



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS
DA TERRA E DO AMBIENTE**

Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

Tese de Doutorado

**Avaliação de área de segurança hídrica por meio de
modelagem computacional e estatística com imagens
de sensoriamento remoto**

Apresentada por: Basílio Fernandez Fernandez
Orientador: Prof. Dr. Gilney Figueira Zebende
Coorientadora: Profª. Dra. Rosângela Leal Santos

abr/2025

Basílio Fernandez Fernandez

Avaliação de área de segurança hídrica por meio de modelagem computacional e estatística com imagens de sensoriamento remoto

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Curso de Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciências Ambientais**.

Área de conhecimento: Estudos Ambientais e Geotecnologias

Orientador: Prof. Dr. Gilney Figueira Zebende

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Coorientadora: Profª. Dra. Rosângela Leal Santos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Feira de Santana, BA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

2025

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

F413a

Fernandez, Basílio Fernandez

Avaliação de segurança hídrica por meio de modelagem computacional e estatística com imagens de sensoriamento remoto / Basílio Fernandez Fernandez. – 2025.

133 f.: il.

Orientador: Gilney Figueira Zebende

Coorientadora: Rosângela Leal Santos

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Feira de Santana,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Feira de Santana, 2025.

1. Recursos hídricos. 2. Segurança hídrica. 3. Dimensão fractal. 4. Machine Learning. 5. Pedra do Cavalo. I. Zebende, Gilney Figueira, orient. II. Santos, Rosângela Leal, coorient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU 556.18(814.2)

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

Doutorado em Ciências da Terra e do Ambiente

A Banca Examinadora, constituída pelos professores listados abaixo, leu e recomenda a aprovação da Tese de Doutorado, intitulada “Avaliação de Área de Segurança Hídrica por meio de Modelagem Computacional e Estatística com Imagens de Sensoriamento Remoto”, apresentada no dia 28 de abril de 2025, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Modelagem em Ciências Ambientais.

GILNEY FIGUEIRA Digitally signed by GILNEY FIGUEIRA
ZEBENDE:02239627751
27751

Orientador:

Prof. Dr. Gilney Figueira Zebende

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Documento assinado digitalmente
gov.br ROSANGELA LEAL SANTOS
Data: 05/05/2025 19:00:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Co-Orientadora:

Prof.^a Dra. Rosângela Leal Santos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA TEREZA COSTA SILVA
Data: 05/05/2025 15:16:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro interno da Banca:

Prof.^a Dra. Ana Tereza Costa Silva

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Documento assinado digitalmente
gov.br MARILDO GERALDETE PEREIRA
Data: 05/05/2025 09:56:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro externo da Banca:

Prof. Dr. Marildo Geraldete Pereira

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Documento assinado digitalmente
gov.br SOLANA MENEGHEL BOSCHILIA
Data: 29/04/2025 12:02:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro externo da Banca:

Prof.^a Dra. Solana Meneghel Boschilia

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL ANDRADE MACIEL
Data: 04/05/2025 15:48:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro externo da Banca:

Prof. Dr. Daniel Andrade Maciel

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Dedico este trabalho aos meus pais
DOLORES FERNANDEZ ALONSO (*in memoriam*) e
BASÍLIO FERNANDEZ MARTINEZ (*in memoriam*).

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Meus agradecimentos à Fundação Municipal de Tecnologia da Informação & Ciências Egberto Tavares Costa que me deu apoio para construção dos trabalhos os quais, correspondentemente, foram creditados.

Meu agradecimento ao Programa de Pós-graduação em Ciências da Terra e Meio Ambiente da UEFS, na pessoa de Luana Araújo - aos técnicos e técnicas administrativos, na pessoa de Dr. Willian Moura de Aguiar - aos coordenadores e coordenadoras, professores e professoras com o(a)s quais tive aula e demais servidores públicos que, direta ou indiretamente, colaboraram com os trabalhos desta Tese.

Agradeço aos professores: Ma. Bethsaide Souza Santos, Sra. Anna Karoline Santana Rebouças e Dr. Florêncio Mendes Oliveira Filho que participaram com contribuições na banca de acompanhamento e à Ma Kelly Cardoso pelas leituras e sugestões.

Agradeço, especialmente, aos professores que fazem parte da banca de defesa da Tese: Dra. Ana Tereza Costa Silva (UEFS), Dr. Marildo Geraldete Pereira (UEFS), Dra. Solana Meneghel Boschilia (UFPA) e Dr. Daniel Andrade Maciel (INPE).

Agradeço à professora Mariana Britto de Lima pela minuciosa revisão do texto assim como pela motivação na melhoria contínua da escrita.

Agradeço aos profissionais, da Empresa Baiana de Águas e Saneamento: Sr. Raimundo Bezerra Lopes Neto, Cindy Liana Souza da Silva, Renilson de Oliveira dos Santos e Erimar de Freitas Nascimento que proporcionaram uma visita técnica à ETA de Conceição da Feira. Colaborando, este dois últimos profissionais também, durante banca de acompanhamento deste trabalho, Ivane Marcley Nascimento Sena com informações sobre a distribuição de água tratada proveniente do mesmo lago e a Daniela Silva dos Santos Alves (Bióloga) com as informações sobre as análises de potabilidade de água realizadas.

Agradeço, sobretudo, ao professor orientador Dr. Gilney Figueira Zebende (UEFS) e a professora coorientadora Dr^a. Rosângela Leal Santos (UEFS) pela disponibilidade e orientações fundamentais para a realização deste trabalho de Tese.

Agradeço aos meus pais Dolores Fernandez Alonso (in memorian) e Basílio Fernandez Martinez (in memorian), imigrantes espanhóis que sempre trabalharam para proporcionar estudos do seu filho e filhas e às minhas irmãs: Dolores Fernandez Fernandez e Jandira Fernandez Fernandez pelo constante apoio.

E, finalmente, mas não menos importante, agradeço a Elizabeth, Edmilson, Miguel, Larissa e Maria Liz pela motivação e compreensão.

Resumo

A presente Tese analisou o uso e cobertura da terra (LULC) em uma área de segurança hídrica, ao longo de 30 anos, em um polígono abrangendo a Área de Proteção Ambiental(APA) de Pedra do Cavalo, seu lago e regiões adjacentes à APA, situado na Bahia-Brasil. Para tanto, foi feita a estatística descritiva das áreas das principais classificações de LULC produzidas pelo MapBiomas e estimadas as dimensões fractais para cada uma delas. Desse modo, foi possível inferir alternâncias entre os valores relativos às classes de floresta e agropecuária. Assim como, estabelecer comparações entre diferentes classes utilizando a dimensão fractal. Neste mesmo polígono, foi estimado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado - EVI, identificando escalas de tempos referentes a processos climáticos anuais na cobertura da vegetação - classes de floresta e agropecuária. Além disso, foram reconhecidas consequências em período de seca na região sobre os valores de amplitudes do infravermelho próximo (NIR) entre os anos de 2018 e 2019, resultado percebido, também, pelo primeiro estudo com a dimensão fractal. Em seguida, foram estudadas a autocorrelação, por meio da Análise de Flutuação sem Tendências (*DFA*) e a correlação cruzada, por meio do Coeficiente de Correlação Cruzada ($\rho DCCA$) entre bandas espectrais (vermelho, azul e NIR) dos satélites Landsat 5, 7 e 8 - empregadas nos cálculos dos referidos índices e entre eles, dentro de um período de seis anos e dez meses. Sendo obtida correlação cruzada, praticamente, perfeita entre esses índices em escalas de tempo de 30 revisitas dos satélites à região do estudo. E, finalmente, um terceiro trabalho, buscou averiguar a ocorrência de banco de macrófitas por meio de imagens do satélite Sentinel 2 L2A. A presença destas espécies de plantas aquáticas possuem implicações na trofia em lagos e efeitos adversos nas operações das estações de tratamentos de água e usina hidroelétrica, ambas presentes nesta área de segurança hídrica.

Palavras Chaves: dimensão fractal, Machine Learning, Pedra do Cavalo, bandas espectrais, macrófita em lago.

Abstract

This Thesis analyzed land use and land cover (LULC) within a water security area over a 30-year period, focusing on a polygon encompassing the Pedra do Cavalo Environmental Protection Area (EPA), its reservoir, and regions adjacent to the EPA, located in Bahia, Brazil. Descriptive statistics were performed on the areas of the main LULC classifications produced by MapBiomas, and fractal dimensions were estimated for each class. This approach allowed the inference of alternations between the relative values of forest and agricultural classes, as well as comparisons between different classes using the fractal dimension. Within the same polygon, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Enhanced Vegetation Index (EVI) were estimated, identifying time scales related to annual climatic processes affecting vegetation cover - particularly forest and agricultural classes. Furthermore, drought-related effects were observed in the region, as reflected in the amplitude values of the near-infrared (NIR) band between 2018 and 2019, a result also highlighted in the fractal dimension analysis. Subsequently, autocorrelation was examined using Detrended Fluctuation Analysis (*DFA*), and cross-correlation was assessed through the Detrended Cross-Correlation Coefficient ($\rho DCCA$) between spectral bands (red, blue, and NIR) from Landsat satellites 5, 7, and 8 - used in the calculation of the aforementioned indices - over a period of six years and ten months. A nearly perfect cross-correlation was found between these indices at time scales equivalent to 30 satellite revisits over the study region. Finally, a third study investigated the occurrence of macrophyte banks using Sentinel-2 L2A satellite imagery. The presence of these aquatic plant species has implications for lake trophic status and poses operational challenges for both water treatment plants and the hydroelectric power plant located within this water security area

Keywords: fractal dimension, machine learning, Pedra do Cavalo, spectral bands, lake macrophytes

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto e Cenário	1
1.2	Estrutura da Dissertação	5
1.3	Problema	6
1.4	Hipótese	7
1.5	Justificativa	7
1.6	Objetivo Geral	7
1.6.1	Objetivos Específicos	8
2	Fundamentação Teórica e Metodologia	9
2.1	Fundamentação Teórica	9
2.1.1	segurança hídrica: terminologia, dimensão e nível	9
2.1.2	Aplicações em plataformas de dados georreferenciados	15
2.1.3	Sensoriamento Remoto	17
2.1.4	Trofia em Lagos	22
2.1.5	Macrófitas	27
2.2	Metodologia	29
2.2.1	Séries temporais (ST)	29
2.2.1.1	Conceitos básicos	29
2.2.1.2	Características e propriedades de Séries Temporais	30
2.2.1.3	Estacionariedade em séries temporais	31
2.2.1.4	Sazonalidade	33
2.2.1.5	Função de Auto-correlação - FAC	34
2.2.2	Coeficiente de Correlação de Pearson	35
2.3	Análise R/S de Hurst	37
2.4	Dimensão Fractal	41
2.4.1	Auto similaridade e auto afinidade	42
2.5	Detrended Fluctuation Analysis - DFA	44
2.5.1	DFA em Série Aleatória	48
2.5.2	DFA em Série Simulada de uma Função Seno	49
2.5.3	DFA - Manchas Solares	49
2.5.4	Detrended Cross-Correlation Analysis - DCCA	50
2.6	Coeficiente de Correlação Cruzada ρ_{DCCA}	51
3	FRACTAL CLASSIFICATION OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA, PEDRA DO CAVALO	53
3.1	Introduction	53
3.2	Method	55
3.2.1	Area of Study and Classification	55
3.2.2	Fractal Dimension	57
3.2.3	Results and Discussion	58
3.2.3.1	Descriptive Statistics	58
3.2.4	Fractal Dimension with Box Counting	62
3.3	Conclusions	64

4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AUTOCORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO CRUZADA: UM ESTUDO DE CASO INERENTE A QUESTÃO DE SEGURANÇA HÍDRICA	66
4.1 Introdução	66
4.2 Área de Estudo e Dados	67
4.2.1 Metodologia	70
4.2.2 Método <i>DFA</i> (PENG et al., 1994)	70
4.2.3 Coeficiente DCCA de Correlação Cruzada $\rho DCCA$ (Zebende, 2011)	72
4.3 Resultados	74
4.4 Conclusões	75
5 DETECÇÃO DE BANCO DE MACRÓFITAS NO LAGO DE PEDRA DO CAVALO COM IMAGEM DO SENTINEL-2 L2A	77
5.1 Introdução	77
5.2 Material e Métodos	78
5.2.1 Equações, fórmulas, ilustrações, tabelas e citações	78
5.2.2 Resultados e Discussão	80
5.2.3 Conclusão	81
6 Conclusões e Considerações Finais	83
7 Anexo	85
Referências	106

Lista de Tabelas

2.1	Intervalos de Classe dos Graus de segurança hídrica (Adaptado ANA (2019)).	14
2.2	Bandas espectrais do sensor OLI/TIRS do Landsat 8 e suas aplicações. (Adaptado NASA (2025))	21
2.3	Estados Tróficos propostos por Kratzer e Brezonik (1981)	24
2.4	Classificação proposta por Pearson (1895)	37
2.5	Propriedade do expoente de HURST	41
2.6	Expoente de auto-correlação α_{DFA} e suas características.	48
2.7	Coeficiente de correlação cruzada de Zebende (ρ_{DCCA}) e suas características.	52
2.8	Intervalos de quantificação da correlação entre duas variáveis usando o Coeficiente de Correlação Cruzada ρ_{DCCA}	52
4.1	α_{DFA} e a característica da série temporal (WALLECZEK, 2000; ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017).	71
4.2	Coeficiente de correlação cruzada de Zebende (ρ_{DCCA}) e suas características.	73

Lista de Figuras

1	2
2.1	Estrutura da “teia” Global da segurança hídrica Nacional - Adaptado de: Zeitoun (2011)	10
2.2	Quadro de indicadores em cada dimensão da segurança hídrica (ANA, 2019). .	12
2.3	Resumo do plano de informação para a construção dos indicadores ANA (2019)	14
2.4	Índice de segurança hídrica do Brasil - 2035 ANA (2019)	15
2.5	Códigos de legenda de classes e paleta de cores usadas no MapBiomas Coleção 7 (Mapbiomas 2022). .	17
2.6	Fluxo da irradiação solar e da radiação do alvo nas direções dos ângulos θ (MENESES; ALMEIDA, 2019). .	18
2.7	Divisão do espectro eletromagnético (MENESES; ALMEIDA, 2019). .	18
2.8	Curva espectral de reflectância (nm) da vegetação (Adaptado de Menezes e Almeida 2019). .	19
2.9	Comparação do espectro da folha verde de uma vegetação com os espectros reamostrados para o sensor multispectral OLI, com 7 bandas (Menezes e Almeida 2019). .	20
2.10	Comparativo de IET_{SD} entre Carlson (1977) , Kratzer e Brezonik (1981) , Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004) . Fonte: Autor (2025). .	26
2.11	Comparativo IET_{Chl-a} entre Carlson (1977) , Kratzer e Brezonik (1981) , Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004) . Fonte: Autor (2025). .	26
2.12	Comparativo IET_P entre Carlson (1977) , Kratzer e Brezonik (1981) , Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004) . Fonte: Autor (2025). .	26
2.13	Curva de IET_N Kratzer e Brezonik (1981) . Fonte: Autor (2025). .	26
2.14	Número Médio Mensal de Manchas Solares, Jan/1749 a Mai/2014. Fonte: SunSpot (NASA). .	30
2.15	Processo estocástico interpretado como uma família de variáveis aleatórias. Fonte: (MORETTIN; TOLOI, 2004). .	31
2.16	Série Temporal não estacionária quanto ao nível e inclinação. Fonte: (MORETTIN; TOLOI, 2004). .	32
2.17	Exemplo de série não estacionária com tendência: o consumo em sacas de 60kg. .	33
2.18	Diagrama de Dispersão População Urbana X População Atendida com Água. Fonte: (MDR, 1996) .	35
2.19	Modelo do reservatório de Hurst (1951) cálculo de $R(\tau)$. Fonte: Feder (1988) . .	38
2.20	Descarga Anual do Lago Albert (linha tracejada), e acúmulo deixado no reservatório por descargas médias (linha cheia). Fonte: Feder (1988) . .	38
2.21	Análise de intervalo rescalonado - Estatística R/S verificado em alguns fenômenos naturais. No gráfico, de cima para baixo, as retas ajustadas referem-se a: descarga do rio, medidor nível, pluviosidade, anéis de troncos de árvores e camadas de sedimentos do Lago Saki. O “expoente de Hurst” (H) aparece como a letra K . Fonte: Feder (1988) . .	39

2.22	Análise de intervalo rescalonado - Estatística R/S verificado em alguns fenômenos naturais. No gráfico, de cima para baixo, as retas ajustadas referem-se a: descarga do rio, medidor nível, pluviosidade, anéis de troncos de árvores e camadas de sedimentos do Lago Saki. Fonte: Feder (1988)	40
2.23	Em cada coluna é apresentado a geometria relativa a sua dimensão(d) cujo fator de escala está apresentado em cada linha. O número de partes (N) está contado em cada figura apresentada.	42
2.24	Construções de fractais a partir de regras simples. Fonte: Fernandez (2014)	42
2.25	Curva de Koch. Fonte: College Mathematics Journal, Mar 1984	43
2.26	Sinal com tendência apresenta seu desvio padrão maior do que o sinal sem tendência. Ambos sinais com variações positivas e outro com variações negativas representarem sistemas descorrelacionados. Fonte: Hardstone 2012.	45
2.27	Sinal com tendência e sinal sem tendência. Ambos auto similares e com correlação de longa escala. Fonte: Hardstone 2012.	45
2.28	Sinais auto similares sem os efeitos de tendência. Sinal com tendência (cruz)e sinal sem tendência (círculo) usados em 2.27 . Fonte: Hardstone 2012	46
2.29	Série integrada com a diferença acumulada em relação à média	46
2.30	Série integrada dividida em intervalos de caixas de tamanhos iguais (mesmo número de pontos).	47
2.31	É calculado desvio padrão médio em relação a ordenada do ajuste	47
2.32	Representação dos pontos de uma ST obtidos a partir de um gerador de números aleatórios e sua respectiva análise utilizando o DFA.	48
2.33	Curva gerada a partir de uma função seno e e sua respectiva análise com o DFA.	49
2.34	Média Mensal do Número de Manchas Solares. Fonte: Adaptado de Moret 2014	50
3.1	(Color online) Location of the area of study and the EPA <i>Pedra do Cavalo</i> in Bahia (Brazil).	55
3.2	Area of study and classification by Mapbiomas land cover.	58
3.3	(Color on-line) Number of boxes as a function of the image size. This is the image of the 'forest' class in 2021, where the fractal dimension was calculated.	59
3.4	(Color on-line) Descriptive statistics of <i>Pedra do Cavalo</i> (all classes) with: (a) Color mean, (b) standard deviation (sd), (c) skewness, and (d) kurtosis.	61
3.5	(Color on-line) Counting as a function (area by class) of the year by: (a) Non Forest Natural Formation, (b) Water, (c) Forest, (d) Farming and (e) Non Vegetated area. Here, the count is made taking into account the smallest pixel, a square of size 30 m ($N = 1$).	61
3.6	(Color on-line) Fractal dimension as a function of time (year) for all classes: (a) Non Forest, (b) Water, (c) Forest, (d) Farming, and (e) Non Vegetated.	62
3.7	(Color on-line) Fractal dimension rate as a function of time (year) for all five classes: (a) Non Forest, (b) Water, (c) Forest, (d) Farming, and (e) Non Vegetated.	64
4.1	Área de estudo localizada na Bahia, polígono que inclue a APA de Pedra do Cavalo, seu lago e áreas adjacentes.	68
4.2	Índices de vegetação e bandas espectrais em função do tempo obtidos por sensoriamento remoto, com período compreendido entre os dias de 25 de dezembro de 2013 e 25 de outubro de 2020, com um total de 273 imagens.	70

4.3	F_{DFA} como função da escala temporal n , para os índices NDVI, EVI, bandas do Azul (<i>Blue Band</i>), do Verde (<i>Green Band</i>), do Vermelho (<i>Red Band</i>) e o NIR - refletância espectral no infravermelho próximo. A linha vertical pontilhada separa as escalas temporais acima e abaixo $n = 30$ observações. Nesta figura vê-se os valores do expoente de autocorrelação calculado para escalas temporais menores e maiores do que 30 observações.	74
4.4	ρ_{DCCA} como função da escala temporal n , com a combinação entre os todos os índices. A linha vertical representa a escala temporal $n = 30$ (observações) e divide o estudo em pequenas e longas escalas temporais. Fonte: Fernandez, B.F.; Zebende, GF	75
5.1	Área de estudo do Reservatório da APA de Pedra do Cavalo. Fonte: Autores, 2024	78
5.2	a)Boxplot das amostras de <i>Pontederia crassipes</i> , b)Valores de reflectância dos pontos com ocorrência de banco de <i>Pontederia crassipes</i> c)Estatística descritiva da amostra de ocorrência de <i>Pontederia crassipes</i> . Fonte: Autores, 2024	79
5.3	a) Visão espectral (SNAP 10.0), b) Bandas espetrais usas na visão espectral e c) Raster com os pontos de observação (Sentinel-2 L2A), 29 de fevereiro de 2024. Fonte: Autores, 2024	80
5.4	a)Foto da <i>Pontederia crassipes</i> , b)assinatura espectral <i>Eichhornia crassipes</i> classificada atualmente da como <i>Pontederia crassipes</i> adaptado Kokaly et al. (2017).	80
5.5	Reflectância dos 42 pontos de amostra com suas respectivas bandas espetrais na resolução de $10m^2$ - 490nm, 560nm, 665nm e 842nm) Fontes autores 2024.	81

Lista de Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BM	Banco Mundial
CAPES	Coordenação de Aprefeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DCCA	<i>Detrended Cross-Correlation Analysis</i>
DFA	<i>Detrended Fluctuation Analysis</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
EMBASA	<i>Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.</i>
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GWP	<i>Global Water Parternship</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISH	Índice de Segurança Hídrica
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
INEMA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
LULC	<i>Land Use and Land Cover</i>
MSI	<i>Multispectral Instrument</i>
NDCI	<i>Normalized Difference Chlorophyll-a Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	<i>Near Infraread Reflectance</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
PPGM	Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente
PSH	Programa de Segurança Hídrica
REM	Radiação Eletromagnética
SEE/OC	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima
SH	Segurança Hídrica
SHU	Segurança Hídrica Urbana
SR	Sensoriamento Remoto
ST	Série Temporal
SWIR	<i>Short Wave Infrared Reflectance</i>
TSI	<i>Trophic State Index</i>
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana
UN	<i>United Nations</i>
VA	Variável Aleatória
WWW	<i>World Wide Web</i>

Introdução

1.1 Contexto e Cenário

Ter água disponível é uma constante preocupação global. Trabalhos e pesquisas buscam compreender o grau de equidade e equilíbrio das interdependências do seu uso em demandas naturais e antrópicas, (PARTNERSHIPS, 2000; HOEKSTRA et al., 2005; CASTRO, 2021). Configuração de um cenário em que, a presença ou falta de água tem reflexos na paisagem e consequências em seu uso e cobertura da terra (CRUZ et al., 2017; SOUZA et al., 2020; WANG et al., 2021).

No mundo, centros urbanos aumentam em população, demandando por um fornecimento de água condizente (UN, 2018). Em 2022, no Brasil, o abastecimento humano representou o segundo maior uso da água, correspondendo a 24% do total. No ano anterior, em 2021, 85% da população urbana foi atendida por mananciais superficiais, os outros 15% abastecido por fontes subterrâneas (BRASIL, 2024). Nestes aglomerados urbanos, o aumento do consumo acontece de forma concentrada, complexa e com interdependências de soluções (TSEGAYE; GALLAGHER; MISSIMER, 2020; BRASIL, 2024) e que envolvem resiliência em situações de desastres (TOUBIN et al., 2015).

Ainda no Brasil, aproximadamente metade de toda a água é usada para a irrigação (2022) (BRASIL, 2024). Ela suplementa o regime das chuvas, viabilizando o cultivo e a produção agrícola (outra preocupação global) mesmo em locais de escassez hídrica (BRASIL, 2024). Porém, a água também está presente na geração de energia, na composição de produtos, bem como relacionada a desastres - por excesso ou escassez de água. Ou seja, a água é empregada amplamente e tem importância abrangente.

Diferentes estudos têm sido feitos no sentido de melhor entender essa interdependências físicas e sociais, em que a segurança hídrica (SH) ocupa o centro dessas relações (GREY; SADOFF, 2007; ZEITOUN, 2011; HOEKSTRA; BUURMAN; GINKEL, 2018). Na topologia de rede proposta por Zeitoun (2011), a SH está no centro da rede. São complexas relações de uso, abordadas em quatro dimensões - econômica, ecossistêmica, humana e resiliência, pela Organização das Nações Unidas (UN, 2013) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019).

No Brasil, a SH é avaliada pelo Índice de Segurança Hídrica (ISH) que se utiliza de diversos indicadores. Tais como, Disponibilidade Hídrica: Quantidade de água disponível para uso, Qualidade de Água: Níveis de poluição e concentração de substâncias químicas, Acesso à

Água Potável: Percentual da população que usa à água tratada, Disponibilidade de Esgoto
Tratado: Percentual da população com acesso a serviços de tratamento de esgoto, entre outros. Procurando, por meio dessa metodologia, estimar o grau de segurança hídrica de uma determinada região (ANA, 2019; BRASIL, 2019).

Por outro lado, os corpos d'água, compreendidos como qualquer acumulação de água - mares, rios, lagos, são estudados pela geomorfologia para investigar fenômenos que propiciam enchentes, estimam o escoamento superficial de um rio, o tamanho de uma bacia hidrográfica, a área de um espelho d'água, entre outros estudos (CABALLERO et al., 2020). Comportamentos que podem estar associados às irregularidades da rede de drenagem de uma bacia fluvial (TARBOTON, 1996; TUNAS; ANWAR; LASMINTO, 2016; CABALLERO et al., 2020). Rios e lagos apresentam-se rugosos e/ou sinuosos em imagens e mapas. Portanto, de difícil representação. Sendo usada a análise fractal em estudos dessas geometrias complexas (GOODCHILD, 1982; TARBOTON, 1996). Os fractais possuem importantes normas e padrões de se pensar formas espaciais (MANDELBROT, 1983; GOODCHILD; MARK, 1987; BRIGGS, 1992; NEEL; MCGARIGAL; CUSHMAN, 2004); resultando em uma metodologia de análise de geometrias da natureza em representações gráficas ou de cenas da superfícies da terra (AAGAARD; HARTVIGSEN, 2014; ANDRONACHE et al., 2016; CABALLERO et al., 2020).

Importante destacar que o monitoramento por meio do sensoriamento remoto tem possibilitado, de forma abrangente, uma abordagem compreensiva de corpos d'água, com dimensões globais, bem como de outras classes de uso e cobertura da terra, propiciando entendimento dos elementos que fazem parte de uma cena com o seu todo e ao longo do tempo (LADE et al., 2020; STANIMIROVA et al., 2023). São imensas quantidades de informações obtidas por missões de satélites. Isso tem resultado em gigantes repositórios de dados geoespaciais, que representam imagens georreferenciadas da superfície terrestre. Eles são armazenados em locais com uma infraestrutura eficiente baseada em nuvem, com canais de suporte, documentação, fóruns e entre outras características, acesso livre - não pago. (Google, 2024; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2024; HUNTINGTON et al., 2017; United States Geological Survey, 2024). Consequentemente, isso permite que projetos robustos como o do MapBiomas nasçam e se desenvolvam (MapBiomas, 2023).

O Projeto MapBiomas é uma iniciativa do SEEG/OC (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima) que produz estudos em rede colaborativa formada por ONGs, universidades e empresas de tecnologia organizados por biomas e temas transversais. O Brasil, país com dimensões continentais tem neste projeto a classificação de seus biomas, com base no uso e cobertura da terra (SOUZA et al., 2020). Essa proposta, transparente, vem sendo exportada para outros países (MapBiomas, 2024a). Como exemplo, temos o bioma pampas que está em áreas do Brasil, Uruguai e Argentina

classificadas em colaboração com especialistas destes mesmos países ([MapBiomas, 2024b](#); [MapBiomas, 2024c](#)) expandindo sua metodologia para novos lugares do planeta além de fronteiras políticas. O MapBiomas Brasil está em sua nona edição (2024) de classificação ([MapBiomas, 2024d](#)).

Sob outro enfoque, a vegetação é um importante componente de um bioma. Ela ocupa, geralmente, grandes áreas de extensão com diferentes espécies e está, intimamente, relacionada à água, em diversas áreas do conhecimento: ecologia ([BERTOLO et al., 2015a](#)), agricultura ([CONCEIÇÃO, 2006](#)), climatologia ([HUNTINGTON et al., 2017](#); [NKIAKA et al., 2024](#); [LIU et al., 2024](#)), entre outras. No entanto, a visão sinóptica de satélites, proporciona a informação necessária para o cálculo de índices de vegetação tais como: o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*)) e o EVI (Índice de Vegetação Melhorado - *Enhanced Vegetation Index*), colaborando no diagnóstico da saúde da vegetação que por sua vez tem implicações na evapotranspiração e ciclo hidrológico ([MOURA et al., 2009](#); [GUERSCHMAN et al., 2009](#); [SENAJ et al., 2011](#)).

O vigor da vegetação depende de sua atividade fotossintética ([SANO et al., 2019](#)), processo pelo qual, a conversão da energia luminosa do sol, dióxido de carbono e água resultam em oxigênio e açúcar ou carboidratos - elementos fundamentais para seres vivos. Os sensores instalados nos satélites captam este fenômeno ([SANO et al., 2019](#); [BERGAMASCHI et al., 2007](#)). Pois, detectam por meio das bandas do infravermelho próximo e na faixa visível do espectro eletromagnético as mudanças ocorridas em seus estádios fenológicos, que repercutem no desenvolvimento das espécies ([BERGAMASCHI et al., 2007](#); [BOTOSO, 2007](#)). São diversos os processos complexos envolvidos nas relações entre fenologia e clima e que são estudados, sobretudo, no tempo e no espaço ([BERGAMASCHI et al., 2007](#)) por meio dos índices NDVI e EVI.

Sob outra perspectiva, a mudança na cobertura da vegetação por um solo exposto tem implicações na vulnerabilidade ao risco da erosão que podem vir a encher rios de sedimentos pela falta de vegetação ribeirinha ([CRUZ et al., 2017](#); [TANKPA et al., 2021](#); [WASEEM et al., 2021](#)). Já para áreas com crescimento urbano implicam em aumento da demanda por água tratada ([PAIVA et al., 2020](#)), ou mesmo, dada a possibilidade da geração de energia por meio de usina hidroelétrica, há que se ter água reservada. Enfim, diversas demandas por uma condição segurança por água com suas inerentes complexidades e implicações de interdependências.

Vale ainda ressaltar que as diferentes espécies de plantas, comportam-se segundo as estações do ano, ou seja, espera-se que, no outono, as plantas caducifólias entrem em um estado de dormência, o que deve representar uma perda momentânea de folhas e uma correspondente variação em seu espectro. Tal fato, impacta nos índices NDVI e EVI. As

séries temporais desses índices correspondem a uma valiosa ferramenta de monitoramento em áreas com cobertura vegetal. O método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) e o coeficiente ρ_{DCCA} (*Detrended Cross-correlation Coefficient*) empregados para estimar a correlação em séries temporais (STs) não estacionárias (ZEBENDE, 2011a; VASSOLER; ZEBENDE, 2012; FERNANDEZ; OLIVEIRA; ZEBENDE, 2024) têm trazido respostas sobre escalas temporais e para esses diferentes fenômenos dessas STs não estacionárias.

Por outro lado, a presença de bioindicadores, a exemplo das macrófitas, servem para avaliar a biodiversidade ecológica e a qualidade dos corpos d'água (BOSCHILIA; OLIVEIRA; SCHWARZBOLD, 2016). A Organização Mundial da Saúde (OMS) traz como preocupação a presença dessas plantas em lagos e reservatórios (BARTRAM; BALLANCE, 1996). Pois, essa vegetação aquática é sensível a variação de fósforo total presente da água (ABOU-HAMDAN et al., 2005; PENNING et al., 2008; CESCHIN; ZUCCARELLO; CANEVA, 2010). Portanto, a identificação da presença desta assembleia bioindicadora é um importante aliado no monitoramento da qualidade da água.

O *locus* desta Tese é uma Área de Preservação Ambiental (APA) que abrange o Lago de Pedra do Cavalo, no Estado da Bahia que foi criada para proteger e assegurar a qualidade da água (INEMA, 2017), este manancial superficial faz parte da bacia do Rio Paraguaçu, que abastece uma população superior a 4 milhões de pessoas (INEMA, 2019b; ANDRADE; CURI; CURI, 2007). Nesta área, coexistem todas as características sobre uso da água relacionados à segurança hídrica em suas dimensões: água para consumo humano por meio da Estações de Tratamento de Água (ETA) presentes ao lago - dimensão humana, água para a agricultura e geração hidroelétrica - dimensão econômica, água para a manutenção do ecossistema de floresta - dimensão ecossistêmica e proteção de riscos relacionados a enchentes com a barragem - dimensão de resiliência (INEMA, 2019a). Aqui, temos uma grande oportunidade de estudar onde ocorrem variações na dinâmica do uso e cobertura da terra ao longo do tempo, dentro de uma mesma área de estudo tendo em vista a segurança hídrica.

Desse modo, a presente Tese vem avaliar impactos ocorridos no uso e cobertura da terra, tendo como base imagens obtidas por sensoriamento remoto, em uma área com demandas de segurança hídrica, por meio de três abordagens: (i) estimar as dimensões fractais das classificações N1 da coleção 7.1 de 30 anos do MapBiomass, (ii) estabelecer relações temporais entre as bandas espectrais de índices de vegetação presentes nesta mesma área ao longo de um período de 6 anos e 10 meses (ou 82 meses) de observação e (iii) identificar, via sensoriamento remoto, a ocorrência de plantas macrófitas no lago.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta Tese está organizada em seis Capítulos. Sendo apresentadas perspectivas futuras com aspirações na continuação de trabalhos e documentações que corroboram com as tarefas executadas. Segue abaixo um resumo do que será tratado em cada um dos Capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Capítulo que ambienta onde é o contexto e o cenário desta Tese, na qual serão apresentadas as seguintes temáticas: segurança hídrica, sensoriamento remoto, classificação de uso e cobertura da terra, análise de bandas espectrais empregadas no cálculo de índices de vegetação e a importância de se considerar bioindicadores como aliados no monitoramento da qualidade de água sob a perspectiva da complexidade que envolve a segurança hídrica (SH).

- **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica e Metodologia**

Nesta Capítulo, serão definidas expressões, conceitos, procedimentos, processos e métodos, com base em autores de referência, os quais foram utilizados para realizar este trabalho de Tese. Mais, especificamente, conhecimentos e metodologias escolhidas que produzissem os resultados esperados, tais como: o DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*), a análise fractal, o coeficiente de correlação cruzada ρ_{DCCA} , o uso de imagens de satélite para identificação de bioindicadores, segurança hídrica, sensoriamento remoto, trofia, importância dos bioindicadores.

- **Capítulo 3 - FRACTAL CLASSIFICATION OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA, PEDRA DO CAVALO**

Aqui é tratado um artigo submetido à revista especializada em fractais onde é feita o cálculo da dimensão fractal de uma série temporal de classes de uso e cobertura da terra. A partir da dimensão fractal é possível de estabelecer relações entre as classes estudadas e suas implicações em relação a uma área de segurança hídrica.

- **Capítulo 4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AUTOCORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO CRUZADA: UM ESTUDO DE CASO INERENTE A QUESTÃO DE SEGURANÇA HÍDRICA**

Aqui é tratado um artigo publicado em revista especializada em climatologia, onde são feitas medições de correlação cruzadas e auto correlação entre bandas espectrais de imagens de satélite empregadas no cálculos de índice de vegetação NDVI e EVI da mesma área estudada no Capítulo 4 onde são possíveis de serem visto o comportamento das escalas de tempo da memória desses índices, sendo identificado fenômenos que têm impactos com a área de segurança hídrica.

- **Capítulo 5 - DETECÇÃO DE BANCO DE MACRÓFITAS NO LAGO DE PEDRA DO CAVALO COM IMAGEM DO SENTINEL-2 L2A**

Aqui é tratado um artigo apresentado em encontro de sensoriamento remoto onde são analisadas as bandas espectrais de alvos que correspondem a bancos de macrófitas no lago de Pedra do Cavalo. A presença destas plantas flutuantes têm relações com nutrientes que por sua vez estão associados a eutrofização e em manejos de macrófitas nas operações das estações de tratamento de água e na geração de energia.

- **Capítulo 6 - Conclusões e Considerações Finais**

Uma síntese dos achados é feita, nesta etapa, e onde, também são retomados os objetivos específicos propostos e as conquistas de novos conhecimentos alcançados. Como fechamento, apesar dos objetivos planejados, novas perspectivas de delineiam após o trabalho com propósitos específicos de uma Tese. Não há como acabar com todas as questões que acercam a segurança hídrica e a disponibilidade de água para diversos fins. Os saberes vão fechando e abrindo portas para novos conhecimentos, essa talvez sejam as esperanças e que também seguem apresentadas nas Considerações Finais.

- **Anexo**

Dois artigos e quatro certificados de registro de *softwares* foram anexados ao presente trabalho de Tese. Pois, os quatro programas foram necessários para fazer o mapeamento do correlogramo (Teste Estatístico do DCCA Correlogramo) - trabalho apresentado em Encontro Nacional de Modelagem Computacional que resultou na construção do artigo do Capítulo 4 e o segundo artigo, que esta no Anexo, refere-se a um trabalho apresentado no Encontro Nacional de Desastres e motivou o desenvolvimento de avanços na pesquisa da área de lagos e banco de macrófitas que faz parte do Capítulo 5.

1.3 Problema

As transformações no uso e cobertura da terra, observadas ao longo dos últimos 30 anos por meio de técnicas de sensoriamento remoto, associadas à análise de bioindicadores, constituem ferramentas eficazes para o monitoramento da disponibilidade de água em áreas estratégicas para a segurança hídrica. Parte-se do pressuposto de que as alterações antrópicas no território impactam diretamente os processos hidrológicos e, consequentemente, a capacidade de oferta e regulação dos recursos hídricos.

Este estudo se insere no campo das Ciências Ambientais, ligado, diretamente, com a gestão de recursos hídricos, geotecnologias aplicadas e planejamento ambiental. O problema se delimita a um polígono espacialmente definido, correspondente a uma área de segurança hídrica, que compreende a APA de Pedra do Cavalo, seu lago e áreas adjacentes, no estado da Bahia - Brasil, cuja dinâmica ambiental será analisada em uma série temporal

de três décadas, por meio da classificação de imagens de sensoriamento remoto.

A motivação para esta pesquisa decorre da necessidade crescente de compreender como os padrões de uso e cobertura da terra interferem na segurança hídrica, especialmente em contextos de intensificação das pressões antrópicas e das mudanças climáticas. A relevância científica e prática deste trabalho reside na possibilidade de gerar subsídios técnicos e metodológicos para a segurança hídrica, contribuindo para a formulação de estratégias de conservação, recuperação ambiental e uso sustentável dos recursos naturais.

1.4 Hipótese

As mudanças sofridas no uso e cobertura da terra, bem como a presença de bioindicadores detectadas por meio de imagens de sensoriamento remoto possibilitam monitorar a disponibilidade de água para a gestão hídrica.

1.5 Justificativa

A APA de Pedra do Cavalo tem o segundo maior reservatório de água do estado da Bahia. E sua importância se destaca em fornecer água para quase metade da população do estado. Formas de avaliar e monitorar, constantemente, a partir do sensoriamento remoto tornam-se fundamentais para a promoção do bem estar e qualidade de vida da população, bem como a compreensão de mecanismos existentes em área de segurança hídrica para subsidiar trabalhos de conservação e uso sustentável de seus recursos naturais.

1.6 Objetivo Geral

Avaliar impactos na segurança hídrica em sua qualidade e quantidade da água, usando indicador ambiental e uso e cobertura da terra observados por sensoriamento remoto, em um polígono espacialmente definido que abrange a APA de Pedra de Cavalo, seu lago e regiões adjacentes ao analisar as relações existentes em mudanças em suas classes de uso e cobertura e pela presença de bioindicadores averiguadas por imagens de satélite.

1.6.1 Objetivos Específicos

- i) Analisar o impacto de mudanças nas áreas, por meio de sua estatística descritiva nas principais classes de uso e cobertura em um polígono espacialmente definido que abrange a APA de Pedra de Cavalo, seu lago e regiões adjacentes ao longo de um período de 30 anos;
- ii) Estimar a dimensão fractal, por meio do método *Box Counting* das principais classes de uso e cobertura da terra, em um polígono espacialmente definido que abrange a APA de Pedra de Cavalo, seu lago e regiões adjacentes, ao longo de um período de 30 anos, construindo uma série temporal da dimensão fractal de cada classe, buscando inferir sobre os resultados e possíveis relações entre classes ao interpretá-los a partir de fenômenos presentes e causas de desfechos encontrados;
- iii) Correlacionar séries temporais de índices de vegetação NDVI, EVI e sua respectivas bandas empregadas para cálculo, obtidos por sensoriamento remoto em um polígono espacialmente definido que abrange a APA de Pedra de Cavalo, seu lago e regiões adjacentes ao longo de um período entre 25 de dezembro 2013 e 25 de outubro de 2020 para identificar possíveis impactos no ecossistema do local (área de estudo) relacionados a resposta dos índices de vegetação com sua área de cobertura calculados e a disponibilidade hídrica;
- iv) Averiguar a presença de banco de macrófitas no lago da APA de Pedra do Cavalo por meio de visitas de campo e imagens de sensoriamento remoto para a identificação de amostras a serem utilizadas em uma classificação para todo o lago.

Fundamentação Teórica e Metodologia

Aqui serão apresentados conceitos de segurança hídrica (SH), Sensoriamento Remoto (SR), classificação de uso e cobertura da terra e procedimentos para análise de séries temporais (ST). Serão abordados conceitos e cálculos para estimar a dimensão fractal, o coeficiente de correlação de Pearson e a análise R/S . Também, serão explanados os passos para ser calculado a auto-correlação e a correlação cruzada para os Métodos DFA, DCCA e o cálculo para estimar o Coeficiente de Correlação Cruzada ρ_{DCCA} .

2.1 Fundamentação Teórica

2.1.1 segurança hídrica: terminologia, dimensão e nível

Apesar de parecer um estereótipo para incentivar o interesse na relevante temática de gestão da água, o termo “segurança hídrica” pode gerar confusão e maiores expectativas de significados considerados como sendo dela (LAUTZE; MANTHRITHILAKE, 2012). Ela é uma expressão que sugere um foco, e que, na prática, abrange outros modos e significados como: integrado, sustentável e adaptável (HOEKSTRA; BUURMAN; GINKEL, 2018). Como exemplo, Grey e Sadoff (2007) definem segurança hídrica como:

“a disponibilidade por uma quantidade e qualidade aceitáveis de água para a saúde, meios de subsistência, ecossistemas e produção, associando, com um nível aceitável de riscos relacionados à água para pessoas, ambientes e economias” .

Dessa definição, nota-se questões sobre a qualidade e quantidade de água, bem como a preocupação em abranger áreas concernentes ao homem, ao meio ambiente e à economia apesar de relativizar a condição do quanto ser aceitável.

Para a *Global Water Partnership* (GWP) - ou Parceria Global da Água, instituição filiada à Organização das Nações Unidas (ONU) e ao Banco Mundial (BM), a nomenclatura segurança hídrica compreende um conceito complexo, de gestão integrada da água e equilíbrio entre proteção e o uso de recursos (PARTNERSHIPS, 2000) pois, denota à água como uma fonte natural com diversas demandas. Dessa forma, a segurança hídrica está relacionada com a redução da pobreza, saúde, educação, energia, segurança alimentar e entre

outras melhorias à sustentabilidade ambiental ([LAUTZE; MANTHRITHILAKE, 2012](#)); ([PARTNERSHIPS, 2000](#)).

Na cronologia da evolução do conceito de segurança hídrica temos: [Witter e Whiteford \(1999\)](#), [Partnerships \(2000\)](#), [Swaminathan \(2001\)](#), [Cheng et al. \(2004\)](#), [Grey e Sadoff \(2007\)](#) e mais, recentemente, [WaterUN et al. \(2013\)](#). Nesta sequencia, muito embora não haja uma única definição de segurança hídrica elas guardam elementos comuns: como a garantia de água em quantidade suficiente para atender a sobrevivência humana (inclusive atividades econômicas) este ponto também é destacado nos trabalhos de [Saito \(2018\)](#) e [Castro \(2022\)](#).

[Zeitoun \(2011\)](#) questionou a despeito de grandes esforços científicos em calcular, de uma única forma, as quantidades básicas de água (em todas as suas formas) que fluem para dentro e para fora de uma bacia hidrográfica. Por conseguinte, propôs um modelo para tratar de segurança hídrica em um formato de “teia”, conforme apresentado na Figura 3.1. Nele, os filamentos da teia pressupõem interdependências que interligam “áreas de segurança hídrica nacional”. Sendo elas: Comunidade, Clima, Energia, Alimentos, Recursos Hídricos, Segurança e segurança hídrica.

