



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

LUCAS GONZALES LIMA PEREIRA CALADO

ANÁLISE DO NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL

Recife
2019

LUCAS GONZALES LIMA PEREIRA CALADO

ANÁLISE DO NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Karoline Paes Jamur.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

C141a Calado, Lucas Gonzales Lima Pereira.
Análise do nível do mar na América do Sul / Lucas Gonzales
Lima Pereira Calado – Recife, 2019.
102 f., il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés.
Coorientadora: Profa. Dra. Karoline Paes Jamur.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e
Tecnologias da Geoinformação, 2019.
Inclui referências.

1. Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2.
Nível do mar. 3. GGOS. 4. Movimento vertical. 5. GNSS. I. Garnés,
Silvio Jacks dos Anjos (Orientador). II. Jamur, Karoline Paes
(Coorientadora). III. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-458

LUCAS GONZALES LIMA PEREIRA CALADO

ANÁLISE DO NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 01/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Techn. Andréa de Seixas (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Regiane Dalazoana (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Paraná

Dedico essa dissertação aos meus pais, Bernadeth e Gonzaga, pela educação e todo esforço que fizeram para minha formação pessoal e profissional, sempre me deixando voar, e ao meu avô, Manoel Ramos (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e do conhecimento. Ele que me deu forças nos momentos mais difíceis da caminhada sendo meu amparo.

Ao meu amor, meu grande amor, minha mãe, Maria Bernadeth, pelo exemplo de ser humano e de mãe.

Ao meu amor, meu pai, Amaro Gonzaga, minha fonte de orgulho, minha força e meu maior incentivador.

Ao meu irmão, Adams Filipe, que mesmo distante geograficamente se fez presente em oração.

A Dona Judite, que foi, e é, uma mãe para mim, sempre me dando forças, torcendo e auxiliando em tudo, e principalmente nos momentos que mais precisei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Jacks, dono de um conhecimento imensurável e inspiração profissional para mim. Gratidão não só pela orientação, mas também pela amizade e ensinamentos. Obrigado por acreditar em mim quando nem eu mesmo acreditava.

A minha co-orientadora, Prof. Dr. Karoline Jamur, pela participação na banca de projeto e qualificação, pelas orientações nos artigos e pela disposição.

A Professora Andréa de Seixas, a qual tenho uma admiração gigante, pela colaboração em todo processo do mestrado, desde o projeto de pesquisa até a defesa final, e também na coordenação da Pós-Graduação.

Ao Professor Rodrigo Mikosz, ao qual passei a admirar, pela colaboração no estágio docência, na banca de projeto e qualificação, e também pela confiança na condução do VII SIMGEO.

A Professora Regiane Dalazoana, pela participação e contribuições na defesa final.

As minhas irmãs de coração: Rayanne Chagas e Estefane Patrícia, pela cumplicidade, apoio, auxílio, incentivo, colaboração e por tornar esses dois anos bem mais leves. Meninas, sem vocês tudo isso seria bem mais difícil.

A minha namorada, Nathaly Marlla, por sua compreensão e por ser calma nos momentos de aflições.

Aos meus amigos de turma, em especial Aline Neves, Kelly Ferri, Gabriela Dayse, Inessa Racine, Thalles Ramon, Márcio Cruz, Antônio Celso, Ulisses Alencar, Rodrigo Kleber, Catarina Ribeiro, Márcio Bezerra e Absalão Aranha, pela amizade e incentivo.

A Equipe de Jovem de Nossa Senhora do Silêncio, por ser sempre minha base, e a minha equipe de Setor, pela compressão e força nos dois anos de caminhada.

Aos meus amigos de graduação: Rafael Lima, Danny Lima, Saulo Costa, Luan Péricles e Rony Viana, pela amizade, cuidado, atenção e carinho.

A toda equipe da Vibe Eventos, pela compreensão e por ser sempre uma família.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco. Em especial a secretária Elizabeth Galdino, por toda paciência, ajuda e informações.

Ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da bolsa de estudos durante os 2 anos de mestrado.

Muito obrigado a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para a conclusão de mais essa etapa da minha formação.

