que devido ao seu distanciamento da linha de costa recebe menor influência destas variáveis continentais e possivelmente está mais associada a fatores oceanográficos. Sua presença na porção interna ao sudeste da baía pode possivelmente estar relacionada a dinâmica de correntes de superfície de maré, como demonstram os modelos de circulação obtidos por Harari e Camargo (1998). Por fim, Z2 - *Intermediária* aparenta ser uma região de mistura entre os extremos Z1 e Z3, ocupando a maior parcela da porção interna da baía e sendo influenciada por ambos os fatores.

Analisando as séries temporais de turbidez (Figura 3.3) e a variação das áreas de uso-cobertura (Figura 3.4) podemos identificar uma possível relação do parâmetro com o aumento na infraestrutura urbana e diminuição das áreas de agricultura e pastagem - posto a tendência de crescimento positiva da turbidez em Z1 e Z2 - evidenciado também pelas correlações obtidas na Tabela 3.1. Estes resultados vão de encontro com os obtidos por McCarthy et al. (2018), no qual os valores de turbidez decaíram conforme o aumento da infraestrutura urbana e diminuição da agricultura, possivelmente relacionados ao melhor escoamento das águas pluviais e a redução na quantidade de sedimentos e partículas transportadas para baía. No entanto, de acordo com Alberti et al. (2007), o impacto da infraestrutura urbana sobre ecossistemas aquáticos pode ocorrer de diversas formas, como por exemplo no estudo elaborado por Nelson e Booth (2002) onde o desenvolvimento urbano e subsequente erosão de canais fluviais contribuíram para o aumento na produção de sedimentos em sua área de estudo. Especificamente neste trabalho sobre a Baía de Santos, a correlação moderada entre o aumento da infraestrutura urbana e os níveis de turbidez para Z1 e Z2 - caso concreta - indicam uma possível influência que pode estar mais associada ao aumento da poluição industrial e doméstica (BRAGA et al., 2000) e aos níveis de erosão costeira (FARINNACCIO et al., 2009).

Através dos resultados da comparação entre a turbidez e precipitação não foi possível realizar nenhuma inferência sobre a possível relação entre os parâmetros. Embora

a variação de suas climatologias mensais seja semelhante para os primeiros meses do ano (Figura 1), nenhuma correlação significativa foi encontrada (Tabela 3.2). Usualmente espera-se que um aumento nas taxas de precipitação também acarrete um aumento nos valores de turbidez em ecossistemas costeiros, devido ao aumento do *run-off* continental e descarga fluvial. No entanto, como discutido por McCarthy et al. (2018), muitas vezes esta relação não ocorre de maneira óbvia e imediata. Ao optarmos pela análise de correlação entre médias mensais estamos desconsiderando a escala temporal em que a precipitação - que ocorre no continente - atua sobre o ambiente aquático, sendo uma das razões possíveis pela qual a mesma aparenta não possuir nenhuma relação com os níveis de turbidez na Baía de Santos.

Já em relação aos resultados obtidos para a comparação da turbidez com a tensão de cisalhamento do vento (Figura 3.6 e Tabela 3.3) os meses que apresentaram correlação significativa correspondem a estação de outono. Esta estação é caracterizada por ser um período de transição entre as características de verão para o inverno, quando geralmente estabelecem-se dinâmicas de ventos mais caóticas e intermitentes, além da forte ciclogênese e intensificação de sistemas de baixa pressão no Atlântico Sul (REBOITA, 2008). Dentro deste contexto podemos destacar o mês de Abril, caracterizado justamente pelo início do outono no hemisfério Sul no qual esta dinâmica pode ser mais evidente, apresentando máxima correlação entre Z1, Z2 e Z3. Segundo Campos et al. (2010) o outono é também a estação do ano onde historicamente mais ocorrem os fenômenos de ressacas e marés meteorológicas na Baía de Santos, eventos que estão diretamente ligados a episódios de erosão e ressuspensão de sedimentos em qualquer ambiente costeiro (MADSEN et al., 1993; JR; FITZGERALD, 2009).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo identificamos o padrão de distribuição espacial da turbidez na Baía de Santos (SP) e discutimos sua possível relação com as variáveis ambientais de uso-cobertura do solo, precipitação e dinâmica de ventos durante 2002-2018. Para isto utilizamos de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e estatística relacionados a algoritmos de estimação, análise de agrupamento espacial e correlação de séries temporais. Os resultados obtidos através do algoritmo K-Means regionalizaram a turbidez em três diferentes zonas ao longo da baía, cada uma com valores médios de turbidez e características distintas: Z1 - Costeira; Z2 - Intermediária; Z3 - Offshore. As regiões Z1 e Z2 apresentaram uma tendência de crescimento nos valores de turbidez significativa durante o período através do teste de Mann-Kendall. Estes valores também apresentaram uma moderada correlação positiva com a variação das áreas de Infraestrutura Urbana e negativa com a variação das áreas de Agricultura & Pasto. Já a precipitação não apresentou nenhuma correlação significativa durante os meses analisados, enquanto que a tensão de cisalhamento do vento apresentou correlação positiva com a turbidez do durante o outono, com ênfase no mês de Abril. Os possíveis fenômenos associados à estas variáveis foram discutidos buscando elucidar como cada parâmetro pôde influenciar a turbidez na região. Em última análise, os resultados aqui discutidos evidenciam principalmente a possível influência antrópica relacionada ao aumento na infraestrutura urbana, como também dos fenômenos meteorológicos durante o outono sobre os níveis de turbidez na Baía de Santos (SP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, M.; BOOTH, D.; HILL, K.; COBURN, B.; AVOLIO, C.; COE, S.; SPIRANDELLI, D. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in puget lowland sub-basins. **Landscape and urban planning**, Elsevier, v. 80, n. 4, p. 345–361, 2007. 17