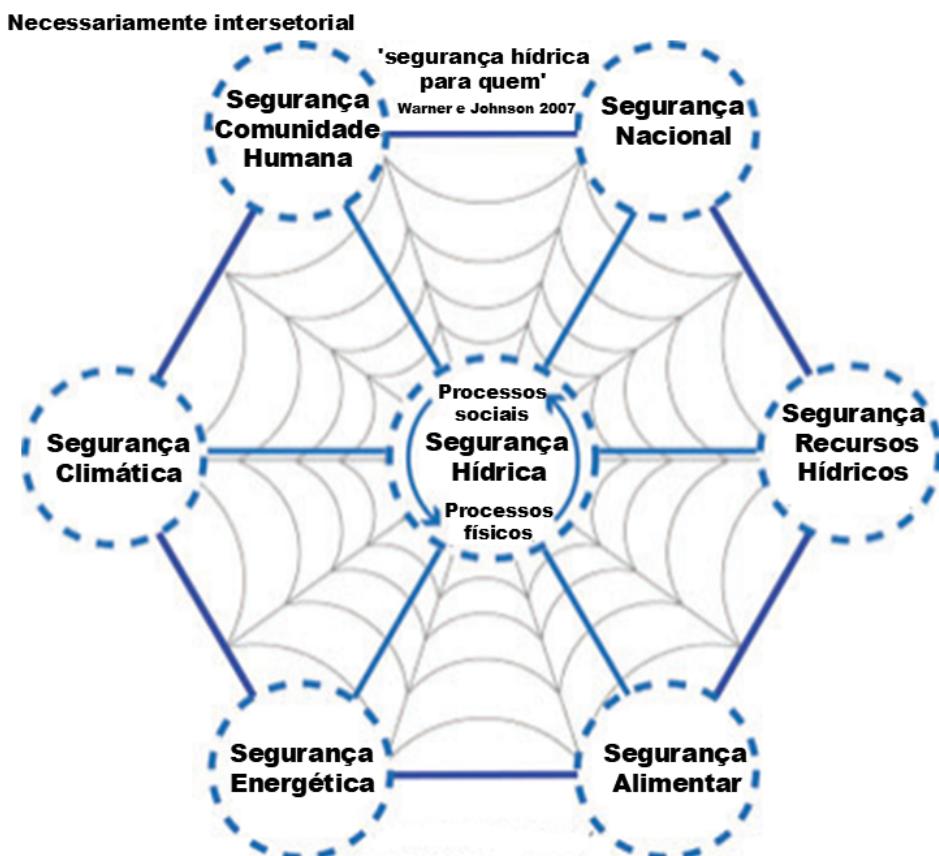


Figura 2.1: Estrutura da “teia” Global da segurança hídrica Nacional - Adaptado de: [Zeitoun \(2011\)](#)

Esse instrumento teórico considera “processos políticos, econômicos e ecológicos ao mesmo tempo” (BAKKER, 2003). No modelo de [Zeitoun \(2011\)](#), isso fica representado ao centro pelas setas cílicas. O nexo dessas ligações entre as áreas envolvidas, devem refletir as interdependências relacionadas com a segurança hídrica. Essas “interdependências” significam oportunidades para alguns, mas dependência e vulnerabilidade para outros (WARNER; JOHNSON, 2007). Por exemplo, água-alimento-clima, tomadas como prováveis candidatas de uma teia, são áreas que estão relacionadas com a segurança hídrica. Há dependência por água, tanto para a produção de alimentos como para um clima adequado para o ser humano. Porém, a produção de alimentos pode vir a tornar o clima vulnerável. Sendo possível de se estabelecer prioridades nacionais (ZEITOUN, 2011) ao considerar uma “segurança hídrica para quem” (Figura 3.1) (WARNER; JOHNSON, 2007).

[Hoekstra, Buurman e Ginkel \(2018\)](#) fizeram uma revisão sobre segurança hídrica urbana (SHU) deixando claro que esse conceito (SHU) é diferente do mais geral - segurança hídrica (SH). O SHU é aplicado ao território de uma área urbana, um município ou aglomeração urbana. Os elementos, válidos para a SHU não são para um nível estadual, nacional ou global. Por isso, estes locais possuem, muitas vezes, suas soluções de recursos hídricos que vêm de fora, às vezes, de muito longe conhecidos como o “alcance da infraestrutura hídrica urbana” (MCDONALD et al., 2014). Os centros urbanos possuem uma “pegada hídrica externa” (HOEKSTRA et al., 2012; HOFF et al., 2014), a exemplo de como ocorre na produção dos alimentos consumidos por seus cidadãos. Por fim, há uma abundância de perspectivas para uma área urbana no tocante à segurança hídrica (COOK; BAKKER, 2012; BEEK; ARRIENS, 2014).

Ainda neste conceito, a segurança hídrica nacional é função de interdependências entre as áreas de segurança, que relacionam-se em vários níveis espaciais (WARNER; JOHNSON, 2007). Por isso, é importante entender tanto a maneira, quanto o contexto dentro do qual a segurança e as interdependências relacionam-se, podendo ser abordada sob diferentes perspectivas qualitativas (WARNER; JOHNSON, 2007) bem como quantitativas (BEEK; ARRIENS, 2014).

De acordo com [Mitchell \(1996\)](#), o indicador é um instrumento que permite obter a informação da realidade, ele representa eficientemente o estado do fenômeno observado. O indicador possui variáveis que o compõem, na realização de um cálculo (MUELLER; TORRES; MORAIS, 1997), já o índice é o valor agregado ao final de um procedimento de cálculo, em que se utilizam, inclusive, de indicadores (SHIELDS; ŠOLAR; MARTIN, 2002).

Indicadores e índices podem ser um importante instrumento de comunicação, ao facilitar discussões entre diferentes partes interessadas (DICKSON; SCHUSTER-WALLACE; NEWTON, 2016); (HOEKSTRA; BUURMAN; GINKEL, 2018). No campo da SH, há um

grande número de índices e indicadores (PLUMMER; LOË; ARMITAGE, 2012; DICKSON; SCHUSTER-WALLACE; NEWTON, 2016) tais como: Sustainable City Water Index (ARCADIS, 2024), SDEWES Index (PUKŠEC et al., 2018), National Water Security Index (ADB, 2016), Urban Water Security Indices and Indicators (JENSEN; WU, 2018), entre outros.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) adota o conceito de segurança hídrica análogo ao da WaterUN et al. (2013), incorporando quatro dimensões: Humana, Resiliência, Econômica e Ecossistêmica. Segundo a ANA (2019):

“A segurança hídrica, de acordo com o conceito da Organização das Nações Unidas (ONU), existe quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento às necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias, devendo ser consideradas as suas quatro dimensões como balizadoras do planejamento da oferta e do uso da água em um país.”

A ANA construiu o Plano Nacional de segurança hídrica (PNSH) o qual visa assegurar a disponibilidade de água para o Brasil. Nele, estão descritos seus objetivos, construção, índices, dimensões, intervenções estratégicas, o Programa de segurança hídrica (PSH), seus estudos, projetos e componentes de obras, desafios para a implementação no PNSH e projeta um caminho seguro entre 2019 e 2035 (ANA, 2019).

Indicadores do ISH	
DIMENSÃO	INDICADOR
Humana	Garantia de água para abastecimento humano
Econômica	Garantia de água para irrigação e pecuária Garantia de água para atividade industrial
Ecossistêmica	Quantidade adequada de água para usos naturais Qualidade adequada da água para usos naturais Segurança das barragens de rejeito de mineração
Resiliência	Reservação artificial Reservação natural Potencial de armazenamento subterrâneo Variabilidade pluviométrica

Figura 2.2: Quadro de indicadores em cada dimensão da segurança hídrica (ANA, 2019).

Para cada uma das dimensões da segurança hídrica, previstas pela ANA, existem indicadores descritos no Índice de Segurança Hídrica (ISH), conforme pode ser visto na Figura 3.2. Ainda, o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) (ANA, 2019) do qual o ISH

faz parte, planeja os recursos hídricos, tendo em vista o cenário brasileiro dentro destas dimensões. Sendo assim, o cálculo destes indicadores, previstos no ISH, estão descritos no Manual Metodológico (versão 1.0) da ANA ([BRASIL, 2019](#)) e ajudam à tomada de decisões na gestão de água.

O ISH está sempre associado a uma base hidrográfica de referência que segue uma metodologia de codificação proposta por [Pfafstetter \(1989\)](#) em um artigo, não publicado em revista de artigos científicos, mas adotado pela ANA. A ottocodificação é a codificação de áreas hierarquizadas de bacias hidrográficas, levando-se em conta a sua contribuição exclusiva - águas que escoam para um determinado curso de água principal ou área delimitada pelos divisores de água (linhas que unem pontos de cotas mais elevadas, a exemplo de morros e serras) ([ROCHA, 2022](#)). Conforme esta classificação, o Continente da América do Sul é subdividido em dez regiões hidrográficas - numeradas de 1 a 10, sendo as quatro principais bacias empregando os números pares: 2-AMAZONAS, 4-TOCANTIS-ARAGUAIA, 6-SÃO FRANCISCO, 8-PARANÁ e 10-CORDILHEIRA DOS ANDES. As interbacias costeiras às estas recebem um número ímpar: 1-COSTA ATLÂNTICA NORTE, 3-COSTA ATLÂNTICA DA ILHA DE MARAJÓ, 5-COSTA ATLÂNTICA DO NORDESTE, 7-COSTA ATLÂNTICA LESTE, 9-COSTA ATLÂNTICA SUL. Para cada uma destas regiões - designada com um algarismo, será subdividida, hierarquicamente, por bacias de segunda ordem, que receberão para os maiores áreas de contribuição algarismos pares (2,4,6 ou 8) segundo a ordem crescente de jusante para montante das bacias regionais e de norte para o sul nas regiões costeiras do Atlântico. As áreas restantes são designadas como "INTERBACIAS" às quais se atribui o dígito adicional ímpar (1,3,5,7, e 9). Essa classificação segue pormenorizando em área menores. A última interbacia na subdivisão de qualquer bacia termina com o algarismo 9 - que representam as cabeceiras. Maiores detalhes para a identificação da área correspondente à sua contribuição podem ser obtidas no documento original ou pela ANA ambos disponibilizados pela ANA ([PFAFSTETTER, 1989](#); [ANA, 2025](#)).

O grau de segurança hídrica varia de 1 ou mínimo a 5 ou máximo conforme apresentado na Tabela 3.3. Assim, de forma geral, o grau de SH é o resultado de uma média simples ou ponderada dos graus de cada um dos indicadores que a compõem, em cada uma bacia ottocodificada. E os indicadores que apresentem valor nulo não participam da média. Para mais, as operações envolvendo níveis e classes de SH, têm seus valores também reclassificados segundo o mesmo quadro da Tabela 3.3 ([BRASIL, 2019](#)).

Para o cálculo do ISH são necessárias informações, basicamente, provenientes da ANA e do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) conforme pode ser visto na Figura 3.4. Todos os passos para o obtenção dos resultados dos indicadores podem ser encontrados no Manual Metodológico do ISH ([BRASIL, 2019](#)).

Intervalo	Grau de SH
1,00 - 1,5	Mínimo ou 1
1,51 - 2,5	Baixo ou 2
3,51 - 4,5	Médio ou 3
3,51 - 4,5	Alto ou 4
4,51 - 5,0	Máximo ou 5

Tabela 2.1: Intervalos de Classe dos Graus de segurança hídrica (Adaptado [ANA \(2019\)](#)).

Dimensão	Planos de Informação
Humana	Balanço hídrico (Dem/Disp) por ottobacia - ANA Demandas hídricas(m^3/s) por tipo de uso, município e ottobacia - Manual de Usos Consuntivos-ANA Pontos de captação para abastecimento urbano - Atlas de Abastecimento Urbano - ANA População urbana municipal - IBGE Polígonos de setor censitário urbano - IBGE Percentual de cobertura de rede de abastecimento urbano – Snis e IBGE
Econômica	Balanço hídrico (Dem/Disp) por ottobacia - ANA Demandas hídricas(m^3/s) por tipo de uso, município e ottobacia - Manual de Usos Consuntivos-ANA Valor da produção agrícola municipal - PAM - IBGE Área cultivada por município – PAM - IBGE Área irrigada por município – Atlas Irrigação - ANA Regiões Rurais - IBGE Quantitativos de rebanho por município - PPM - IBGE Valor de cabeça animal, por tipo de rebanho - agrolink adaptado Valor Agregado Bruto da indústria - IBGE Polígono das áreas municipais - IBGE
Ecossistêmica	Balanço hídrico (Dem/Disp) por ottobacia - ANA Concentração de DBO por ottobacia - Atlas Esgotos - ANA Categoria de risco e dano potencial de barragens - RSB - ANA
Resiliência	Polígonos de reservatórios e seus volumes - ANA Vazões médias e Q95 por ottobacia - ANA Polígonos de aquíferos aflorantes classificados por tipo e seus coeficientes de infiltração - ANA Coeficiente de variação da chuva anual (Grade) - ANA

Figura 2.3: Resumo do plano de informação para a construção dos indicadores [ANA \(2019\)](#).

Desse modo, o ISH pode ser estimado para todo o território nacional com os seus respectivos graus de SH, conforme pode visto nesta projeção de ISH para o ano 2035 no Brasil, Figura 3.5.

A despeito da promoção de índices para a compreensão mais tangível dos conceitos de SH pensados por [Lautze e Manthrithilake \(2012\)](#), outros trabalhos empregando sensoriamento remoto também, buscam fazê-lo, como [Machado e Baptista \(2016\)](#), [Cruz et al. \(2017\)](#) e [Akbar et al. \(2019\)](#). Tais estudos, especialmente, realizados em áreas próximas a centros urbanos, usam informações de dados de satélite e, por conseguinte, a classificação do uso e cobertura da terra ou LULC (do inglês, *land use land cover*) na compreensão de seus impactos na disponibilidade hídrica para o consumo humano e de estabelecer relações com outras áreas classificadas e que tenham relação direta com a segurança hídrica. Assim,

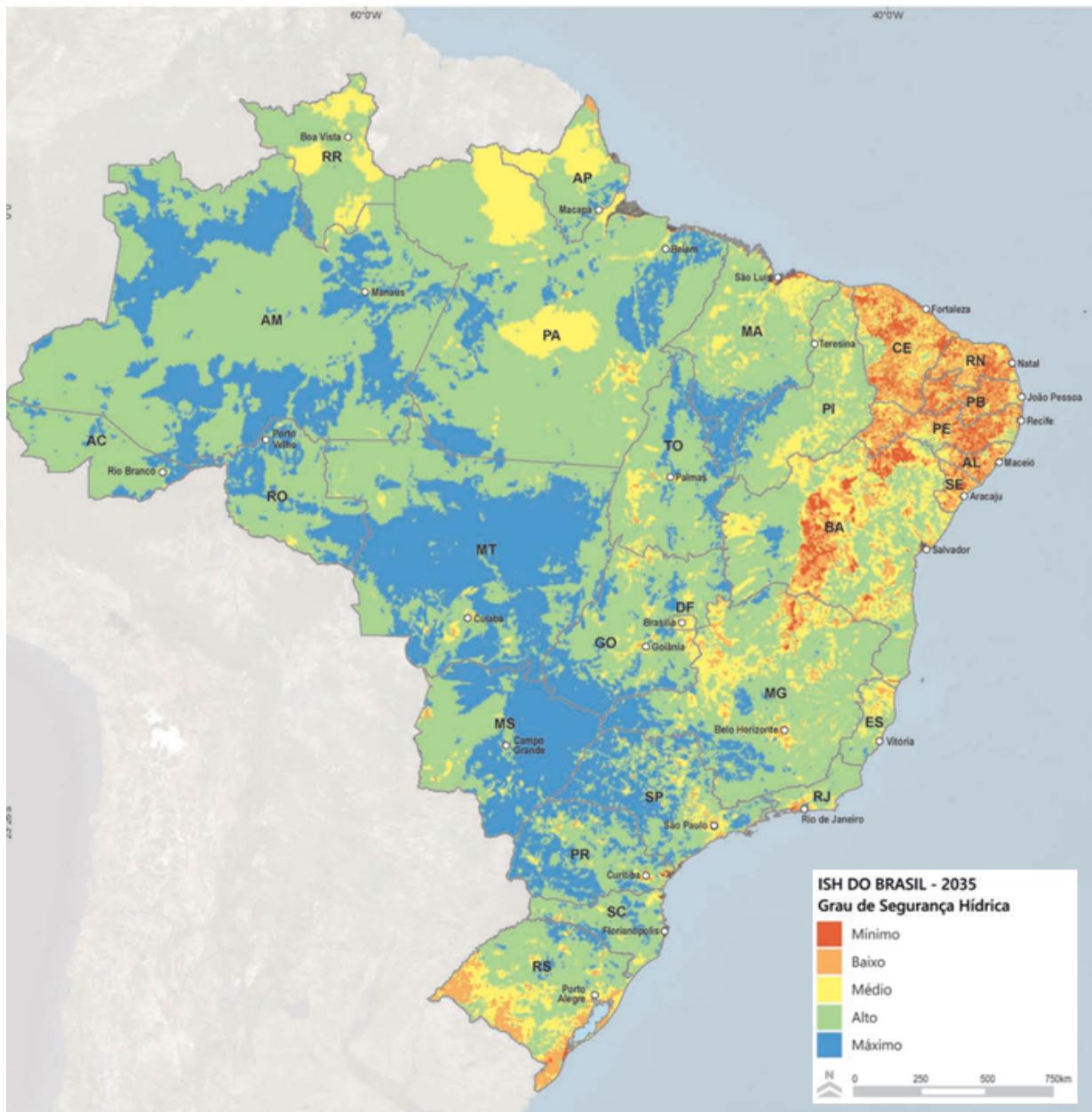


Figura 2.4: Índice de segurança hídrica do Brasil - 2035 [ANA \(2019\)](#).

destaca-se o emprego das classificações do LULC em áreas de SH bem conhecidas.

2.1.2 Aplicações em plataformas de dados georreferenciados

[Hasan et al. \(2024\)](#) fizeram uma revisão de aplicações do *Google Earth Engine* (GEE) - plataforma que permite analisar e mapear dados geoespaciais, na gestão de recursos hídricos, sistematizando produções que abordam a quantidade e a qualidade de água. Nesse trabalho de revisão, outros domínios, além do LULC, foram agrupados: bioindicadores, hidrologia, mapeamento florestal, agricultura, setor de saúde, avaliação de perigos

e riscos, e mudanças climáticas (tradução autoral), em diferentes abordagens de estudos em SH com o uso de informações obtidos por sensoriamento remoto, armazenados e processadas em uma única plataforma aberta e gratuita ([Google, 2024](#)).

Ainda, utilizando a plataforma do GEE e sob o domínio do LULC, o Projeto MapBiomas classificou todo o território brasileiro, entre 1985 e 2022. A conceito de classe no MapBiomas refere-se a uma categoria ou tipo de cobertura e uso da terra que é mapeada após seu processamento para melhor representar uma área. As classe servem para identificar e categorizar diferentes tipos de: vegetação, áreas antrópicas, água entre outras do território. Seguindo os seguintes níveis: Nível 1 - Floresta, Formação Não Florestal, Agricultura, Área Não Vegetada, Água e Não Observada. O Nível 2 possui 16 classes e também têm uma combinação de classes LULC (Figura 2.5) ([MAPBIOMASCOLLECTION, 2025](#)).

A classe Floresta Nível 1 (N1) é dividida em quatro subclasses: Formação Florestal, Formação de Savana, Manguezal e Restinga Arborizada. A seguinte classe N1 é a Formação Natural Não Florestal é dividida em seis subclasses: Campo Alagado e Área Pantanosa, Formação campestre (Pastagem), Planície Salina (Apicum), Afloramento Rochoso, Outras Formações Não Florestais e a nova classe Vegetação de Banco de Areia - Restinga Herbácea. A próxima classe (N1) é Agropecuária que é dividida em: Agricultura em Pasto, Agricultura, Plantação Florestal e Mosaico de Usos. Há ainda em N1 a Área Não Vegetada, que está subdividida em Praia, Duna e Mancha de Areia, Área Urbana, Mineração e Outras Áreas Não Vegetadas. A penúltima classe N1 refere aos Corpos D'água subdividida em: Água em Rio, Lago e Oceano e Aquicultura. A última classe N1 é Não observado (Figura 2.5).

A classe de Agricultura vai até os níveis 3 e 4 sendo esta subdividida em Culturas Temporárias e Culturas Perenes. Enquanto isso, a classe de cultura temporária é dividida em Soja, Cana-de-açúcar, Arroz, Algodão e Outras Culturas Temporárias. E, totalizando, a Cultura Perene é detalhada nas classes Café, Cítricos e Outras Culturas Perenes.

O MapBiomas mantém cálculos de acurácia das classificações de LULC para todos os anos (1985-2023) ([MAPBIOMAS, 2025](#)). Ao estimar a acurácia geral, consideramos o erro de comissão ou inclusão (quando o *pixel* não deveria ser classificado para uma determinada classe correspondente à verdade de campo) e o erro de omissão (quando deixa de mapear um *pixel* de uma determinada classe corretamente). O erro por coleção (iniciado na 3.1 até a atual que é a 9), por bioma brasileiro (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa), Global e para cada Nível - entre 1 e 3. Tais estimativas são baseadas em dados de referências, composta por ~ 85.000 amostras, pré-determinadas por técnicas de amostragem estatística. Assim, em cada ano, cada *pixel* da base de dados de referência são avaliados por técnicos treinados em interpretação visual de imagens do Landsat, possibilitando, que outros pesquisadores, independentemente, também avaliem

COLEÇÃO 7 - CLASSE	COLLECTION 7 CLASSES	NEW ID	Color number	
1. Floresta	1. Forest	1	#129912	
1.1 Formação Florestal	1.1. Forest Formation	3	#006400	
1.2. Formação Savânica	1.2. Savanna Formation	4	#00ff00	
1.3. Mangue	1.3. Mangrove	5	#687537	
1.4. Restinga Arborizada	1.4. Wooded Sandbank Vegetation	49	#6b9932	
2. Formação Natural não Florestal	2. Non Forest Natural Formation	10	#bbfcac	
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	2.1. Wetland	11	#45c2a5	
2.2. Formação Campestre	2.2. Grassland	12	#b8af4f	
2.3. Apicum	2.3. Salt Flat	32	#968c46	
2.4. Afloramento Rochoso	2.4. Rocky Outcrop	29	#ff8c00	
2.5 Restinga Herbácea	2.5. Herbaceous Sandbank Vegetation	50	#66ffcc	
2.6. Outras Formações não Florestais	2.5. Other non Forest Formations	13	#bdb76b	
3. Agropecuária	3. Farming	14	#ffffb2	
3.1. Pastagem	3.1. Pasture	15	#ffd966	
3.2. Agricultura	3.2. Agriculture	18	#e974ed	
3.2.1. Lavoura Temporária	3.2.1. Temporary Crop	19	#d5a6bd	
3.2.1.1. Soja	3.2.1.1. Soybean	39	#c59ff4	
3.2.1.2. Cana	3.2.1.2. Sugar cane	20	#c27ba0	
3.2.1.3. Arroz (beta)	3.2.1.3. Rice	40	#982c9e	
3.2.1.4. Algodão (beta)	3.2.1.4. Cotton (beta)	62	#660066	
3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias	3.2.1.5. Other Temporary Crops	41	#e787f8	
3.2.2. Lavoura Perene	3.2.2. Perennial Crop	36	#f3b4f1	
3.2.2.1. Café	3.2.2.1. Coffee	46	#cca0d4	
3.2.2.2. Citrus	3.2.2.2. Citrus	47	#d082de	
3.2.1.3. Outras Lavouras Perenes	3.2.1.3. Other Perennial Crops	48	#cd49e4	
3.3. Silvicultura	3.3. Forest Plantation	9	#935132	
3.4. Mosaico de Usos	3.4. Mosaic of Uses	21	#ffff3bf	
4. Área não Vegetada	4. Non vegetated area	22	#ea9999	
4.1. Praia, Duna e Areal	4.1. Beach, Dune and Sand Spot	23	#dd7e6b	
4.2. Área Urbanizada	4.2. Urban Area	24	#af2a2a	
4.3. Mineração	4.3. Mining	30	#8a2be2	
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	4.4. Other non Vegetated Areas	25	#ff99ff	
5. Corpo D'água	5. Water	26	#0000ff	
5.1. Rio, Lago e Oceano	5.1. River, Lake and Ocean	33	#0000ff	
5.2 Aquicultura	5.2. Aquaculture	31	#29eee4	
6. Não observado	6. Non Observed	27	#D5D5E5	

Figura 2.5: Códigos de legenda de classes e paleta de cores usadas no MapBiomas Coleção 7 (Mapbiomas 2022).

a evolução dessa acurácia (FREITAS; CAVALCANTI; BRAZ, 2023); (OLIVEIRA; ARRAUT, 2024), por concluírem de que sua classificação é um excelente produto na escala de resolução proposta.

2.1.3 Sensoriamento Remoto

A imagem de um alvo obtida por um satélite, corresponde à detecção de radiação eletromagnética (REM), feita por sensores instalados em uma plataforma (satélite) que orbita

a Terra (Figura 3.7). Ou seja, a forma com que o satélites obtém as imagens dos alvos na superfície da Terra dependem de relação do fluxo de radiação incidente e de suas características físico-químicas desse alvo, como sua composição, textura e estado físico.

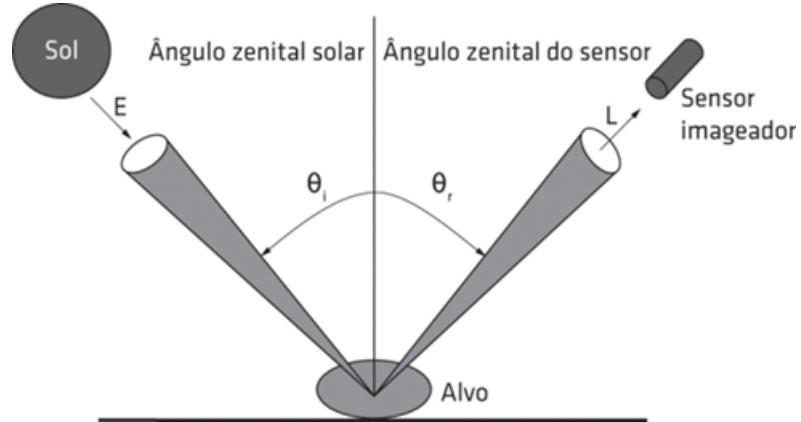


Figura 2.6: Fluxo da irradiância solar e da radiância do alvo nas direções dos ângulos θ (MENESES; ALMEIDA, 2019).

A faixa da radiação eletromagnética mais conhecida ao ser humano é a luz solar, que está inserida em uma faixa do espectro eletromagnético (Figura 2.7).

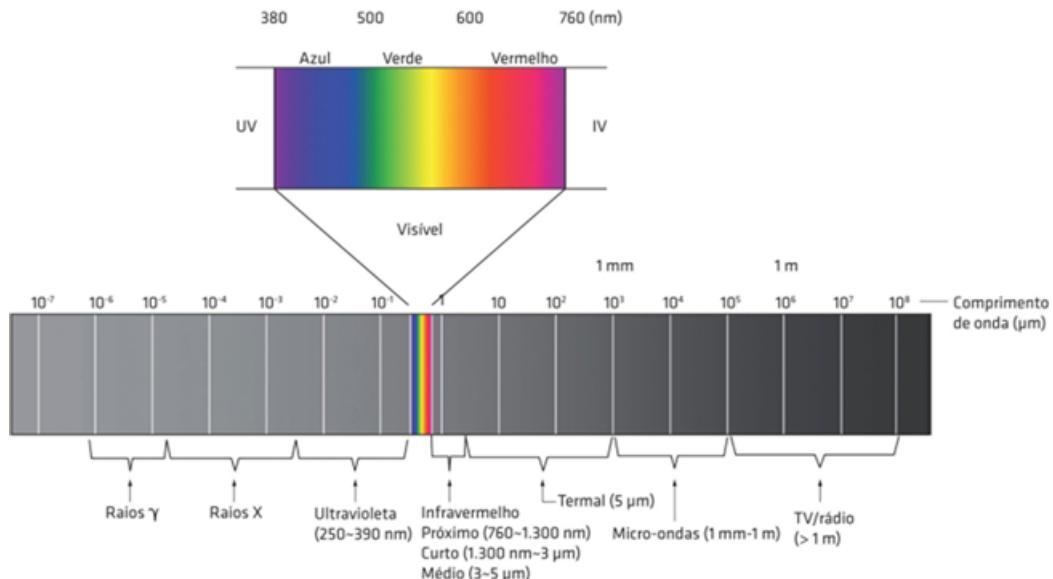


Figura 2.7: Divisão do espectro eletromagnético (MENESES; ALMEIDA, 2019).

A razão do fluxo radiante total refletido (L) pelo fluxo radiante incidente (E) em superfície de um dado alvo, corresponde à reflectância difusa (ρ) (Equação 2.1).

$$\rho \propto \frac{L}{E} \quad (2.1)$$

Tais valores de reflectância, assumem emissões em diversos comprimentos de onda (Figura 2.8) inerentes a interações macroscópicas e microscópicas do material constituinte do alvo

com a radiação eletromagnética. Desse modo, sendo a reflectância consistem em um parâmetro essencial para a interpretação de imagens de sensores remotos e nos diferentes tipos de classes como rocha, vegetação, solo e água ([MENESES; ALMEIDA, 2019](#)).

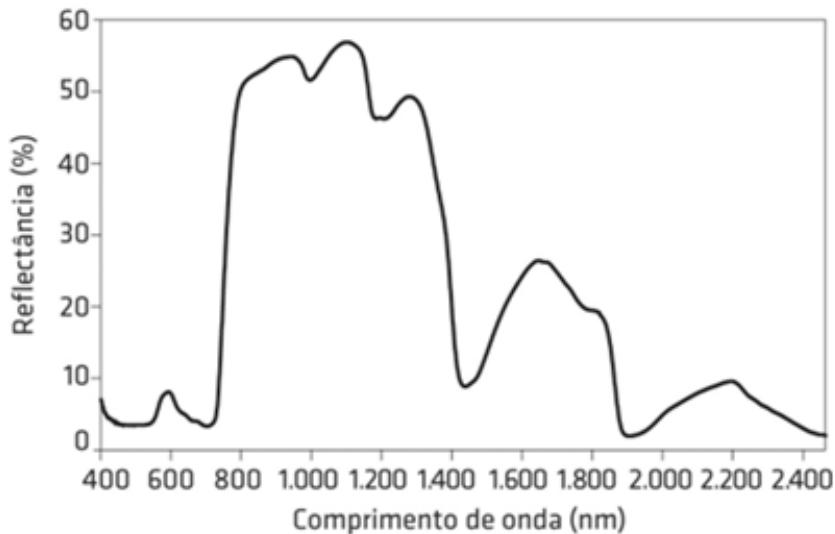


Figura 2.8: Curva espectral de reflectância (nm) da vegetação (Adaptado de Menezes e Almeida 2019).

Na prática, os sensores possuem uma faixa de sensibilidade de operação correspondendo uma banda de atuação espectral. Com efeito, o satélite Landsat 8 possui um Sensor Multiespectral OLI (*Operational Land Imager*) com as seguintes características de bandas multiespectrais: 435-451 nm (Costeiro/Aerosol), 452-512 nm (*Blue*), 533-590nm (*Green*), 636-673 nm (*Red*), 851-879 nm (*NIR-Near Infrared Reflectance*), 1566-1651 nm (*SWIR1 - Short Wave Infrared Reflectance*), 2107-2294 nm (*SWIR2-Short Wave Infrared Reflectance*), 1363-1384 nm Cirrus - relativo a nuvens do tipo Cirros) todos eles com uma resolução espacial de 30 metros ($30m^2$) ([NASA, 2025](#)), uma comparação do espectro de um alvo sendo uma folha verde (obtido em laboratório - praticamente contínuo) pode ser vista em comparação com os valores da referidas bandas do sensor OLI (Figura 2.9).

Utilizando-se das bandas espectrais do Red e do NIR o *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI, ou, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada pode ser calculado, segundo a Equação 2.2. Esse índice permite avaliar a densidade e a atividade fotossintética da vegetação ([SANO et al., 2019](#)).

Por meio da fotossíntese as plantas obtêm sua energia. A partir da luz quando atinge os cloroplastos - organela presente nas folhas e que contém um pigmento verde conhecido como clorofila. Durante a fotossíntese, a luz é absorvida em alguns comprimentos de onda do visível e cujas intensidades dependem da quantidade e da qualidade do pigmento fotossintético ([SANO et al., 2019](#)).

Por exemplo, valores elevados de NDVI, Equação 2.2, indicam vegetação densa e saudável,

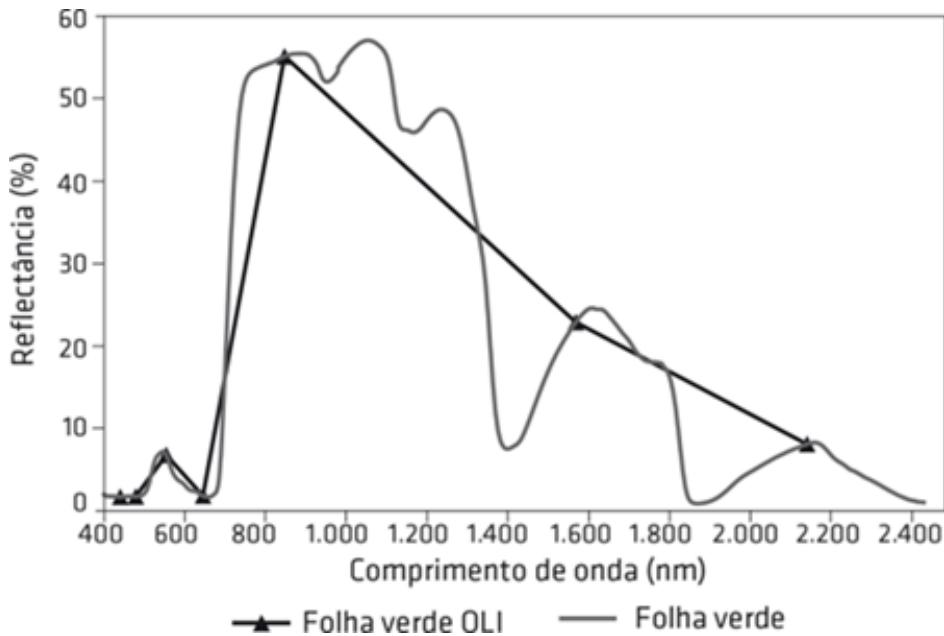


Figura 2.9: Comparação do espectro da folha verde de uma vegetação com os espectros reamorteados para o sensor multiespectral OLI, com 7 bandas (Menezes e Almeida 2019).

enquanto valores baixos podem sinalizar áreas com menor cobertura vegetal ou vegetação estressada. Porém, há limitações desses índices, como a sensibilidade às condições do solo e a saturação em dosséis muito densos. Assim, o que ressalta a necessidade de ajustes e desenvolvimento de novos índices para aprimorar as análises (SANO et al., 2019).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2.2)$$

onde:

- NIR é a reflectância no infravermelho próximo,
- Red é a reflectância na banda do vermelho.

Já com o *Enhanced Vegetation Index*- EVI, ou Índice Vegetação Melhorado permite avaliar a densidade e a saúde da vegetação com melhor aplicação para melhor avaliar os dosséis, e seu valor pode ser calculado, seguindo a Equação 2.3.

$$EVI = G \times \frac{NIR - Red}{NIR + C_1 \times Red - C_2 \times Blue + L} \quad (2.3)$$

onde:

- G é o fator de ganho (geralmente 2.5),
- C_1 e C_2 são coeficientes ajustáveis para correção atmosférica (tipicamente 6 e 7.5, respectivamente),
- L é um fator de ajuste para solo (geralmente 1),
- $Blue$ é a reflectância na banda do azul.

De modo semelhante, as informações do satélite Landsat 8, quanto aos valores de faixa correspondentes de cada banda espectral, sua descrição e habituais usos ([NASA, 2025](#)) podem ser vistas em formato de tabela, (Tabela 2.2):

Banda	Faixa (μ m)	Descrição e Usos Habituais
1	0.435 - 0.451	Azul profundo - Estudos de cor da água e aerossóis
2	0.452 - 0.512	Azul - Análise de corpos d'água e vegetação costeira
3	0.533 - 0.590	Verde - Análise da vegetação e saúde das plantas
4	0.636 - 0.673	Vermelho - Diferenciação entre vegetação e solo
5	0.851 - 0.879	Infravermelho Próximo (NIR) - Análise de biomassa/cobertura
6	1.566 - 1.651	SWIR 1 - Análise de umidade do solo e vegetação
7	2.107 - 2.294	SWIR 2 - Detecção de queimadas, geologia e umidade
8	0.503 - 0.676	Pancromática - Imagens de alta resolução
9	1.363 - 1.384	Cirrus - Identificação de nuvens cirros
10	10.60 - 11.19	TIRS 1 - Temperatura da superfície terrestre
11	11.50 - 12.51	TIRS 2 - Análise térmico e ambientais

Tabela 2.2: Bandas espetrais do sensor OLI/TIRS do Landsat 8 e suas aplicações. (Adaptado [NASA \(2025\)](#))

Por outro lado, a Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* -ESA), também possui suas missões satelitais com características diferentes às da Landsat e que possuem um “olhar” mais detalhado como a do Sentinel 2 - ambas úteis para diferentes análises. As imagens do sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) do satélite Sentinel 2 apresentaram precisões espetrais compatíveis com o LandSat 8 ([MELO; SCHMIDT; GONÇALVES, 2020](#)). Também, possuem melhor resolução espacial ($10m^2$). No entanto, ao analisar todas as bandas do espectro visível e infravermelho próximo, foi verificado que as imagens LandSat 8 têm maior capacidade de diferenciação de elementos suspensos na água ([MELO; SCHMIDT; GONÇALVES, 2020](#)). Desse modo, as características dos sensores devem ser observadas, bem como as suas efetivas utilizações em lagos, rios, reservatórios entre outros corpos d’água, para a obtenção dos melhores resultados.

De forma semelhante, a ESA apresenta uma classificação de LULC Global, onde corpos hídricos são classificados com uma resolução de $10m^2$ ([ZANAGA et al., 2022](#)). Por conseguinte, toda a Terra pode ser explorada por meio de uma legenda correspondentes às superfícies imageadas ([ESA, 2025](#)), sendo elas: Cobertura de árvores, Arbustos, Pastagens, Terras de cultivo, Construída, Vegetação nua/esparsa, Neve e gelo, Corpos d’água

permanentes, Área úmida herbácea, Manguezais, Musgos e líquens. Essa classificação emprega diferentes algoritmos no processamento de imagens de satélites para estudos em SH.

Com imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos e da reflexão espelhante (quando o ângulo de reflexão é o mesmo que o de incidência dos raios solares) é possível de calcular o Índice Normalizado de Clorofila-a (*Normalized Difference Chlorophyll-a Index - NDCI*) ([MISHRA; MISHRA, 2012](#)). O NDCI foi usado para criar uma metodologia de estimar a concentração de Chl-a e o Índice de Estado Trófico (TSI, do inglês, Trophic State Index) por meio de algoritmos calibrados. Esses algoritmos são implementados no *Algae Bloom Monitoring Application* (AlgaeMAP) ([LOBO et al., 2021](#)) - primeira plataforma online baseada em GEE com alta resolução espacial de parâmetros de qualidade da água ([HASAN et al., 2024](#)).

2.1.4 Trofia em Lagos

A trofia de um lago é definida pela quantidade de matéria orgânica e nutrientes disponíveis no ecossistema aquático, influenciando diretamente sua produtividade primária. Segundo [Esteves \(1998\)](#), os lagos podem ser classificados em três principais categorias tróficas: oligotróficos, que apresentam baixa concentração de nutrientes e alta transparência da água; mesotróficos, caracterizados por níveis intermediários de nutrientes e biomassa; e eutróficos, onde há grande disponibilidade de nutrientes, levando a uma elevada produção primária. A presença excessiva de fósforo e nitrogênio nos sistemas aquáticos, pode resultar em florações de algas potencialmente tóxicas e redução do oxigênio dissolvido, comprometendo a biodiversidade e a qualidade da água. Devendo a classificação trófica de um ecossistema aquático basear-se no maior número possível de características ([ESTEVES, 1998](#)) e salienta a latitude nos estudos da eutrofização e por conseguinte, na análise sobre a qualidade de água ([THOMAZ; ESTEVES, 2011](#)).

O processo de eutrofização pode ocorrer naturalmente ao longo de milhares de anos, mas é frequentemente acelerado pela ação antrópica, como o lançamento de efluentes urbanos e atividades agrícolas ricos em nutrientes. Esse fenômeno é uma preocupação central na segurança hídrica, pois impacta no fornecimento de água para estações de tratamento que irão atender aos habitantes de cidades inteiras, dessedentação de animais e piscicultura. O monitoramento contínuo do estado trófico dos lagos permite avaliar a dinâmica dos nutrientes e identificar medidas para a mitigação da eutrofização, como o controle da carga de nutrientes e a restauração ecológica de ambientes aquáticos degradados([ESTEVES, 1998](#)).

O índice de Estado Trófico (*IET*) tem por finalidade classificar corpos d'água em diferen-

tes graus de trofia, ou melhor ainda, avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes. O *IET* foi proposto por [Carlson \(1977\)](#) ao tabular a variação trófica da água a partir de sua transparência (disco de Secchi) (m), a clorofila a (mg/m^3) e o fósforo total (mg/m^3) sendo esses dois últimos parâmetros resultados de análises laboratoriais. O *IET* varia entre 0 e 100 e possui a seguinte classificação:

- Ultra-oligotrófico, menor que 20;
- Oligotrófico, entre 21 e 40;
- Mesotrófico, entre 41 e 50;
- Eutrófico, entre 51 e 60;
- Hipereutrófico, maior que 61 .

As fórmulas para os cálculos dos parâmetros de Carlson (Equações [2.4](#), [2.5](#) e [2.6](#)) para estimar transparência (disco de Secchi), clorofila a e fósforo total respectivamente

$$IET_{SD} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{\ln SD}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$IET_{Chl-a} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,68 \ln Chl - a}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$IET_{PT} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{48}{TP}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.6)$$

onde:

- IET_{SD} é Índice de Estado Trófico da transparência da água;
- IET_{Chl-a} é Índice de Estado Trófico da clorofila- a ;
- IET_{PT} é Índice de Estado Trófico do fósforo total;
- SD é a transparência da água medida com o Disco de Secchi (m);
- $Chl - a$ é a concentração de clorofila- a (mg/m^3);
- PT é a concentração de fósforo total (mg/m^3);
- \ln representa o logaritmo natural.

Os valores de *IET*, produzidos por Carlson, ganham maior resolução de classificação ao incluir o parâmetro Nitrogênio Total a partir de uma nova classificação feita por [Kratzer e Brezonik \(1981\)](#). No entanto, para ambos o *IET* podem variar entre 0 e 100, segundo os valores de seus parâmetros. No entanto, vale-se ressaltar que [Carlson \(1977\)](#) emprega três parâmetros (transparência, clorofila-*a* e fósforo total), enquanto que [Kratzer e Brezonik \(1981\)](#) além destes parâmetros de Carlson adicionou o Nitrogênio Total, conforme ilustrado na Tabela 2.3:

Classe	IET	Secchi(<i>m</i>)	Fósforo($\mu\text{g}/\text{L}$)	Clorofila- <i>a</i> ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Nitrogênio(mg/L)
Ultraoligotrófico	0	64	0.75	0.04	0.02
Ultraoligotrófico	10	32	1.5	0.12	0.05
Ultraoligotrófico	20	16	3	0.34	0.09
Oligotrófico	30	8	6	0.94	0.18
Oligotrófico	40	4	12	2.6	0.37
Mesotrófico	45	2.8	17	5	0.52
Mesotrófico	50	2	24	7.3	0.74
Eutrófico	53	1.6	30	10	0.92
Eutrófico	60	1	48	20	1.47
Hipereutrófico	70	0.5	96	56	2.94
Hipereutrófico	80	0.25	192	154	5.89
Hipereutrófico	90	0.12	384	427	11.7
Hipereutrófico	100	0.062	768	1183	23.6

Tabela 2.3: Estados Tróficos propostos por [Kratzer e Brezonik \(1981\)](#).

[Toledo et al. \(1983\)](#) propôs modificações no *IET* de Carlson para melhor representar o contexto de lagos e reservatórios brasileiros. Considerando fatores de sazonalidade e diferentes fontes de nutrientes, destacando a relação de fósforo e da clorofila *a* como indicador confiável da disponibilidade de nutrientes e da produção primária - sendo essa o aumento da matéria orgânica acrescida pela fotossíntese ou quimiossíntese em um dado intervalo de tempo ([ESTEVES, 1998](#)).