RESUMO

O conhecimento acerca das variações do nível do mar tem um papel importante para identificar mudanças climáticas, sejam elas globais ou regionais, visto que o aumento do nível do mar está amplamente associado a essas mudanças e afeta diretamente as zonas costeiras. O GGOS (*Global Geodetic Observing System*), da IAG (*International Association of Geodesy*), identificou a mudança do nível do mar como um dos seus principais temas e o estabeleceu como um de seus focos de pesquisa. O Tema 3 do GGOS, Compreensão e Previsão da Elevação e Variabilidade do Nível do Mar (*Understanding and Forecasting Sea Level Rise and Variability*), tem como um dos objetivos a compreensão adequada da elevação e variabilidade global, e regional/local, do nível do mar, integrando diferentes técnicas de monitoramento, pontuais e globais. Neste contexto, analisou-se a variação temporal do nível do mar na América do Sul utilizando dados maregráficos de três bancos de dados: 1) Serviço Permanente para o Nível Médio do Mar (PSMSL – *Permanent Service for Mean Sea Level*); 2) Centro de estudos do Nível do Mar da Universidade do Haváí (*University of Hawaii Sea Level Center*); e 3) Rede Maregráfica Permanente para Geodésia do IBGE (RMPG). Para identificar a variação vertical crustal local, foram utilizadas as coordenadas semanais das estações fornecidas pela rede SIRGAS de monitoramento contínuo, por meio da componente altimétrica. O processamento e análise dos dados foram realizados com auxílio do módulo análise de maré do *software* AstGeoTop. A estrutura dessa dissertação seguiu o modelo de artigo, com os seguintes trabalhos: a) Análise da estação maregráfica de Fortaleza para determinar as variações do nível do mar; b) Estimativa do nível do mar na América do Sul a partir de Registros Maregráficos e Coordenadas SIRGAS-CON; e, c) O nível do mar na América do Sul por meio de análise de séries temporais. Os resultados evidenciaram um aumento do nível absoluto do mar na região estudada de $1,15 \text{ mm/ano} \pm 0,76 \text{ mm/ano}$. As análises efetuadas passam a contribuir para melhorar a descrição da variação do nível do mar na América do Sul.

Palavras-chave: Nível do mar. GGOS. Movimento vertical. GNSS.

ABSTRACT

Knowledge about sea level variations plays an important role in identifying climate change, whether global or regional, as sea level rise is largely associated with these changes and directly affects coastal zones. The Global Geodetic Observing System (GGOS), International Association of Geodesy (IAG), identified sea level change as one of its main themes and established it as one of its research focuses. GGOS Theme 3, Understanding and Prediction of Understanding and Forecasting Sea Level Rise and Variability, has as one of its objectives the proper understanding of global and regional / local elevation and variability of sea level, integrating different point and global monitoring techniques. In this context, the sea level variation in South America was analyzed using data from three databases: 1) Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL); 2) University of Hawaii Sea Level Center; and 3) IBGE Permanent Maregraphic Network for Geodesy (RMPG). To identify the local crustal vertical variation, the weekly coordinates of the stations provided by the continuous monitoring SIRGAS network were used, through the altimetric component. Data processing and analysis were performed with the aid of the tide analysis module of the AstGeoTop software. The structure of this dissertation followed the article model, with the following works: a) Analysis of Fortaleza's sea station to determine sea level variations; b) Estimation of sea level in South America from SIRGAS-CON Maregraphic Records and Coordinates; and (c) sea level in South America by means of time series analysis. The results showed an increase in absolute sea level in the studied region of $1.15 \text{ mm/year} \pm 0.76 \text{ mm/year}$. The analyzes carried out contribute to improve the description of sea level variation in South America.

Keywords: Sea level. GGOS. Vertical movement. GNSS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Força de Maré.....	19
Figura 2 –	Marégrafo tradicional com gravador e gráfico.....	23
Figura 3 –	Situação observacional básica de monitoramento geodésico do marégrafo.....	25
Figura 4 –	América do Sul.....	28
Quadro 1 –	Quantidade de estações maregráficas e GNSS (SIRGAS-CON) na área de estudo.....	29
Figura 5 –	Divisão das placas tectônicas no mundo.....	30
Figura 6 –	Fluxograma de metodologia.....	31
Quadro 2 –	Relação entre a regressão linear e regressão quadrática.....	37

Artigo 1

Quadro 1 –	Formato dos arquivos disponibilizados pela UHSLC	42
Quadro 2 –	Formato dos arquivos disponibilizados pela RMPG	42
Figura 1 –	Representação da nomenclatura dos arquivos do processamento SIRGAS-CON.....	43
Figura 2 –	Barra de ferramentas com aplicativos de Análise de Maré @versão 2016.09.01 do AstGeoTop	43
Figura 3 –	Dados maregráficos da estação Fortaleza – UHSLC, série temporal de 1955 a 1968 (1), 1995 a 1998 (2) e 2008 a 2015 (3).....	45
Figura 4 –	Dados maregráficos da estação Fortaleza – UHSLC, série temporal de 1955 a 1968 (1), 1995 a 1998 (2) e 2008 a 2015 (3), com os dados filtrados e calibrados.....	45
Figura 5 –	Dados maregráficos da estação Fortaleza – RMPG.....	47
Figura 6 –	Dados altimétricos da estação CEFT, série temporal 25/05/2011 a 06/06/2018.....	48