ARTHUR, D.; VASSILVITSKII, S. k-means++: the advantages of careful seeding. **SODA'07: proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on discrete algorithms**. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 2007. 7

BRAGA, E. S.; BONETTI, C. V.; BURONE, L.; FILHO, J. B. Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the baixada santista estuarine system–brazil. **Marine Pollution Bulletin**, Elsevier, v. 40, n. 2, p. 165–173, 2000. 17

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R. D.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do ncep no sudoeste do atlântico sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 25, n. 2, p. 175–184, 2010. 18

CARRIÇO, J. M. **Baixada Santista: transformações produtivas e sócio-espaciais na crise do capitalismo após a década de 1980**. Tese (Doutorado), 2006. 4

CARVALHO, M.; MELO-GONÇALVES, P.; TEIXEIRA, J.; ROCHA, A. Regionalization of europe based on a k-means cluster analysis of the climate change of temperatures and precipitation. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, Elsevier, v. 94, p. 22–28, 2016. 7

CBH-BS, C. da Bacia Hidrográfica da B. S. Relatório de situação dos recursos hídricos da baixada santista. 2019. 3, 4

CETESB. Relatório de qualidade das águas litorâneas do estado de são paulo, 2008. **São Paulo: CETESB**, 2008. 2

DNH. **Port of Santos Nautical Charts (Carta Náutica do Porto de Santos)**. [S.l.]: Marinha do Brasil, Divisão de Hidrografia e Navegação Rio de Janeiro, 2003. 2

DOGLIOTTI, A. I.; RUDDICK, K.; NECHAD, B.; DOXARAN, D.; KNAEPS, E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote sensing of environment**, Elsevier, v. 156, p. 157–168, 2015. 6

FARINNACCIO, A.; GOYA, S. C. y; TESSLER, M. G. Variações da linha de costa nas baías de santos e são vicente. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 1, n. 1, 2009. 17

FEDERATION, W. E.; ASSOCIATION, A. P. H. et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. **American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA**, 2005. 1

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, Nature Publishing Group, v. 2, n. 1, p. 1–21, 2015. 9

GREGORIO, H. P. **Modelagem numérica da dispersão da pluma do emissário submarino de Santos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. 2

GUPTA, A.; GUPTA, S.; PATIL, R. S. A comparison of water quality indices for coastal water. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, Taylor & Francis, v. 38, n. 11, p. 2711–2725, 2003. 1

HARARI, J.; CAMARGO, R. d. Numerical modeling of the coast region of santos (sp): tidal circulation. **Revista Brasileira de Oceanografia**, SciELO Brasil, v. 46, n. 2, p. 135–156, 1998. 17

HARARI, J.; FERREIRA, F. R.; DEGASPARI, F. A.; SARTOR, S. M. Modelagem numérica da hidrodinâmica e da dispersão de esgoto na baía de santos, sp. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 205–214, 2013. 3

HARTIGAN, J.; WONG, M. et al. A k-means clustering algorithm. **New Haven**, 1979. 7

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D. et al. The era5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal**

Meteorological Society, Wiley Online Library, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. 9

JR, R. A. D.; FITZGERALD, D. M. **Beaches and coasts**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. 1, 17, 18

KASSAMBARA, A. **Practical guide to cluster analysis in R: unsupervised machine learning**. [S.l.]: STHDA, 2017. 8

MADSEN, O.; WRIGHT, L.; BOON, J.; CHISHOLM, T. Wind stress, bed roughness and sediment suspension on the inner shelf during an extreme storm event. **Continental Shelf Research**, Elsevier, v. 13, n. 11, p. 1303–1324, 1993. 18

MCCARTHY, M. J.; MULLER-KARGER, F. E.; OTIS, D. B.; MÉNDEZ-LÁZARO, P. Impacts of 40 years of land cover change on water quality in tampa bay, florida. **Cogent Geoscience**, Cogent OA, v. 4, n. 1, p. 1422956, 2018. 1, 2, 17, 18

NELSON, E. J.; BOOTH, D. B. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 264, n. 1-4, p. 51–68, 2002. 17