[Lamparelli \(2004\)](#) fala da necessidade em adaptar os valores limites de qualidade de água para os nutrientes e clorofila *a*, bem como as equações de correlação entre os parâmetros que servem de base para o *IET* em regiões temperadas, onde o metabolismo dos ecossistemas aquáticos diferem dos encontrados em ambiente tropical. Desse modo, correspondendo como elemento motivador para outras adaptações do *IET*, a exemplo de [Toledo et al. \(1983\)](#), no contexto brasileiro.

Assim como [Toledo et al. \(1983\)](#), [Lamparelli \(2004\)](#) propõe novos valores para regiões tropicais ao estimar o *IET* para reservatórios e lagos, utilizando os mesmos parâmetros de [Carlson \(1977\)](#) e [Toledo et al. \(1983\)](#) cujas fórmulas estão detalhadas nas Equações 2.7, 2.8 e 2.9.

$$IET_{SD} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{\ln SD}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.7)$$

$$IET_{Chl-a} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{0,92 - 0,34 \ln Chl - a}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.8)$$

$$IET_{PT} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{1,77 - 0,42 \ln PT}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.9)$$

onde:

- IET_{SD} é Índice de Estado Trófico da transparência da água;
- IET_{Chl-a} é Índice de Estado Trófico da clorofila- a ;
- IET_{PT} é Índice de Estado Trófico do fósforo total;
- SD é a transparência da água medida com o Disco de Secchi (m);
- $Chl - a$ é a concentração de clorofila- a ($\mu g/L$);
- PT é a concentração de fósforo total ($\mu g/L$);
- \ln representa o logaritmo natural.

Já o Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA, órgão oficial do estado da Bahia para assuntos relativos à temática de recursos hídricos, adota como metodologia (INEMA, 2017) para estimar o IET a adaptação proposta por Lamparelli (2004) cujo valor do IET representa a média aritmética simples dos índices relativos ao fósforo total e a clorofila- a , segundo a Equação 2.10:

$$IET = \frac{(IET_{PT} + IET_{Chl-a})}{2} \quad (2.10)$$

Desse modo, as $IETs$ aqui citadas, denotam adaptações e aprimoramentos para melhor representarem o Estado Trófico, a partir de métodos empíricos. Uma comparação dos valores propostos por estas classificações de Carlson (1977), Kratzer e Brezonik (1981), Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004) podem ser vistas por meio dos gráficos nas Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13. A partir dos comportamentos exponenciais das linhas dessas figuras podem ser depreendidos que, para reservatórios com transparência profunda estão diretamente relacionados com IETs: Ultra-oligotróficos e Oligotróficos. Já o oposto não

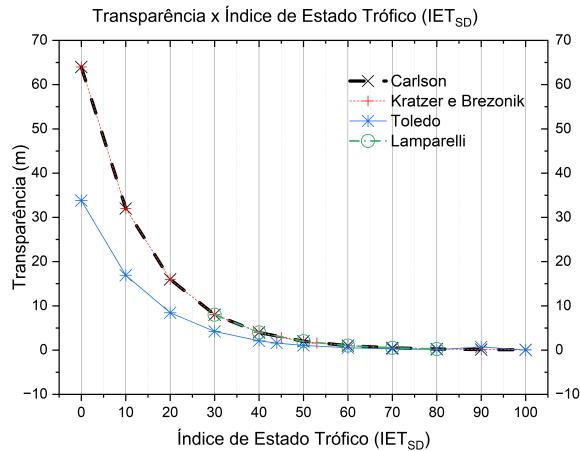


Figura 2.10: Comparativo IET_{SD} entre Carlson (1977), Kratzer e Brezonik (1981), Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004). Fonte: Autor (2025).

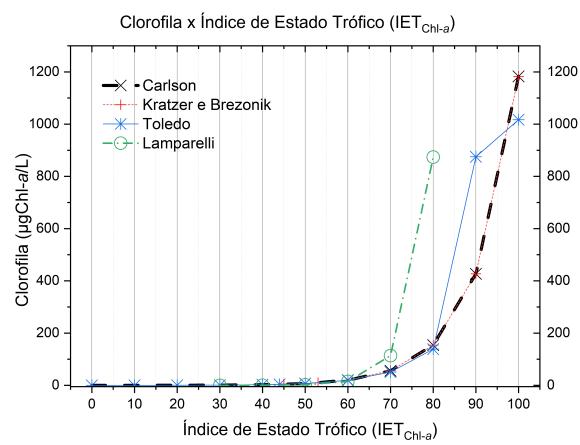


Figura 2.11: Comparativo IET_{Chl-a} entre Carlson (1977), Kratzer e Brezonik (1981), Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004). Fonte: Autor (2025).

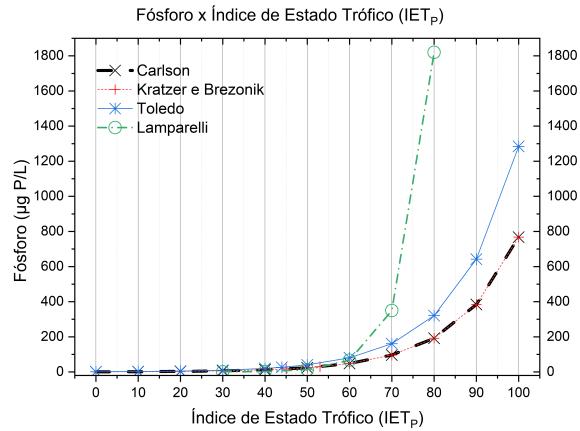


Figura 2.12: Comparativo IET_P entre Carlson (1977), Kratzer e Brezonik (1981), Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004). Fonte: Autor (2025).

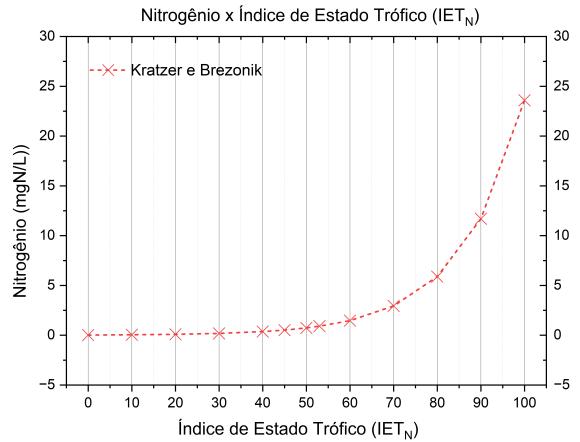


Figura 2.13: Curva de IET_N Kratzer e Brezonik (1981). Fonte: Autor (2025).

podendo ser dito, como para águas que não tenham transparência serem classificadas como eutrofizadas.

A classificação de trofia é monitorada pela INEMA, já a Empresa Baiana de Águas e Saneamento - EMBASA que trata e distribui a água do lago faz monitoramento da água para o controle e qualidade da água no manancial de Pedra do Cavalo seguindo a recomendação exigida pela Portaria GM/MS nº 888/2021 que estabelece os critérios e diretrizes para a elaboração dos Planos de Amostragem de Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano, tanto por parte dos prestadores de serviço de abastecimento de água quanto pelos órgãos de vigilância sanitária. Este documento detalha que o plano deve ser representativo de toda a água distribuída à população, considerando a abrangência geográfica do sistema, as características das fontes de abastecimento e os riscos associados. As amostras devem ser coletadas em pontos estratégicos da rede de distribuição, reservatórios e

pontos de consumo, buscando garantir a avaliação real da qualidade da água que chega à população (Brasil. Ministério da Saúde, 2021).

Tais exigências legais pelo Ministério da Saúde prevê que os planos devem contemplar o monitoramento dos grupos de parâmetros definidos na própria portaria, incluindo parâmetros de controle operacional (como cloro residual livre, turbidez e pH), parâmetros de qualidade da água em relação à potabilidade (como microbiológicos - especialmente *Escherichia coli* e coliformes totais, além de parâmetros físico-químicos essenciais), além dos parâmetros relacionados à radioatividade e a compostos orgânicos específicos quando aplicáveis. A frequência de amostragem é definida conforme o porte do sistema e o volume de água distribuído, sendo maior em sistemas que atendem populações maiores. O capítulo enfatiza que é responsabilidade do prestador garantir que esses planos estejam formalmente elaborados, atualizados e disponíveis para consulta pela Agência de Vigilância Sanitária - ANVISA. Dessa forma, assegura-se que a água para consumo humano esteja sob permanente controle e que eventuais riscos à saúde sejam prontamente identificados e mitigados (Brasil. Ministério da Saúde, 2021).

2.1.5 Macrófitas

As macrófitas aquáticas, do ponto de vista ecológico, são organismos fotossintéticos visíveis a olho nu que habitam os ecossistemas aquáticos, sendo as espécies plantas aquáticas vasculares. Esse conceito ultrapassa a definição, puramente, botânica e considera organismo autotrófico ou parcialmente autotrófico fixo ou flutuante, observáveis a simples vista que desenvolva biomassa substancial nos ambientes que vão desde brejos a verdadeiramente aquáticos, cujas partes vegetativas crescem tanto permanente como periodicamente (DENNY, 1985; ESTEVES, 1998; CHAMBERS et al., 2008; THOMAZ; ESTEVES, 2011). Neste contexto ecológico, macrófitas são fundamentais para a estruturação e funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Elas contribuem para a heterogeneidade do habitat, oferecem abrigo, local de reprodução e alimentação para uma ampla gama de organismos aquáticos, como peixes, zooplâncton e macroinvertebrados (THOMAZ; ESTEVES, 2011; JUNK; PIEDADE et al., 1997). Assim, essa denominação genérica, independente de aspectos taxonômicos, em uma definição mais ampla, pode considerar até mesmo algas filamentosas aderidas formando extensos tapetes (p. ex. Cyanobactérias) incluídas como macrófitas (PEDRALLI, 2003).

Macrófitas são excelentes bioindicadoras da qualidade da água, pois respondem de forma sensível e relativamente previsível às variações nos parâmetros físicos, químicos e biológicos do ambiente (DENNY, 1985; PEDRALLI, 2003; THOMAZ; ESTEVES, 2011). Espécies de rápido crescimento, que tendem a proliferar em ambientes eutrofizados, ricos em nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, bem como as características climáticas e fisico-

químicas dos corpos d'água, geografia física de uma área, seu aspecto a sotavento ou barlavento, sedimentos e ondulações dos leitos de lagos podem afetar essa vegetação direta ou indiretamente por meio da ação das ondas e da turbulência da água. A profundidade da água limita a colonização e é um importante regulador na zonalização das espécies (DENNY, 1985). A assembleia de macrófitas flutuantes possui relação direta com concentração de nutrientes na água, que podem estar relacionados a pulsos de inundação e no sedimento, enquanto a penetração de luz é forte preditor da ocorrência de espécies submersas (CAMARGO; ESTEVES, 1996; BINI et al., 1999).

De acordo com Pedralli (2003), a composição das comunidades de macrófitas reflete diretamente as condições ambientais. A presença e abundância deste organismo que realiza fotossíntese está fortemente relacionadas ao nível trófico dos corpos de água (THOMAZ; ESTEVES, 2011; WETZEL, 2001) Em ambientes oligotróficos predominam espécies submersas que dependem da alta transparência da água para realizar fotossíntese. Por outro lado, em ambientes eutróficos e hipereutróficos, há dominância de macrófitas flutuantes livres, como *Pontederia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes*, que aproveitam a elevada disponibilidade de nutrientes na coluna de água. As macrófitas acumulam em seus tecidos e em seus biofilmes perifíticos compostos que podem ser analisados para inferir sobre poluentes, nutrientes e processos de eutrofização (CARPENTER; LODGE, 1986). Detritos de macrófitas contribuem com até 50% do carbono disponível para a síntese de substâncias húmicas em ecossistemas aquáticos, que influenciam o suprimento de carbono para muitos processos ecológicos existentes neste corpos aquáticos lênticos (BOTTINO et al., 2021).

A presença de macrófitas é um situação comum em lagos urbanos, reservatórios de usinas hidrelétricas e até mesmo em sistemas de tratamento de água, onde a carga de nutrientes, principalmente fósforo, é elevada, o que pode vir a impedir os múltiplos usos da água (MOURA; FRANCO; MATALLO, 2009). Além de indicadoras, as macrófitas também são agentes moduladores da trofa. Elas competem com o fitoplâncton por nutrientes, promovem a sedimentação de partículas e influenciam a transparência da água (SCHEFFER, 1998). No entanto, o crescimento excessivo pode gerar impactos negativos, como obstrução de canais, dificultar o fluxo de água e interferir nas operações de reservatórios, estações de tratamento e de usinas hidroelétricas (MOURA; FRANCO; MATALLO, 2009).

O monitoramento dos bancos de macrófitas é essencial, sobretudo em ambientes sob influência antrópica, como reservatórios e estações de tratamento de água. A avaliação da biomassa, composição específica e cobertura espacial dessas plantas permite não apenas inferir sobre a qualidade da água, mas também subsidiar o manejo, o controle de espécies invasoras e a manutenção dos serviços ecossistêmicos dos corpos hídricos (PEDRALLI, 2003; SRIVASTAVA; GUPTA; CHANDRA, 2008; THOMAZ; ESTEVES, 2011). Esse acompanhamento com imagens de sensoriamento remoto de assembleias de macrófitas em lagos e reservatórios tem buscando compreender a dispersão espacial de macrófitas e seus

ritmos naturais influenciados por flutuações climáticas e, como tal, seus efeitos na distribuição espacial (COLADELLO et al., 2020; COLADELLO et al., 2022; FAN et al., 2024). Desses estudos também decorrem melhores detecção de águas superficiais em lagos pois a composição heterogênea dessa vegetação que devem ser considerados no monitoramento de corpos d'água (ALVES; ZIMMERMANN; DÁVILA, 2024).

Em síntese, as macrófitas são elementos-chave tanto para o diagnóstico quanto para a gestão da qualidade ambiental de ecossistemas lênticos. Sua presença, distribuição e composição servem como indicadores sensíveis da trofia e das pressões ambientais, sendo indispensáveis no planejamento de ações para conservação e uso sustentável dos recursos para uma área de segurança hídrica

2.2 Metodologia

2.2.1 Séries temporais (ST)

2.2.1.1 Conceitos básicos

Uma série temporal é uma seqüência de observações ou medições obtidas no tempo (BOX; JENKINS, 1976). Para Morettin e Toloi (2004), este conjunto de observações são ordenados no tempo. A principal característica é estudar a dependência entre observações vizinhas (EHLERS, 2007). Uma aplicação para as investigações com STs é a elaboração de teoria que permitem predizer a evolução futura a partir de uma ou poucas realizações (ANTENEODO, 2004). Isso constitui uma ferramenta estatística para uso em diversas áreas do conhecimento humano, como exemplo a Biofísica (GALHARDO, 2010), Astrofísica (FALCÃO, 2012).

Como exemplos de séries temporais temos:

- (i) Consumo de água do Mensal da cidade de Feira de Santana ao longo do ano;
- (ii) Valores diário de temperatura da cidade de Feira de Santana;
- (iii) Número Médio Mensal de Manchas Solares, Jan/1749 a Mai/2014, (Figura 2.14);

Para Ehlers (2007), a ST é uma coleção de observações feitas ao longo do tempo. A ordem dos elementos dessa coleção é crucial para sua análise. A ST contínua é definida como o conjunto $T = X_t : t_1 < t < t_2$. Já ela é dita discreta quando suas observações são feitas

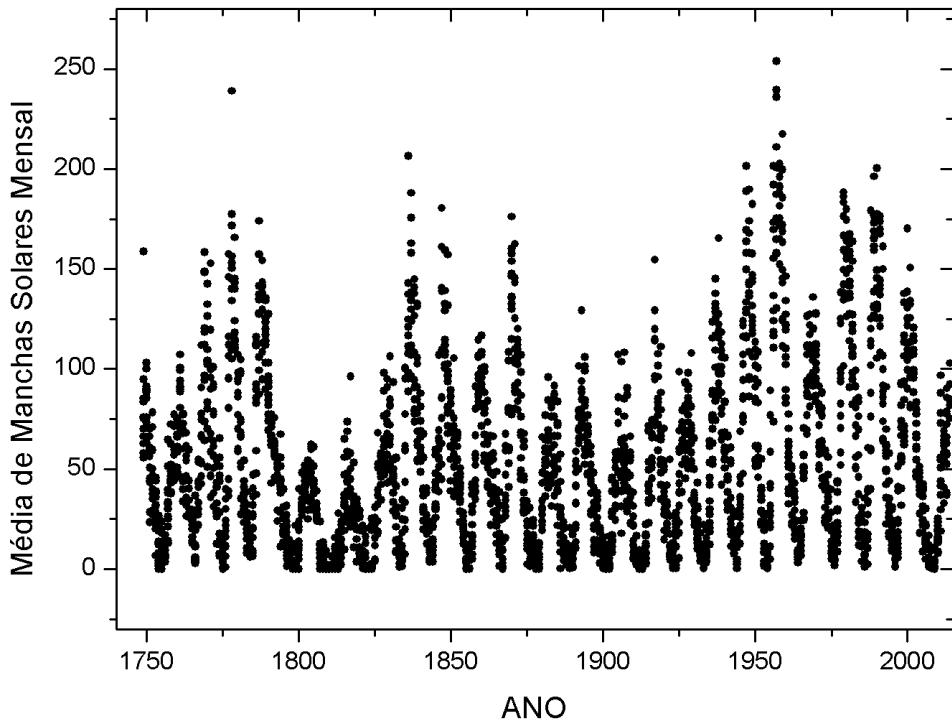


Figura 2.14: Número Médio Mensal de Manchas Solares, Jan/1749 a Mai/2014. Fonte: SunSpot (NASA).

em tempos específicos e denotada por $T = X_t : t \in T$. E ainda, séries contínuas podem ser discretizadas, ou seja, seus valores são registrados a certos intervalos de tempo e a variável tempo também pode ser substituída por espaço, profundidade, etc. ([EHLERS, 2007](#)).

2.2.1.2 Características e propriedades de Séries Temporais

Caso uma função matemática seja utilizada para estabelecer exatamente seus valores futuros na série temporal, ela recebe a denominação de Determinística. A ST pode ser vista como uma realização de um processo estocástico ([ANTENEODO, 2004](#)), ou seja, uma coleção infinita de variáveis aleatórias (que evoluem ao acaso) no tempo - tomado como parâmetro. Na Figura 2.15 pode-se perceber que para cada $t \in T$ tem uma variável aleatória (VA). $Z(t, \omega)$ como uma distribuição de probabilidade, assim, neste sentido, é possível que a função densidade de probabilidade $f_z(Z)$ no instante t_1 seja distinta da $f_z(Z)$ no instante t_2 . Desta forma, para cada $\omega \in \Omega$ obtemos uma função de t , isto é, uma trajetória do processo, ou uma série temporal.

Assim, o conjunto de todas as trajetórias é chamado de *ensemble* e definimos por $Z(t, \omega)$ onde $Z^1(t), Z^2(t), Z^3(t) \dots Z^n(t)$ são as trajetórias (realizações) do processo. Cada

realização $Z^j(t)$ é uma função do tempo t não aleatória e para cada t fixo, $Z^j(t)$ é um número real. ([MORETTIN; TOLOI, 2004](#)).

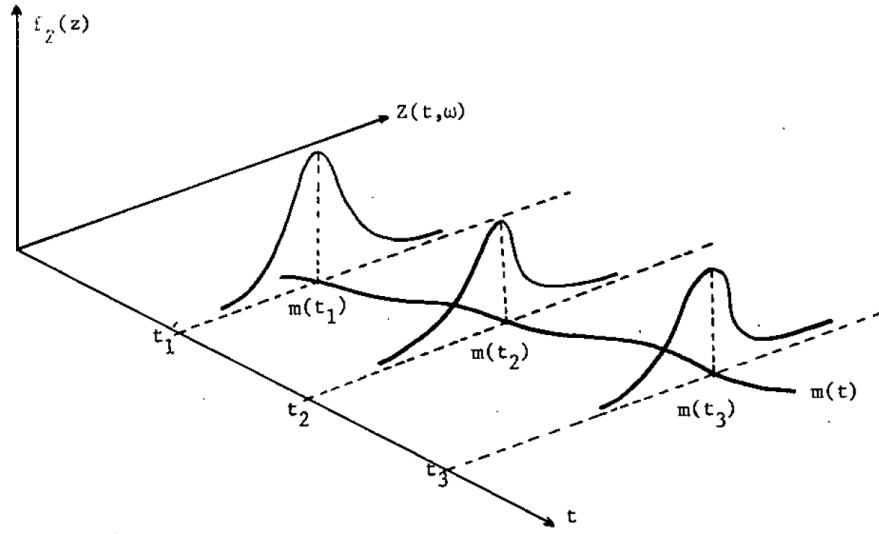


Figura 2.15: Processo estocástico interpretado como uma família de variáveis aleatórias. Fonte: ([MORETTIN; TOLOI, 2004](#)).

2.2.1.3 Estacionariedade em séries temporais

A série temporal é dita estacionária se não existe uma mudança sistemática na média (tendência) e na variância e, se as variações cíclicas forem removidas. A maior parte da teoria de séries temporais trata-se de séries estacionárias, a Figura 2.16 ilustra essa forma de não estacionariedade, por esta razão, a análise é feita transformando séries não estacionárias em estacionárias para aplicar a teoria ([CHATFIELD; XING, 2019](#)), e, geralmente, as séries são apresentadas na forma não estacionária ([MORETTIN; TOLOI, 2004](#)). A exemplo, pode-se citar algumas séries não estacionárias que apresentam tendência, como as séries financeiras e econômicas, onde a série flutua ao redor de uma reta, com inclinação positiva ou negativa (tendência linear). Uma outra forma encontrada de série não estacionária é a explosiva, como o crescimento de uma colônia de bactérias. Uma série temporal, poderá mudar de nível e/ou de inclinação durante sua trajetória, podendo ser estacionária por um período longo, mas também pode ser por períodos curtos ([FILHO, 2014](#)).

A maioria dos procedimentos da análise estatística de séries temporais supõe que estas sejam estacionárias, sendo necessário transformar os dados originais prevendo sua estacionariedade. Esta transformação consiste em calcular as diferenças sucessivas da série original, até obter uma série estacionária. Assim, a primeira diferença de $Z(t)$ é definida pela Equação 2.11:

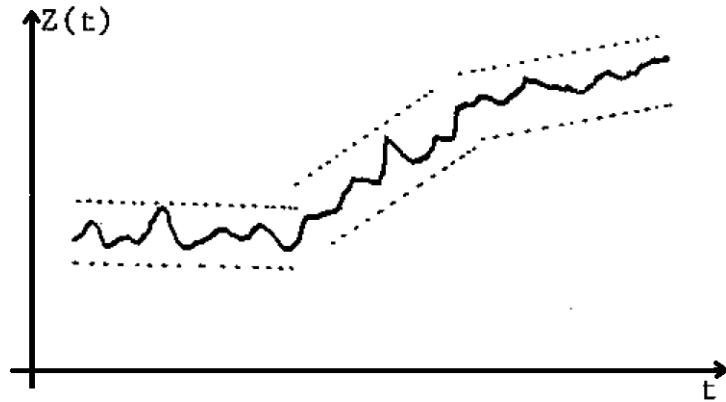


Figura 2.16: Série Temporal não estacionária quanto ao nível e inclinação. Fonte: ([MORETTIN; TOLOI, 2004](#)).

$$\Delta Z(t) = Z(t) - Z(t - 1) \quad (2.11)$$

a segunda diferença é expressa pela Equação 2.12:

$$\Delta^2 Z(t) = \Delta[\Delta Z(t)] = \Delta[Z(t) - Z(t - 1)] \quad (2.12)$$

ou seja,

$$\Delta^2 Z(t) = Z(t) - 2Z(t - 1) + Z(t - 2) \quad (2.13)$$

onde, a n -ésima diferença de $Z(t)$ é dada pela Equação 2.14.

$$\Delta^n Z(t) = \Delta[\Delta^{n-1} Z(t)] \quad (2.14)$$

Geralmente, é calculada uma ou duas diferenças para que a série torne-se estacionária.

Uma série temporal pode apresentar característica de estacionariedade em um período de tempo longo ou apenas períodos curtos, podendo apresentar alguma tendência (Figura 2.17). Na natureza, as variáveis, dificilmente, são estacionárias, por exemplo, séries que se desenvolvem de forma não estacionária explosiva, como o aumento de colônia de bactérias. Existem séries que oscilam ao redor de um nível médio durante algum tempo e em seguida saltam para outro nível, temporariamente, como é comum em séries da economia

(FERNANDEZ, 2014).

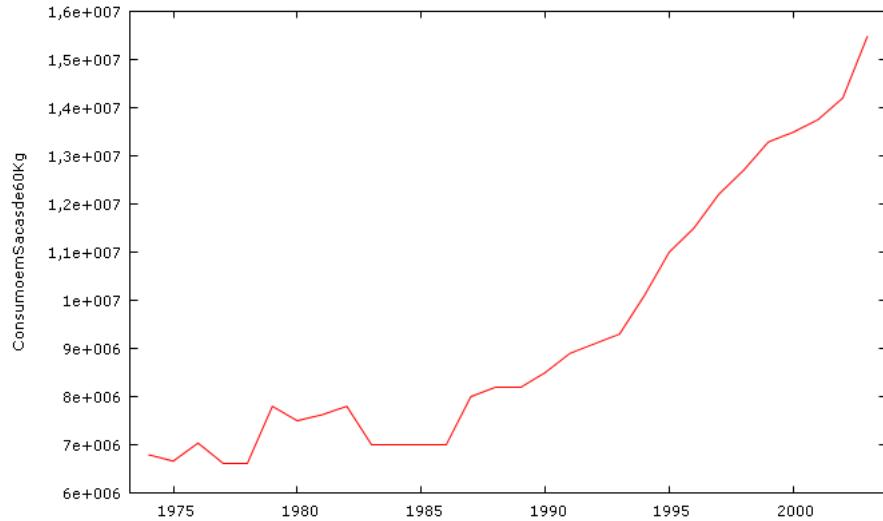


Figura 2.17: Exemplo de série não estacionária com tendência: o consumo em sacas de 60kg.

Uma das propriedades mais importantes para análise de ST é a determinação de sua persistência, também chamada de memória ou correlação interna da série. Um série é dita persistente, se os valores adjacentes estão correlacionados positivamente, ou melhor, se valores grandes tem a tendência de serem seguidos por valores grandes, válido também, para valores pequenos serem seguidos por valores pequenos. Já séries ditas como antipersistentes têm valores grandes seguidos por valores pequenos. Este estão correlacionados inversamente. Pode ocorrer o caso, também, em que as observações das series não têm persistência, por estarem descorrelacionadas ou sem memória, por exemplo do ruído branco (ANTENEODO, 2004).

Uma propriedade relevante em uma série temporal é a sua autocorrelação, que determina, se a série possui memória de longa duração ou não, isto é, se a ST é persistente, anti-persistente ou descorrelacionada. Considerando os incrementos $\Delta_{t_i} = t_i - t_{i-1}$ de uma série temporal auto afim, (t_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ com N valores equidistantes no tempo, neste caso, Δ_{t_i} pode ser persistente, descorrelacionado ou anti-persistente (KANTELHARDT, 2012).

2.2.1.4 Sazonalidade

Sazonalidade é caracterizada por padrões cílicos de flutuações que se repetem em intervalos relativamente constantes de tempo (MACHADO; SILVA; ZEBENDE, 2014). Portanto, podemos denominar sazonalidade como uma série temporal em que todos os eventos ocorrem em intervalos constantes e regulares. Desta forma, consideraremos uma série temporal como a adição de três componentes, isto é, $Z_t = T_t + S_t + a_t$ com $t = 1, 2, \dots, N$ onde T_t e

S_t representam a tendência e a sazonalidade, respectivamente e a_t componente aleatória, de média zero e variância constante σ_a^2 . O objetivo aqui é estimar S_t e construir uma série com uma sazonalidade ajustada, para isso, utilizamos \hat{S}_t como uma estimativa de S_t através da Equação 2.15 que é a série sazonalmente ajustada.

$$Z_t^{SA} = Z_t - \hat{S}_t \quad (2.15)$$

Quando estimamos a componente sazonal estamos cometendo erro de ajuste sazonal, dado pela Equação 2.16. Para esse ajuste em uma série temporal, é de suma importância minimizar $E(\delta_t^2)$ que é o erro de ajustamento sazonal.

$$\delta_t = S_t - \hat{S}_t \quad (2.16)$$

2.2.1.5 Função de Auto-correlação - FAC

A função de auto-correlação, definida pela Equação 2.17, é a covariância amostral da série na defasagem k , dividida pela variância amostral da série, em que N denota o tamanho da série e \bar{X} o valor médio das observações.

$$\sigma_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{X})(x_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^2} \quad (2.17)$$

A **FAC** tem como objetivo medir a auto-correlação entre as observações, defasadas por períodos de tempo k , medindo assim a interdependência existente entre elas. Devido ao fato de que tanto a covariância como a variância são mensuradas nas mesmas unidades de medida, σ_k , é um número adimensional com a seguinte variação: $-1 \leq \sigma_k \leq 1$.

Estas correlações devem ser calculadas com variações de $k = 1, 2, \dots, j$, em que j não deve exceder o valor $\frac{N}{4}$ (BOX; JENKINS, 1976). Desta forma, podemos representar $\sigma_k \times k$ graficamente através de um correlograma amostral, procedimento estatístico padrão muito utilizado para caracterizar uma série temporal. Tendo como método de análise a **FAC** em diferentes defasagens, podemos caracterizar uma série temporal como:

- Estacionária, se os valores de σ_k decrescem rapidamente para zero;
- Não estacionárias, se os valores de σ_k decrescem lentamente para zero;

- Periódica, quando a série apresenta característica sazonal de um dado período mudando de sinal;

Através da análise da função de auto-correlação podemos também identificar a memória da série, ou seja, analisar se a ST possui memória longa ou de curto alcance. Entretanto, se os valores σ_k decrescem rapidamente para zero, a série é caracterizada como de memória curta e sua dependência temporal permanece presente por um período curto ([MACHADO; SILVA; ZEBENDE, 2014](#)).

2.2.2 Coeficiente de Correlação de Pearson

Segundo ([MACHADO; SILVA; ZEBENDE, 2014](#)), é possível identificar e mensurar a relação entre duas ou mais variáveis e, em estatística, esse relacionamento é denominado de correlação cruzada. O diagrama de dispersão é uma ferramenta utilizada para análise das correlações cruzadas lineares, é a representação dos pares de valores em um sistema cartesiano, ver exemplo na Figura 2.18. As análises feitas empregando diagramas de dispersão tendem a conclusões subjetivas e devido a este fato, métodos mais robustos tornam-se necessários.

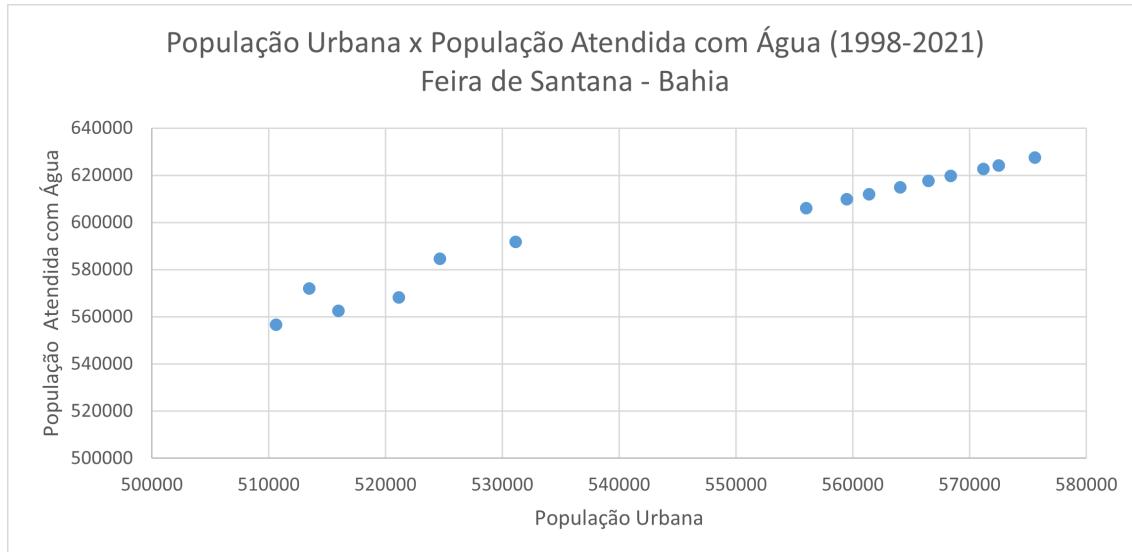


Figura 2.18: Diagrama de Dispersão População Urbana X População Atendida com Água. Fonte: ([MDR, 1996](#))

O coeficiente de correlação de Pearson determina o grau e a direção (se positiva ou negativa) da correlação entre duas variáveis ([PEARSON, 1895](#)). O coeficiente de Pearson, σ_{xy} , é a razão entre a covariância e a raiz quadrada do produto das variâncias. Tomando as variáveis como x e y é definido pela Equação 2.18:

$$\sigma_{xy} = \frac{Cov(x, y)}{\sqrt{Var(x)} \cdot \sqrt{Var(y)}} \quad (2.18)$$

a covariância entre x e y é definida pela Equação 2.19:

$$Cov(x, y) = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y}) \quad (2.19)$$

e a variância de x e de y são definidas, respectivamente, pelas Equações 2.20 e 2.21:

$$Var(x) = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.20)$$

$$Var(y) = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.21)$$

onde as Equações 2.22 e 2.23 são as médias, respectivamente, de x e de y :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.22)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.23)$$

O Coeficiente de Pearson tem como propriedade:

- Pode assumir valores entre $-1 \leq \sigma_{xy} \leq 1$ - campo de variação (Pearson);
- Caso sejam permutarmos os valores de x e de y , o valor de σ_{xy} permanecerá inalterado.

O coeficiente de correlação de Pearson possui um valor numérico e seu sinal (+ ou -). A classificação da correlação cruzada proposta por Pearson da seguinte forma (Tabela 2.4):

Correlação linear	Valor de σ_{xy}
positiva	entre 0 e 1
perfeita	igual a 1
negativa	entre -1 e 0
negativa perfeita	igual -1
nula	não ha correlação linear entre as variáveis x e y

Tabela 2.4: Classificação proposta por [Pearson \(1895\)](#).

2.3 Análise *R/S* de Hurst

Em 1965, Harold E. Hurst publicou um trabalho baseado em estudo experimental sobre armazenamento de água. Ele desenvolveu para a época um novo método estatístico - análise de intervalo reescalonado (Análise *R/S*), com o objetivo de calcular o tamanho de um reservatório ideal (que nem fique vazio e nem transborde) de acordo com dados de vazão de entrada e saída. Após análise sobre décadas de medições do Lago Albert - região Oeste de Uganda (África), ele pode inferir e estabelecer relações que mostravam claramente que o intervalo entre o nível mínimo e máximo de um reservatório não dependia de um período τ já que este intervalo aumentava com o aumento do intervalo de tempo τ .

O modelo de reservatório, (Figura 2.19), tem como base séries temporais obtidas de influxos de água do Rio Nilo e o acúmulo de água médio deixado no reservatório, ao longo do tempo (Figura 2.20). Hurst baseava-se na medição dos volumes máximos e mínimos obtidos deste reservatório(amplitude) e no cálculo do desvio padrão dos fluxos de água dado um intervalo de tempo τ , com o algoritmo dado a seguir:

- 1) Calcula-se a média $\langle \xi \rangle_\tau$ da vazão de água de entrada no período τ :

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (2.24)$$

onde $\xi(t)$ é a vazão de água de entrada ao reservatório no instante t de tempo.

- 2) Calcula-se a amplitude $X(t, \tau)$ de água do reservatório a partir do valor acumulado do fluxo de entrada de água subtraídos do valor médio de saída de água no período τ , ou seja, o que ficou é tudo que entrou de água menos tudo que saiu (na média) durante o período:

$$X(t, \tau) = \sum_{v=1}^t [\xi(v) - \langle \xi \rangle_\tau], \quad (2.25)$$

em que $\langle \xi \rangle_\tau$ denota a média de todos os pontos da série no período em estudo.

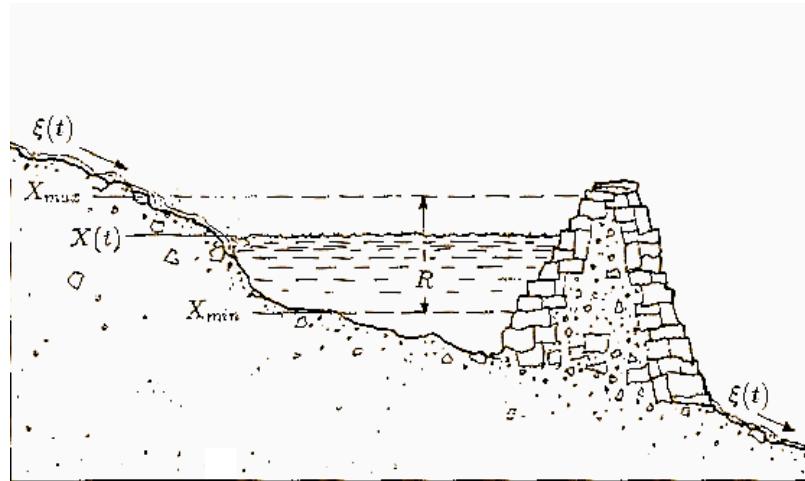


Figura 2.19: Modelo do reservatório de Hurst (1951) cálculo de $R(\tau)$. Fonte:[Feder \(1988\)](#).

- 3) Calcula-se o intervalo entre o valor máximo e o mínimo de $X(t)$ no período τ : (Figura 2.19):

$$R(\tau) = \text{Max}[X(t, \tau)] - \text{Min}[X(t, \tau)] \quad (2.26)$$

em que $1 \leq t \leq \tau$

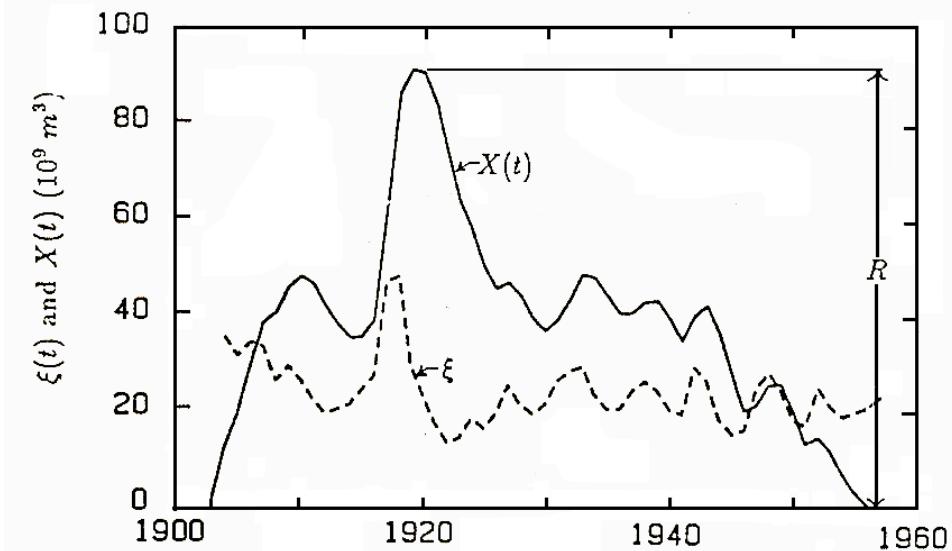


Figura 2.20: Descarga Anual do Lago Albert (linha tracejada), e acúmulo deixado no reservatório por descargas médias (linha cheia). Fonte:[Feder \(1988\)](#).

4) Para obter o valor da relação no tempo τ . Divide-se $R(\tau)$ pelo desvio padrão $S(\tau)$,

$$R/S = \frac{R(\tau)}{S(\tau)} \quad (2.27)$$

onde,

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2} \quad (2.28)$$

Para uma quantidade de diferentes valores de tempos τ de observação, ao longo do estudo, os resultados destes cálculos (passos de 1 a 4) seguem uma lei de potência denotada por $R/S = (\tau/2)^H$, onde H é chamado expoente de Hurst. A letra H para fazer referência ao expoente de Hurst foi uma homenagem de Benoît Mandelbrot, (Figura 2.21)

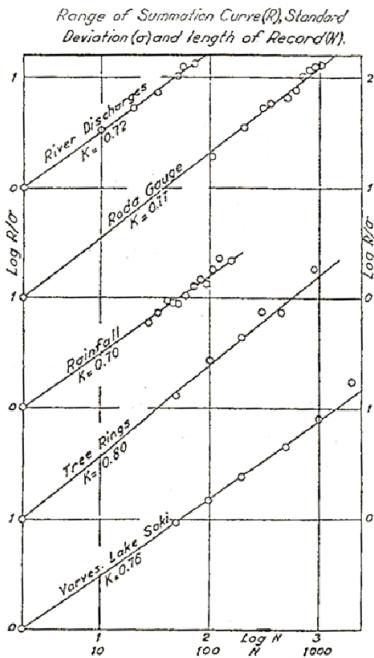


Figura 2.21: Análise de intervalo rescalonado - Estatística R/S verificado em alguns fenômenos naturais. No gráfico, de cima para baixo, as retas ajustadas referem-se a: descarga do rio, medidor nível, pluviosidade, anéis de troncos de árvores e camadas de sedimentos do Lago Saki. O “expoente de Hurst” (H) aparece como a letra K . Fonte: [Feder \(1988\)](#).

Um fato notável, destas observações de Hurst, é que o expoente $H > \frac{1}{2}$ e que aparece em muitos fenômenos naturais. E na ausência de uma relação R/S de longo prazo este valor torna-se assintoticamente proporcional a $(\tau/2)^{\frac{1}{2}}$. Isso foi testado, na prática, através de um experimento com o lançamento de moedas, ao acaso.

Para isso, Hurst contou com o resultado obtido por 100 moedas lançadas 1000 vezes em um tempo aproximado de 35 minutos. Destaca-se seu caráter aleatório, ou seja, não havendo uma maior probabilidade de ocorrer caras ou de ocorrer coroas. A expressão que

descreve a ocorrência de processos independentes aleatórios e com finitas variações é dada por $R/S = (a\tau/2)^{\frac{1}{2}}$. A Figura 2.22 apresenta o valor de $H = 0,503 \pm 0,008$ superestimado, para valores de τ inferiores a 20. Para valores de $\tau \leq 4$ o valor subestimado de $H = 0,516 \pm 0,006$ ([FEDER, 1988](#)).

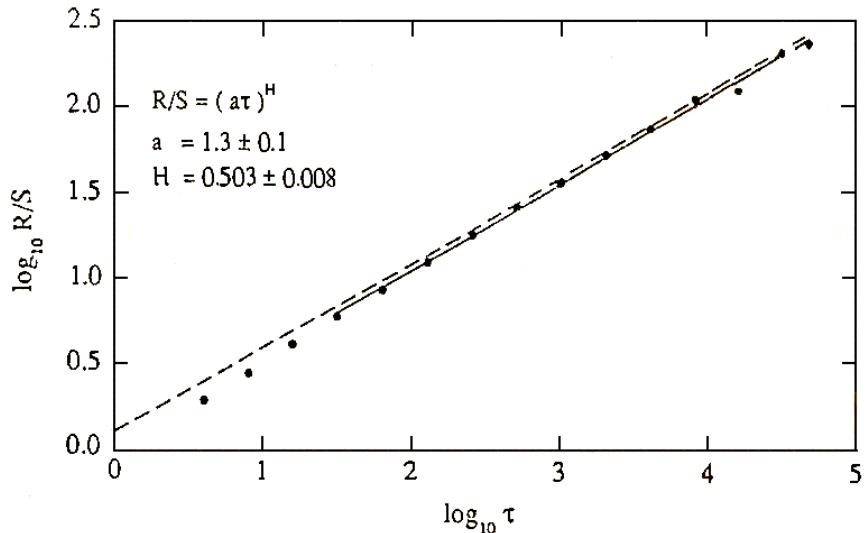


Figura 2.22: Análise de intervalo rescalonado - Estatística R/S verificado em alguns fenômenos naturais. No gráfico, de cima para baixo, as retas ajustadas referem-se a: descarga do rio, medidor nível, pluviosidade, anéis de troncos de árvores e camadas de sedimentos do Lago Saki. Fonte:[Feder \(1988\)](#).

O valor de H varia entre 0 e 1 ($0 \leq H \leq 1$). Caso o valor de H seja igual a 0,5 a série é descrita como descorrelacionada. Caso H esteja entre 0,50 e 1 ($0,50 < H \leq 1,0$) a série temporal é dita como persistente. Assim, um aumento na tendência de uma série temporal implicará em um aumento futuro desta série e uma diminuição de valores no presente implicarão na diminuição de valores no futuro. Caso o expoente de Hurst varie entre 0 e 0,5 ($0 \leq H < 0,5$) inferimos que a série tem comportamento antipersistente ([FEDER, 1988](#)).

Dessa forma, para tamanhos de distintos tempos, a relação R/S poderá, ou não, seguir uma lei de potência em τ , isto é, $R/S \sim \tau^H$, em que H é conhecido como **expoente de Hurst**.

O **Expoente de Hurst** varia entre 0 e 1, conforme a Tabela 2.5:

Valor	Característica
$H < 0,5$	série com comportamento antipersistência
$H = 0,5$	série descorrelacionada ou aleatória
$H > 0,5$	série com comportamento persistente

Tabela 2.5: Propriedade do expoente de HURST

Assim, com a análise de Hurst, dá-se o início de estudos em STs com a ocorrência de leis de potências, em diversos fenômenos da natureza. De forma semelhante, temos a invariância de escala com a Dimensão Fractal que veremos a seguir.

2.4 Dimensão Fractal

Em 1982, Benoît Mandelbrot refere-se a formas presentes na natureza como: “Nem as montanhas correspondem a formas de pirâmides ou cones exatos, nem as estrelas estão dispostas no céu de forma descuidada, por que não estão a uma distância uniforme” com as irregularidades apresentadas na formas naturais das coisas Mandelbrot cunha o termo fractal ([MANDELBROT, 1982](#)). Um conjunto para o qual dimensão Hausdorff-Besicovitch excede estritamente a dimensão topológica, essa é sempre expressa como um número inteiro ([FERNANDEZ, 2014](#)).

A Figura 2.23 apresenta formas geométricas Euclidianas onde a dimensão (coluna) assumem valor inteiro (Hausdorff-Besicovitch). A quantidade de parte que são obtidas das formas geométricas (linha, quadrado, cubo) N em diferentes fatores de escalas s (apresentada em cada linha) é dada pela Equação 2.29, onde d é a dimensão, s é o fator de escala e N é o número de partes em que a figura foi dividida ([MANDELBROT, 1982](#)).

$$N = s^d \Rightarrow d = \frac{\log N}{\log s} \quad (2.29)$$

A partir desta expressão matemática lei de potência de uma dimensão fracionária pode ser achada estruturas fractais que não variam apesar de transformações de fatores de escala, são chamadas de fractais escalonáveis ([MANDELBROT, 1982](#)). Essa invariância a partir

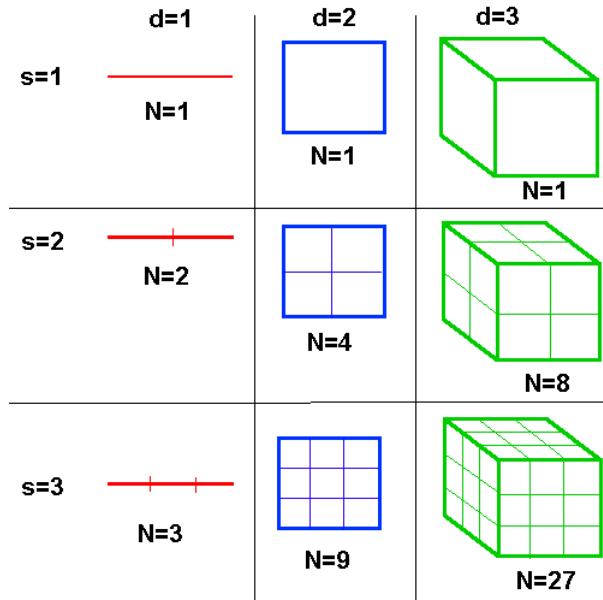


Figura 2.23: Em cada coluna é apresentado a geometria relativa a sua dimensão(d) cujo fator de escala está apresentado em cada linha. O número de partes (N) está contado em cada figura apresentada.

de uma geometria ordinária similar dita como auto-similar, a Figura 2.24 ilustra alguns exemplos de como sucede a construção de um fractal.

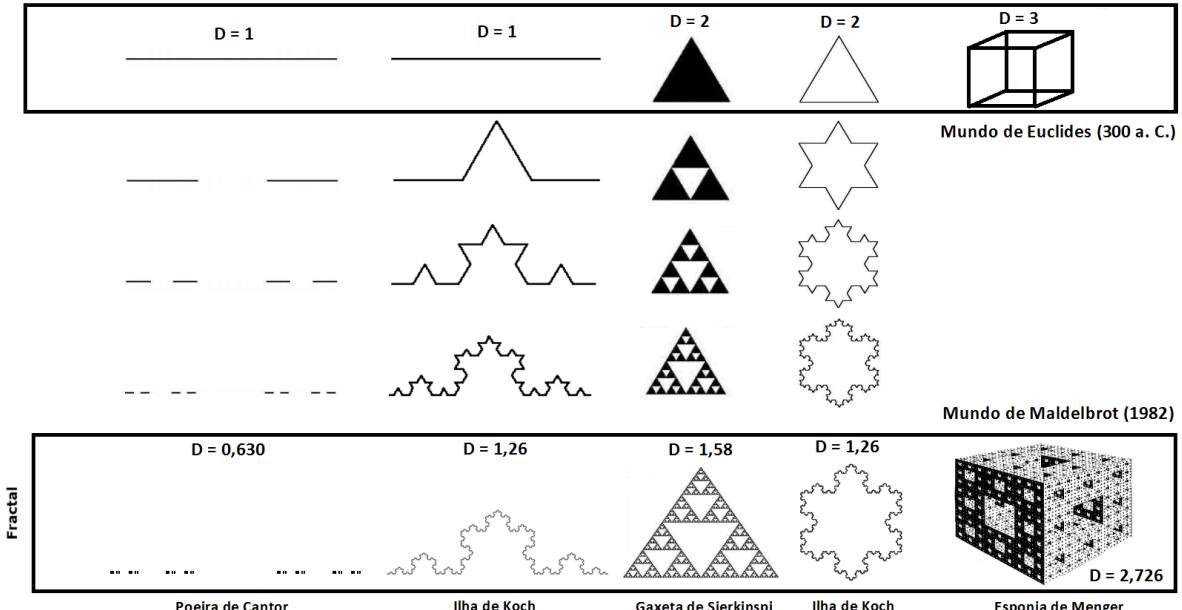


Figura 2.24: Construções de fractais a partir de regras simples. Fonte: [Fernandez \(2014\)](#)

2.4.1 Auto similaridade e auto afinidade

Uma lei de escala que caracterize um sistema de expoente fracionário é descrito como fractal (KANTELHARDT, 2012). Um sistema fractal é caracterizado por sua auto similaridade.

laridade, ou melhor, se uma pequena parte é ampliada, estatisticamente, ela é equivalente ao todo. Quando uma pequena parte é uma réplica do todo então o fractal é exato ([HARDSTONE et al., 2012](#)) e puramente matemático, ex. Curva de Koch Figura [2.25](#).

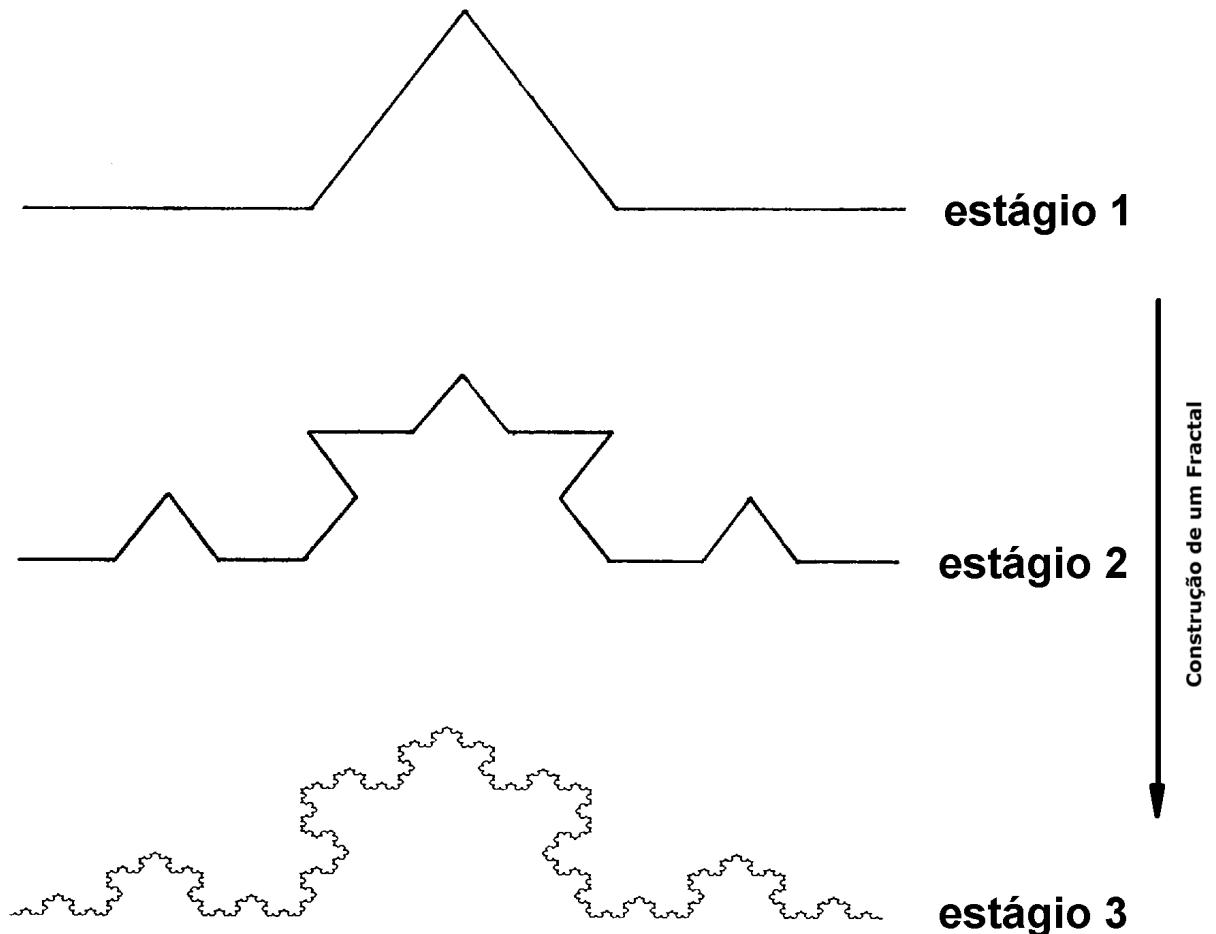


Figura 2.25: Curva de Koch. Fonte: College Mathematics Journal, Mar 1984

Quando a auto similaridade é expressa em termos de propriedades estatísticas (ex. média e desvio padrão para uma parte do fractal são versões escalonadas da média e do desvio padrão para o todo) essa estatística é dita fractal. Enquanto a propriedade de auto similaridade é isotrópica e aplicada completamente para todas as dimensões do objeto fractal, a auto afinidade descreve uma escala anisotrópica onde as propriedades estatísticas da escala fractal são diferentes para as diferentes dimensões. Para as séries temporais a dimensão temporal é reescalada ([HARDSTONE et al., 2012](#)).

Estruturas auto similares e autoafins têm em comum uma distribuição estatística que seguem uma lei de potência, sua função matemática é livre de escala. A persistência se verifica para todas as escalas de tempo quando a relação é de auto afinidade. Apesar disso, a intensidade da persistência pode variar em diferentes escalas de tempo. A temperatura e umidade são bons exemplos disso: enquanto as condições do tempo de amanhã ou da

próxima semana é provavelmente influenciada pelo comportamento do dia de hoje, esta mesma persistência é mais difícil de ser identificada para escalas de tempo mais longas.

2.5 Detrended Fluctuation Analysis - DFA

A análise das flutuações sem tendência do inglês, *Detrended Fluctuation Analysis- DFA* (PENG et al., 1994b), identifica e mensura autocorrelação de longo alcance em séries temporais não-estacionárias. Ele é capaz de identificar correlações aparentes que mascaram comportamentos que não correspondem às mesmas (HARDSTONE et al., 2012). As propriedades estatísticas são mantidas em séries temporais que demonstram o comportamento autoafim em diferentes escalas de tempo. Basicamente, a principal característica da robustez e eficiência do Método DFA reside em poder analisar um ST sem os efeitos de tendências.

O Método DFA tem sido utilizado em vários áreas do conhecimento humano: biológicos (PENG et al., 1994b; FERNANDEZ; OLIVEIRA; ZEBENDE, 2024), mercado financeiro (PODOBNIK et al., 2009; ZEBENDE; SILVA; MACHADO, 2011), economia (ZEBENDE; MACHADO, 2009; ZEBENDE; SILVA; MACHADO, 2011), fenômenos físicos (ZEBENDE; OLIVEIRA; PENNA, 1998; ZEBENDE et al., 2004; MORET, 2014; ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017; MORET et al., 2003) e medicina (HARDSTONE et al., 2012).

O expoente de Hurst mostra a presença de leis de potências em séries temporais. Porém, ele necessita de um cuidado especial com relação a ST que apresentem tendência. O cálculo do desvio padrão em certas escalas pode ser influenciado, fortemente, para longos períodos, com uma tendência estabilizada sobreposta ao sinal Figura 2.26. O cálculo do expoente livre de escala sem a influência de uma tendência Figura 2.27, vem revelar com maior eficiência, o verdadeiro comportamento de escala da ST (Figura 2.28) (HARDSTONE et al., 2012).

O DFA apresentado, por Peng em 1994, para quantificar correlação temporais de longa escala veio com menos rigores, quanto à estacionariedade, do que a função de autocorrelação (HARDSTONE et al., 2012).

A seguir o Método DFA é apresentado em quatro passos:

Passo 1: Calcula-se o desvio de cada ponto em relação à incidência média da série total, Figura 2.29, integrando a ST u_i e obtendo-se a ST integrada $y(k)$ cuja expressão é:

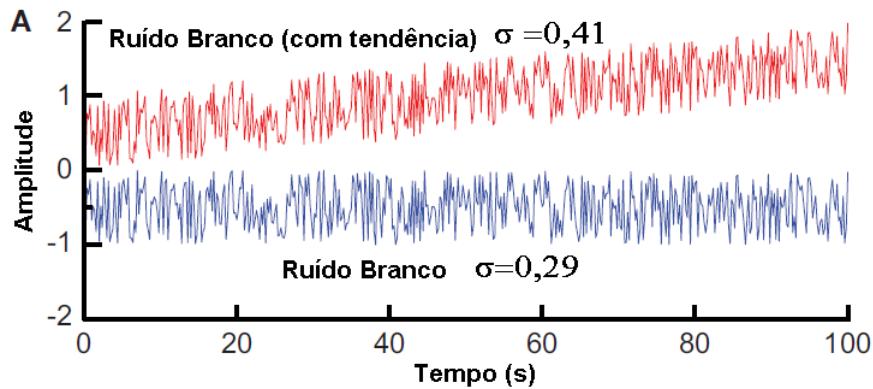


Figura 2.26: Sinal com tendência apresenta seu desvio padrão maior do que o sinal sem tendência. Ambos sinais com variações positivas e outro com variações negativas representarem sistemas descorrelacionados. Fonte: Hardstone 2012.

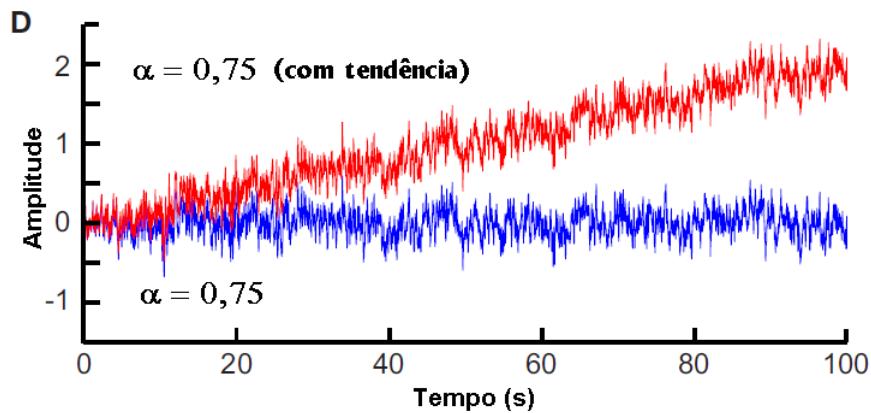


Figura 2.27: Sinal com tendência e sinal sem tendência. Ambos auto similares e com correlação de longa escala. Fonte: Hardstone 2012.

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [u_i - \langle u \rangle] \quad (2.30)$$

em que $\langle u \rangle$ é o valor médio de u_i ; para $k=1,2,\dots,N$.

Passo 2: A série integrada $y(k)$ é dividida em intervalos iguais (n) não sobrepostos, ou seja caixas de tamanhos iguais (Figura 2.30).

Passo 3: Cada intervalo de tamanho n , ajusta-se um polinômio de grau ≥ 1 a $y(k)$, denotado por $y_n(k)$, Figura 2.31. Isto representa a tendência local para amplitude em uma caixa de tamanho n .

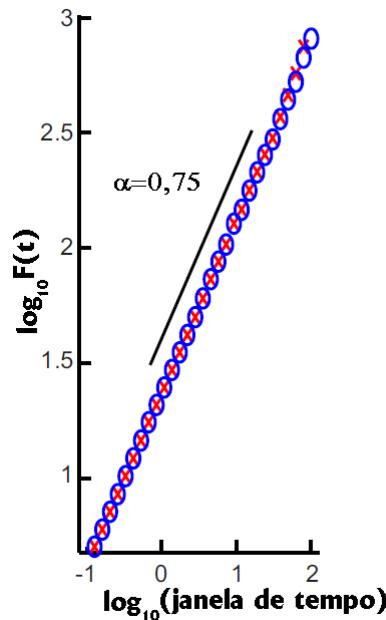


Figura 2.28: Sinais auto similares sem os efeitos de tendência. Sinal com tendência (cruz) e sinal sem tendência (círculo) usados em 2.27. Fonte: Hardstone 2012

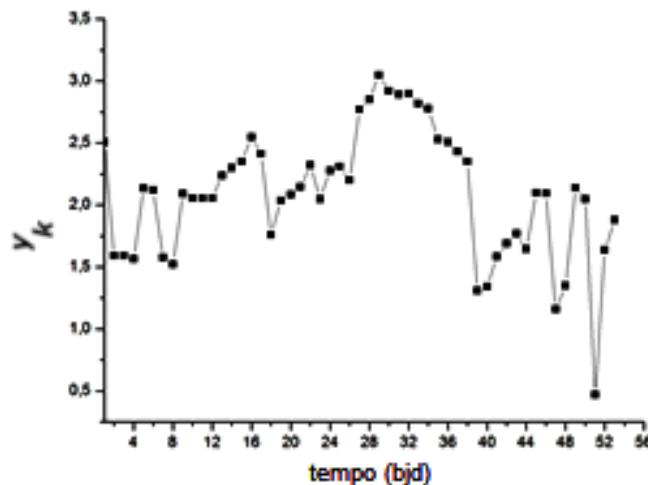


Figura 2.29: Série integrada com a diferença acumulada em relação à média

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (2.31)$$

As operações são repetidas para os diferentes valores de tamanhos de caixas. Cujo número de pontos em cada caixas varie de ℓ mínimo igual a 4 e um máximo de $N/4$ pontos .

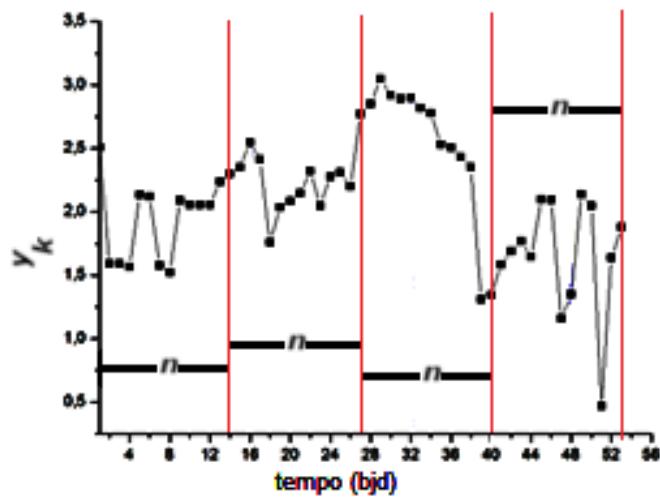


Figura 2.30: Série integrada dividida em intervalos de caixas de tamanhos iguais (mesmo número de pontos).

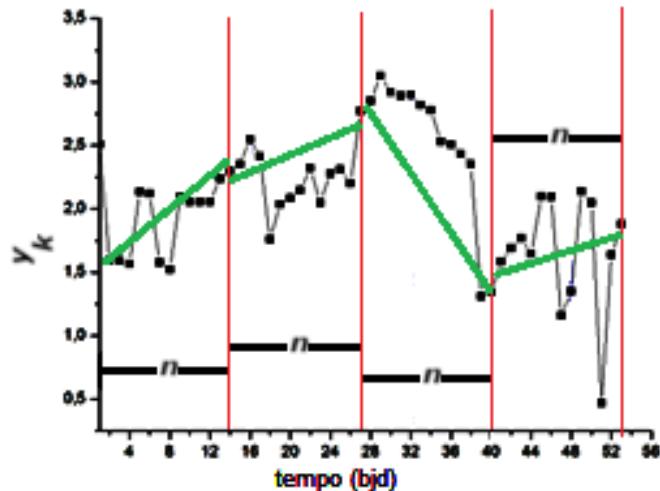


Figura 2.31: É calculado desvio padrão médio em relação a ordenada do ajuste

Passo 4: Ao final caso a $F_d(n)$ tenha comportamento do tipo $F_d(n) \sim n^\alpha$, ou seja corresponda a uma reta com um coeficiente angular α . Este é o expoente de correlação de longo alcance DFA.

Se a relação $F_{DFA} \times n$ seguir uma lei de potência, ou seja, $F_{DFA}(n) \sim n^{\alpha_{DFA}}$, então neste caso α_{DFA} será o expoente de auto-correlação de longo alcance. O expoente α_{DFA} quantifica a força empírica do sinal das auto-correlações de longo alcance (lei de potência), um parâmetro de auto-afinidade (ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017). Na Tabela 2.6 apresenta as características para o expoente α_{DFA} segundo (KANTELHARDT, 2008).

Expoente α_{DFA}	Tipo de sinal/comportamento
$> 0,5$	Série apresenta persistência de longo alcance
$< 0,5$	Anti-persistent de longo alcance
$\simeq 0,5$	Ruído branco, <i>Random Walk</i> ou não correlacionado
$\simeq 1,0$	Ruído 1/f ou ruído rosa
$> 1,0$	Não estacionário
$\simeq 3/2$	Ruído browniano

Tabela 2.6: Expoente de auto-correlação α_{DFA} e suas características.

Trata-se de um método vantajoso **DFA** que permite a detecção de auto-correlações de longo alcance embutidas em séries temporais aparentemente não estacionárias. O que evita a detecção espúria de auto-correlações aparentes de longo alcance, identificadas como artefatos de estacionariedade.

Assim, o expoente α_{DFA} - obtido pelo **DFA** avalia em que medida a tendência observada na ST no passado tem implicação em sua manutenção do comportamento no futuro, identificando o efeito de memória de longa duração na ST (MACHADO; SILVA; ZEBENDE, 2014).

2.5.1 DFA em Série Aleatória

Para melhor ilustrar os resultados obtidos com o emprego do **DFA** Fernandez (2014) faz um estudo de séries fotométricas de uma estrela e simula o comportamento aleatório de uma série temporal que gerou 40.433 pontos (mesma quantidade de número de observações de uma estrela estudada) a partir de um gerador de números aleatórios conhecido como rand4 (PRESS et al., 2007), Figura 2.32.

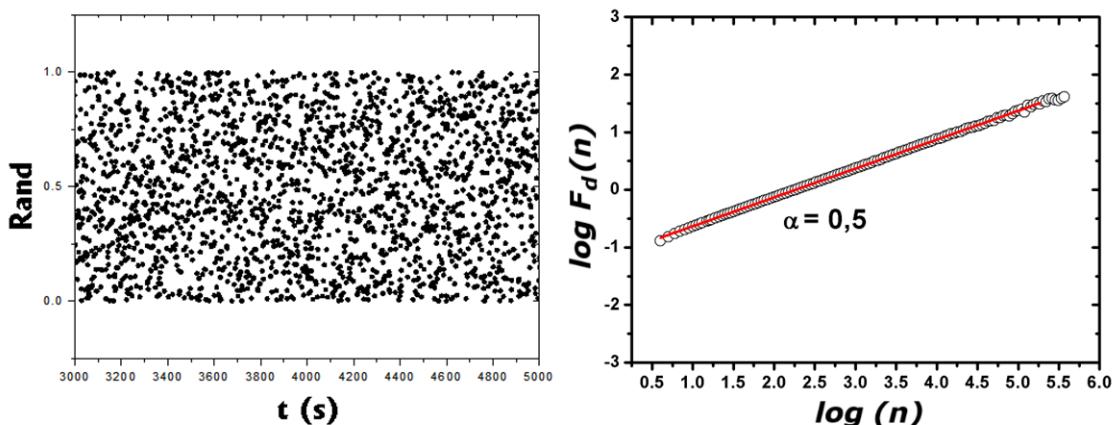


Figura 2.32: Representação dos pontos de uma ST obtidos a partir de um gerador de números aleatórios e sua respectiva análise utilizando o DFA.

2.5.2 DFA em Série Simulada de uma Função Seno

Para simular o comportamento periódico em uma série temporal gerou-se 40.433 pontos (mesma quantidade pontos que uma das STs mais adiante estudada) a partir da expressão $F(x) = \text{sen}\left(\frac{\pi x}{202,965}\right)$ (valor empírico com um ciclo da senóide ≈ 400 pontos) Figura 2.33.

O gráfico da Figura 2.33 apresenta o resultado do DFA para a ST obtida a partir da função senoidal. Foram ajustadas retas para dois trechos cujos coeficiente angular são: $\alpha_1 = 1,9$ e $\alpha_2 = 0,0$ e, para ambos $R^2 = 0,99$. O valor de uma janela (caixa) equivalente a 400 pontos que perfazem um ciclo do sinal senoidal também é apresentada sua posição no gráfico em log 2,6.

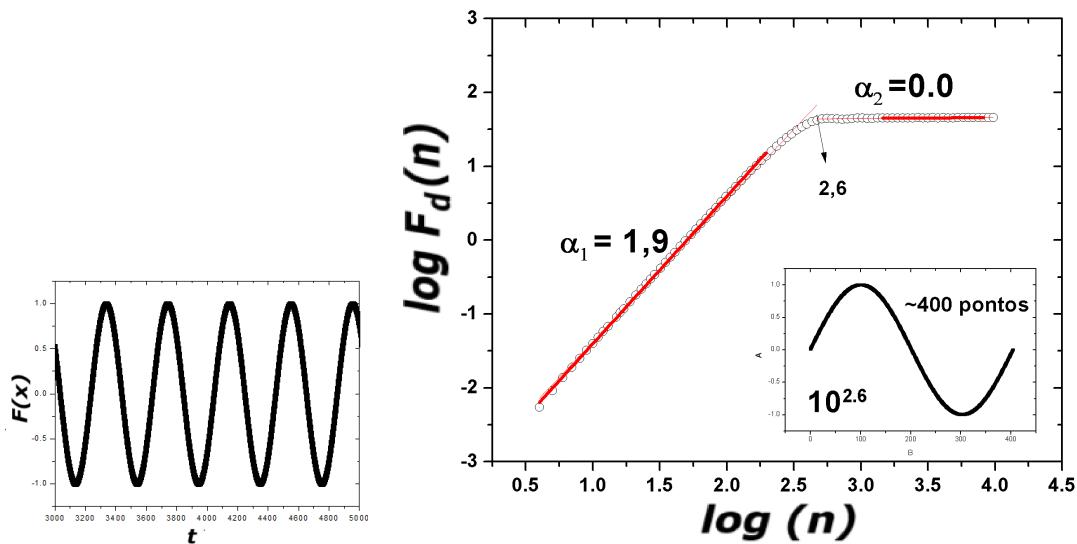


Figura 2.33: Curva gerada a partir de uma função seno e e sua respectiva análise com o DFA.

2.5.3 DFA - Manchas Solares

Manchas solares são áreas na fotosfera do sol onde há uma diminuição de pressão e temperatura devido à presença de intenso campo magnético. O número de manchas solares (média) sofre variações conforme registrado desde janeiro de 1749 a maio de 2014, na NASA (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>) Em média, a cada 11 anos tem-se um ciclo entre o aumento e diminuição destas manchas solares (Figura 2.34).

Calculado o DFA para esta ST é apresentado o comportamento de uma lei de potência $\alpha = 1,42 \pm 0,02$, com uma mudança de regime, quando o valor da abscissa do ajuste é $\sim 2,13$, o equivale a ~ 11 anos e 3 meses Figura 2.34.

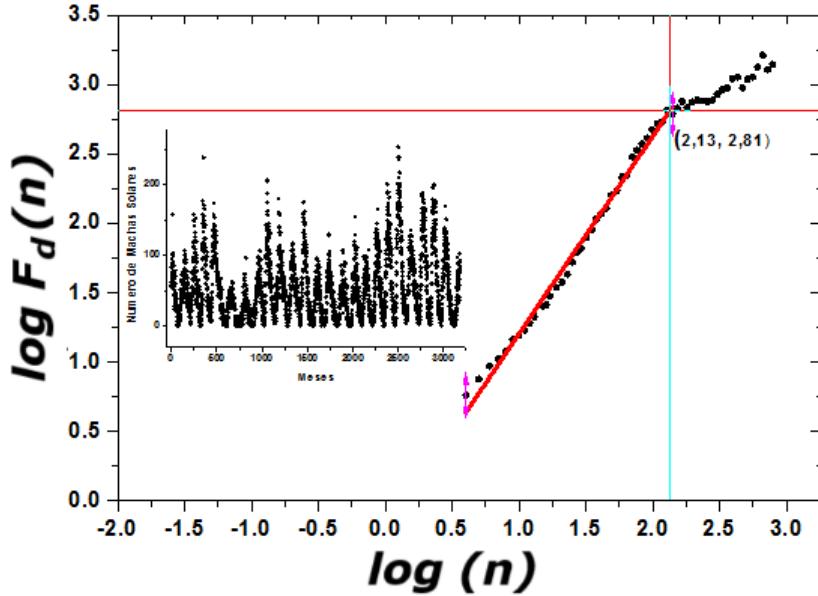


Figura 2.34: Média Mensal do Número de Manchas Solares. Fonte: Adaptado de Moret 2014

2.5.4 Detrended Cross-Correlation Analysis - DCCA

O método **DCCA** - *Detrended Cross-Correlation Analysis*, é uma generalização do **DFA** e tem como objetivo analisar e quantificar as correlações cruzadas entre duas séries temporais distintas não estacionárias com mesmo tamanho N . A finalidade do método **DCCA** é estimar a existência ou não da correlação cruzada de longo alcance entre séries temporais por meio da função de covariância sem tendência $F_{DCCA}^2(n)$, o **DCCA** foi proposto por [PODOBNIK e STANLEY \(2008\)](#).

A análise da correlação cruzada entre duas séries temporais, $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$, de mesmo tamanho N pelo método **DCCA** é feita seguindo o algoritmo para o cálculo da função de flutuação para o método **DFA**. O algoritmo consiste nos seguintes passos, listados logo abaixo:

Passo 1: Considere duas séries temporais $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$, com i variando de 1 a N (número total de pontos). Integra-se x_i e y_i para se obter X_K e Y_K respectivamente, equação 2.32:

$$\begin{aligned} X_k &= \sum_{i=1}^K [x_i - \langle x \rangle] \\ Y_k &= \sum_{i=1}^K [y_i - \langle y \rangle] \end{aligned} \tag{2.32}$$

sendo $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$ os valores médios de x_i e y_i , com $K = 1, 2, \dots, N$.

Passo 2: Dividimos as séries integradas X_K e Y_K em $(N - n)$ caixas de igual tamanho

n (escala temporal) sobrepostas. Cada caixa contém $n + 1$ valores, que começam em i e terminam em $i + n$.

Passo 3: Para cada caixa, ajustamos em X_K e Y_K polinômios de $grau \geq 1$, denotado por $\tilde{X}_{K,i}$ e $\tilde{Y}_{K,i}$, com $i \leq K \leq (i + n)$.

Passo 4: Subtraímos X_K e Y_K das séries ajustadas $\tilde{X}_{K,i}$ e $\tilde{Y}_{K,i}$, em cada caixa sobreposta de tamanho n , e então calculamos a função $f_{DCCA}^2(n, i)$ pela Equação 2.33.

$$F_{DCCA}^2(n, i) \equiv 1/(n + 1) \sum_{K=i}^{i+n} (X_K - \tilde{X}_{K,i}) (Y_K - \tilde{Y}_{K,i}) \quad (2.33)$$

Passo 5: Depois para uma dada escala temporal de comprimento n a função de flutuação, $F_{DCCA}^2(n)$, é calculada por:

$$F_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{N - n} \sum_{K=1}^{N-n} f_{DCCA}^2(n, i) \quad (2.34)$$

Passo 6: Os passos acima são repetidos para diferentes caixas de tamanho n , com $4 \leq n \leq \frac{N}{4}$ (valores mínimo e máximo de n). Por fim, verificamos a relação entre n e F_{DCCA}^2 .

Desta forma, pode-se verificar a existência ou não da lei de potência, em que λ descreve o expoente de correlação cruzada de longo alcance, através da expressão 2.35:

$$F_{DCCA}^2(n) \sim n^{2\lambda} \quad (2.35)$$

2.6 Coeficiente de Correlação Cruzada ρ_{DCCA}

O coeficiente de correlação cruzada ρ_{DCCA} quantifica o nível de correlação cruzada entre duas séries temporais não estacionárias. Este coeficiente é a razão entre a função de covariância sem tendência, F_{DCCA}^2 e a função de variância sem tendência, F_{DFA} e foi proposto por (ZEBENDE, 2011a) logo o ρ_{DCCA} é definido pela Equação 2.36:

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F_{DCCA}^2(n)}{F_{DFA_x}(n) F_{DFA_y}(n)} \quad (2.36)$$

O coeficiente de correlação cruzada é adimensional e varia no intervalo entre $-1 \leq \rho_{DCCA} \leq 1$. A Tabela 4.2 apresentada suas características (ZEBENDE, 2011a).

ρ_{DCCA}	Característica
1	correlação cruzada perfeita
0	sem correlação cruzada
-1	anti correlação cruzada perfeita

Tabela 2.7: Coeficiente de correlação cruzada de Zebende (ρ_{DCCA}) e suas características.

O coeficiente de correlação cruzada ρ_{DCCA} quantifica os níveis de correlação entre duas STs em oito níveis - quatro positivos e quatro negativos (Tabela 2.8) (FERNANDEZ; ZEBENDE, 2024).

Condição α_{DFA}	ρ_{DCCA}
Muito Forte	$\pm 0,666 \leftrightarrow \pm 0,999$
Forte	$\pm 0,333 \leftrightarrow \pm 0,666$
Fraca	$\pm 0,283 \leftrightarrow \pm 0,333$
Muit Fraca	$\pm 0,000 \leftrightarrow \pm 0,283$

Tabela 2.8: Intervalos de quantificação da correlação entre duas variáveis usando o Coeficiente de Correlação Cruzada ρ_{DCCA} .

Assim, após expostas a fundamentação teórica e as metodologias empregadas nesta Tese, a avaliação de uma área de segurança hídrica será apresentada, em formatos de artigos, no próximo Capítulo.

FRACTAL CLASSIFICATION OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA, PEDRA DO CAVALO

O presente artigo foi submetido em revista internacional especializada na temática de Fractais (Fractals - wspc.com). Propõe uma análise a partir da dimensão fractal em uma região de segurança hídrica utilizando cinco principais classes - floresta, formação não florestal, agropecuária, área não vegetada e corpos d'água (MapBiomas). Foi possível de contar os pixels das imagens para diferentes tamanhos (Boxcounting) o que produziu uma lei de potência. Foi possível de calcular a dimensão fractal para essas imagens em todas as principais classes e realizar uma comparação correta entre as classes a partir de sua dimensão fractal.

3.1 *Introduction*

According to the National Aeronautics and Space Administration (NASA), remote sensing in its most generally accepted meaning refers to instrument-based techniques employed in the acquisition and measurement of spatially organized (most commonly, geographically distributed) data/information on some properties of an array of target points (pixels) within the sensed scene that correspond to features, objects, and materials, doing this by applying one or more recording devices not in physical, intimate contact with the item(s) under surveillance (thus at a certain distance from the observed target, in which the spatial arrangement is preserved); its techniques involve amassing knowledge pertinent to the sensed scene (target) by using electromagnetic radiation, force fields, or acoustic energy sensed by recording cameras, radiometers or scanners, lasers, radio frequency receivers, radar systems, sonar, thermal devices, sound detectors, seismographs, magnetometers, gravimeters, scintillometers, or other instruments ([NASA, 2023](#)). The most up-to-date way of remotely sensing the Earth's surface is using artificial satellites, which are launched into space and carry various instruments for measuring spectral, spatial and physical characteristics. The Landsat Series is one of the most famous, because it has the objective of repeatedly imaging the Earth's land and coastal areas with the aim of monitoring changes in those areas over time. The first Landsat mission was launched in 1972, and was the first Earth observation satellite with the goal of monitoring the world's land. The series continues to this day, making Landsat the longest continuous Earth imaging programme in history ([NASA, 2025](#)). For researchers, one of the fastest ways to acquire

remote sensing data from the Earth's surface is with the help of Google Earth Engine (GEE), a platform for scientific analysis and visualization of geospatial data-sets. GEE hosts satellite imagery and stores it in a public data archive that includes historical earth images going back more than 40 years. The images, taken on a daily basis, are then made available for global-scale data mining. The GEE team has worked in close collaboration with Google Cloud to bring the Landsat collections to Google Cloud Storage as part of the Google Cloud public data program ([Google, 2024](#)).

From the complete set of remote sensing data about the Earth's surface stored in GEE, we have studied and analyzed a small portion, regarding the State of Bahia, Brazil. We will use data from the MapBiomass project, a partnership between a collaborative network formed by non-governmental organizations (NGOs), universities, technology companies, and Google, based on GEE. Since this partnership was signed, MapBiomass has been producing annual land-cover and land-use mapping (in Brazil), with data from 1985 to the present day. The MapBiomass project also plays an important role in validating and reporting deforestation events in Brazil. Data from MapBiomass are public, open, and free, under a Creative Commons (CC-BY-SA) license. For more details about the project, see ([MapBiomass, 2024d](#)).

Urban sprawl, water area, forests, and cultivated land are all significant factors for changes in the value of ecological services ([JING et al., 2021](#)). The availability of water resources for water supply systems, both in quality and quantity, are influenced by the natural vulnerability of the environment ([WANG et al., 2013; CRUZ et al., 2017](#)) and are associated with changes in land use and land cover ([VERBURG et al., 2006; TANKPA et al., 2021](#)). Water security, for urban centers, is one of the great challenges to human survival in the years to come ([NATIONS, 2015; BERTOLO et al., 2015b; DORICI et al., 2016; CRUZ et al., 2017](#)).

More specifically, our object of study will be an area where an Environmental Protection Area (EPA) is located, called *Pedra do Cavalo*, which has fundamental importance from the point of view of water security for the metropolitan region of Salvador, Brazil (see Fig. 3.1).

Before that, however, we recall that our research group on Complex Systems has developed many theories and made applications of them, which may in the future also be implemented in the analysis of remote sensing, such as ([ZEBENDE, 2011b; ZEBENDE; SILVA; FILHO, 2013; ZEBENDE et al., 2018; ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017; ZEBENDE; BRITO; CASTRO, 2019](#)).

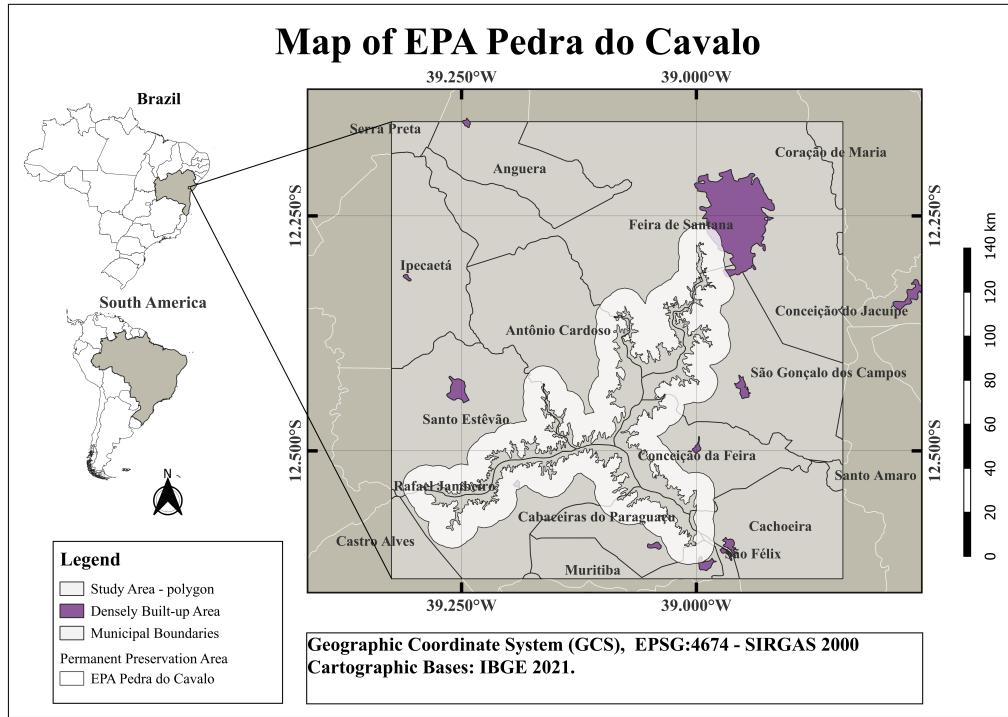


Figura 3.1: (Color online) Location of the area of study and the EPA *Pedra do Cavalo* in Bahia (Brazil).

3.2 Method

3.2.1 Area of Study and Classification

The area of study, as shown in Fig. 3.1, is of great importance from the point of view of water security, because the EPA *Pedra do Cavalo* is located there. This EPA was established in 1997, it being important to protect the water source and ensure its quality. This EPA is responsible for a good portion of the supply of drinking water for the Metropolitan Region of Salvador and Feira de Santana, benefiting around 4,000,000 consumers.

Also, in this area the *Pedra do Cavalo* Dam is located, with its hydroelectric plant. This dam has as its main function the supply of water to the Metropolitan Region of Salvador, and was also designed to regulate the flow of water, avoiding the floods that devastated the cities downstream on the banks of the Paraguaçu river. This requires the hydroelectric power plant to close (open) its floodgates, maintaining the pre-established water levels in the dam, to meet priorities other than that of generating hydroelectric power (VOTORANTIM, 2023).

As in a considerable number of areas around the world, in this area of study there are environmental conflicts, including: discharge of domestic sewage into the lake, invasion of the EPA, irregular garbage disposal, deforestation and burning, agricultural practices

in the flood quota, and disorderly growth of cities around the EPA, among others. Therefore, the main objective will be to connect the remote sensing produced by Landsat with the classification by MapBiomas over time (years), to determine descriptive and fractal statistics, trying to study the land use and the land cover on this valuable piece of land. The MapBiomas project has produced seven map collections since its beginning. These collections represent the changes: in the coverage periods of the annual maps, in the legend, or corrections in relation to the previous version. We will now describe the collections over the years.

Colection 1 : published in April of 2016, with a simplified legend, containing 7 classes and covering the period from 2008 to 2015;

Colection 2: published in April of 2017, with 13 classes covering the period from 2000 to 2016;

Colection 2.3, published in January of 2018, with improvements from the application of the random forest model.

Colection 3: published in August of 2018, with 19 classes covering the period from 1985 to 2017;

Colection 3.1, published in April of 2019, with improvements.

Colection 4: published in August of 2019, with 19 classes covering the period from 1985 to 2018;

Colection 4.1, published in March of 2020, with improvements.

Colection 5: published in August of 2020, with 21 classes covering the period from 1985 to 2019;

Colection 6: published in August of 2021, with 25 classes covering the period from 1985 to 2020;

Colection 7: published in August of 2022, with 27 classes covering the period from 1985 to 2021;

Colection 7.1, published in April of 2023, with improvements.

In all MapBiomas collections, the historical series is completely revised. Here, we use Collection 7.1, with 30-m spatial resolution (per pixel). For example, the year 1985 is available at

https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-71/lclu/coverage/brasil_coverage_1985.tif

For other years, just change the final year of the link: it can range from 1985 to 2021. After classifying and ordering all the figures, the fractal dimension by box counting will be presented just below, as a theoretical part of our main objective of classifying the images over time.