ORTIZ, J.; ARASAKI, E.; MARCELINO, E. Emissários submarinos: Projeto, avaliação de impacto ambiental e monitoramento: Visão geral dos emissários submarinos no litoral paulista. **Cetesb. São Paulo**, 2006. 2

REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade**. 2008. 180f. Tese (Doutorado) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP, 2008. 18

SANTOS, R. C. L.; LIMA, Á. S.; CAVALCANTI, E. B.; MELO, C. M. d.; MARQUES, M. N. Aplicação de índices para avaliação da qualidade da água da bacia costeira do sapucaia em sergipe. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 23, n. 1, p. 33–46, 2018. 1

ZHANG, Y.; MOGES, S.; BLOCK, P. Optimal cluster analysis for objective regionalization of seasonal precipitation in regions of high spatial–temporal variability: application to western ethiopia. **Journal of Climate**, v. 29, n. 10, p. 3697–3717, 2016. 7

ANEXOS

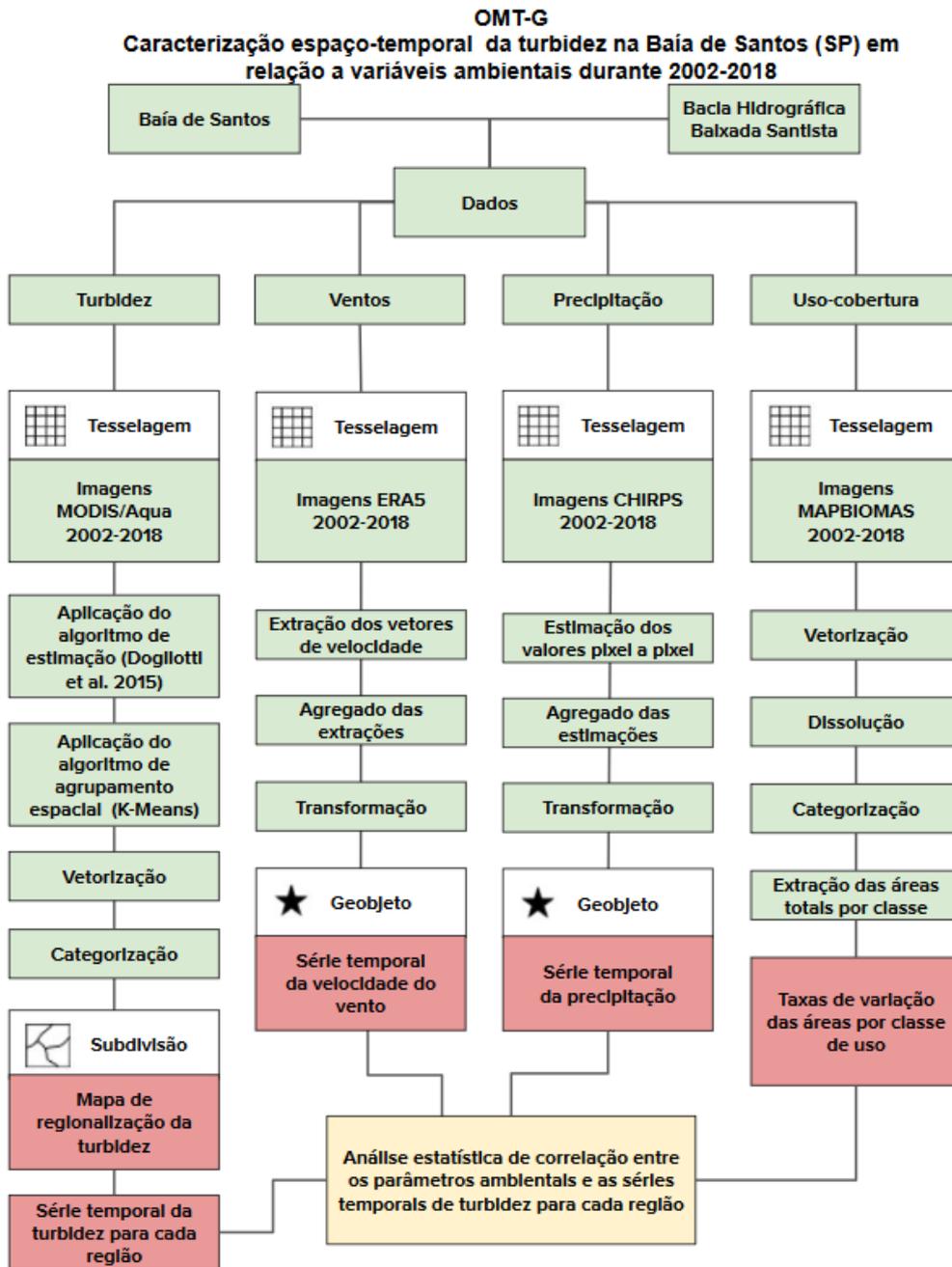


Figura 1 - Diagrama OMT-G referente ao estudo.