3.2.2 Fractal Dimension

The fractal dimension, d_f , unlike in Euclidean Geometry, is not necessarily an integer, because it is a fractional quantity which represents the degree of occupancy of the structure in the space that contains it, see (MANDELBROT, 1982; ASSIS et al., 2008). The idea of a fractal has proved to be important because many physical surface phenomena cannot readily be interpreted with reference to the usual conventional descriptors, thus the fractal dimension is being increasingly applied to establish correlations between surface structure in terms of scaling behavior and performance. The fractal created by Briggs (BRIGGS, 1992) is the most famous, because of its haunting beauty. There have been many papers that have focused on the fractal dimension, from the pioneering proposal of Mandelbrot (MANDELBROT, 1967), with the question: “How long is the coastline of Great Britain”, up to papers that analyze the process whereby particles undergoing a random walk due to Brownian motion cluster together to form aggregates, the so-called diffusion-limited aggregation (CARVALHAES; ZEBENDE; PENNA, 1993), or even articles that study the fractal properties of topography (KLINKENBERG; GOODCHILD, 1992), a geomorphic application the Hausdorff–Besicovitch dimension (OUTCALT; MELTON, 1992), and the fractal geometry of a soil-covered landscape (CULLING; DATKO, 1987). A good reference for further reading about fractal dimension is (CONNORS, 2010).

Of the various ways of calculating the fractal dimension, one of the most used is through the box-counting method, due to the ease of its calculation and empirical estimation (FALCONER, 2013). Box counting is a method of gathering data for analyzing complex patterns by breaking a dataset, object, image, etc., into smaller and smaller pieces, and analyzing the pieces at each smaller scale. One of the limitations of the box-counting method is that it is only applied to binary colors (usually black and white) and gray-scale digital images. When box counting is done to determine the fractal dimension, d_f , the information recorded is usually either yes or no as to whether or not the box contains any pixels of the predetermined color or range. One of the advantages of applying the box-counting method is to see the possibility of finding or not properties of self-similarity, as shown in this equation:

$$\# \text{ count} \sim (\text{box size})^{-d_f} \quad (3.1)$$

Here, $\# \text{ count}$ denotes the total count of a given box size. Fig. 3.3, $\log \times \log$ scale, show this relationship as an example of the box-counting method.

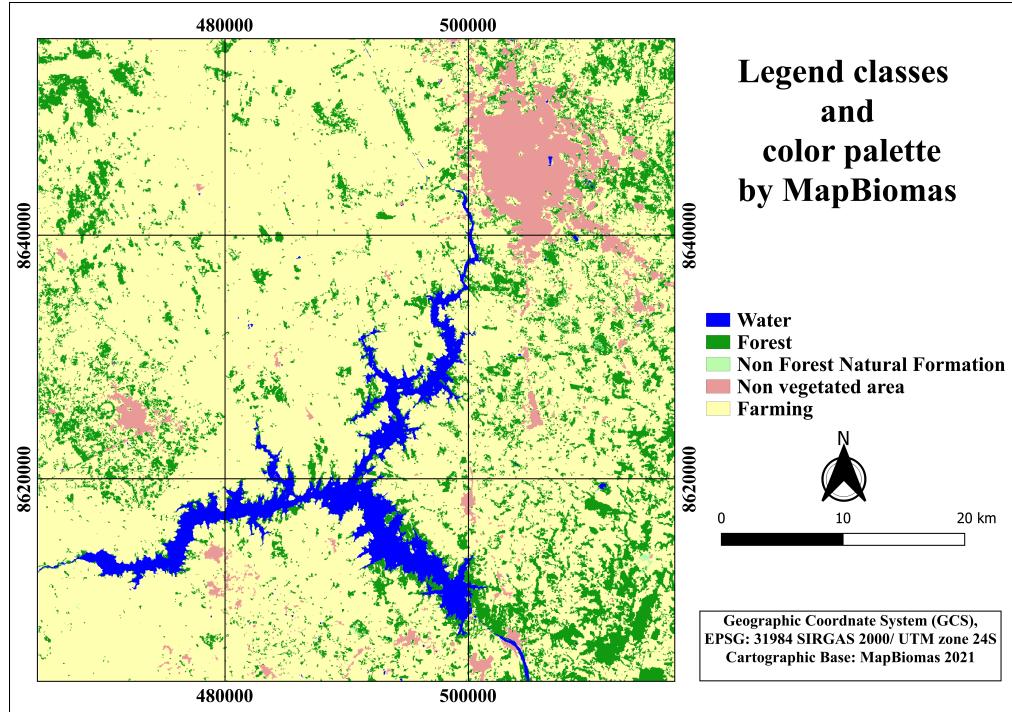


Figura 3.2: Area of study and classification by Mapbiomas land cover.

The box-counting method has three limitations, but these are negligible in this case (AA-GAARD; HARTVIGSEN, 2014; ANDRONACHE et al., 2016). This technique is usually implemented in software for use on patterns extracted from digital media, although the fundamental method can be used to investigate some patterns physically, as an example, see

[\(https://iqm.sourceforge.net/\)](https://iqm.sourceforge.net/)

3.2.3 Results and Discussion

3.2.3.1 Descriptive Statistics

First of all, we calculated descriptive statistics related to the area of study for all classes, by the MapBiomas classification, see Fig. 3.4. Therefore, each image produced here (from 1992 to 2021) will be the median value (over a period of one year) of all images produced by the Landsat Series in its orbit about the area of study. Logically, each image will be the sum of all the classifications of the classes. Hence, each pixel (per classified image) will have an integer value between 0 (none) and 255 (more intense), and in this way we can infer the main moments: the color mean, standard deviation (sd), skewness, and kurtosis.

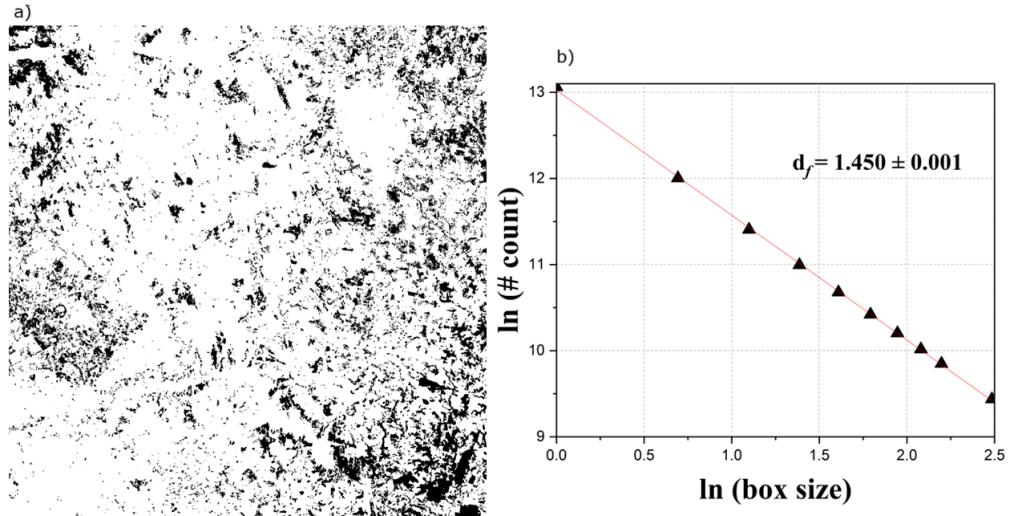


Figura 3.3: (Color on-line) Number of boxes as a function of the image size. This is the image of the ‘forest’ class in 2021, where the fractal dimension was calculated.

Starting from the average value for all pixels, that is,

$$\langle \text{Color} \rangle = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} \text{color}_i \quad (3.2)$$

where color_i takes a value between 0 and 255, N_{total} represents the total number of pixels in the image, we can see (see Fig. 3.4) the existence of two peaks (one in 1992 and the other in 2007) with average values at 204, with a value more close to farming. In this figure, with the color mean oscillating over time, we can see two valleys: the first is in 2001 (with an average around 192) and the second in 2016, slightly higher. From the first to the second peak, the fall and the rise have the same six years of temporal order. From 2007, the fall took longer and was noticeably less intense. From there on there is a clear change in the color mean if we compare it to what was previously measured (15 years ago): the mean color is below 204 (~ 196).

In this section, we were also careful to look at the fluctuation around the mean value, initially in terms of its standard deviation (sd), Fig. 3.4(b). The standard deviation proved to be totally asymmetric in relation to the mean value (maximum mean with minimum sd and vice-versa).

Now, looking at the distribution function, we can calculate the third (skewness) and fourth (kurtosis) moments. Knowing that skewness is defined by

$$\text{Skewness} = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} \frac{(\text{color}_i - \langle \text{color} \rangle)^3}{sd^3} \quad (3.3)$$

then, what kind of behavior can be seen in this case? The results, Fig. 3.4(c), show negative (the tail is on the left side of the distribution) values for all periods of time, with symmetric oscillation, between -2.0 (minimum) and -1.4 (maximum), with respect to the sd and asymmetric with respect to the mean value. It can be seen that the distribution has a tail on the left side (negative), however how close is it or not to a normal distribution? This will be measured here by the variable ‘Kurtosis’, that is

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{N_{total}} \sum_{i=1}^{N_{total}} \frac{(color_i - \langle color \rangle)^4}{sd^4}. \quad (3.4)$$

In this sense, Kurtosis = 3 will be a distribution fully fitted by a normal distribution. In Fig. 3.4(d), we can see that Kurtosis < 3, characteristic of a platykurtic distribution (a distribution that has less kurtosis than a normal distribution), and with total symmetry in relation to its mean value, higher (lower) mean color, higher (lower) kurtosis, see Fig. 3.4. For this statistical analysis, we have taken into account all classes, and even so, we can identify possible natural and anthropogenic (see Fig. 3.4 after 2015) patterns over time. However, with the aim of presenting clearer results in relation to natural and anthropogenic patterns, a new step will be implemented. Now, each image (over time) will be separated into five distinct classes by the MapBiomas classification, namely:

Non Forest: Wetland, Grassland, Salt Flat, Rocky Outcrop, Herbaceous Sandbank Vegetation, Other non Forest Formations;

Water: River, Lake and Ocean, Aquaculture;

Forest: Forest Formation, Savanna Formation, Mangrove, Wooded Sandbank Vegetation;

Farming: Pasture, Agriculture, Temporary Crop, Soybean, Sugar cane, Rice, Cotton (beta), Other Temporary Crops, Perennial Crop, Coffee, Citrus, Other Perennial Crops, Forest Plantation, Mosaic of Uses;

Non Vegetated: Beach, Dune and Sand Spot, Urban Area, Mining, Other non Vegetated Areas.

For our area of study (Fig. 3.1), we can see this classification in Fig. 3.2. The overall image has a full resolution of 1743×1792 pixels. In this way, we can proceed to the box-count statistics (indirect area measurement), taking each pixel and its classification. On the first count, we did a full scan for the smallest box size ($N = 1$). The results for these counts are shown in Fig. 3.5. The great novelty that will appear here is the direct possibility of seeing (inferring) the total number of boxes as a function of time, due to natural and anthropogenic reasons, as we will see in the results right now. For example, for the box size $N = 1$ (smallest) we infer the total box count as a function of time (year) for all classes individually, see Fig. 3.5. This figure shows that the dominant

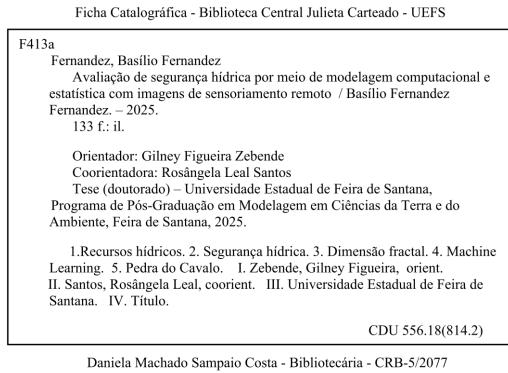


Figura 3.4: (Color on-line) Descriptive statistics of *Pedra do Cavalo* (all classes) with: (a) Color mean, (b) standard deviation (sd), (c) skewness, and (d) kurtosis.

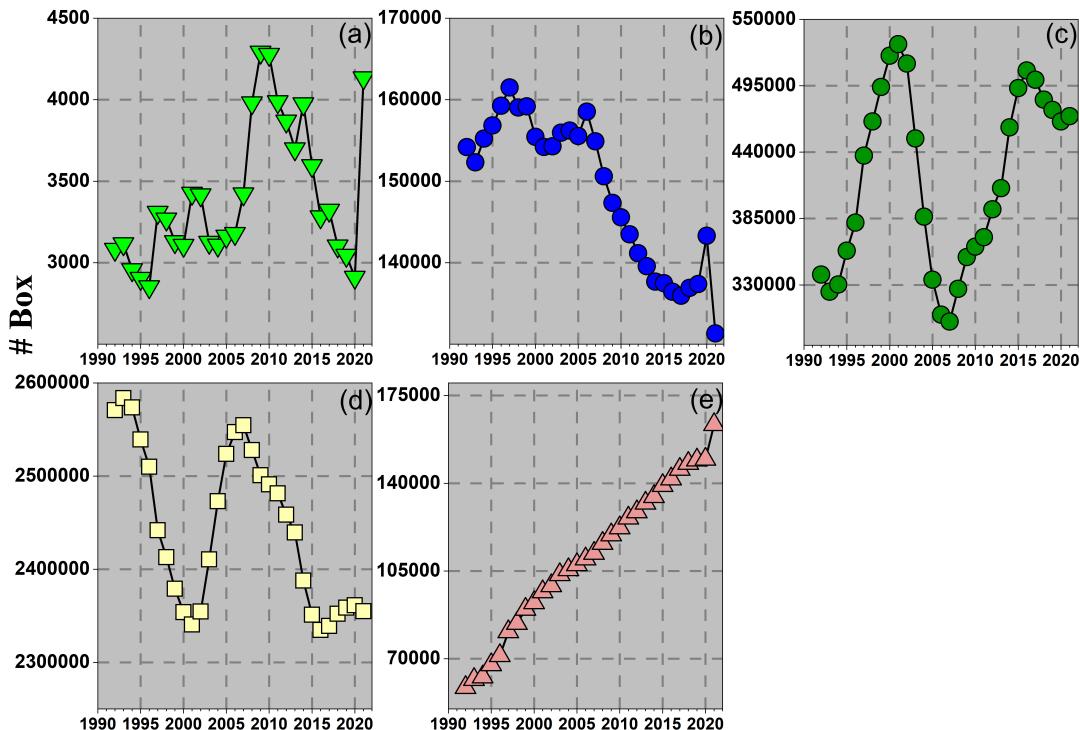


Figura 3.5: (Color on-line) Counting as a function (area by class) of the year by: (a) Non Forest Natural Formation, (b) Water, (c) Forest, (d) Farming and (e) Non Vegetated area. Here, the count is made taking into account the smallest pixel, a square of size 30 m ($N = 1$).

class is the class (d) (Farming), followed by the class (c) (Forest). In this same figure, (b) (Water) and (e) (Non Vegetated) are equivalent. Although fluctuating with time, (a) (Non Forest) has a small value compared to the other classes. Classes (c) and (d) (Fig. 3.5) are closely linked, because while one increases (decreases) the other decreases (increases), one class is the inverse of the other and the natural behavior prevails here. Also, as can be seen, there is an oscillation around seven years (between peaks and valleys), which was modified from 2016 (there is a clear transition in behavior). In the class where urban area prevails, Fig. 3.5(e), we can see a very clear anthropogenic action, because in this case the count linearly increases (which is clearly unnatural). Specifically, looking

at 2020 (the year of the beginning of the COVID-19 pandemic), we can see perfectly the anthropogenic effect of COVID-19 on the area Fig. 3.5(e), due to the confrontation with the spread of the pandemic (social isolation), there was a global economic downturn, evidenced by the stagnation in size, from 2020 to 2019 (almost the same number). This effect is reflected in Fig. 3.5(b), with the decrease in hydroelectric power generation at the *Pedra do Cavalo* plant, increasing the water area in 2020 if compared with that of 2019. With the resumption of economic activity, from 2020 to 2021 (Post-crisis), there is a significant increase in Fig. 3.5(e), due to urban expansion repressed in the previous year, also reflected in Fig. 3.5(b) with a large decrease (due to more hydroelectric energy generation).

The relationship between the pixel's size and its amount is governed by a power law, like that seen in Fig. 3.6, described by Eq. 3.1, with d_f denoting its fractal dimension. Therefore, the results will be seen in Section 3.2.4.

3.2.4 Fractal Dimension with Box Counting

The results for d_f in each class as a function of time (year) are shown in Fig. 3.6. It

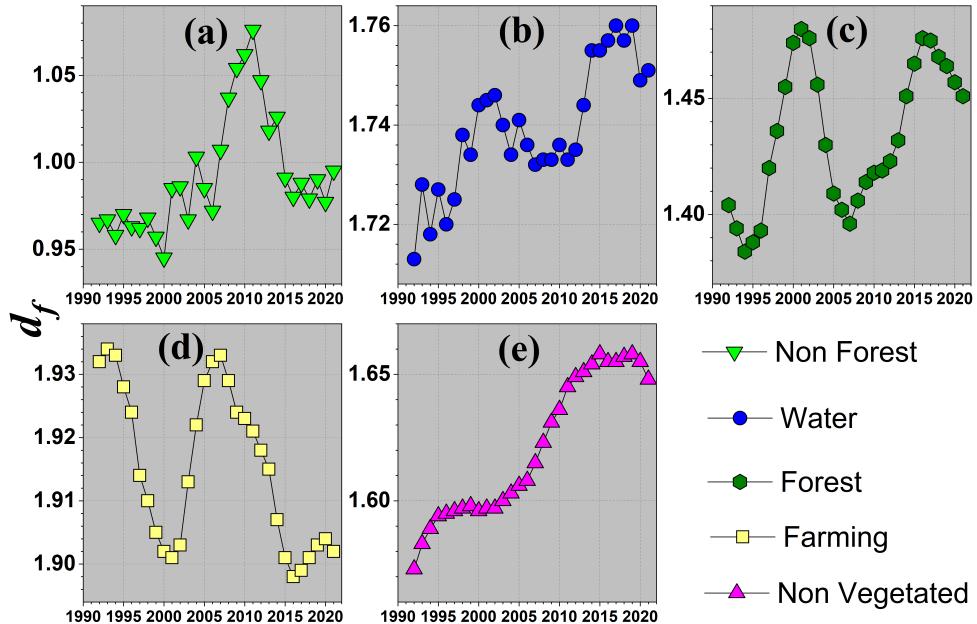


Figura 3.6: (Color on-line) Fractal dimension as a function of time (year) for all classes: (a) Non Forest, (b) Water, (c) Forest, (d) Farming, and (e) Non Vegetated.

is interesting to note that d_f does not measure the total area, and that this value can be compared between different classes. As we are obviously dealing with an image in two-dimensional topological space, that is, if

$0 \leq d_f \leq 1$, this class occupies more space than a point, but less than a line;

$1 \leq d_f \leq 2$, this class occupies more space than a line, but less than a plane.

The exponent d_f in Eq. 3.1 is a dimensionless value, which represents the arrangement (shape) of the figures (classes), that is, saying whether the object of study is compact or not. Specifically, it can be noticed that d_f varies with time, as shown in Fig. 3.6. In this figure with d_f as a function of time, it can be seen that: class (a) has a peak in its fractal dimension (above 1.00) between 2006 and 2016, and that, but as a whole, the value of d_f is around 1.00 (characteristic of a scattered image with few pixels). For class (b), the fractal dimension increased from 1.71 (1992) to 1.76 (2016), after this period d_f stabilizes until 2019, where there is a clear drop to 1.75, from 2019 to 2020 (the effect of COVID-19?). However, class (c) presented the greatest variation in d_f , oscillating between a minimum value, $d_f = 1.38$ (1994), to a maximum value, $d_f = 1.48$ (2001), with a period of seven years. There is a new oscillation between 2007 and 2016, but with a new behavior. In class (d), there is oscillation in d_f , but this variation is the smallest compared to those existing in other classes ($1.90 \leq d_f \leq 1.93$). Again for class (e), as shown in Fig. 3.5(e), the anthropogenic effect (through the city) appeared in d_f , where it can be noted that there is an increase in d_f between 1992 and 2015, with $1.57 \leq d_f \leq 1.65$, and after 2015, d_f stabilizes until 2021 (with a slight drop; the effect of COVID-19?).

It can be seen that d_f oscillates as a function of time, and that if we want to measure by how much and how fast, this is possible if we define the fractal dimension rate as a function of time, that is:

$$\frac{\Delta d_f(\text{time}_i)}{\Delta t} \equiv \frac{d_f(\text{time}_i) - d_f(\text{time}_{i-1})}{\text{time}_i - \text{time}_{i-1}} \quad (3.5)$$

where $\Delta t = \text{time}_i - \text{time}_{i-1} = 1$ (year). With this measure, it is possible to compare the values of d_f for the various classes, knowing by how much it varies and how fast (within a year). Also, $\frac{\Delta d_f(\text{time}_i)}{\Delta t} = \Delta d_f(\text{time}_i)$, because $\Delta t = \text{time}_i - \text{time}_{i-1} = 1$. The results for $\frac{\Delta d_f(\text{time}_i)}{\Delta t}$ are shown in Fig. 3.7. All classes, (a) to (e), are now on the same scale; in this case, Δd_f has the highest rate of change in the case of class (a), with Δd_f increasing and decreasing faster than the other cases. Although with a smaller oscillation, class (b) has a behavior very similar to class (a), unlike what is seen for the other classes (c, d, e). In Fig. 3.7, it can be seen again that Δd_f for class (c) (although larger in amplitude) is antagonistic to that presented by class (d). The anthropogenic effect (human), seen in the previous results, can be also identified by Δd_f . We have already shown that the area (number of pixels) has been increasing linearly with time for the class Non Vegetated (Fig. 3.5(e)), also reflected in its fractal dimension Fig. 3.6(e), or in Δd_f in Fig. 3.7(e), with a basically constant rate, which changed in 2020 (negative) (most likely due to COVID-19).

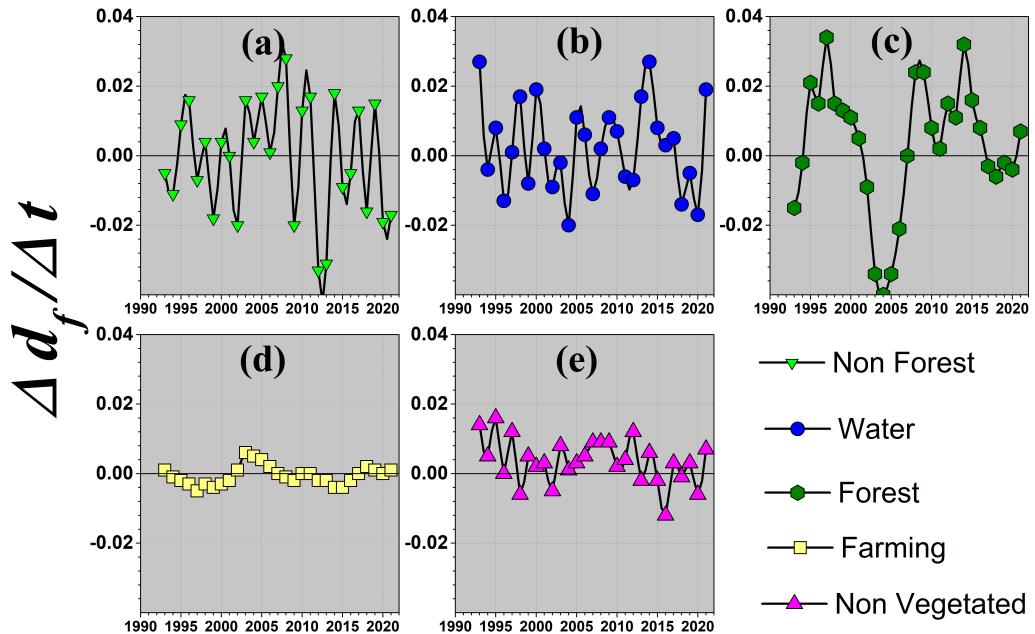


Figura 3.7: (Color on-line) Fractal dimension rate as a function of time (year) for all five classes: (a) Non Forest, (b) Water, (c) Forest, (d) Farming, and (e) Non Vegetated.

3.3 Conclusions

Using a spatio-temporal remote sensing analysis of the Environmental Protection Area (EPA) of *Pedra do Cavalo*, there have been determined some statistics and fractal properties of the land use and land cover in the course of time (both natural and anthropogenic causes). Thus, if we look at the five classes (of Mapbiomas) and the # count of pixels in each image, it was possible to measure (analyze) these area by class. By counting the pixels for different sizes, we found a power law relation between and the size of a box and the number of boxes with that size. Thus, it was possible to calculate the fractal dimension, d_f , for these images in all classes, enabling a more accurate comparison. With the pixel count in each class of the images varying annually from 1992 to 2021, the fractal dimension was calculated, allowing indirectly inferring the sizes and shapes (entrails), thus making it possible to identify specifically:

Changes in behavior (antagonism) between the classes Farming and Forest, both in the pixel count and d_f ;

In general, a decrease in size (number of pixels) with an increase in the fractal dimension (shape), for the Water class. This result demonstrates the concentration of this class in the lake area (decreased roughness on its margins);

The anthropogenic nature of the changes, both in the form of the pixel count (linear growth behavior) and in its d_f , for the Non Vegetated class;

Measuring how and by how much each class oscillates as a function of time, looking at the rate of change of the fractal dimension, thus making it even possible to compare these rates;

Finally, the year of 2016 apparently marks a transition of behavior in the space (seen in all classes). This could be due to the intense drought that devastated the region at that time or even to human factors (which is clear in 2020, due to COVID-19, see classes (b,e) in Fig. 3.5).

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AUTOCORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO CRUZADA: UM ESTUDO DE CASO INERENTE A QUESTÃO DE SEGURANÇA HÍDRICA ¹

O presente artigo foi publicado na Revista Brasileira de Climatologia que tem acesso público e gratuito (FERNANDEZ; OLIVEIRA; ZEBENDE, 2024). Propõe uma análise da relação mútua entre os índices NDVI e EVI, por meio de do coeficiente DCCA de correlação cruzada, percebe-se que o valor do coeficiente pode ser negativo ou positivo, com variação de DCCA correlação cruzada de nível fraco até nível forte, a depender de sua escala temporal. Foi identificado escalas de tempo das mudanças na cobertura da vegetação, a autocorrelação em torno de 30 observações empregando o *DFA* e a correlação cruzada entre os índices.

4.1 *Introdução*

O fornecimento de água para centros urbanos através de reservas hídricas tem recebido atenção ultimamente de gestores públicos, isto por meio da criação e manutenção de Áreas de Proteção Ambiental, APAs, destinadas à proteção dos solos e especialmente das matas ciliares (Brasil, 2012). Este tipo de vegetação tem como função de salvaguardar reservatórios, lagos e rios de assoreamentos, garantindo assim a biodiversidade dos ecossistemas, onde a fauna e a flora recebem destaque e, por conseguinte, a preservação dos recursos hídricos ficam garantidos (BRASIL, 1981; UN, 2013). Neste artigo, uma área localizada no Estado da Bahia, onde encontra-se a APA de Pedra do Cavalo (Figura 4.1), será destacada. Esta é uma área que abriga uma rica diversidade de ecossistemas terrestres e aquáticos. Dentro dessa área, está situada também uma usina de energia hidráulica e duas estações de tratamento de água, operadas pela EMBASA, Empresa Baiana de Águas e Saneamento da Bahia, que desempenham um papel vital na garantia de acesso a água potável e de qualidade para a Região Metropolitana de Salvador e da cidade de Feira

¹Este capítulo é baseado em um artigo publicado na Revista Brasileira de Climatologia.

Fernandez, B.F., Oliveira, L.A., Zebende, F.G. (2024). ANÁLISE ESTATÍSTICA DE AUTOCORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO CRUZADA: UM ESTUDO DE CASO INERENTE A QUESTÃO DE SEGURANÇA HÍDRICA. *Revista Brasileira de Climatologia*, 35, 2237-8642. <https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.18891>

de Santana. A coexistência destas infraestruturas, quando geridas de forma responsável e sustentável, exemplifica a importância de se conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a conservação ambiental, promovendo um equilíbrio entre as necessidades humanas e a preservação dos recursos naturais.

Por sua clara importância, neste artigo, uma região pautada pelo bem-estar e pela segurança hídrica de milhões de pessoas será analisada. A análise desta região será feita a partir de dados de sensoriamento remoto, com índices de vegetação e as bandas espetrais correspondentes ao espectro no visível (RGB), medidos ao longo do tempo. Por meio do estudo de autocorrelação (para cada índice), via método DFA, e da aplicação do coeficiente DCCA de correlação cruzada, ρ_{DCCA} ([ZEBENDE, 2011a](#)), os resultados serão obtidos, analisados e discutidos ao longo do trabalho.

Estes índices são essenciais para investigar a resposta da vegetação a variações climáticas, como seca e eventos extremos de precipitação, ver ([HUETE; JACKSON; POST, 1985](#); [HUNTINGTON et al., 2017](#)). Na região de estudo, esses índices podem auxiliar na avaliação da disponibilidade e do uso da água. Estudos como os de [Ansari et al. \(2024\)](#) destacam que a integração de dados climáticos e de vegetação permite a geração de indicadores que fornecem suporte para a gestão de recursos hídricos, reduzindo os riscos associados à escassez de água. A relação entre os índices de vegetação e a climatologia é fundamental para compreender, por exemplo, os padrões de evapotranspiração e o ciclo hidrológico. Regiões com alta segurança hídrica frequentemente apresentam padrões consistentes de vegetação ao longo do tempo, refletidos por valores elevados e estáveis de NDVI e EVI ([GORELICK et al., 2017](#); [ANSARI et al., 2024](#)).

Portanto, este trabalho tem como objetivo identificar a existência ou não de memórias (de curta ou de longo alcance) nos sinais produzidos por estes índices, e ao mesmo tempo, medir as suas relações mútuas. Desta forma, este artigo está dividido nas seguintes seções: área de estudo e dados, metodologia, resultados e conclusões, visto logo a seguir.

4.2 Área de Estudo e Dados

A área de estudo, apresentada na Figura 4.1, compreende um polígono com cerca de 2.500 km² na APA de Pedra do Cavalo, criada em 1997. Esta APA visa proteger o manancial do lago de Pedra do Cavalo, garantindo o abastecimento de água para aproximadamente 4 milhões de habitantes.

A área de estudo é apresentada na Figura 4.1 (polígono interno), área com interesse ambiental e de fundamental importância sobre o ponto de vista da segurança hídrica.

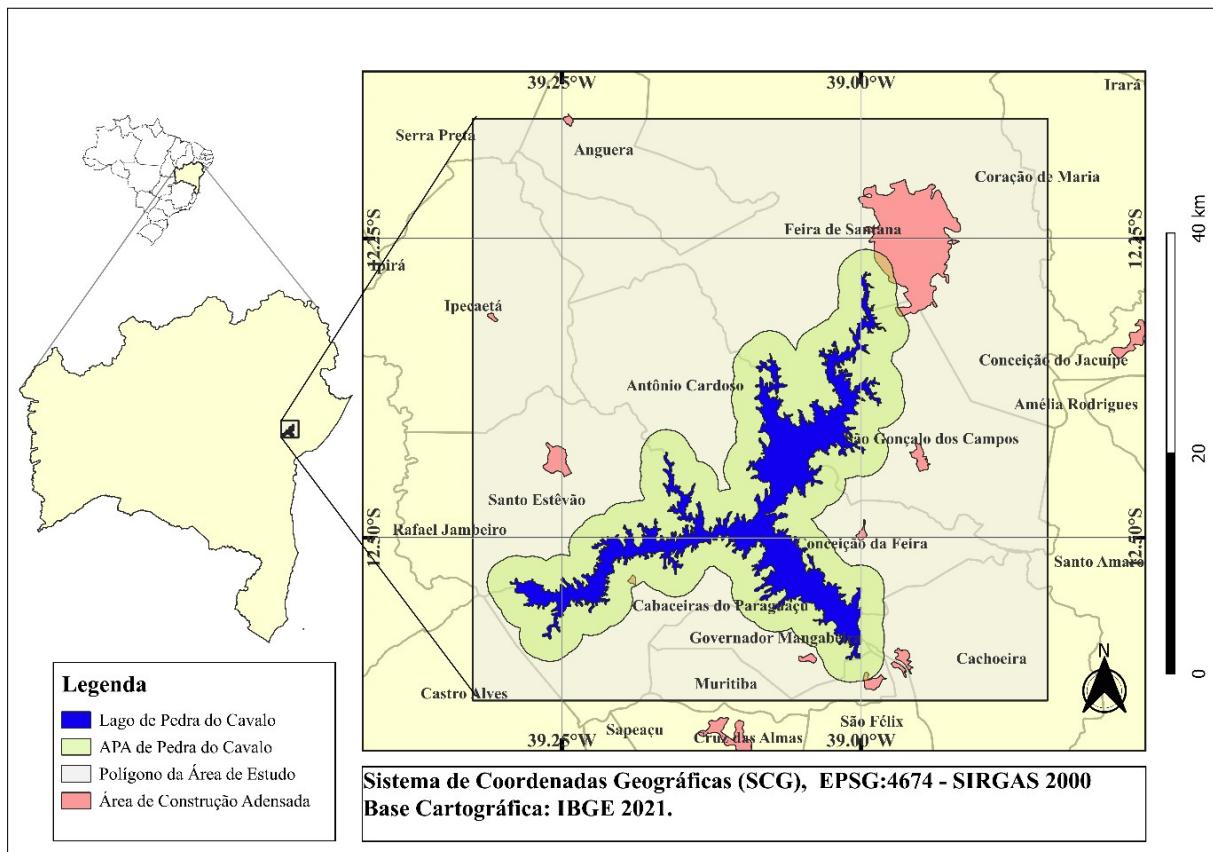


Figura 4.1: Área de estudo localizada na Bahia, polígono que inclue a APA de Pedra do Cavalo, seu lago e áreas adjacentes.

Nesta região está localizada uma APA, bem como várias cidades ao seu entorno. Entre as cidades, vê-se: Feira de Santana, Antônio Cardoso, Santo Estêvão, Cabaceiras do Paraguaçu, Cachoeira de São Félix, Conceição da Feira, São Gonçalo dos Campos, Rafael Jambeiro e áreas de Serra Preta, Anguera, Coração de Maria, Santo Amaro, Muritiba, Castro Alves e Ipecaetá, com um total de aproximadamente 2.500 km^2 . Especificamente, a APA, denominada de Pedra do Cavalo, foi criada em 1997 por um decreto estadual da Bahia. Esta APA tem o objetivo de proteger o manancial de água no lago de Pedra do Cavalo, respeitando suas características ambientais, assegurando assim o abastecimento de água, em qualidade e quantidade, para boa parte da Região Metropolitana de Salvador e Feira de Santana, beneficiando assim cerca de 4 milhões de habitantes.

Para análise estatística dos índices de vegetação e bandas espectrais como função do tempo, os dados foram obtidos através de sensoriamento remoto a partir do Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017), utilizando de uma prática ferramenta, chamada de Climate Engine (HUNTINGTON et al., 2017), útil para a aquisição dos dados de vegetação e bandas espectrais em nossa área de estudo. O Climate Engine utiliza dados do Google Earth Engine, para processamento sob demanda de dados climáticos e de satélite em um navegador da web e apresenta mapeamento sob demanda de conjuntos de dados monitoramento ambiental por meio de imagens de sensoriamento remoto. Com análises total-

mente personalizáveis, o aplicativo permite ao usuário produzir mapas e resumos de séries temporais a partir desses conjuntos de dados. O aplicativo é customizável para análises espaciais e temporais. As métricas disponíveis para processamento incluem um conjunto abrangente de variáveis que fornecem indicadores de alerta precoce dos impactos climáticos, tais como secas, incêndios florestais, stress ecológico e produção agrícola. O aplicativo Climate Engine está disponível on-line em: <https://app.climateengine.org/climateEngine>, acesso em: 18 ago. 2024.

O aplicativo é bem intuitivo, onde podemos escolher a área de estudo, o tipo de variável e o satélite (GARCÍA, 2024; ANSARI et al., 2024) dentre outros trabalhos.

O artigo opta pela escolha dos satélites LANDSAT 5,7 e 8, com uma resolução espacial de $30m^2$, para área na (Figura 4.1). Sendo a análise estatística feita para os Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI) - dois importantes indicadores, usados em sensoriamento remoto para avaliar a saúde e a vigorosidade da vegetação (HUETE; JACKSON; POST, 1985; JACKSON; HUETE, 1991; LIU; HUETE, 1995).

O NDVI é calculado a partir de dados de refletância de luz visível e infravermelho próximo, que mede a quantidade de clorofila nas plantas e sua atividade fotossintética. Sabe-se que valores próximos a 1 indicam alta densidade de vegetação e valores próximos a 0 indicam pouca ou nenhuma vegetação. Já o EVI é uma versão melhorada do NDVI, que leva em consideração fatores como o efeito do solo e a dispersão atmosférica, tornando-o mais sensível a mudanças na vegetação em áreas densas. Ele é calculado usando as mesmas bandas espectrais do NDVI, mas com fórmula que compensa a distorção introduzida por esses fatores. O EVI é considerado mais robusto em áreas com vegetação densa e em ambientes urbanos. Ambos os índices são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações, incluindo monitoramento da saúde das plantas, detecção de mudanças no uso da terra, estimativa de produtividade agrícola, estudos de ecologia e gestão de recursos naturais. A escolha entre o NDVI e o EVI depende das características específicas da área de estudo e dos objetivos da análise, para maiores detalhes ver (NKIAKA et al., 2024; GONÇALVES, 2012; GODWIN, 2024; SABY et al., 2022; LIU et al., 2024).

Para complementação da análise, serão utilizadas as bandas do Azul (*Blue Band*), do Verde (*Green Band*), do Vermelho (*Red Band*) e o NIR - refletância espectral no infravermelho próximo, como pode ser visto na Figura 4.2.

Com os dados tabulados (séries temporais) será aplicada a metodologia a seguir, no intuito de verificar a existência ou não de leis de potência (memória de curto ou longo alcance) ou mesmo relações mútuas (correlações cruzadas) entre os índices, por meio do método

DFA e do coeficiente ρ_{DCCA} .

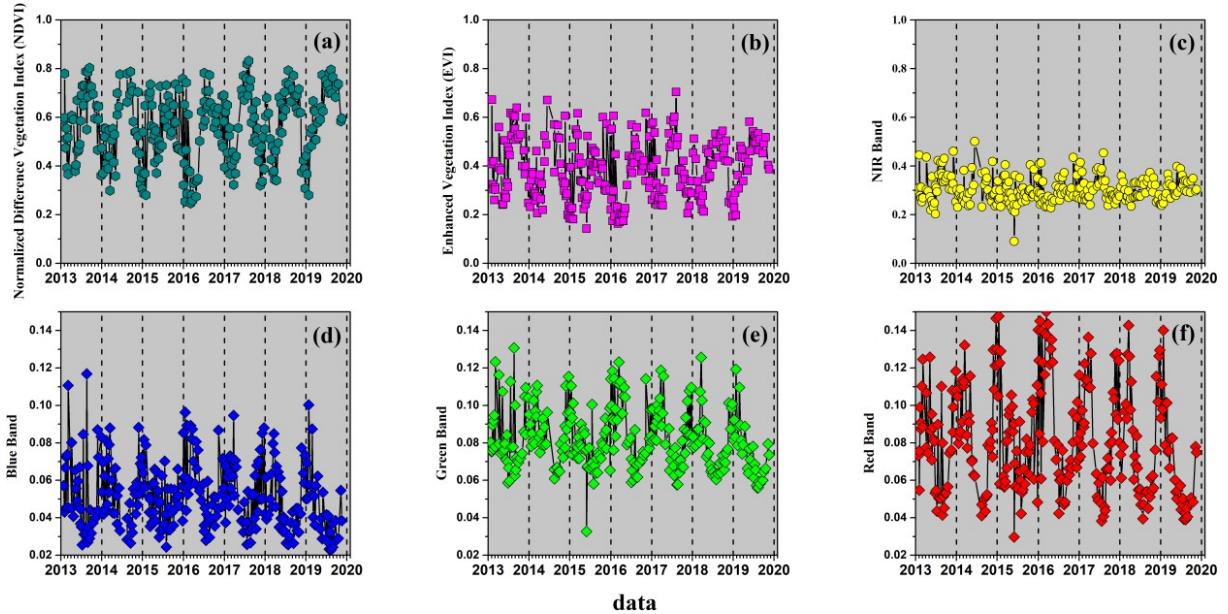


Figura 4.2: Índices de vegetação e bandas espectrais em função do tempo obtidos por sensoriamento remoto, com período compreendido entre os dias de 25 de dezembro de 2013 e 25 de outubro de 2020, com um total de 273 imagens.

4.2.1 Metodologia

4.2.2 Método *DFA* (PENG et al., 1994)

O método *DFA* (PENG et al., 1994a) fornece uma relação entre a função de flutuação, F_{DFA} , e a escala temporal n . O método *DFA* tem sido muito eficiente na detecção de autocorrelações de longo alcance com caudas longas, do tipo lei de potência. A importância do método pode ser comprovada pelo grande número de aplicações e citações em diversas áreas do conhecimento, como em Chen et al. (2002), Hu et al. (2001), Zebende et al. (2021), entre muitas outras. Nesta direção, logo abaixo é feita brevemente uma introdução ao algoritmo do método *DFA*, que envolve os seguintes passos (seis):

Passo 1: Considere um determinado sinal u_i , com $i = 1, 2, \dots, N$, sendo N o tamanho da série temporal. O sinal u_i é integrado, e assim obtém-se:

$$x(k) = \sum_{i=1}^k [u_i - \langle u \rangle], \quad (4.1)$$

sendo $\langle u \rangle$ a média aritmética de u_i para toda a série temporal $k=1, 2, \dots, N$;

Passo 2: O sinal integrado $x(k)$ é dividido em caixas (box) de igual tamanho n (escala

temporal);

Passo 3: Para cada caixa de tamanho n , um ajuste polinomial de ordem l (geralmente é usado $l = 1$) é feito em $x(k)$, que será a tendência do sinal dentro da caixa. A coordenada y do ajuste dentro de cada caixa será definida por $x_n(k, l)$;

Passo 4: O sinal integrado $x(k)$ é ”destendenciado”, isto pela subtração de $x_n(k, l)$ em cada caixa (de tamaho n);

Passo 5: Para caixas sobrepostas, com $(N - n)$ valores, calcula-se a função de covariância em todas as caixas, ou seja,

$$F_{DFA}^2(n, i) = \frac{1}{(n+1)} \sum_{k=1}^{i+n} [x(k) - x_n(k, l)]^2 \quad (4.2)$$

Logo após, calcula-se a sua função de flutuação, definida por:

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} F_{DFA}^2(n, i)} \quad (4.3)$$

Passo 6: O cálculo, dos passos anteriores, é repetido para as outras escalas temporais que compreendem, $4 \leq n \leq N/4$, e assim tem-se a relação entre F_{DFA} e a escala temporal n . Se o sinal for caracterizado por uma lei de potência, então:

$$F_d(n) \sim n^{\alpha_{DFA}} \quad (4.4)$$

Neste sentido, α_{DFA} é definido como sendo o expoente de autocorrelação de longo-alcance, como a seguintes propriedades (Quadro 4.1)

Expoente α_{DFA}	Tipo de série temporal
$\alpha_{DFA} < 0,5$	Anti-persistente de longo alcance
$\alpha_{DFA} \simeq 0,5$	Ruído branco, <i>Random Walk</i> ou não correlacionado
$\alpha_{DFA} > 0,5$	Série apresenta persistência de longo alcance
$\alpha_{DFA} \simeq 1,0$	Ruído 1/f ou ruído rosa
$\alpha_{DFA} > 1,0$	Não estacionário
$\alpha_{DFA} \simeq 3/2$	Ruído browniano

Tabela 4.1: α_{DFA} e a característica da série temporal ([WALLECZEK, 2000](#); [ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017](#)).

O expoente α_{DFA} é semelhante ao expoente de Hurst, porém α_{DFA} pode ser aplicado a sinalis não estacionários e é mais robusto do que o expoente de Hurst avaliados por [Hu et al. \(2001\)](#) e [Chen et al. \(2002\)](#), em que efeitos de tendência e não estacionaridade foram testa-

dos. Porém, nem sempre há uma caracterização de lei de potência única, assim tendências e sazonalidades podem estar presentes no sinal. Nestes casos o método *DFA* também pode ser aplicado para a análise destes efeitos, como pode ser visto em [Zebende et al. \(2021\)](#).

Também, se houver interesse em se analisar correlações cruzadas entre as séries temporais, pode-se (e é bem-vindo) empregar o coeficiente DCCA de correlação cruzada, $\rho DCCA$, que será descrito e aplicado entre todas as combinações das séries temporais (Figura 4.2) logo abaixo.

4.2.3 Coeficiente DCCA de Correlação Cruzada $\rho DCCA$ (Zebende, 2011)

O coeficiente DCCA de correlação cruzada, $\rho DCCA$, quantifica o nível de correlação entre duas séries não estacionárias de mesmo tamanho. Por exemplo, considerando duas séries temporais $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$, com $i = 1, 2, 3, \dots, N$, (tamanho da série), o cálculo de $\rho DCCA$ preconiza as seguintes etapas ([ZEBENDE, 2011a](#)):

Passo 1: Integra $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$, e assim obter duas novas séries:

$$x_k = \sum_{i=1}^k [x_i - \langle x \rangle] \quad (4.5)$$

e

$$y_k = \sum_{i=1}^k [y_i - \langle y \rangle] \quad (4.6)$$

sendo $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$ os respectivos valores médios de $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$;

Passo 2: Dividir as duas séries $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$ em $(N-n)$ caixas sobrepostas de igual comprimento n , cada uma contendo $n+1$ valores, com inicio em i e término em $(i+n)$:

Passo 3: Para cada caixa, calcula-se a tendência linear local, $\tilde{X}_{k,i}$ e $\tilde{Y}_{k,i}$ ($i \leq k \leq i+n$) de X_k e Y_k respectivamente, e assim obtém-se a covariância dos resíduos em cada caixa:

$$f_{DCCA_{xy}}^2(n, i) = \frac{1}{(n+1)} \sum_{i=1}^{i+n} (X_k - \tilde{X}_{k,i})(Y_k - \tilde{Y}_{k,i}); \quad (4.7)$$

Passo 4: Seguidamente, para cada escala temporal de tamanho n (número de observações do satélite - mesma área), calcula-se a função de covariância sem tendência, ou seja:

$$F_{DCCA_{xy}}^2(n, i) = \frac{1}{(N-n)} \sum_{i=1}^{N-n} f_{DCCA}^2(n, i); \quad (4.8)$$

Passo 5: As etapas acima são repetidas, para cada uma das escalas temporais, $4 \leq n \leq N/4$:

$$F_{DCCA_{xy}}^2(n) = \frac{1}{(n+1)} \sum_{k=1}^{n+1} [y_k - \langle y \rangle][y_k - \langle y \rangle]; \quad (4.9)$$

Passo 6: Ao fim, o coeficiente ρ_{DCCA} é calculado pela equação:

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F_{DCCA}^2(n)}{F_{DFA_x}(n) F_{DFA_y}(n)} \quad (4.10)$$

O algoritmo, para o cálculo deste coeficiente, pode ser melhor compreendido a partir do vídeo publicado em "Algoritmo para o α_{DFA} , por Gilney Zebende (2021)".

Todos os resultados encontrados para α_{DFA} são adimensionais e variam entre -1 e 1, em que:

ρ_{DCCA}	Característica
1	existe correlação cruzada perfeita
0	ausência de correlação cruzada entre as duas séries temporais
-1	existe anticorrelação cruzada perfeita

Tabela 4.2: Coeficiente de correlação cruzada de Zebende (ρ_{DCCA}) e suas características.

Várias aplicações do ρ_{DCCA} podem ser vistas na literatura, como em [Kristoufek \(2014\)](#), [Podobnik et al. \(2011\)](#), [Vassoler e Zebende \(2012\)](#), [Zebende, Brito e Castro \(2019\)](#). Os resultados com a aplicação do método DFA e do ρ_{DCCA} , aos índices captados por sensoriamento remoto, serão apresentados na próxima seção.

4.3 Resultados

Vendo a Figura 4.2, como os valores dos índices em função do tempo (escala de dias), percebe-se, nitidamente, o efeito sazonal anual (ver linhas pontilhadas verticais) ao longo da área demarcada, com uma maior amplitude de variação para o NDVI, e seguido do EVI. Os valores para os quais o NDVI é máximo concentram-se basicamente no inverno, período de maior intensidade de chuvas, ao passo que ele é menor no verão, período de menor precipitação e por conseguinte menos verde. Para os outros espectros, também há esta variação sazonal ao longo do tempo (ver *NIR Band*, *Blue Band*, *Green Band* e *Red Band*). Ao olharmos diretamente para esta figura, em geral, não é possível se inferir conclusões a respeito de sua memória, ou mesmo, da relação estatística entre os índices. Para tanto, o método DFA e o coeficiente $\rho DCCA$ foram aplicados, com o objetivo de se aferir a memória da série temporal e suas relações mútuas, de modo a se obter uma análise estatística robusta para uma importante região (APA de Pedra do Cavalo).

Inicialmente, os resultados para a aplicação do método DFA são apresentados na Figura 4.3, com F_{DFA} como função de n . Os resultados mostram que, para todos os índices, há uma transição de comportamento para escalas temporais n em torno de 30 medições dos satélites (apresentado na figura pela linha vertical pontilhada). Os valores do expoente α_{DFA} , mostram-se persistentes ($\alpha_{DFA} \geq 0,5$) para $n \leq 30$ e antipersistentes ($\alpha_{DFA} < 0,5$) no caso em que $n > 30$. Também, os valores obtidos para o expoente α_{DFA} dependem de qual índice é analisado.

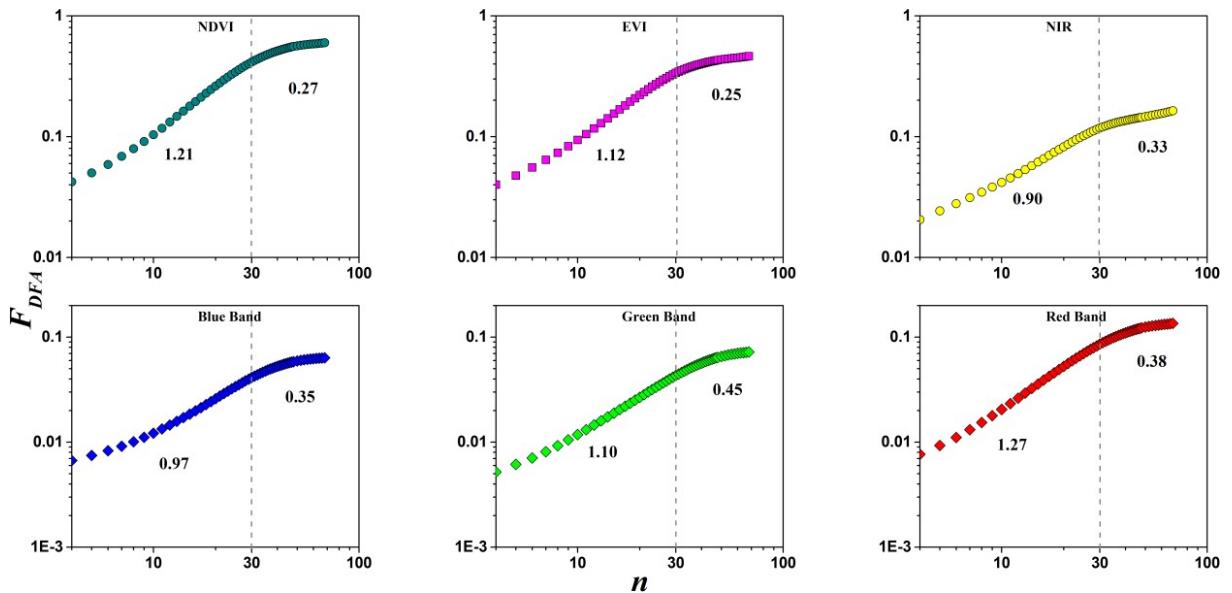


Figura 4.3: F_{DFA} como função da escala temporal n , para os índices NDVI, EVI, bandas do Azul (*Blue Band*), do Verde (*Green Band*), do Vermelho (*Red Band*) e o NIR - refletância espectral no infravermelho próximo. A linha vertical pontilhada separa as escalas temporais acima e abaixo $n = 30$ observações. Nesta figura vê-se os valores do expoente de autocorrelação calculado para escalas temporais menores e maiores do que 30 observações.

Sob a perspectiva das relações mútuas entre variáveis, ou das suas correlações cruzadas, aplica-se o coeficiente ρ_{DCCA} como função da escala temporal n entre todos os índices. O resultado para esta aplicação encontra-se na Figura 4.4. A figura mostra todas as possíveis combinações entre estes índices e bandas. O valor de ρ_{DCCA} é dividido entre: valores positivos e valores negativos, tendo $= 30$ como aquele em que ρ_{DCCA} tem aproximadamente a sua maior amplitude (veja a linha vertical tracejada na figura). Alguns dos resultados corroboram com a teoria, ou seja, NDVI com EVI tem $\rho_{DCCA} \cong 1,0$ (máximo valor) e NDVI com Red tem $\rho_{DCCA} \cong -1,0$ (mínimo valor), principalmente a partir de $n = 30$ observações. Ou seja, é possível identificar em que escala temporal isto ocorre e aferir qual a relação entre todos estes índices. Por exemplo, NDVI com Blue não é totalmente antcorrelacionado (com $\rho_{DCCA} = -1,0$), mas tem um valor em torno de -0,8 para $n = 30$ observações, entre os outros casos.

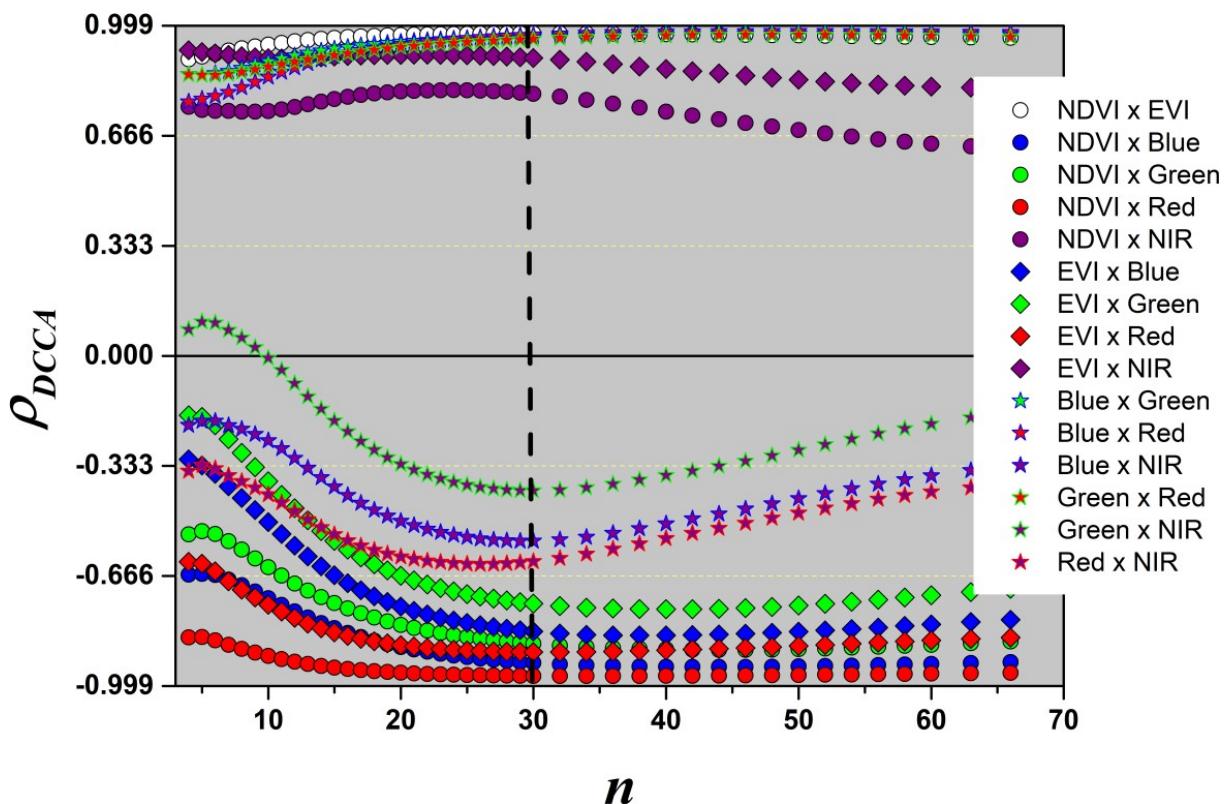


Figura 4.4: ρ_{DCCA} como função da escala temporal n , com a combinação entre os todos os índices. A linha vertical representa a escala temporal $n = 30$ (observações) e divide o estudo em pequenas e longas escalas temporais. Fonte: Fernandez, B.F.; Zebende, GF

4.4 Conclusões

Sabendo da importância dos índices NDVI e EVI, para o monitoramento da vegetação, na agricultura, no estudo climático, ou mesmo na gestão dos recursos hídricos. Inicialmente, são apresentados os referidos índices e as bandas espectrais como função do tempo, a partir de sensoriamento remoto (com suas sazonalidades) para a área de estudo, onde

geração de energia e segurança hídrica são fatores cruciais no que diz respeito o bem estar de milhões de habitantes.

Logo, neste primeiro momento, pôde-se observar que há nitidamente um efeito sazonal (na escala de meses) para todos os índices, um com maiores e outros com menores valores. Aqui, surge naturalmente o seguinte questionamento: qual é o valor sazonal e qual tipo de memória está associado a estas séries temporais? A resposta para estas questões foi dada pela aplicação do método α_{DFA} a todos os índices, que permitiu identificar a presença de autocorrelações persistente (em pequenas escalas temporais) e antipersistente (em grandes escalas temporais), divididas em torno de $n \cong 30$ (componente sazonal), onde há uma transição de comportamento da função de flutuação, F_{DFA} . O comportamento de F_{DFA} pode ser caracterizado pelo valor do expoente α_{DFA} , calculado aqui para cada índice e escala temporal, caracterizando assim, a natureza e o tipo de memória da série (Quadro 4.1).

Fechando com os objetivos, também foi analisado como um índice se relaciona com o outro, através do coeficiente ρ_{DCCA} , mostrando que este coeficiente pode ser positivo, negativo e variando de fraca até forte correlação cruzada, a depender de sua escala temporal. O tratamento estatístico, via ρ_{DCCA} , permite analisar correlações cruzadas mesmo no caso em que as séries temporais sejam não estacionárias (caso em que $\alpha_{DFA} > 1,0$), além de medir os níveis de correlações cruzadas em diferentes escalas temporais, detectando assim, padrões ocultos de interdependência entre todos os índices estudados (Figura 4.4).

Finalmente, para a área onde está localizada a APA de Pedra do Cavalo, um completo mapeamento do ponto de vista das autocorrelações e correlações cruzadas foi feito, e o efeito de memória da série temporal e suas relações mútuas foram analisados. Aqui, foi mostrando ser possível fazer uma completa análise estatística com o método DFA e com ρ_{DCCA} , a partir de dados de sensoriamento remoto para uma importante porção da superfície da Terra, com um imenso valor no que tange a segurança hídrica. E ainda, a metodologia pode oferecer nova e sofisticada abordagem para desvendar as relações complexas entre os índices de vegetação e as variáveis climáticas (por exemplo), que seria particularmente útil na climatologia, no intuito de se compreender as interações entre vegetação e clima.

DETECÇÃO DE BANCO DE MACRÓFITAS NO LAGO DE PEDRA DO CAVALO COM IMAGEM DO SENTINEL-2 L2A

O presente artigo foi adaptado para esta Tese e apresentado no XXI Simpósio Internacional SELPER (FERNANDEZ et al., 2025) com objetivo averiguar a presença de bancos de macrófitas no Lago de Pedra do Cavalo pelo fato de ser um bioindicador da qualidade de água e das questões de manejo nos locais de captação das estações de tratamento a partir de imagens de sensoriamento remoto do Satélite Sentinel 2.

5.1 *Introdução*

A eutrofização é um problema ambiental significativo causado pelo excesso de nutrientes tais como nitrogênio e fósforo, afetando corpos d'água globalmente (THOMAZ; ESTEVES, 2011). Esse fenômeno resulta na proliferação de plantas aquáticas, como as *Pontederia crassipes*, localmente, conhecida como baronesa, sua presença e abundância está fortemente relacionado à redução dos níveis de oxigênio na água e prejudicam a biodiversidade (KISSMANN; GROTH, 1991). As *Pontederia crassipes* têm alta capacidade fotossintética devido à grande quantidade de cloroplastos com clorofila em suas folhas, permitindo assim seu rápido crescimento (HOLM; WELDON; BLACKBURN, 1969). No sensoriamento remoto, os sensores multiespectrais e hiperespectrais detectam as assinaturas espectrais da vegetação, permitindo monitorar a presença e densidade das *Pontederia crassipes* com precisão usando imagens de satélite (CHEN; ZHANG; HALLIKAINEN, 2007; ROBLES; MADSEN; WERSAL, 2010).

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo identificar a ocorrência de banco de macrófitas com *Pontederia crassipes* a partir de curvas espectrais obtidas pelo Sentinel-2 L2A no reservatório de Pedra do Cavalo, Bahia com importância para a segurança hídrica (ANA, 2019) de uma população superior a 4 milhões de pessoas (ANDRADE; CURI; CURI, 2007), podendo enfrentar problemas significativos no caso da eutrofização e crescimento descontrolado dessas plantas.

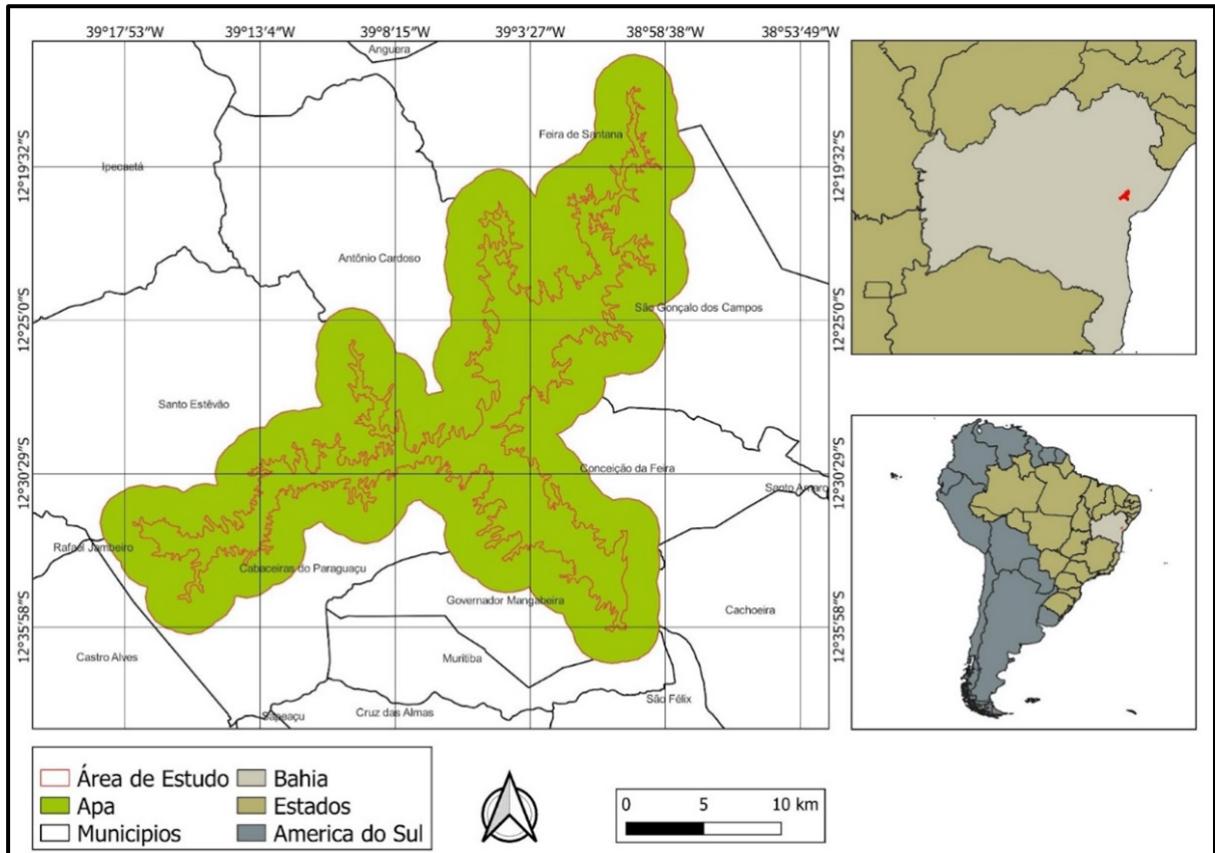


Figura 5.1: Área de estudo do Reservatório da APA de Pedra do Cavalo. Fonte: Autores, 2024

5.2 Material e Métodos

A área de estudo está localizada na Área de Proteção Ambiental do reservatório Pedra do Cavalo nas coordenadas $38^{\circ}59'46.79^{\prime\prime}\text{O}/12^{\circ}35'13.65^{\prime\prime}\text{S}$ (Figura 5.1), abrangendo 12 municípios baianos e faz parte da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, que tem uma área de 55.317 km² (a maior do Estado), localizada na região centro-leste do estado da Bahia.

5.2.1 Equações, fórmulas, ilustrações, tabelas e citações

Temos a estatística descritiva dos valores (Figura 5.2) para os canais de 490nm, 560nm, 665nm, 842nm cujos resultados demonstram a distribuição dos pontos da amostra (P1 a P42) em cada uma das referidas bandas, sabendo que o canal 842nm obteve a maior variação em torno da média, variando desde 0,2766 dl a 0,3868 dl, enquanto que os demais canais analisados variam 0,0218 dl (490nm), 0,0424 dl (560nm) e 0,0279 dl (665nm).

O gráfico de boxplot dos canais analisados (Figura 5.2 a)) demonstram distribuições assimétricas. Com assimetria à direita somente para o canal 665nm e assimetria à esquerda para as demais. Temos ocorrência de 4,76% (2/42) dos pontos de outliers para o canal

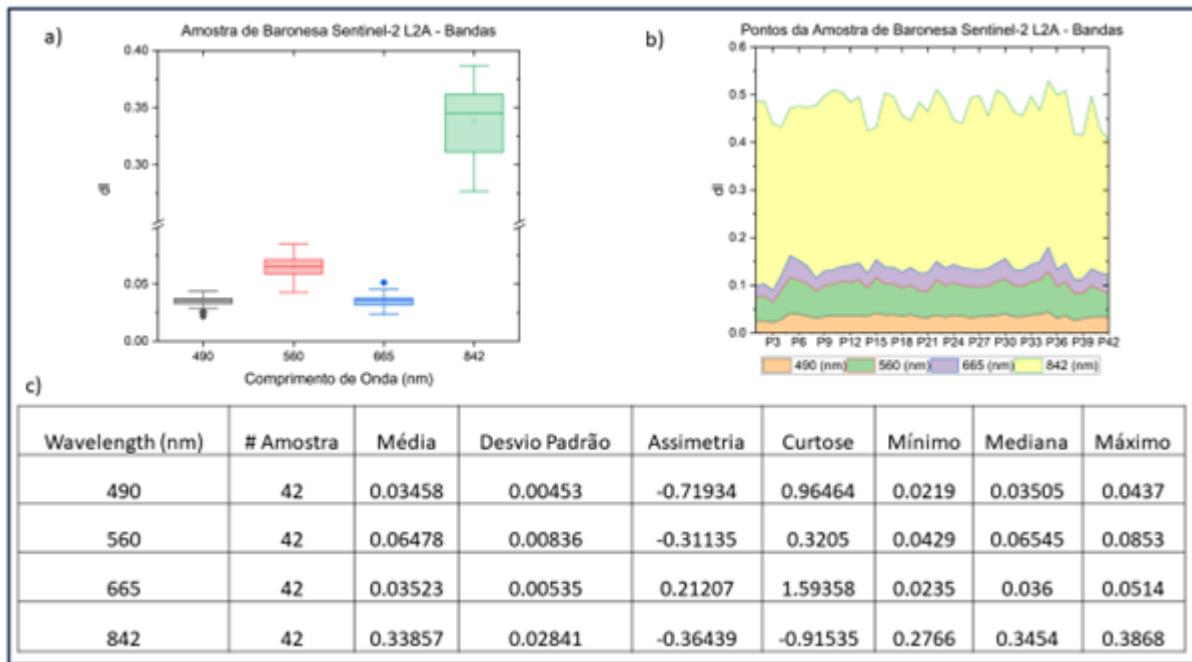


Figura 5.2: a)Boxplot das amostras de *Pontederia crassipes*, b)Valores de reflectância dos pontos com ocorrência de banco de *Pontederia crassipes* c)Estatística descritiva da amostra de ocorrência de *Pontederia crassipes*. Fonte: Autores, 2024

de 490nm e 2,38% (1/42) dos pontos de outliers para o canal de 665nm, enquanto que os canais de 560nm e 842nm não apresentaram outliers. Comparativamente, os valores dos canais 490nm, 560nm e 665nm estão mais próximos, respectivamente, às suas médias. Enquanto que para 842nm possui maior concentração no primeiro quartil. O gráfico de linhas (Figura 5.2 b)) apresenta os valores acumulados das bandas (490nm, 560nm, 665nm e 842nm) em cada uma das amostras onde podendo ser comparados os aumentos ocorridas em cada uma dos pontos e em relação aos demais. A imagem de satélite da área de estudo mostra a ocorrência de bancos de macrófitas distribuído em 42 pontos (Figura 5.3). Para cada um deles foram obtidas suas assinaturas espectrais.

Como primeiro passo, foram realizadas visitas de campo para verificar a presença das *Pontederia crassipes*. Foram visitados três locais na área, para constatar a ocorrência dessa vegetação (-38.998206781085656, -12.28596128494981, -39.050022729263624, -12.508960141568839 e -39.01126850610888, -12.36590271524678). Uma vez identificada sua ocorrência, procedeu-se à delimitação da área de estudo no software QGIS versão 3.36.1, posteriormente, à coleta das imagens foram obtidas por meio do satélite Sentinel S2, site Copernicus Browse Homepage. Para os processamentos das imagens coletadas, utilizou-se o software SNAP versão 10.0, onde foram determinadas as bandas B2, B3, B4 e B8 ($10m^2$) para a reconhecimento espectral das *Pontederia crassipes* e obtenção dos valores para a estatística descritiva (OriginPro 2022). Para cada um dos pontos de amostras foram encontrados os valores correspondentes a cada uma das bandas cuja resolução é de 10^2m (Figura 5.5). Já para as curvas espectrais com o SNAP foram utilizadas as seguintes bandas: B1, B2,

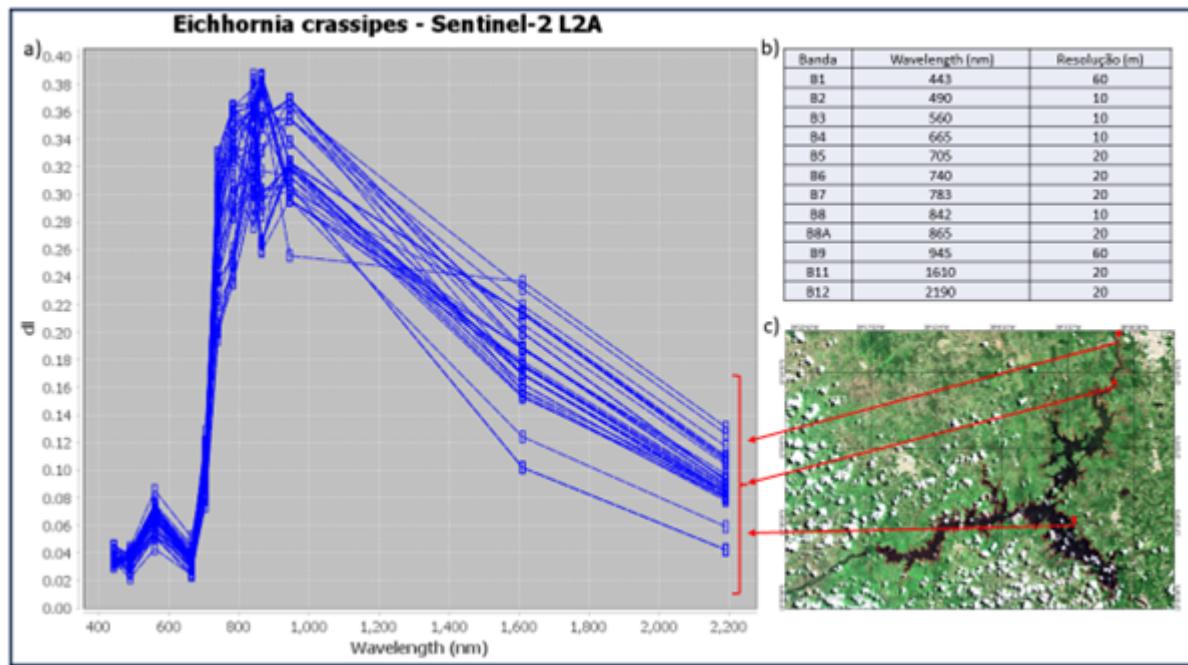


Figura 5.3: a) Visão espectral (SNAP 10.0), b) Bandas espetrais usas na visão espectral e c) Raster com os pontos de observação (Sentinel-2 L2A), 29 de fevereiro de 2024. Fonte: Autores, 2024

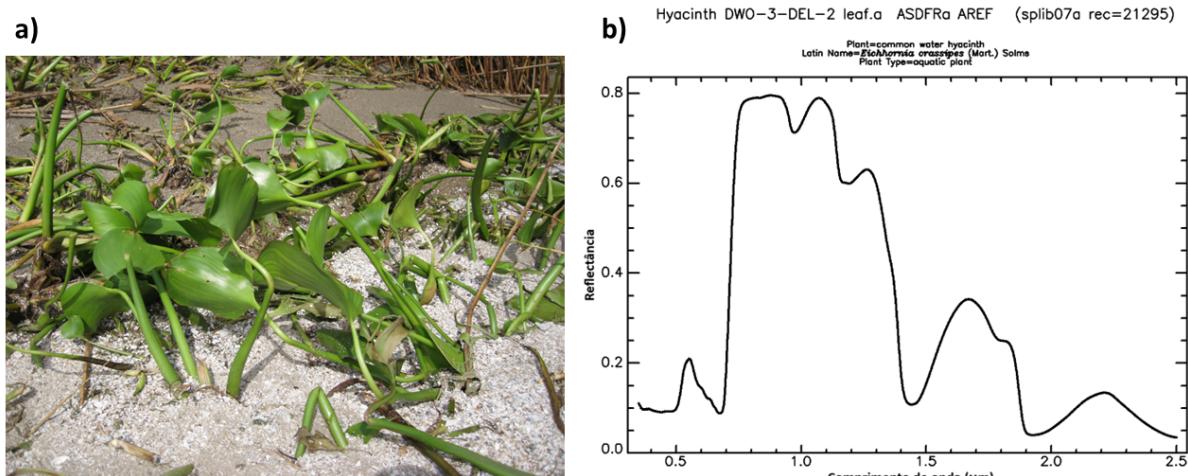


Figura 5.4: a)Foto da *Pontederia crassipes*, b)assinatura espectral *Eichhornia crassipes* classificada atualmente da como *Pontederia crassipes* adaptado Kokaly et al. (2017).

B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B9, B11 e B12 (Figura 5.3).

5.2.2 Resultados e Discussão

A partir do gráfico das bandas espetrais das *Pontederia crassipes* (Sentinel-2 L2A) observamos similaridade na distribuição das assinaturas espetrais de cada ponto quando comparada com a assinatura espectral da *Pontederia crassipes* (Figura 5.4) registrada

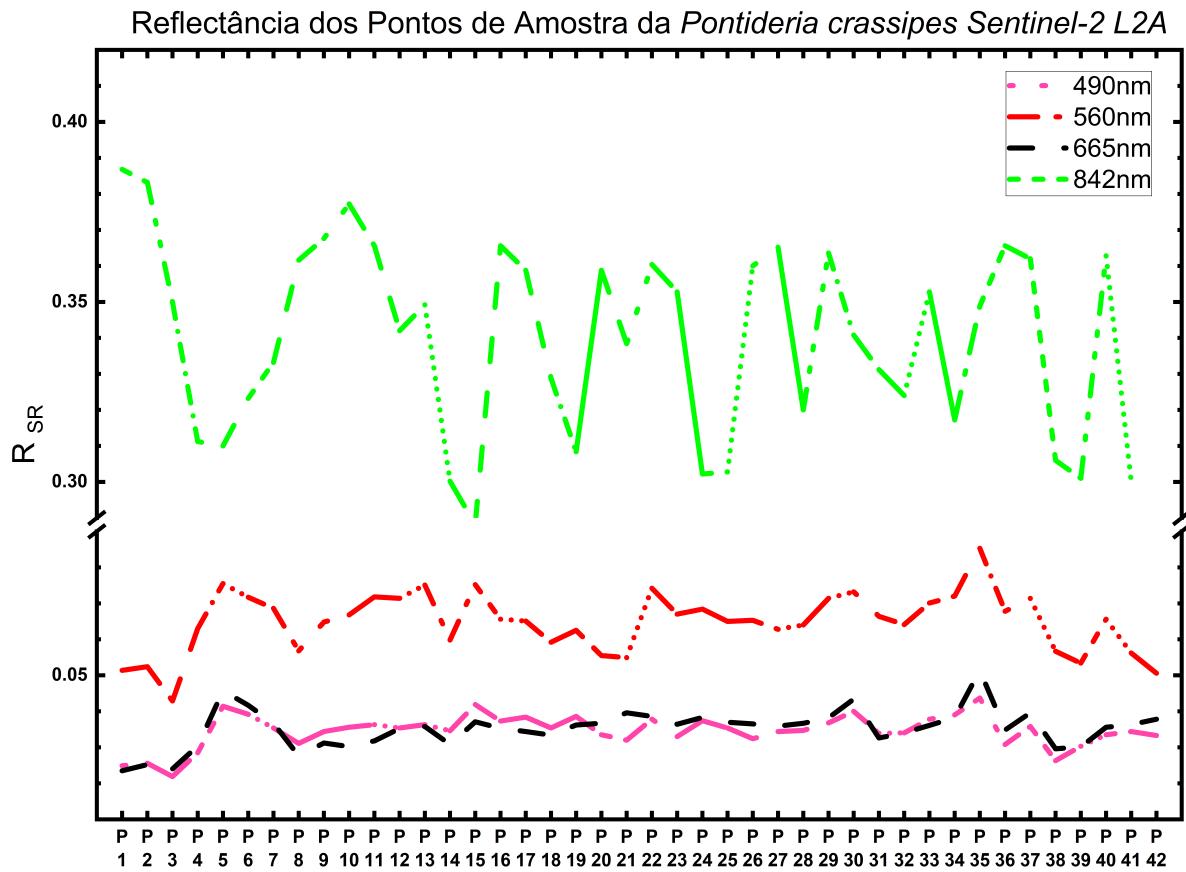


Figura 5.5: Reflectância dos 42 pontos de amostra com suas respectivas bandas espectrais na resolução de $10m^2$ - 490nm, 560nm, 665nm e 842nm) Fontes autores 2024.

na biblioteca espectral da USGS versão 7 (KOKALY et al., 2017). Ao analisar o gráfico notamos que os pontos das amostras para as bandas de 10m apresentam-se mais próximos entre si, resultando em ligações mais estreitas em comparação com as com resolução espacial de 20m e 60 m. Essa proximidade indica a presença de banco de macrófitas e alerta para necessidade do biomonitoramento dessa vegetação.

5.2.3 Conclusão

Conclui-se que foi possível identificar, nas amostras, assinaturas espetrais coerentes com a *Pontederia crassipes* encontrada na biblioteca espectral da USGS versão 7. Desse modo, permitindo identificar a ocorrência de *Pontederia crassipes* no Lago de Pedra do Cavalo por meio de imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2 L2A.

A utilização de satélites mostrou-se uma ferramenta eficaz para o biomonitoramento da vegetação. Possibilitando a detecção e o acompanhamento de focos de proliferação, bem como a consideração de soluções para mitigar a eutrofização em ambientes aquáticos. Para tornar a metodologia mais sofisticada e automatizada, recomenda-se a integração de

algoritmos de aprendizado de máquina com dados de sensoriamento remoto. Melhorando a precisão na identificação de *Pontederia crassipes* e prevendo padrões de crescimento e dispersão. Para monitorar a localização destes bancos que podem prejudicar a captação de água identificar locais com riqueza de nutrientes em regiões do lago.

Conclusões e Considerações Finais

O conceito de segurança hídrica comprehende, no sentido teórico, o de quantificar e qualificar a disponibilidade de água segundo suas quatro dimensões (humana, ecossistêmica, econômica e resiliência). No entanto, na prática, percebemos as complexidades envolvidas quanto aos seus diversos usos, o que dificulta uma simples análise direta que tente abranger de forma integrada esta conjuntura. Por isso, o sensoriamento remoto, com sua visão sinóptica, ao possibilitar estabelecer relações, abrangentes, entre áreas segundo o uso e cobertura da terra inerentes ao seu uso da água, é uma ferramenta promissora.

Neste contexto, por meio deste estudo foi possível de avaliar impactos sofridos no uso e cobertura da terra sobre a área de estudo em que estão presentes demandas por água, no sentido de segurança hídrica em suas quatro dimensões por meio do sensoriamento remoto.

Inicialmente, foi possível identificar a presença de banco de macrófita, *Pontederia crassipes*, por meio de sensoriamento remoto. No entanto, vê-se a necessidade da realização de um maior levantamento de dados em campo, com maior número de amostras com relevância estatística para possibilitar uma classificação e espacialização de sua presença por todo o lago.

Posteriormente, com a análise da dimensão fractal - d_f , foi possível de estabelecer relações entre classes de uso e cobertura da terra - realizadas pelo MapBiomas, apesar das classes possuírem valores de área milhares de vezes diferentes. Aqui, as imagens do Landsat (satélites), ao longo do período de 30 anos, apresentaram alternância entre as áreas de Agropecuária e Floresta, dentro de um mesmo intervalo de tempo, ou seja, enquanto uma aumentava sua d_f a outra diminuía d_f , inclusive com uma escala temporal ~ 11 anos.

Ainda com a d_f , foi possível de visualizar que na classe Área não vegetada, apesar da área sempre crescer, o que é previsto pela literatura, há momentos visíveis de mudança da forma como que esse crescimento ocorre. Desse modo entre em duas faixas de anos entre 1995-2002 e 2013-2017 há um espalhamento da área crescida e em outros não, devido às mudanças da rugosidade levando a entender de como este comportamento acontece. Outro ponto importante, é a possibilidade de se comparar as variações de cada uma das classes, e confrontá-las, por se tratarem de grandezas adimensionais.

Já em outra análise, das correlações de bandas espectrais utilizadas para estimação de índices de vegetação (NDVI e EVI), vê-se que as escala temporais evidenciam va-

riações de comportamentos das bandas espetrais. Por exemplo, a correlação da banda do Green com o NIR são fracamente correlacionadas, inclusive, variando entre correlacionado, fracamente, para anti-correlacionado, fracamente, a depender da escala temporal. Isso demonstra que a atividade fotossintética da planta, e sua correspondente conversão de energia - boa saúde, está relacionadas com o resultado da reflectância do NIR sobre os cloroplastos da folhas, efetivamente. Explicando de uma outra forma, a situações de perda de folhas devido ao estresse de uma estação climática, ao longo do ano, não implica de que esteja a planta doente. Ainda neste estudo de correlação entre bandas, é possível que em uma escala de tempo de, aproximadamente, 30 passagens de revisitação do local pelo satélite, há um comportamento de sazonalidade, possivelmente, com uma memória relativa às estações do ano, que iniciam um novo ciclo, período aproximado de 30 revisitas. Uma vez que, não foram estimadas correlações entre bandas de satélites diferentes, ou seja, os valores de cada respectivas bandas de estudo foram feitas, exclusivamente, com os do mesmo satélite sendo analisada essas correlações ao longo da série temporal de medições. Desse modo, em nada pode ser dito sobre estes valores entre satélites (Landsat 5/7/8). Praticamente, não há diferença entre os índices de vegetação NDVI e EVI para escalas temporais equivalente a 30 revisitações. O implica em dizer que, para escala escala temporal, a utilização de um ou outro índice são equivalentes.

E finalmente, nesta Tese deixamos por meio do sensoriamento e análise estatística, a problemática da segurança hídrica em duas dimensões. Apresentando bons resultados e publicações. Ainda, como perspectivas, tem-se de investigar a qualidade de água em corpos d'água interiores e reservatórios com a presença de banco de macrófitas, por se tratarem de potenciais bioindicadores nestes locais a partir de sensoriamento remoto. Bem como, expandir a análise de dimensão fractal (d_f) para classificações de outras superfícies de uso e cobertura da Terra. Além de, ampliar os estudos sobre as correlações entre séries temporais de bandas espetrais com base nas reflectâncias de materiais terrestres - análises e interpretações.

Anexo



TESTE ESTATÍSTICO DO DCCA CORRELOGRAMO

Basílio Fernandez Fernandez¹ - basilio.fernandez@hotmail.com

Gilney Figueira Zebende² - gfzebende@uefs.br

¹Programa de Pós Grad. em Model. em Ciências da Terra e do Ambiente-Feira de Santana, BA, Brazil

²Universidade Estadual de Feira de Santana, BA, Brazil

Resumo. Neste artigo, através de simulação computacional, testamos estatisticamente o coeficiente de autocorrelação proposto por Zebende e Guedes (2022). Para tanto, utilizamos um pseudo gerador de números aleatórios (RAN4) no intuito de concebermos amostras de séries temporais aleatórias, com o propósito verificarmos a hipótese nula do coeficiente de autocorrelação, ou seja, coeficiente de autocorrelação igual a zero. Aqui, cada amostra terá um tamanho de 10.000 séries temporais para dois tamanhos distintos, $N = 250$ e $N = 500$. Assim, aqui mostraremos os resultados do correlograma para esta simulação em termos de suas médias e desvios padrão, bem como de um mapa gradiente de cores.

Palavras Chave: Séries Temporais, Simulação, Correlograma

1. INTRODUÇÃO

A autocorrelação é a correlação cruzada de uma série temporal (ST) com uma cópia defasada dela própria em função desta defasagem. Além disso, a análise de autocorrelação surge como uma ferramenta matemática e estatística com objetivo de se descobrir padrões. Como exemplo, podemos ter a presença de um sinal periódico obscurecido por um ruído.

Diferentemente, da análise de Fourier que é amplamente empregada no estudo de sinais, este tipo de análise é usada no processamento de sinais no domínio do tempo. Diferentes campos de estudo definem a autocorrelação de maneira diferente e nem todas essas definições são equivalentes. No entanto, o coeficiente de Karl Pearson é, amplamente, conhecido e empregado para análises de STs Pearson (1920); Rodgers and Nicewander (1988). Métodos estatísticos são empregados para se conhecer o comportamento de séries temporais, tais como: a de raiz unitária, estacionários de tendência, autorregressivos e de média móvel. Assim, formas específicas de processos com autocorrelação Box et al. (2015).

Porém, tais análises clássicas são bem aplicadas em séries temporais estacionária, e na sua grande maioria tais séries são não estacionárias. Para estes casos, de comportamento não estacionário, outras alternativas (métodos) de coeficientes deverão ser aplicadas, para a obtenção de resultados mais realistas. Nesta direção, aqui neste artigo propomos realizar uma análise estatística (simulação) em torno do coeficiente de autocorrelação, ρ_{DCCA}^a , proposto por

Zebende and Guedes (2022), verificando assim sua robustez para análise de autocorrelação, resultando ao seu final em um mapa de auto-correlação.

Neste estudo, dividimos este artigo em seções, a saber: na seção 2. apresentamos a metodologia e os dados simulados para o estudo, na seção 3. temos os resultados da simulação e finalmente na seção 4. concluímos o artigo.

2. METODOLOGIA E DADOS

2.1 Auto-correlação clássica de Pearson

A análise de séries temporais tem sido uma importante metodologia para a ciência investigar o comportamento ao longo do tempo de um objeto de estudo Box et al. (2015); Chatfield and Xing (2019). Logo, a partir de uma dada variável $\{u_t\}$ (temperatura, pluviosidade, radiância, mercado de capitais, etc.), sucessivos valores podem ser medidos ao longo do tempo, formando uma série temporal, que muitas das vezes pode estar correlacionada entre si. Tal propriedade ou característica, pode ser analisada no domínio do tempo ou da frequência, por modelos e métodos estatísticos. O coeficiente proposto por Pearson (1895, 1896) mede a correlação linear entre duas STs. Assim, a autocorrelação clássica, introduzida pelo coeficiente de Pearson, pode ser representado por $\rho(\tau)$, definido como:

$$\rho(\tau) \equiv \frac{Cov(u_t, u_{t+\tau})}{\sqrt{Var(u_t)Var(u_{t+\tau})}} \quad (1)$$

Aqui, τ representa a defasagem temporal, $Cov(u_t, u_{t+\tau})$ a covariância de u_t com $u_{t+\tau}$ e $Var(u_t)$ a sua variância. Como principal característica, tem-se que $-1 \leq \rho(\tau) \leq 1$, identificativo assim o sinal da autocorrelação em negativo/positivo (antipersistência/persistência).

Porém, para séries temporais não estacionárias (caso usualmente mais encontrado no dia a dia da pesquisa), essa análise proposta por Pearson não é robusta. Para analisar estas séries não estacionárias, métodos mais robustos deveriam ser empregados, tais como exemplo: *Detrended Fluctuation Analysis* - DFA Peng et al. (1994, 1995), *Detrended Cross-Correlation analysis Analysis* - DCCA Podobnik and Stanley (2008) métodos, e o *Detrended Cross-Correlation coefficient*, ρ_{DCCA} Zebende (2011); Kristoufek (2014); Zebende and da Silva-Filho (2018) coeficientes. Logo a seguir, apresentamos o novo coeficiente de autocorrelação baseado em métodos estatísticos robustos, que será aqui testado, totalmente, por simulação computacional.

2.2 Coeficiente de Autocorrelação sem Tendência - $\rho_{DCCA}^a(\tau, n)$

Considere uma dada série temporal não estacionária, $\{u_t\}$, com $t = 1, 2, 3, \dots, N$ (tamanho total da série). Uma nova série temporal é criada (clonada) com os mesmos elementos da série original, porém com seus valores defasados, por um tempo τ . Logo, o coeficiente de autocorrelação sem tendência é definido segundo Zebende and Guedes (2022) por:

$$\rho_{DCCA}^a(\tau, n) \equiv \frac{F_{\{u_t : u_{t+\tau}\}}^2(n)}{F_{\{u_t\}}(n) F_{\{u_{t+\tau}\}}(n)} \quad (2)$$

Abaixo, definimos as funções de flutuação $F_{\{u_t : u_{t+\tau}\}}^2$, $F_{\{u_t\}}$ e $F_{\{u_{t+\tau}\}}$, no algoritmo de cálculo para o coeficiente ρ_{DCCA}^a :

1. Em primeiro lugar clonamos a série original (que será defasada) e escolhemos uma defasagem temporal τ , com $0 \leq \tau \leq N/2$.
2. A série temporal original e a série temporal defasada são integradas até a posição $(N - \tau)$, com $k = 1, 2, 3, \dots, (N - \tau)$. :

$$u_k = \sum_{t=1}^k (u_t - \langle u \rangle) \quad (3)$$

e

$$u_{\tau k} = \sum_{t=1}^k (u_{t+\tau} - \langle u_{\tau} \rangle) \quad (4)$$

Aqui $\langle u \rangle$ e $\langle u_{\tau} \rangle$ representam os valores médios de $\{u_t\}$ e $\{u_{t+\tau}\}$, respectivamente;

3. Com os valores de u_k e $u_{\tau k}$ formamos duas novas séries temporárias, que serão divididas em caixas sobrepostas de mesmo tamanho n entre 4 e $(N - n - \tau)$. Cada caixa com $(n + 1)$ valores. Para ambas séries temporais, cada caixa inicia em i e finaliza em $(i + n)$. Uma tendência local (na caixa) é obtida pelo método dos mínimos quadrados (aqui com um ajuste linear) por, $u_i(k)$ e $u_{\tau i}(k)$;
4. A linha de tendência de cada caixa é obtida a partir da diferença entre o valor original e o da série defasada. Desse modo é calculado a covariância dos resíduos pela Eq.5,

$$f_{u,\tau}^2(n, i) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=i}^{i+n} [u_k - u_i(k)] [u_{\tau k} - u_{\tau i}(k)] \quad (5)$$

com $4 \leq n \leq \frac{N-\tau}{4}$;

5. A média dos valores para todas as caixas sobrepostas é calculado a fim de se obter uma novo valor de função de covariância (Eq.6),

$$F_{\{u_t : u_{t+\tau}\}}^2(n) = \frac{1}{N-n-\tau} \sum_{i=1}^{N-n-\tau} f_{u,\tau}^2(n, i); \quad (6)$$

6. Por fim, o coeficiente de autocorrelação, com o tempo de defasagem τ e a escala temporal n , é definido por:

$$\rho_{DCCA}^a(\tau, n) \equiv \frac{F_{\{u_t : u_{t+\tau}\}}^2(n)}{F_{\{u_t\}}(n) F_{\{u_{t+\tau}\}}(n)} \quad (7)$$

Um exemplo para o cálculo do coeficiente de correlação cruzada, ρ_{DCCA} , proposto por Zebende (2011) foi reproduzido em um vídeo no YouTube (veja *link* abaixo):

<https://www.youtube.com/watch?v=RQL7Db74yG0&t=216s>

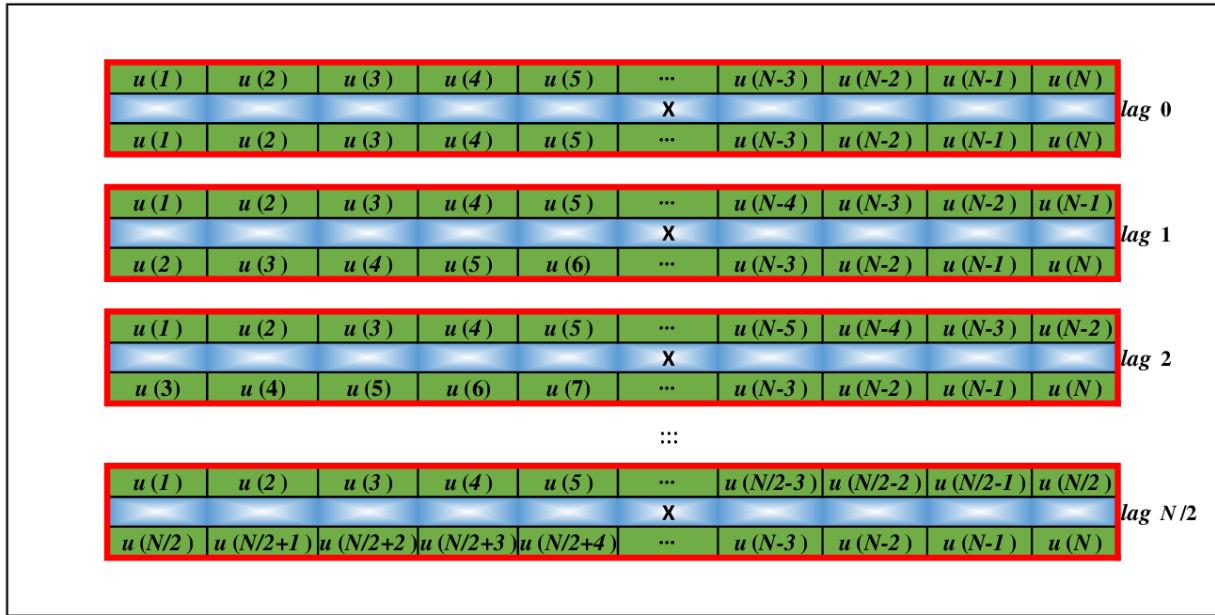


Figura 1: Diagrama para as defasagens temporais, onde *lag* representa a defasagem temporal da série original em relação a série clonada.

Neste breve vídeo, são apresentados, claramente, alguns dos passos do algoritmo que foi, totalmente, detalhado aqui, anteriormente.

O coeficiente, $\rho_{DCCA}^a(\tau, n)$ depende da defasagem temporal τ e da escala temporal n (tamanho da caixa), e seus valores variam entre $-1 \leq \rho_{DCCA}^a \leq 1$. O valor de $\rho_{DCCA}^a = 0$ significa que não existe autocorrelação na série, caso contrário ρ_{DCCA}^a se divide em valores positivos e negativos. Assim, o valor de ρ_{DCCA}^a pode ser classificado tendo em consideração o seu nível de intensidade, como por exemplo de acordo com a Tabela 1, veja Zebende et al. (2019); Podobnik et al. (2011).

Tabela 1: Níveis de Correlação Cruzada.

ρ_{DCCA}^a			
Muito Fraca	Fraca	Forte	Muito Forte
$\pm 0.000 \mapsto \pm 0.283$	$\pm 0.283 \mapsto \pm 0.333$	$\pm 0.333 \mapsto \pm 0.666$	$\pm 0.666 \mapsto \pm 1.000$

Desse modo, de acordo com a base metodológica apresentada, passaremos a expor as simulações realizadas e, por conseguinte, os resultados.

Fechando assim a parte teórica, logo abaixo destacamos a obtenção de nossos dados a partir de simulações computacional.

2.3 Dados Simulados

A fim de testarmos a hipótese nula para o coeficiente, de semelhante modo utilizado em Guedes et al. (2018); Podobnik et al. (2011), ou seja, $\rho_{DCCA}^a = 0$, dado na Eq.7, simulamos duas amostras com 10.000 séries temporais aleatórias cada, cujos valores variam entre 0 e 1 (inclusive). Estas duas amostras foram feitas para que nós testássemos o efeito de tamanho da séries temporais, ou seja, uma amostra tem tamanho $N = 250$ e a outra tem tamanho $N = 500$.

Aqui utilizamos a rotina **RAN4**, que gera excelentes números aleatórios a partir de uma dada semente aleatória. Ver tal implementação no capítulo 7, listado em Vetterling et al. (1999). Portanto, para cada série temporal aleatória (nas suas duas amostras), calculamos os valores de ρ_{DCCA}^a como funções de τ e n , obtendo assim um conjunto de resultados que foram modelados posteriormente, isto no sentido de obtermos seus valores médios

$$\langle \rho_{DCCA}^a(n) \rangle \quad (8)$$

e os respectivos desvios padrões

$$\langle sd(\rho_{DCCA}^a(n)) \rangle \quad (9)$$

como veremos logo próxima seção com os resultados.

3. RESULTADOS

Portanto, para cada um dos 10.000 arquivos, de ρ_{DCCA}^a como função da defasagem temporal τ (*lag*) e da escala temporal n , calculamos o valor médio e seu respectivo desvio padrão, equações 8 e 9. Logo na Fig.2 apresentamos $\langle sd(\rho_{DCCA}^a(n)) \rangle$ para a amostra de tamanho $N = 250$. Colocamos os resultados do coeficiente de autocorrelação em um mapa de cores, onde: o valor azul significa perfeita autocorrelação, pois $\rho_{DCCA}^a = 1$, o valor vermelho significa a anti-perfeita autocorrelação, pois $\rho_{DCCA}^a = -1$ e o branco a ausência de autocorrelação, pois $\rho_{DCCA}^a = 0$. Como estamos testando a hipótese nula, deveríamos ter em teoria $\rho_{DCCA}^a = 0$ para todas as defasagens e escalas temporais. Porém, na prática isto não ocorre. Nota-se que, para pequenas defasagens - τ (*lag*), e grandes escalas temporais - n ; $\rho_{DCCA}^a \rightarrow 1$. Mas, no geral $\rho_{DCCA}^a \simeq 0$. Além disso, calculamos o valor médio e o seu desvio padrão, para verificarmos a dispersão dos valores de ρ_{DCCA}^a com relação à sua média. Os resultados para o desvio padrão se encontram na Fig. 3.

Neste figura é possível identificar os locais onde há maior dispersão em relação aos valores médios (parte mais vermelha). Agora, para verificar o efeito de tamanho na estatística, calculamos os valores de ρ_{DCCA}^a para a amostra de tamanho $N = 500$. Os resultados para o valor médio podem ser vistos na Fig.4.

Nesta figura vemos que há uma maior parte branca, evidenciando que na sua maior parte o valor de $\rho_{DCCA}^a \simeq 0$, confirmando a hipótese nula do coeficiente para esta simulação. Na Fig.5 temos os resultados para o desvio padrão de ρ_{DCCA}^a .

Que também mostra valores mais perto do branco, ou seja, menos desvio do seu valor médio.

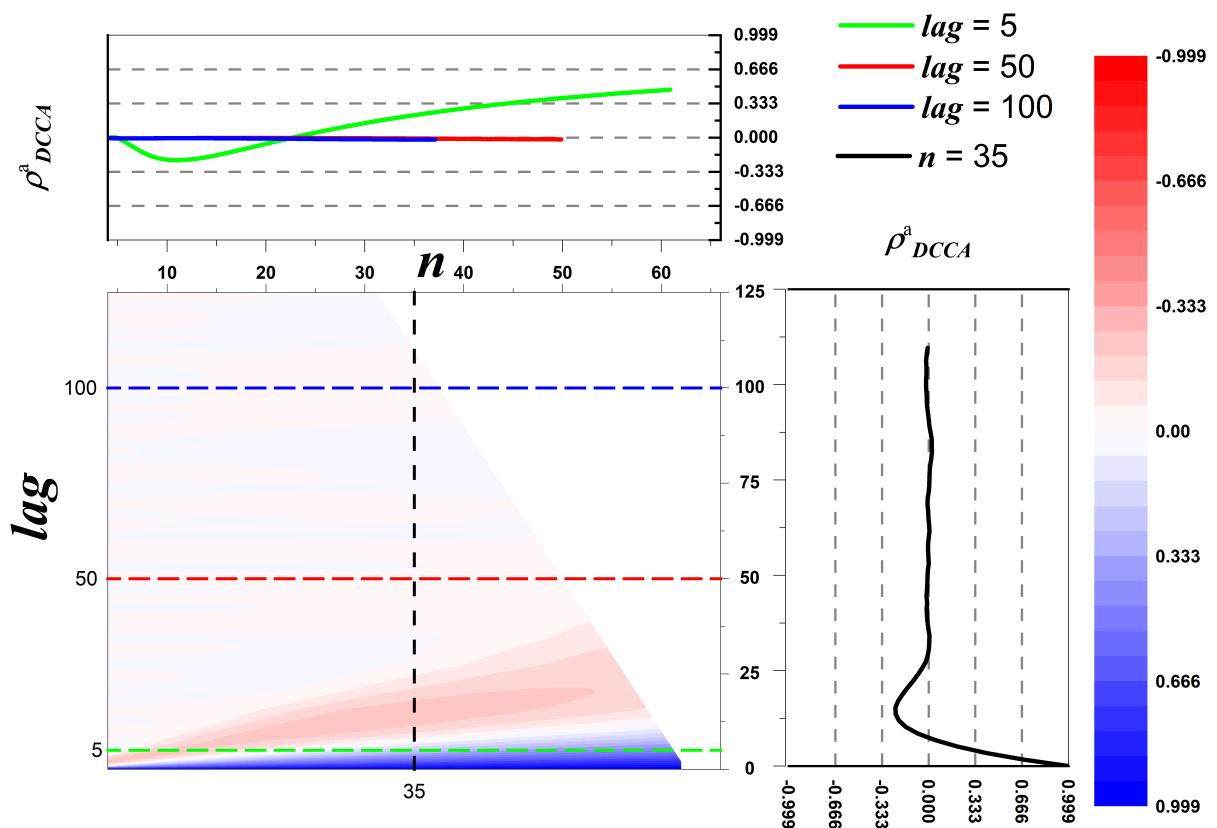


Figura 2: Valores médios de ρ_{DCCA}^a calculados para uma amostra de 10.000 séries aleatórias com $N = 250$ em função da defasagem temporal, lag (eixo vertical), e da escala temporal, n (eixo horizontal). Os gráficos, acima e do lado direito do Mapa, são os valores para ρ_{DCCA}^a fixos em $n = 35$ (linha pontilhada preta), ou na defasagem temporal $lag = 5 : 50 : 100$ (linhas pontilhadas verde, vermelha e azul).

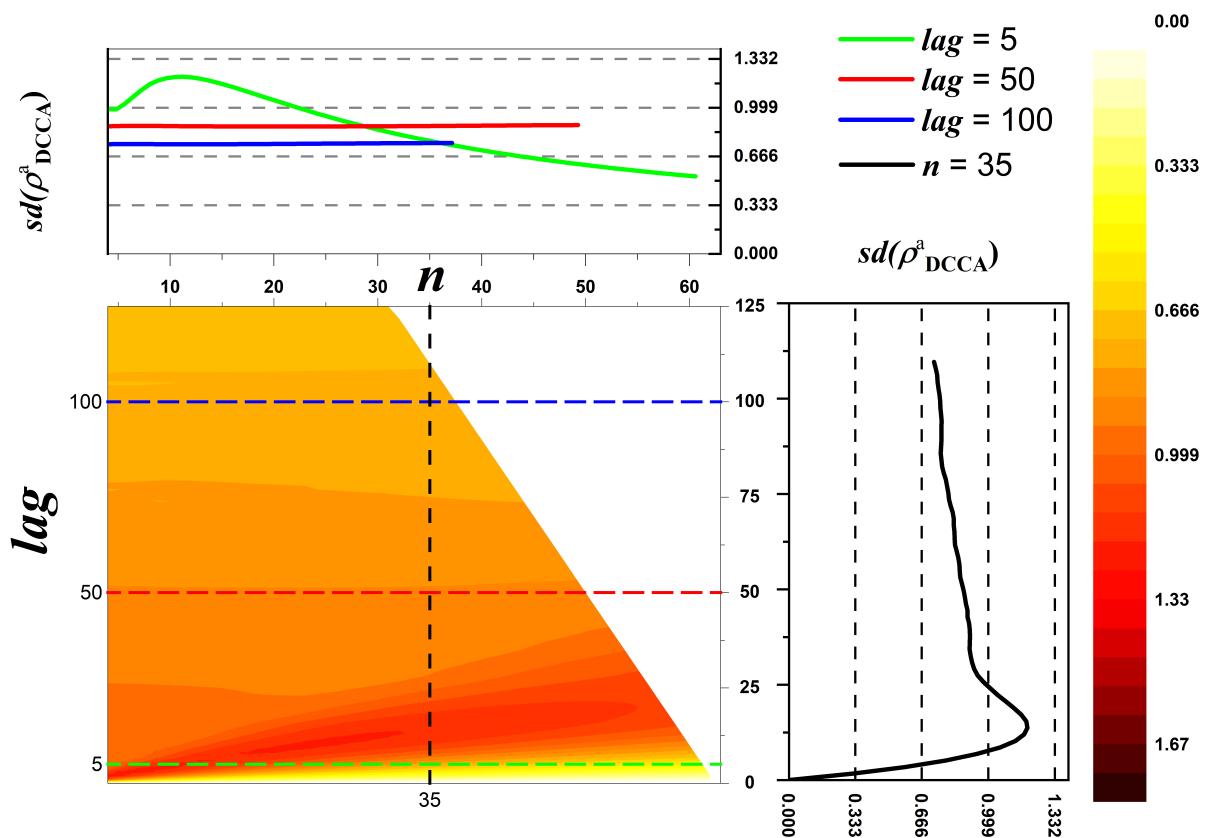


Figura 3: Desvio padrão de ρ^a_{DCCA} para uma amostra de 10.000 séries aleatórias com $N = 250$ em função da defasagem temporal, lag (eixo vertical), e da escala temporal, n (eixo horizontal). Os painéis, acima e do lado direito do Mapa, são os valores para ρ^a_{DCCA} fixos em $n = 35$ (linha pontilhada preta), ou na defasagem temporal $lag = 5 : 50 : 100$ (linhas pontilhadas verde, vermelha e azul).

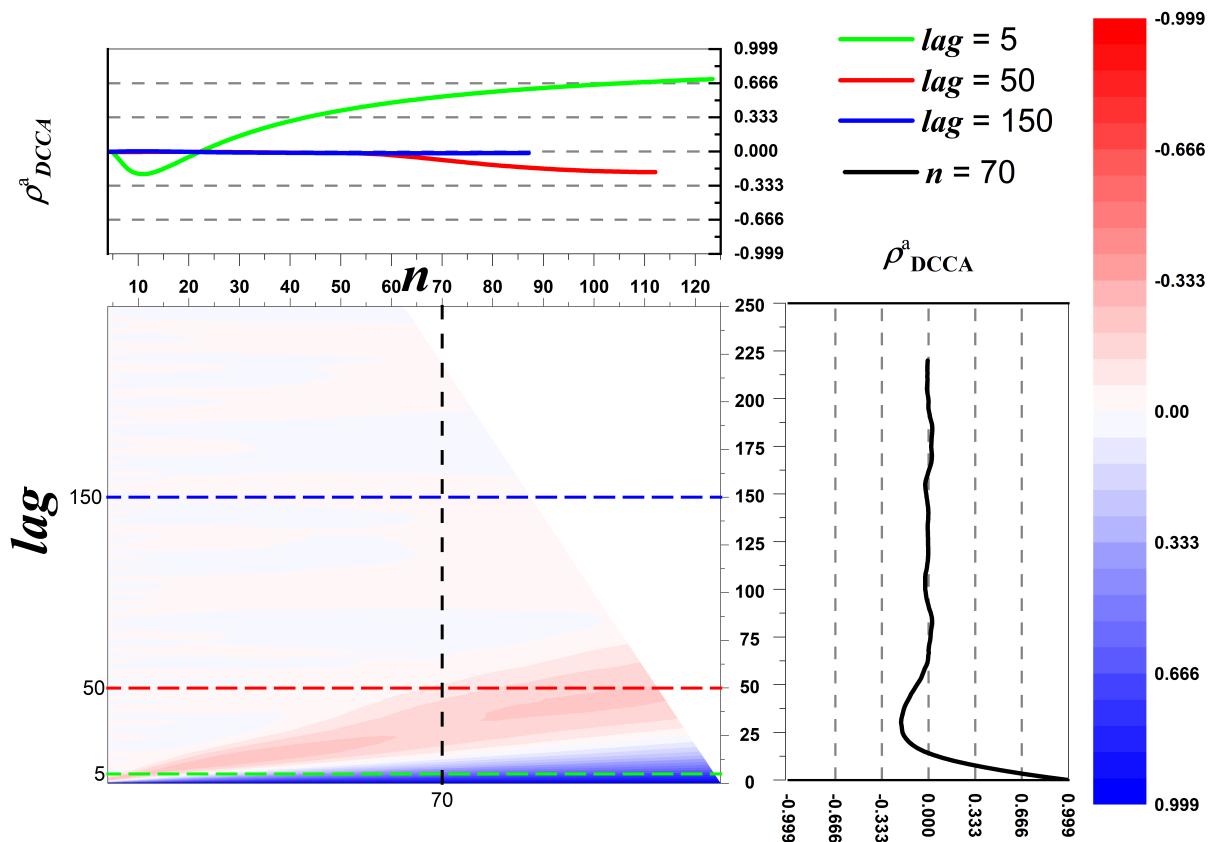


Figura 4: Valores médios de ρ_{DCCA}^a calculados para uma amostra de 10.000 séries aleatórias com $N = 500$ em função da defasagem temporal, lag (eixo vertical), e da escala temporal, n (eixo horizontal). Os gráficos, acima e do lado direito do Mapa, são os valores para ρ_{DCCA}^a fixos em $n = 35$ (linha preta), ou na defasagem temporal $lag = 5 : 50 : 100$ (linhas pontilhadas verde, vermelha e azul).

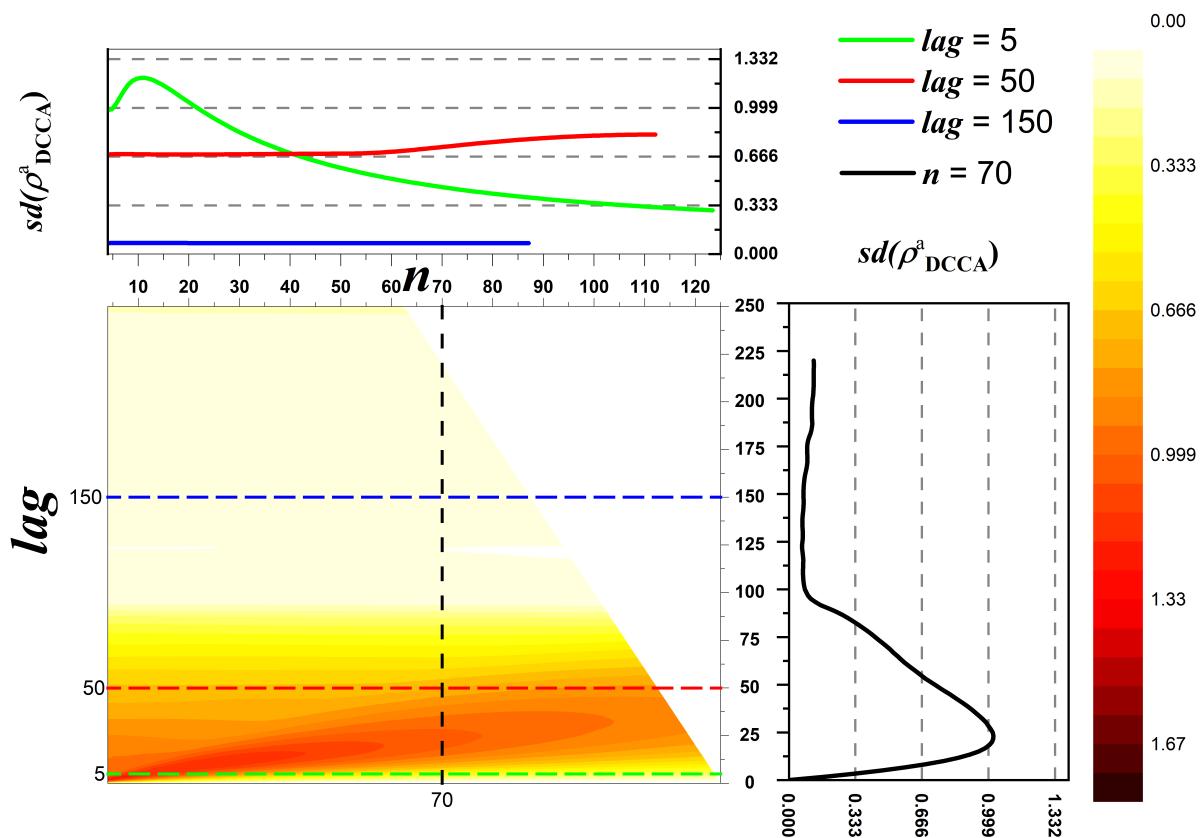


Figura 5: Desvio padrão de ρ_{DCCA}^a calculados para uma amostra de 10.000 séries aleatórias com $N = 500$ em função da defasagem temporal, lag (eixo vertical), e da escala temporal, n (eixo horizontal). Os gráficos, acima e do lado direito do Mapa, são os valores para ρ_{DCCA}^a fixos em $n = 70$ (linha preta), ou na defasagem temporal $lag = 5 : 50 : 150$ (linhas pontilhadas verde, vermelha e azul).

4. CONCLUSÃO

Neste artigo, propomos um teste estatístico no coeficiente de autocorrelação, ρ_{DCCA}^a , isto através da hipótese nula do mesmo. Para darmos seguimento a esta proposta, uma simulação computacional foi desenvolvida para se montar duas amostras de tamanhos diferentes (com $N = 250$ e $N = 500$) de séries temporais aleatórias, cada amostra contendo 10.000 séries. Como resultado, calculamos os valores médios e o desvio padrão do ρ_{DCCA}^a calculado para as amostras. Tais resultados foram apresentados em mapas de cores. Identificamos que a hipótese nula foi bem apresentada e robusta nos seus resultados para a amostra de tamanho $N = 500$, ao passo que a amostra de tamanho $N = 250$ ficou deficiente para pequenas defasagens e grandes escalas temporais.

Agradecimentos

B. F. Fernandez agradece à FUNTITEC (Fundação de Tecnologia da Informação Telec. Egberto Costa) e G. F. Zebende agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (Grant 310136/2020-2). Também agradecemos ao Dr. Paulo Murilo Castro de Oliveira, grande Físico Estatístico (*in memoriam*).

Referências

- George EP Box, Gwilym M Jenkins, Gregory C Reinsel, and Greta M Ljung. *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons, 2015.
- Chris Chatfield and Haipeng Xing. *The analysis of time series: an introduction with R*. CRC press, 2019.
- EF Guedes, AA Brito, FM Oliveira Filho, BF Fernandez, APN de Castro, AM da Silva Filho, and GF Zebende. Statistical test for $\Delta\rho_{DCCA}$ cross-correlation coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 501:134–140, 2018.
- Ladislav Kristoufek. Measuring correlations between non-stationary series with dcca coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 402:291–298, 2014.
- Karl Pearson. Vii. note on regression and inheritance in the case of two parents. *proceedings of the royal society of London*, 58(347-352):240–242, 1895.
- Karl Pearson. Vii. mathematical contributions to the theory of evolution. iii. regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, (187):253–318, 1896.
- Karl Pearson. Notes on the history of correlation. *Biometrika*, 13(1):25–45, 1920.
- C.-K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys. Rev. E*, 49:1685–1689, 1994.
- C-K Peng, SV Buldyrev, AL Goldberger, S Havlin, RN Mantegna, M Simons, and HE Stanley. Statistical properties of dna sequences. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 221(1-3):180–192, 1995.
- B. Podobnik and H. E. Stanley. Detrended cross-correlation analysis: A new method for analyzing two nonstationary time series. *Phys. Rev. Lett*, 100:1–4, 2008.
- Boris Podobnik, Zhi-Qiang Jiang, Wei-Xing Zhou, and H Eugene Stanley. Statistical tests for power-law cross-correlated processes. *Physical Review E*, 84(6):066118, 2011.

Joseph Lee Rodgers and W. Alan Nicewander. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, 42(1):59–66, 1988. doi: 10.1080/00031305.1988.10475524.

William T Vetterling, Saul A Teukolsky, William H Press, and Brian P Flannery. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*, volume 1. Cambridge university press, 2 edition, 1999. ISBN 0-521-43108-5.

G. F. Zebende. DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(4):614–618, 2011.

G.F. Zebende and A.M. da Silva-Filho. Detrended multiple cross-correlation coefficient. *Physica A*, 510:91 – 97, 2018. ISSN 0378-4371.

GF Zebende and EF Guedes. Detrended correlogram method for non-stationary time-series analysis. *Fluctuation and Noise Letters*, 21(02):2250012, 2022.

GF Zebende, AA Brito, and AP Castro. DCCA cross-correlation analysis in time-series with removed parts. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, page 123472, 2019.

STATISTICAL TEST FOR DCCA CORRELOGRAM

Abstract. In this paper, through computer simulation, we statistically test the auto-correlation coefficient proposed by Zebende and Guedes (2022). For that, we used a pseudo-random number generator (RAN4) to design samples of random time-series, to verify the null hypothesis of the auto-correlation coefficient, that is, the auto-correlation coefficient equal to zero. Here, each sample will have a size of 10,000 time-series for two different sizes, $N = 250$ and $N = 500$. Thus, here we will show the correlogram results for this simulation in terms of their means and standard deviations, as well as a color gradient map.

Keywords: Time Series, Simulation, Corrgram

ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A ALAGAMENTO EM BAIRROS DE FEIRA DE SANTANA - BA

*Basílio Fernandez Fernandez*¹; *Rosângela Leal Santos*²; *Bethsaide Souza Santos*³
& *Gilney Figueira Zebende*⁴

Palavras-Chave – Eventos Extremos, Cidades Resilientes, Inundação.

INTRODUÇÃO

A informação de susceptibilidade a alagamentos em zonas urbanas é fundamental para a construção de cidades resilientes. Sobretudo para mitigar desastres na ocorrência de eventos extremos. Os diferentes contextos dos bairros podem agravar ou atenuar inundações por precipitações. Este estudo tem como objetivo analisar esse risco a partir do uso do aplicativo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND). (v. 5.12.1). Cenários são simulados para a obtenção das áreas de risco em cada um dos bairros observados. Nestas simulações, foram verificados, por meio de pontos de ocorrências registradas pela Defesa Civil da cidade de Feira de Santana nos anos de 2021, 2022, 2023 e 2024. Este estudo tem o objetivo de validar a acuracidade dos resultados obtidos pelo aplicativo HAND na classificação de área de risco de alagamento para Segurança Hídrica.

METODOLOGIA

O presente trabalho se desenvolveu segundo a metodologia proposta por Rennó *et al.* (2008) e Nobre *et. al* (2011), com o uso do aplicativo HAND. Este se caracteriza por ser uma métrica para quantificar a elevação relativa de um ponto em relação ao seu ponto de drenagem mais próximo, o qual é calculado a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e extração dos vetores de drenagem. O HAND foi desenvolvido visando auxiliar na modelagem de inundações e na classificação de paisagens em termos de potencial de acúmulo de água e suscetibilidade a inundações.

Utilizou-se, como ponto inicial, a imagem obtida do Alos Palsar - AP_15680_FBS_F6940_RT1.dem, com 12,5m de resolução espacial, a partir da qual foi possível simular as classes de risco de alagamento.

Utilizou-se duas variações para a área mínima de acumulação de contribuição. Esta área também denominada de *Threshold* ou limiar representa o tamanho da área de captação (m^2) a partir o qual ocorrerá um escoamento concentrado (Rennó *et al.* 2008). Para facilitar a escolha destes valores para testes, utilizou-se como constante de *Threshold* ($\tau = 153,789$). Foram escolhidos dois valores para testes (500 τm^2 e 2000 τm^2) que possuíssem maior aderência à realidade observada em amostragem de campo para os 44 bairros da área urbana de Feira de Santana (BA).

O *Quadro 1* apresenta os dados relativos aos bairros que tiveram ocorrência de alagamento (SEPREV-PMFS 2024) durante este período de estudo. Tiveram registros em 21 dos 44 bairros aqui apresentados pelo mapa da área de estudo (*Figura 1*). Conforme descrito por FRITZ e BINDA (2015) a água que precipita no solo urbano, dada uma impermeabilização provocada por construções, ainda escoa em direção aos canais fluviais, uma vez que não seja interceptada ou infiltrada. Podendo ser ao longo desse caminho acumulada, originando alagamentos.

1) FUNTITEC, Universidade Estadual de Feira de Santana (PPGM - UEFS), basilio.fernandez@hotmail.com

2) UEFS, Universidade Estadual de Feira de Santana (PPGM - UEFS), rosaleal@uefs.br

3) UEFS, Universidade Estadual de Feira de Santana (PPGM - UEFS), bssantos@uefs.br

4) UEFS, Universidade Estadual de Feira de Santana (PPGM - UEFS), gfzebende@uefs.br



Quadro 1 – Lista de bairros com registros de alagamentos entre os anos 2021 e 2024 (SEPRev-PMFS)

Id	Área (km²)	Perím. (km)	Bairro	#*
1	6.70	14.37	Tomba	14
2	8.70	16.16	Mangabeira	12
3	8.22	14.74	Campo Limpo	11
4	1.46	4.99	Cidade Nova	7
5	1.29	5.39	Baraunas	6
6	3.18	7.16	Brasilia	5
7	2.24	7.47	Muchila	3
8	2.01	6.01	Queimadinha	3
9	1.22	4.47	Lagoa Grande	3
10	0.67	3.49	Rua Nova	3
11	8.95	14.19	Papagaio	2
12	1.58	6.32	Columbi	2
13	7.25	11.18	Gabriela	2
14	3.08	9.62	35º BI	1
15	3.43	8.64	SIM	1
16	1.88	7.11	Pedra do Descanso	1
17	2.94	7.24	Centro	1
18	5.19	11.68	Stº Antonio dos P.	1
19	2.59	6.81	Parque Ipe	1
20	0.64	4.41	Sobradinho	1
21	0.54	3.86	Pq, Getulio Vargas	1

*número de pontos de ocorrência no bairro.

Quadro 2 –Percentuais de ocorrência de alagamento registrados pela Defesa Civil em cada classe de risco simulada. Modelo ajustado com base na área mínima de acumulação de contribuição para iniciar a drenagem pelo ponto alto mais próximo (limiar).

Risco (limiar 500 τ m²)	#	%	% Acum.
Muito alta (0m a 1m)	13	16.05%	16.05%
Alta (1m a 5m)	44	54.32%	70,37%
Média (5m a 10m)	18	22.22%	92.59%
Baixa (10m a 25m)	6	7,41%	100,00%
Muito baixa (25m a 100m)	0	0,00%	100.00%
Total	81	100.00%	

Risco (limiar 2000 τ m²)	#	%	% Acum.
Muito alta (0m a 1m)	8	9.88%	9.88%
Alta (1m a 5m)	48	59.26%	69.14%
Média (5m a 10m)	16	19.75%	88.89%
Baixa (10m a 25m)	8	9.88%	98.77%
Muito baixa (25m a 100m)	1	1.23%	100.00%
Total	81	100.00%	

a) b)

A partir das áreas de classe de risco obtidas, de semelhante maneira como proposto por JOHNSON *et. al* (2019) e os georreferenciamento dos pontos de ocorrência foram feitos os *Quadro 2 a) e b)* com os respectivos percentuais de acertos - considerando as classes hierárquicas de susceptibilidade média, alta e muito alta de probabilidade. O *Quadro 3* apresenta um estudo de correlação entre os

pontos de ocorrência que tiveram alagamento (em cada bairro) e suas respectivas áreas - em cada uma das classes de susceptibilidades (modeladas usando o HAND), área total e perímetros, corroborando com as análises realizadas.

RESULTADOS

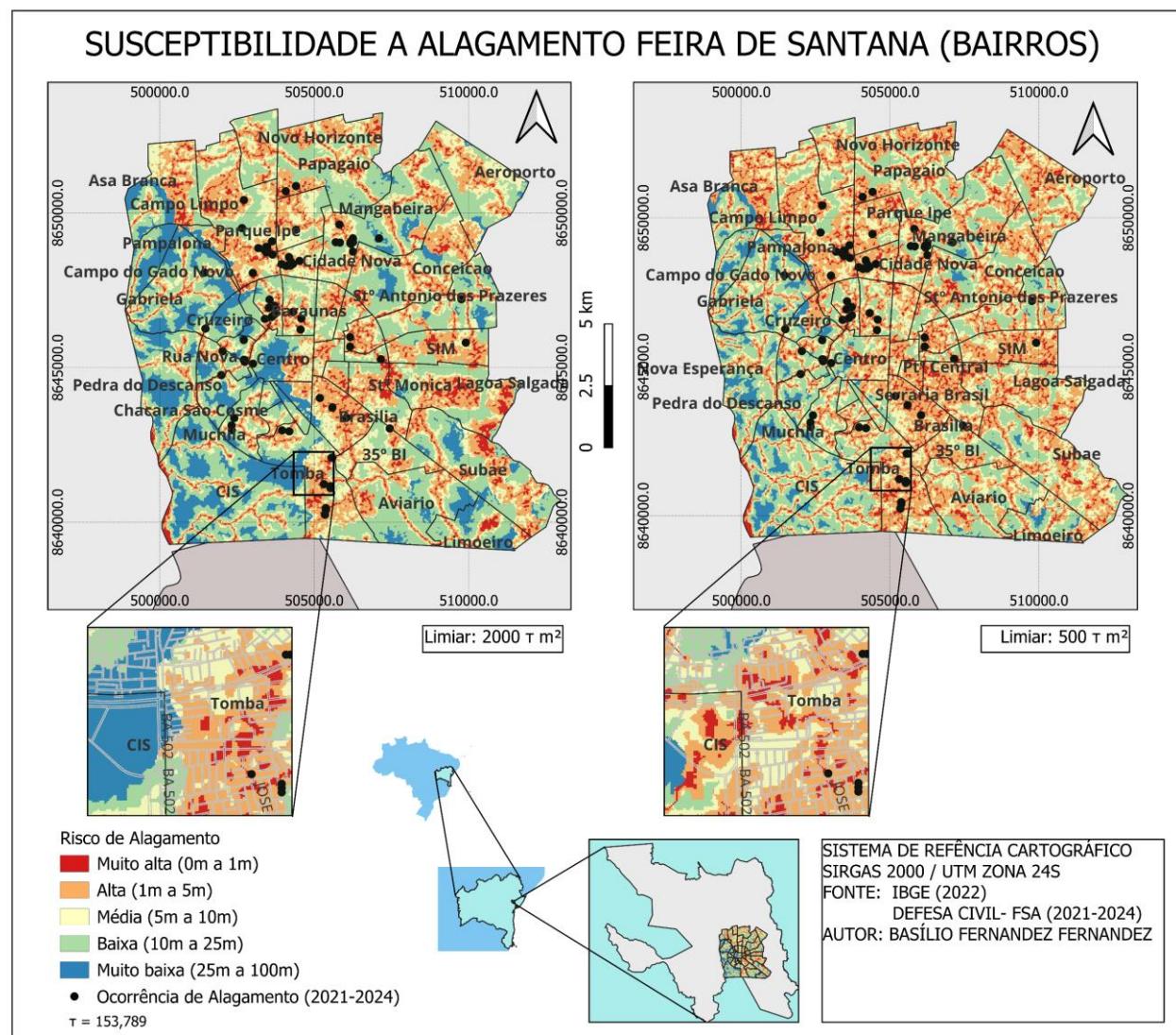


Figura 1. Bairros de Feira de Santana – Bahia classificados por risco de alagamento - HAND (5.12.1- Limiar 500 $\tau \text{ m}^2$ e 2000 $\tau \text{ m}^2$).

Análise de correlação¹ com os pontos de ocorrência

Quadro 3 – Correlação entre os pontos de alagamentos e áreas ou perímetros

Limiar	Área ²	Perímetro ²	Muito alta ³	Alta ³	Média ³	Baixa ³	Muito baixa ³
500 $\tau \text{ m}^2$	0.51	0.55	0.61	0.61	0.57	0.20	-0.09
2000 $\tau \text{ m}^2$	0.51	0.55	0.56	0.60	0.63	0.28	-0.01

¹Cálculo de Correlação (Pearson)

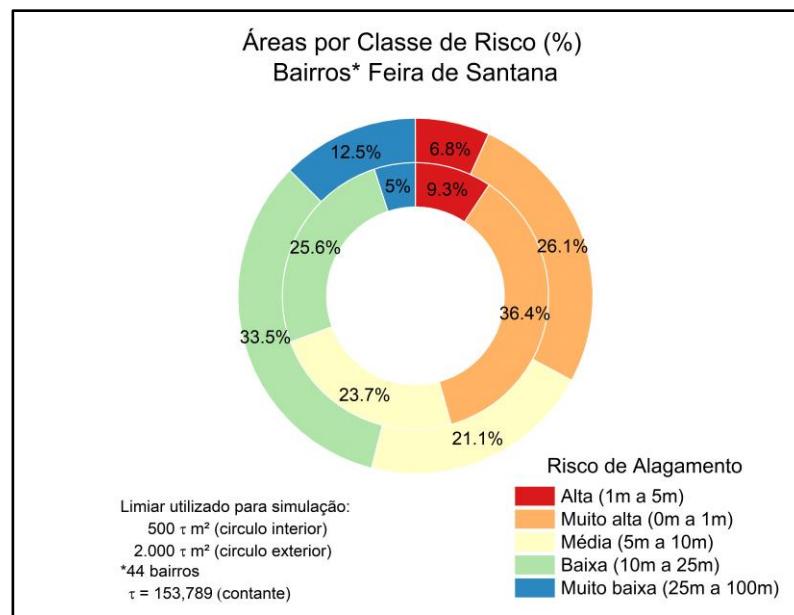
²Bairro onde teve ocorrência e o número de ocorrências

³Áreas das classes simuladas e o número de ocorrências no bairro

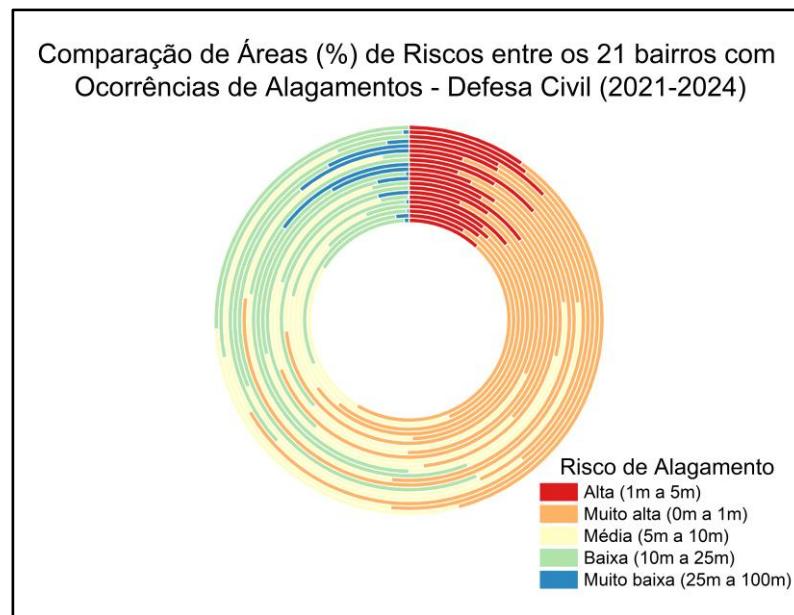
Quadro 4 – Interpretação para os valores de correlação de Pearson (r).

Interpretação Coeficiente de Correlação Pearson (r) (RATNER 2019)					
Interpretação	Sem correlação	Fraca	Moderada	Forte	Correlação Perfeita
Valor de r (+ ou -)	0,00] $0,00, 0,30]$] $0,30, 0,70]$] $0,70, 0,99]$	1

Figura 1 – a) Percentual das áreas de classe de risco b) áreas de classes de risco para os 21 bairros que tiveram ocorrência de alagamento (comparativo).



a)



b)

CONCLUSÕES

A partir do exposto, este trabalho indica, por meio de classe hierárquicas de susceptibilidade, áreas sujeitas à inundação. Demonstrando as probabilidades de risco das mais susceptíveis às menos susceptíveis.

Os pontos de alagamento entre os anos de 2021 e 2024 foram registrados em 92,59% ($L500 \tau m^2$) e 88,89% ($L2000 \tau m^2$) das áreas simuladas pelo HAND, com classes associadas de risco médio, alto e muito alto, estabelecendo correlação positiva moderada ($0,51 < r < 0,61$) tanto para as área e perímetro quanto para os referidos modelos para detecção do risco de alagamentos. O que nos leva a concluir que quanto maior as áreas, perímetros e áreas classificadas pelo HAND (média, alta e muito alta) maiores a probabilidade de acúmulo de água.

O limiar utilizado pelo HAND de 500tm^2 foi mais assertivo em relação ao de 2000tm^2 tomando os pontos onde foram registrados alagamentos.

A falta de registros em 23 dos 44 bairros desta análise, tendo em vista que o modelo também simulou e o alto percentual de acerto em 21 de 44 bairros sugere uma subnotificação e/ou realidades diferentes em áreas que são de lagoas – reconhecidamente a cidade possui muitas lagoas.

O reconhecimento das áreas de risco permite aos gestores atuarem na Gestão de Risco e de Desastres ao planejar prioridades de atendimento à população presentes nestas áreas, bem como buscar soluções técnicas em mitigar futuras calamidades.

REFERÊNCIAS

- FRITZEN, M.; BINDA, A. L. (2015). “*Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente*”. Ateliê Geográfico, Goiânia-GO, v. 5, n. 3 dez/2011 p.239-254. Em: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/atelie/article/view/16703/10155>. Acesso em: 18 fev.
- JOHNSON, J. M. et. al (2019). “*An integrated evaluation of the national water model (NWM)–Height above nearest drainage (HAND) flood mapping methodology*”. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 19, n. 11, p. 2405-2420.
- NOBRE, A. D. et. al (2011). “*Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. Journal of Hydrology*”, v. 404, n. 1-2, p. 13-29.
- NOBRE, A. D. et. al (2016). “*HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. Hydrological Processes*”, v. 30, n. 2, p. 320-333.
- RATNER, B. (2009). “*The correlation coefficient: Its values range between + 1/- 1, or do they?*”. Journal of targeting, measurement and analysis for marketing, v. 17, n. 2, p. 139-142.
- RENNÓ, C. D. et. al. (2008). “*HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia*”. Remote Sensing of Environment, v. 112, n. 9, p. 3469-3481.
- SEPREV-PMFS (2024). Coordenação Municipal de Proteção e Defesa Civil. “*PONTOS DE ALAGAMENTOS EM FEIRA DE SANTANA NOS ANOS DE 2021 A 2024*”. Feira de Santana – Bahia. PMFS.

AGRADECIMENTOS

B. F. Fernandez agradece à Fundação Mun. de Tec. da Informação e Tel. Egberto Tavares Costa



INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
Assinado Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo N°: **BR512022002653-8**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 16/09/2022, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: Rho_Correl

Data de publicação: 16/09/2022

Data de criação: 16/09/2022

Titular(es): BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Autor(es): GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE; ANDREA DE ALMEIDA BRITO; EVERALDO FREITAS GUEDES; BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Linguagem: C

Campo de aplicação: GC-06; GC-08; HD-01; HD-02; MA-01

Tipo de programa: SM-01; TC-01

Algoritmo hash: SHA-224

Resumo digital hash: 9650e407ba3fe2f7d042a8f7143566670682e8d2a5856e1285a69773

Expedido em: 27/09/2022

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO



INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
Assinado Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo N°: **BR512022002652-0**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 16/09/2022, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: Mean_and_sd

Data de publicação: 16/09/2022

Data de criação: 16/09/2022

Titular(es): BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Autor(es): GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE; EVERALDO FREITAS GUEDES; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Linguagem: C

Campo de aplicação: AG-11; AG-12; GC-06; MA-04; MT-04; MT-06

Tipo de programa: SM-01

Algoritmo hash: SHA-224

Resumo digital hash: 55f74aa8de1a1778011172585d826cdfc44a931893c99e0e6b8133b0

Expedido em: 27/09/2022

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO



INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
Assinado Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo N°: **BR512022002651-1**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 16/09/2022, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: Random_Sample

Data de publicação: 16/09/2022

Data de criação: 16/09/2022

Titular(es): BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Autor(es): GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Linguagem: C

Campo de aplicação: GC-06; MA-01; MA-02

Tipo de programa: SM-01; TC-01

Algoritmo hash: SHA-224

Resumo digital hash: 438975b66da607603588662b953712f0421d9f1b33325033d20088ac

Expedido em: 27/09/2022

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO



IPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
Assinado Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo N°: **BR512022002654-6**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 16/09/2022, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: Pearson_Correl

Data de publicação: 16/09/2022

Data de criação: 16/09/2022

Titular(es): BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Autor(es): GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE; ANDREA DE ALMEIDA BRITO; EVERALDO FREITAS GUEDES; BASÍLIO FERNANDEZ FERNANDEZ

Linguagem: C

Campo de aplicação: GC-06; GC-08; HD-01; HD-02; MA-01

Tipo de programa: SM-01; TC-01

Algoritmo hash: SHA-224

Resumo digital hash: 51c2465516acd5e65f88da9f8cce2d72eacdef4f4fb43a23544d94af

Expedido em: 27/09/2022

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO

Referências Bibliográficas

- AAGAARD, K.; HARTVIGSEN, G. Assessing spatial patterns of plant communities at varying stages of succession. *Applied Mathematics*, Scientific Research Publishing, v. 2014, 2014. [1.1, 3.2.2](#)
- ABOU-HAMDAN, H. et al. Macrophytic communities inhabiting the huveaune (south-east france), a river subject to natural and anthropic disturbances. *Hydrobiologia*, Springer, v. 551, n. 1, p. 161–170, 2005. [1.1](#)
- ADB. Asian water development strengthening water security in asia and the pacific. 2016. Disponível em: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/189411/awdo-2016.pdf>. [2.1.1](#)
- AKBAR, T. A. et al. Investigative spatial distribution and modelling of existing and future urban land changes and its impact on urbanization and economy. *Remote Sensing*, MDPI, v. 11, n. 2, p. 105, 2019. [2.1.1](#)
- ALVES, K. M. A. D. S.; ZIMMERMANN, E. D.; DÁVILA, M. C. P. Aplicación y análisis estadístico de múltiples índices de agua basado en datos de reflectancia del landsat 8 para detectar aguas superficiales en un entorno pampeano argentino. Universidade Federal de Pernambuco, 2024. [2.1.5](#)
- ANA. Pnsh - plano nacional de segurança hídrica. 2019. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/04/pnsh.pdf>. (document), [1.1, 2.1.1, 2.2, 2.1.1, 2.1, 2.3, 2.4, 5.1](#)
- ANA. *CODIFICAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS PELO MÉTODO DE OTTO PFAFSTETTER - Aplicação na ANA*. 2025. https://metadados.snrh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7bb15389-1016-4d5b-9480-5f1acdadd0f5/attachments/Manual_Codificao_de_Bacias_de_Otto_Pfafstetter.pdf. [Accessed 03-05-2025]. [2.1.1](#)
- ANDRADE, P. R. G. S. d.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Índices de sustentabilidade na simulação da operação do reservatório de pedra do cavalo - ba: um estudo para compatibilização entre diversos usos da água e a hidroeletricidade. In: ABRHIDRO. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2007. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/16182140065edc04c839ae78a7953d8d_5e9495eb7398ae3ab7de0444c7b46748.pdf. [1.1, 5.1](#)
- ANDRONACHE, I. C. et al. Fractal analysis for studying the evolution of forests. *Chaos, Solitons & Fractals*, Elsevier, v. 91, p. 310–318, 2016. [1.1, 3.2.2](#)
- ANSARI, S. et al. Standardized drought indices on drought. gov, produced with climate engine and google earth engine, from multiple foundational precipitation and temperature datasets. In: AMS. *104th AMS Annual Meeting*. [S.l.], 2024. [4.1, 4.2](#)
- ANTENEODO, C. Processos estocásticos. In: *V Escola do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. p. 1–34. Disponível em: <http://mesonpi.cat.cbpf.br/e2004/docs/PG2-cban.pdf>. [2.2.1.1, 2.2.1.2, 2.2.1.3](#)

ARCADIS. The Arcadis Sustainable Cities Index 2024 — arcadis.com. 2024. Disponível em: [⟨https://www.arcadis.com/en/insights/perspectives/global/sustainable-cities-index-2024⟩](https://www.arcadis.com/en/insights/perspectives/global/sustainable-cities-index-2024). 2.1.1

ASSIS, T. A. d. et al. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de ensino de física*, SciELO Brasil, v. 30, p. 2304–1, 2008. 3.2.2

BAKKER, K. J. A political ecology of water privatization. *Studies in political economy*, Taylor & Francis, v. 70, n. 1, p. 35–58, 2003. 2.1.1

BARTRAM, J.; BALLANCE, R. *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. [S.l.]: CRC press, 1996. 1.1

BEEK, E. V.; ARRIENS, W. L. *Water security: Putting the concept into practice*. [S.l.]: Global Water Partnership Stockholm, 2014. 2.1.1

BERGAMASCHI, H. et al. Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos. 2007. 1.1

BERTOLO, L. S. et al. Land-use changes assessed by overlay or mosaic methods: Which method is best for management planning? *Ecological indicators*, Elsevier, v. 55, p. 32–43, 2015. 1.1

BERTOLO, L. S. et al. Land-use changes assessed by overlay or mosaic methods: Which method is best for management planning? *Ecological indicators*, Elsevier, v. 55, p. 32–43, 2015. 3.1

BINI, L. M. et al. Aquatic macrophyte distribution in relation to water and sediment conditions in the itaipu reservoir, brazil. *Hydrobiologia*, Springer, v. 415, p. 147–154, 1999. 2.1.5

BOSCHILIA, S. M.; OLIVEIRA, E. F. de; SCHWARZBOLD, A. Partitioning beta diversity of aquatic macrophyte assemblages in a large subtropical reservoir: prevalence of turnover or nestedness? *Aquatic Sciences*, Springer, v. 78, p. 615–625, 2016. 1.1

BOTOSSO, P. C. Fenologia como instrumento no acompanhamento da periodicidade e formação de anéis de crescimento no tronco de espécies arbóreas. In: REGO, GM, 2007. 1.1

BOTTINO, F. et al. Characterization of humic substances from five macrophyte species decomposed under different nutrient conditions. *Limnetica*, Asociación Española de Limnología, v. 40, n. 2, p. 267–278, 2021. 2.1.5

BOX, G. P.; JENKINS, G. M. *Time series analysis: forecasting and control*. [S.l.]: New York: Holden Day, 1976. 2.2.1.1, 2.2.1.5

BRASIL. Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981. 1981. Disponível em: [⟨https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6902.htm⟩](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6902.htm). 4.1

Brasil. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. 2012. Acesso em: 20 ago. 2024. 4.1

BRASIL, A. A. N. de Agua. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual*. [S.l.], 2024. v. 1, n. 01, 133 p. 1.1

BRASIL, A. A. N. de Águas. *Índice de Segurança Hídrica - ISH*. [S.l.], 2019. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia_ISH.pdf. 1.1, 2.1.1, 2.1.1

Brasil. Ministério da Saúde. Portaria gm/ms nº 888, de 4 de maio de 2021. estabelece os procedimentos e os parâmetros de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>, Acesso em: maio 2025. 2.1.4

BRIGGS, J. *Fractals: The patterns of chaos: A new aesthetic of art, science, and nature*. [S.l.]: Simon and Schuster, 1992. 1.1, 3.2.2

CABALLERO, C. B. et al. Dimensão fractal e análise geomorfológica de bacias hidrográficas brasileiras. *Rega: revista de gestión del agua de America Latina. Vol. 17 (jan./dez. 2020),[Artigo] e3, 12 p.*, 2020. 1.1

CAMARGO, A.; ESTEVES, F. Influence of water level variation on biomass and chemical composition of the aquatic macrophyte eichhornia azurea (kunth) in an oxbow lake of the rio mogi-guaçu (são paulo, brazil). 1996. 2.1.5

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, Wiley Online Library, v. 22, n. 2, p. 361–369, 1977. (document), 2.1.4, 2.1.4, 2.1.4, 2.1.4, 2.1.4, 2.10, 2.11, 2.12

CARPENTER, S. R.; LODGE, D. M. Macrophyte control of phosphorus in a freshwater ecosystem. *Environmental Science & Technology*, ACS Publications, v. 20, n. 6, p. 653–658, 1986. 2.1.5

CARVALHAES, C.; ZEBENDE, F.; PENNA, T. Iliffusion limited aggregation with competitive part icles. *Brazilian Journal of Physics*, v. 23, n. 1, 1993. 3.2.2

CASTRO, C. N. Plano nacional de segurança hídrica, problemas complexos e participação social. 2021. 1.1

CASTRO, C. N. Água, problemas complexos e o plano nacional de segurança hídrica. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022. 2.1.1

CESCHIN, S.; ZUCCARELLO, V.; CANEVA, G. Role of macrophyte communities as bioindicators of water quality: Application on the tiber river basin (italy). *Plant biosystems*, Taylor & Francis, v. 144, n. 3, p. 528–536, 2010. 1.1

CHAMBERS, P. et al. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. *Freshwater animal diversity assessment*, Springer, p. 9–26, 2008. 2.1.5

CHATFIELD, C.; XING, H. *The analysis of time series: an introduction with R*. [S.l.]: Chapman and hall/CRC, 2019. 2.2.1.3

CHEN, Q.; ZHANG, Y.; HALLIKAINEN, M. Water quality monitoring using remote sensing in support of the eu water framework directive (wfd): A case study in the gulf of finland. *Environmental monitoring and assessment*, Springer, v. 124, p. 157–166, 2007. 5.1

- CHEN, Z. et al. Effect of nonstationarities on detrended fluctuation analysis. *Physical Review E*, v. 65, p. 041107, 2002. Disponível em: <<http://polymer.bu.edu/hes/articles/cihs02.pdf>>. 4.2.2, 4.2.2
- CHENG, J. et al. Discussing water security. *China Water Resources*, v. 1, p. 21–23, 2004. 2.1.1
- COLADELLO, L. F. et al. Macrophytes abundance changes in eutrophicated tropical reservoirs exemplified by salto grande (brazil): Trends and temporal analysis exploiting landsat remotely sensed data. *Applied Geography*, Elsevier, v. 121, p. 102242, 2020. 2.1.5
- COLADELLO, L. F. et al. Assessing climate influence on spatiotemporal dynamics of macrophytes in eutrophicated reservoirs by remotely sensed time series. *Remote Sensing*, MDPI, v. 14, n. 14, p. 3282, 2022. 2.1.5
- CONCEIÇÃO, M. A. Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de penman-monteith-fao. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006., 2006. 1.1
- CONNORS, M. A. Exploring fractal dimension, area, and volume. *The Beauty of Fractals: Six Different Views*, MAA, n. 76, p. 51, 2010. 3.2.2
- COOK, C.; BAKKER, K. Water security: Debating an emerging paradigm. *Global environmental change*, Elsevier, v. 22, n. 1, p. 94–102, 2012. 2.1.1
- CRUZ, B. et al. Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the paulista macro metropolis area (se brazil). *Environmental Earth Sciences*, Springer, v. 76, p. 1–13, 2017. 1.1, 2.1.1, 3.1
- CULLING, W. E. H.; DATKO, M. The fractal geometry of the soil-covered landscape. *Earth Surf. Processes Landforms*, v. 12, n. 4, p. 369–385, 1987. 3.2.2
- DENNY, P. Submerged and floating-leaved aquatic macrophytes (euhydrophytes). In: *The ecology and management of African wetland vegetation: A botanical account of African swamps and shallow waterbodies*. [S.l.]: Springer, 1985. p. 19–42. 2.1.5
- DICKSON, S.; SCHUSTER-WALLACE, C.; NEWTON, J. Water security assessment indicators: the rural context. *Water resources management*, Springer, v. 30, p. 1567–1604, 2016. 2.1.1
- DORICI, M. et al. Accelerated erosion in a watershed in the southeastern region of brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, p. 1–12, 2016. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133342799>>. 3.1
- EHLERS, R. S. *Análise de Séries Temporais*. Departamento de Estatística, UFPR. Disponível em <http://leg.est.ufpr.br/ehlers/notas>. Acesso em: 23 abril de 2013. 2007. 2.2.1.1, 2.2.1.1
- ESA. *WorldCover — WORLDCOVER — esa-worldcover.org*. 2025. <<https://esa-worldcover.org/en>>. [Accessed 04-03-2025]. 2.1.3
- ESTEVES, F. de A. *Fundamentos de limnologia*. [S.l.]: Interciência, 1998. 2.1.4, 2.1.4, 2.1.5
- FALCÃO, A. J. T. Mestrado em engenharia informática, *Detecção de correlação e causalidades em séries temporais não categóricas*. Lisboa: [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.rcaap.pt/detail.jsp?id=oai:run.unl.pt:10362/7814>>. 2.2.1.1

FALCONER, K. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. [3.2.2](#)

FAN, Y. et al. Dynamic distribution monitoring and biomass estimation of aquatic vegetation in jupiá hydropower station, brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Elsevier, v. 51, p. 101606, 2024. [2.1.5](#)

FEDER, J. *Fractals*. New York,: Plenum Press, New York, 1988. ([document](#)), [2.19](#), [2.20](#), [2.21](#), [2.3](#), [2.22](#), [2.3](#)

FERNANDEZ, B.; OLIVEIRA, L. A. de; ZEBENDE, G. F. Análise estatística de autocorrelação e correlação cruzada: um estudo de caso inerente a questão de segurança hídrica. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 35, p. 735–751, 2024. [1.1](#), [2.5](#), [4](#)

FERNANDEZ, B. F. *Análise da autoafinidade do comportamento de variabilidade temporal da estrela pulsante KIC10670103*. [S.l.]: Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, 2014. ([document](#)), [2.2.1.3](#), [2.4](#), [2.24](#), [2.5.1](#)

FERNANDEZ, B. F. et al. Caracterização da baronesa (eichhornia crassipes) a partir de curvas espectrais do sentinel-2 l2a na apa de pedra do cavalo, ba. In: *Anais do Simpósio Internacional Selper: Além do dossel Tecnologias e Aplicações de Sensoriamento Remoto*. [S.l.]: Even3, 2025. [5](#)

FERNANDEZ, B. F.; ZEBENDE, G. F. Teste estatístico do dcca correlogramo. In: *Anais do Encontro Nacional de Modelagem Computacional e Encontro de Ciência e Tecnologia dos Materiais*. [S.l.]: Even3, 2024. [2.6](#)

FILHO, A. M. d. S. *Autocorrelação e correlação cruzada: teorias e aplicações*. Tese (Doutorado) — SENAI-CIMATEC, 2014. [2.2.1.3](#)

FREITAS, L. C. da S.; CAVALCANTI, L. C. de S.; BRAZ, A. M. Avaliação da acurácia das classes de uso e cobertura da terra do mapbiomas (coleção 6) para o município de carpina (pe). *Caderno Prudentino de Geografia*, v. 2, n. 45, p. 38–52, 2023. [2.1.2](#)

GALHARDO, C. E. C. *Análise e modelagem estocástica do barorreflexo através de séries temporais de pressão arterial sistólica*. Tese (Doutorado em Física) — Universidade Federal Fluminense, Instituto de Física, 2010. [2.2.1.1](#)

GARCÍA, L. e. a. Construction of linear models for the normalized vegetation index (ndvi) for coffee crops in peru based on historical atmospheric variables from the climate engine platform. *Atmosphere*, v. 15, n. 8, p. 923–923, 2024. [4.2](#)

GODWIN, P. e. a. Detecting groundwater dependence and woody vegetation restoration with ndvi and moisture trend analyses in an indonesian karst savanna. *Frontiers in Remote Sensing*, v. 5, p. 1280712, 2024. [4.2](#)

GONÇALVES, R. V. e. a. Analysis of ndvi time series using cross-correlation and forecasting methods for monitoring sugarcane fields in brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 15, p. 4653–4672, 2012. [4.2](#)

GOODCHILD, M. F. Fractional brownian process as a terrain simulation model. In: ISA. *Modeling and Simulation, Proceedings of the Annual Pittsburgh Conference*. [S.l.], 1982. p. 1133–1137. [1.1](#)

- GOODCHILD, M. F.; MARK, D. M. The fractal nature of geographic phenomena. *Annals of the Association of American Geographers*, Taylor & Francis, v. 77, n. 2, p. 265–278, 1987. [1.1](#)
- Google. Earth engine. 2024. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. [1.1](#), [2.1.2](#), [3.1](#)
- GORELICK, N. et al. Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, Elsevier, v. 202, p. 18–27, 2017. [4.1](#), [4.2](#)
- GREY, D.; SADOFF, C. W. Sink or swim? water security for growth and development. *Water policy*, IWA Publishing, v. 9, n. 6, p. 545–571, 2007. [1.1](#), [2.1.1](#)
- GUERSCHMAN, J. P. et al. Scaling of potential evapotranspiration with modis data reproduces flux observations and catchment water balance observations across australia. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 369, n. 1-2, p. 107–119, 2009. [1.1](#)
- HARDSTONE, R. et al. Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations. *METHODS ARTICLE*, v. 3, n. 450, p. 1–13, Novembro 2012. [2.4.1](#), [2.4.1](#), [2.5](#), [2.5](#)
- HASAN, R. et al. A state-of-the-art review on the quantitative and qualitative assessment of water resources using google earth engine. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer Science and Business Media LLC, v. 196, n. 12, nov. 2024. ISSN 1573-2959. [2.1.2](#), [2.1.3](#)
- HOEKSTRA, A. et al. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. [S.l.]: Routledge, 2012. [2.1.1](#)
- HOEKSTRA, A. Y.; BUURMAN, J.; GINKEL, K. C. V. Urban water security: A review. *Environmental research letters*, IOP Publishing, v. 13, n. 5, p. 053002, 2018. [1.1](#), [2.1.1](#), [2.1.1](#)
- HOEKSTRA, A. Y. et al. original: The water footprint assessment manual. setting the global standard. *Sciences*, v. 14, n. 1, p. 1259–1276, 2005. [1.1](#)
- HOFF, H. et al. Water footprints of cities—indicators for sustainable consumption and production. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 18, n. 1, p. 213–226, 2014. [2.1.1](#)
- HOLM, L.; WELDON, L.; BLACKBURN, R. Aquatic weeds: The rampant quality of aquatic weeds has become one of the symptoms of our failure to manage our resources. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 166, n. 3906, p. 699–709, 1969. [5.1](#)
- HU, K. et al. Effect of trends on detrended fluctuation analysis. *Physical Review E*, v. 64, n. 19, p. 011114, 2001. Disponível em: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.64.011114>. [4.2.2](#), [4.2.2](#)
- HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, v. 17, n. 1, p. 3753, fev. 1985. [4.1](#), [4.2](#)
- HUNTINGTON, J. L. et al. Climate engine: Cloud computing and visualization of climate and remote sensing data for advanced natural resource monitoring and process understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 98, n. 11, p. 2397–2410, 2017. [1.1](#), [4.1](#), [4.2](#)

INEMA. Relatórios do monitora. 2017. Disponível em: [\(http://www.inema.ba.gov.br/servicos/monitoramento/qualidade-dos-rios/relatorios-do-monitora/\)](http://www.inema.ba.gov.br/servicos/monitoramento/qualidade-dos-rios/relatorios-do-monitora/). 1.1, 2.1.4

INEMA. *PLANO DE AÇÕES ESTRATÉGICAS PARA GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIOPARAGUAÇU E DO RECÔNCAVO NORTE E INHAMBUPEPP03A RELATÓRIO DE ANÁLISE INTEGRADA DA BHPFEVEREIRO/2019 0389-RF-10-MA-014 R-00BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU*. [S.l.], 2019. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/wp-content/uploads/2021/11/PAEPRNI_PP02A_Volume_I_R00.pdf. 1.1

INEMA. *RELATÓRIO DE ANÁLISE INTEGRADA DA BHP0389-RF-10-MA-014 R-00 FEVEREIRO/2019BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU*. [S.l.], 2019. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/wp-content/uploads/2021/11/PAEPRNI_PP03A_R00.pdf. 1.1

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de dados de recursos naturais (bdrn). 2024. Disponível em: <https://data.inpe.br/bdc/web/>. 1.1

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, v. 11, n. 3-4, p. 185200, dez. 1991. 4.2

JENSEN, O.; WU, H. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science & Policy*, Elsevier, v. 83, p. 33–45, 2018. 2.1.1

JING, Y. et al. Land-use changes and ecosystem services under different scenarios in nansi lake basin, china. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer, v. 193, p. 1–14, 2021. 3.1

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. et al. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)*, v. 106, p. 110–127, 1997. 2.1.5

KANTELHARDT, J. W. Fractal and multifractal time series. *Institute of Physics, Martin-Luther-University*, p. 1–59, 2008. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/0804.0747>. 2.5

KANTELHARDT, J. W. *Mathematics of Complexity and Dynamical Systems Fractal and Multifractal Time Series*. New York: Springer, 2012. 2.2.1.3, 2.4.1

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. Plantas infestantes e nocivas. Sao Paulo (Brazil) BASF Brasileira, 1991. 5.1

KLINKENBERG, B.; GOODCHILD, M. F. The fractal properties of topography: A comparison of methods. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 17, n. 3, p. 217–234, 1992. 3.2.2

KOKALY, R. F. et al. *USGS spectral library version 7*. [S.l.], 2017. (document), 5.4, 5.2.2

KRATZER, C. R.; BREZONIK, P. L. A carlson-type trophic state index for nitrogen in florida lakes 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Wiley Online Library, v. 17, n. 4, p. 713–715, 1981. (document), 2.1.4, 2.3, 2.1.4, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13

- KRISTOUFEK, L. Measuring cross-correlation between non-stationary series with DCCA coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 402, p. 291–298, 2014. [4.2.3](#)
- LADE, S. J. et al. Human impacts on planetary boundaries amplified by earth system interactions. *Nature sustainability*, Nature Publishing Group UK London, v. 3, n. 2, p. 119–128, 2020. [1.1](#)
- LAMPARELLI, M. C. *Graus de trofa em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. Tese (Doutorado) — USP, 2004. [\(document\)](#), [2.1.4](#), [2.1.4](#), [2.1.4](#), [2.10](#), [2.11](#), [2.12](#)
- LAUTZE, J.; MANTHRITHILAKE, H. Water security: old concepts, new package, what value? In: WILEY ONLINE LIBRARY. *Natural resources forum*. [S.l.], 2012. v. 36, n. 2, p. 76–87. [2.1.1](#), [2.1.1](#)
- LIU, H. Q.; HUETE, A. A feedback based modification of the ndvi to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 2, p. 457465, mar. 1995. [4.2](#)
- LIU, Q. et al. Characteristics of groundwater drought and its correlation with meteorological and agricultural drought over the north china plain based on grace. *Ecological Indicators*, Elsevier, v. 161, p. 111925, 2024. [1.1](#), [4.2](#)
- LOBO, F. d. L. et al. Algaemap: Algae bloom monitoring application for inland waters in latin america. *Remote Sensing*, MDPI, v. 13, n. 15, p. 2874, 2021. [2.1.3](#)
- MACHADO, A.; SILVA, M. da; ZEBENDE, G. F. Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. *Physica A*, v. 400, p. 12–19, 2014. Disponível em: [/http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437114000193](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437114000193). [2.2.1.4](#), [2.2.1.5](#), [2.2.2](#), [2.5](#)
- MACHADO, M. T. d. S.; BAPTISTA, G. M. d. M. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do lago paranoá (df). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 21, p. 357–365, 2016. [2.1.1](#)
- MANDELBROT, B. How long is the coast of britain? statistical self-similarity and fractional dimension. *science*, American Association for the Advancement of Science, v. 156, n. 3775, p. 636–638, 1967. [3.2.2](#)
- MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature*. [S.l.]: WH freeman New York, 1982. v. 1. [2.4](#), [2.4](#), [3.2.2](#)
- MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature/Revised and enlarged edition*. [S.l.: s.n.], 1983. [1.1](#)
- MapBiomass. The project. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/>. [1.1](#)
- MapBiomass. Download dos atbds com método detalhado. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/download-dos-atbds-com-metodo-detalhado/>. [1.1](#)
- MapBiomass. Pampa trinacional - evolución anual de la cobertura y uso de la tierra (1985-2023). 2024. Disponível em: <https://pampa.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/9/2024/12/MBI-pampa-trinacional-4.0-ES-scaled.jpg>. [1.1](#)

- MapBiomass. *Plataforma MapBiomass - Coleção de Mapas Anuais de Cobertura e Uso do Solo do Chile*. 2024. Disponível em: <https://chile.mapbiomas.org/>. 1.1
- MapBiomass. Quem somos. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/quem-somos>. 1.1, 3.1
- MAPBIOMAS. *Análise de acurácia*. 2025. <https://brasil.mapbiomas.org/analise-de-acuracia>. [Accessed 01-03-2025]. 2.1.2
- MAPBIOMASCOLLECTION. *MapBiomass Brasil — brasil.mapbiomas.org*. 2025. <https://brasil.mapbiomas.org/codigos-de-legenda>. [Accessed 01-03-2025]. 2.1.2
- MCDONALD, R. I. et al. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global environmental change*, Elsevier, v. 27, p. 96–105, 2014. 2.1.1
- MDR, M. do D. R. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) - Base dos Dados - basedosdados.org*. 1996. <https://basedosdados.org/dataset/2a543ad8-3cdb-4047-9498-efe7fb8ed697?table=df7cf198-4889-4baf-bb77-4e0e28eb90ca>. [Accessed 23-03-2025]. (document), 2.18
- MELO, C.; SCHMIDT, M. A. R.; GONÇALVES, R. M. Comparação das imagens landsat 8 e sentinel 2 para o monitoramento de reservatórios de abastecimento no cerrado brasileiro. *Geosciences = Geociências*, UNESP - Universidade Estadual Paulista, v. 39, n. 04, p. 1119–1128, dez. 2020. ISSN 1980-900X. 2.1.3
- MENESES, P.; ALMEIDA, T. d. Fundamentos de espectrorradiometria. *MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Reflectância dos materiais terrestres*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 11–38, 2019. (document), 2.6, 2.7, 2.1.3
- MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 117, p. 394–406, 2012. 2.1.3
- MITCHELL, G. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. *Sustainable development*, Wiley Online Library, v. 4, n. 1, p. 1–11, 1996. 2.1.1
- MORET, M. A. Self-affinity and nonextensivity of sunspots. *Physics Letter A*, n. 378, p. 494–496, 2014. 2.5
- MORET, M. A. et al. Fluctuation analysis of stellar x-ray binary systems. *Physical Review E*, v. 68, p. 041104, 2003. Disponível em: <http://www.aticenter.com.br/mestrado/cti/>. 2.5
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. d. C. *Análise de séries temporais*. São Paulo: Blucher, 2004. (document), 2.2.1.1, 2.2.1.2, 2.15, 2.2.1.3, 2.16
- MOURA, M.; FRANCO, D.; MATALLO, M. Manejo integrado de macrófitas aquáticas. *Divulgação Técnica Biológico*, p. 77–82, 2009. 2.1.5
- MOURA, Y. M. de et al. Análise comparativa entre índices de vegetação ndvi e evi e sua relação com o balanço hídrico na bacia do una-sp. In: . [s.n.], 2009. Disponível em: <https://ipabhi.org/serhidro/anais/anais2009/doc/pdfs/p35.pdf>. 1.1

- MUELLER, C.; TORRES, M.; MORAIS, M. Referencial básico para a construção de um sistema de indicadores urbanos. *Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)*, 1997. [2.1.1](#)
- NASA. *ARSET - Fundamentals of Remote Sensing*. 2023. Disponível em: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arsset-fundamentals-remote-sensing>. [3.1](#)
- NASA. *Landsat 8 — Landsat Science — landsat.gsfc.nasa.gov*. 2025. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>. [Accessed 03-03-2025]. [\(document\)](#), [2.1.3](#), [2.1.3](#), [2.2](#), [3.1](#)
- NATIONS, U. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development — Department of Economic and Social Affairs — sdgs.un.org. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [3.1](#)
- NEEL, M. C.; MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S. A. Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. *Landscape ecology*, Springer, v. 19, p. 435–455, 2004. [1.1](#)
- NKIAKA, E. et al. Quantifying the effects of climate and environmental changes on evapotranspiration variability in the sahel. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 642, p. 131874, 2024. [1.1](#), [4.2](#)
- OLIVEIRA, N. F. de; ARRAUT, E. M. Evolution of mapbiomas collections accuracy for the highly fragmented são paulo landscape evolution of mapbiomas collections accuracy for the highly fragmented são paulo landscape. *Rev. Bras. Cartogr*, v. 76, 2024. [2.1.2](#)
- OUTCALT, S. I.; MELTON, M. A. Geomorphic application of the hausdorff-besicovich dimension. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 17, n. 8, p. 775–787, 1992. [3.2.2](#)
- PAIVA, A. C. d. E. et al. Urban expansion and its impact on water security: The case of the paraíba do sul river basin, são paulo, brazil. *Science of The Total Environment*, Elsevier BV, v. 720, p. 137509, jun. 2020. ISSN 0048-9697. [1.1](#)
- PARTNERSHIPS, G. W. Towards water security: A framework for action. *GWP, London*, 2000. [1.1](#), [2.1.1](#)
- PEARSON, K. Vii. note on regression and inheritance in the case of two parents. *proceedings of the royal society of London*, The Royal Society London, v. 58, n. 347-352, p. 240–242, 1895. [\(document\)](#), [2.2.2](#), [2.4](#)
- PEDRALLI, G. Macrófitas aquáticas como bioindicadoras da qualidade da água: alternativas para usos múltiplos de reservatórios. In: _____. *Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas*. Maringá: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2003. p. 171–188. [2.1.5](#)
- PENG, C. et al. Mosaic organization of dna nucleotides. *Physical Review E*, United States, v. 49, n. 2, p. 1685–1989, 1994. [4.2.2](#)
- PENG, C.-K. et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys. Rev. E*, v. 49, p. 1685–1689, 1994. [2.5](#)
- PENNING, W. E. et al. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in european lakes. *Aquatic ecology*, Springer, v. 42, p. 237–251, 2008. [1.1](#)

- PFAFSTETTER, O. *Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação*. [S.l.], 1989. Manuscrito não publicado. [2.1.1](#)
- PLUMMER, R.; LOË, R. de; ARMITAGE, D. A systematic review of water vulnerability assessment tools. *Water resources management*, Springer, v. 26, p. 4327–4346, 2012. [2.1.1](#)
- PODOBNIK, B. et al. Quantifying cross-correlations using local and global detrending approaches. *European Physical Journal B*, v. 71, p. 243–250, 2009. [2.5](#)
- PODOBNIK, B. et al. Statistical tests for power-law cross-correlated processes. *Phys. Rev. E*, v. 84, p. 066118, 2011. [4.2.3](#)
- PODOBNIK, B.; STANLEY, H. E. Detrended cross-correlation analysis: A new method for analyzing two nonstationary time series. *Physical Review Letters*, v. 100, p. 084102, 2008. Disponível em: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.084102>. [2.5.4](#)
- PRESS, W. H. et al. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. 3^a. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. [2.5.1](#)
- PUKŠEC, T. et al. *Sustainable development of energy, water and environment systems 2016*. [S.l.]: Elsevier, 2018. 1685–1690 p. [2.1.1](#)
- ROBLES, W.; MADSEN, J. D.; WERSAL, R. M. Potential for remote sensing to detect and predict herbicide injury on waterhyacinth (eichhornia crassipes). *Invasive Plant Science and Management*, Cambridge University Press, v. 3, n. 4, p. 440–450, 2010. [5.1](#)
- ROCHA, E. G. de A. Conceitos básicos de hidrologia e drenagem para projetos rodoviários. 2022. [2.1.1](#)
- SABY, L. et al. Sensitivity of remotely sensed vegetation to hydrologic predictors across the colorado river basin, 2001–2019. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Wiley Online Library, v. 58, n. 6, p. 1017–1029, 2022. [4.2](#)
- SAITO, C. H. Segurança hídrica e direito humano à água. In: *RUSCHEINSKY, A.; CALGARO, C; WEBER, TÉtica, direito socioambiental e democracia*. 1ed. Caxias do Sul: Educs, p. 94–108, 2018. [2.1.1](#)
- SANO, E. E. et al. Reflectância da vegetação. *MENESES, Paulo Roberto et al. Reflectância dos Materiais Terrestres*. Brasília: Oficina de Textos. Cap, v. 6, p. 189–223, 2019. [1.1](#), [2.1.3](#)
- SCHEFFER, M. *Ecology of Shallow Lakes*. London: Chapman and Hall, 1998. [2.1.5](#)
- SENAY, G. et al. Estimating basin scale evapotranspiration (et) by water balance and remote sensing methods. *Hydrological Processes*, Wiley Article Library, v. 25, n. 26, p. 4037–4049, 2011. [1.1](#)
- SHIELDS, D. J.; ŠOLAR, S. V.; MARTIN, W. E. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. *Ecological Indicators*, Elsevier, v. 2, n. 1-2, p. 149–160, 2002. [2.1.1](#)
- SOUZA, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, MDPI, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. [1.1](#)

- SRIVASTAVA, J.; GUPTA, A.; CHANDRA, H. Managing water quality with aquatic macrophytes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Springer, v. 7, p. 255–266, 2008. [2.1.5](#)
- STANIMIROVA, R. et al. A global land cover training dataset from 1984 to 2020, radiant mlhub, version 1.0. 2023. [1.1](#)
- SWAMINATHAN, M. Ecology and equity: Key determinants of sustainable water security. *Water Science and Technology*, IWA Publishing, v. 43, n. 4, p. 35–44, 2001. [2.1.1](#)
- TANKPA, V. et al. Modeling the effects of historical and future land use/land cover change dynamics on the hydrological response of ashi watershed, northeastern china. *Environment, Development and Sustainability*, Springer, v. 23, p. 7883–7912, 2021. [1.1](#), [3.1](#)
- TARBOTON, D. G. Fractal river networks, horton's laws and tokunaga cyclicity. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 187, n. 1-2, p. 105–117, 1996. [1.1](#)
- THOMAZ, S. M.; ESTEVES, F. d. A. Comunidade de macrófitas aquáticas. In: *Fundamentos de Limnologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Atheneu, 2011. p. 461–521. 2^a edição. [2.1.4](#), [2.1.5](#), [5.1](#)
- TOLEDO, A. P. d. et al. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. Cetesb, 1983. ([document](#)), [2.1.4](#), [2.1.4](#), [2.10](#), [2.11](#), [2.12](#)
- TOUBIN, M. et al. Improving the conditions for urban resilience through collaborative learning of parisian urban services. *Journal of urban planning and development*, American Society of Civil Engineers, v. 141, n. 4, p. 05014021, 2015. [1.1](#)
- TSEGAYE, S.; GALLAGHER, K. C.; MISSIMER, T. M. Coping with future change: Optimal design of flexible water distribution systems. *Sustainable Cities and Society*, v. 61, p. 102306, 2020. ISSN 2210-6707. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720305278>. [1.1](#)
- TUNAS, I. G.; ANWAR, N.; LASMINTO, U. Fractal characteristic analysis of watershed as variable of synthetic unit hydrograph model. *The Open Civil Engineering Journal*, v. 10, n. 1, 2016. [1.1](#)
- UN. What is water security? 2013. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/what-water-security-infographic>. [1.1](#), [4.1](#)
- UN. *The World's Cities in 2018 Data Booklet*. [S.l.], 2018. [1.1](#)
- United States Geological Survey. Earth explorer. 2024. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [1.1](#)
- VASSOLER, R.; ZEBENDE, G. Dcca cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 391, n. 7, p. 2438–2443, 2012. [1.1](#), [4.2.3](#)
- VERBURG, P. H. et al. Modeling land-use and land-cover change. In: *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts*. [S.l.]: Springer, 2006. p. 117–135. [3.1](#)

VOTORANTIM. *Assumimos a operação da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo - Votorantim Cimentos* — *votorantimcimentos.com.br*. 2023. [\(https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/assumimos-a-operacao-da-usina-hidreletrica-de-pedra-do-cavalo/\)](https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/assumimos-a-operacao-da-usina-hidreletrica-de-pedra-do-cavalo/). [Accessed 29-08-2023]. **3.2.1**

WALLECZEK, J. *Self-organized Biological Dynamics and Nonlinear Control*. Cambridge University Press, 2000. Disponível em: [\(www.cambridge.org/9780521624367\)](http://www.cambridge.org/9780521624367). (document), **4.1**

WANG, L. et al. Dynamic assessment of soil erosion risk using landsat tm and hj satellite data in danjiangkou reservoir area, china. *Remote sensing, Molecular Diversity Preservation International (MDPI)*, v. 5, n. 8, p. 3826–3848, 2013. **3.1**

WANG, Y. et al. Spatial distribution and influencing factors on urban land surface temperature of twelve megacities in china from 2000 to 2017. *Ecological Indicators*, Elsevier, v. 125, p. 107533, 2021. **1.1**

WARNER, J. F.; JOHNSON, C. L. Virtual water -real people: Useful concept or prescriptive tool? *Water International*, Taylor & Francis, v. 32, n. 1, p. 63–77, 2007. **2.1.1**

WASEEM, L. A. et al. Influence of urban sprawl on microclimate of abbottabad, pakistan. *Land*, v. 10, n. 2, 2021. ISSN 2073-445X. Disponível em: [\(https://www.mdpi.com/2073-445X/10/2/95\)](https://www.mdpi.com/2073-445X/10/2/95). **1.1**

WATERUN et al. Water security and the global water agenda. *UN Water Analytical Brief*. Hamilton, Canada: UN University, 2013. **2.1.1, 2.1.1**

WETZEL, R. G. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001. **2.1.5**

WITTER, S. G.; WHITEFORD, S. Water security: the issues and policy challenges. *International Review of Comparative Public Policy*, v. 11, p. 1–25, 1999. **2.1.1**

ZANAGA, D. et al. *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*. [S.l.]: Zenodo, 2022. **2.1.3**

ZEBENDE, G.; BRITO, A.; CASTRO, A. DCCA cross-correlation analysis in time-series with removed parts. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, North-Holland, p. 123472, 2019. **3.1, 4.2.3**

ZEBENDE, G. et al. ρ_{DCCA} applied between air temperature and relative humidity: An hour/hour view. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 494, p. 17–26, 2018. **3.1**

ZEBENDE, G.; MACHADO, A. Cross-correlation between time series of vehicles and passengers. *Physica A*, v. 388, p. 4863–4866, 2009. Disponível em: [\(http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2009.07.046\)](http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2009.07.046). **2.5**

ZEBENDE, G.; SILVA, M. D.; FILHO, A. M. DCCA cross-correlation coefficient differentiation: Theoretical and practical approaches. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 392, n. 8, p. 1756–1761, 2013. **3.1**

ZEBENDE, G. F. Dcca cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A*, v. 390, p. 614–618, 2011. **1.1, 2.6, 2.6, 4.1, 4.2.3**

- ZEBENDE, G. F. Dcca cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A*, v. 390, p. 614–618, 2011. [3.1](#)
- ZEBENDE, G. F.; FERNANDEZ, B. F.; PEREIRA, M. G. Analysis of the variability in the sdB star KIC 10670103: DFA approach. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 464, n. 3, p. 2638–2642, 2017. [\(document\)](#), [2.5](#), [2.5](#), [3.1](#), [4.1](#)
- ZEBENDE, G. F.; OLIVEIRA, P. D.; PENNA, T. Long-range correlations in computer diskettes. *Physical Review E*, v. 57, p. 3311–3314, 1998. Disponível em: [⟨http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.57.3311⟩](http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.57.3311). [2.5](#)
- ZEBENDE, G. F. et al. Uma visão hora a hora da autocorrelação em dados de temperatura e umidade relativa do ar na bahia. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 29, p. 99112, 2021. [4.2.2](#), [4.2.2](#)
- ZEBENDE, G. F. et al. Studying long-range correlations in a liquidvapor-phase transition. *Physical A*, v. 342, p. 322–328, 2004. Disponível em: [⟨http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2004.01.071⟩](http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2004.01.071). [2.5](#)
- ZEBENDE, G. F.; SILVA, P. A. D.; MACHADO, A. Study of cross-correlation in a self-affine time series of taxi accidents. *Physica A*, v. 390, p. 1677–1683, 2011. Disponível em: [⟨http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2010.12.038⟩](http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2010.12.038). [2.5](#)
- ZEITOUN, M. The global web of national water security. *Global Policy*, Wiley Article Library, v. 2, n. 3, p. 286–296, 2011. [\(document\)](#), [1.1](#), [2.1.1](#), [2.1](#), [2.1.1](#)

Avaliação de área de segurança hídrica por meio de modelagem computacional e estatística com imagens de sensoriamento remoto

Basílio Fernandez Fernandez

Feira de Santana, abr/2025.