Artigo 2

Figura 1 –	Estações maregráficas com séries temporais com mais de 20 anos de dados na América do Sul e estações GNSS da rede SIRGAS-CON próximas aos marégrafos.....	56
Figura 2 –	Representação para obtenção do valor do nível do mar absoluto integrando estações maregráficas e estações GNSS.....	60

Quadro 1 – Comparação entre tendência (velocidade) do nível relativo do mar obtida pelos autores com outros autores.....	65
Figura 3 – Médias mensais do nível do mar a partir dos dados do PSMSL	66
Figura 4 – Estimativa do Nível do Mar a partir das informações da AVISO.....	73

Artigo 3

Figura 1 – Séries mareográficas mensais no Chile, nas estações Antofagasta e Valparaíso com dados do UHSLC.....	85
Figura 2 – Série mareográficas mensais na Colômbia	86
Figura 3 – Série mareográficas mensais no Equador e no Peru.....	87
Figura 4 – Séries mareográficas mensais no Brasil, na estação Rio de Janeiro e Cananéia, e na Argentina, estação Buenos Aires, com dados do UHSLC.....	87
Figura 5 – Séries mareográficas diárias da RMPG com possíveis mudanças de referencial.....	88
Figura 6 – Séries Mareográficas Diárias e Mensais de Fortaleza e Salvador (RMPG).....	89
Figura 7 – Séries Mareográficas Diárias e Mensais de Santana e Imituba (RMPG).....	90

LISTA DE TABELAS

Artigo 1

Tabela 1 – Estações maregráficas da UHSLC e da RMPG, em Fortaleza, com os órgãos que originaram os dados, tipo de dado originalmente gerado e taxa de coleta de dados.....	41
Tabela 2 – Estações maregráficas da UHSLC e da RMPG, em Fortaleza, com anos de origem e fim da série de dados.....	41
Tabela 3 – Descrição da estação pertencente a rede SIRGAS-CON utilizada neste trabalho.....	43
Tabela 4 – Descrição das estações com combinação IBGE.....	43
Tabela 5 – Valores analisados para a estação Maregráfica de Fortaleza – UHSLC.....	46
Tabela 6 – Valores analisados para a estação Maregráfica de Fortaleza – RMPG.....	47

Artigo 2

Tabela 1 – Estações Maregráficas.....	55
Tabela 2 – Estações GNSS	57
Tabela 3 – Resultado da regressão linear para as estações maregráficas.....	63
Tabela 4 – Resultados da movimentação vertical crustal das estações GNSS por regressão linear	70
Tabela 5 – Nível absoluto do mar nas estações maregráficas.....	72

Artigo 3

Tabela 1 – Tendências do nível relativo do mar (TM) obtidas a partir dos marégrafos (M); Tendências do movimento vertical obtidas com as coordenadas da rede SIRGAS-CON (TS); Nível absoluto do mar, corrigido dos movimentos verticais crustais (M+SIRGAS).....	84
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	MARÉS	17
2.1.1	Breve histórico	17
2.1.2	Força e potencial de maré	18
2.1.3	Tipos de marés	21
2.1.4	Instrumentos para medição do nível do mar	22
2.1.5	Movimentos verticais da crosta da Terra	24
2.2	SISTEMA GLOBAL DE OBSERVAÇÃO GEODÉSICA - GGOS	26
3	ÁREA DE ESTUDO	28
3.1	A PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA (SOAM)	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	SÉRIES TEMPORAIS	32
4.1.1	Serviço Permanente para Nível Médio do Mar – PSMSL	32
4.1.2	Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Havaí – UHSLC.....	33
4.1.3	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG	34
4.1.4	Rede GNSS SIRGAS-CON	35
4.2	ANÁLISE POR REGRESSÃO	37
5	RESULTADOS	39
5.1	ARTIGO 1 – ANÁLISE DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA PARA DETERMINAR AS VARIAÇÕES DO NÍVEL DO MAR	39
5.2	ARTIGO 2 – ESTIMATIVAS DO NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL A PARTIR DE REGISTROS MAREGRÁFICOS E COORDENADAS SIRGAS-CON	50

5.3	ARTIGO 3 – O NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL POR MEIO DE ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS	79
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
6.1	CONCLUSÕES	93
6.2	RECOMENDAÇÕES	93
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC, 2018), as atividades humanas já provocaram um aumento global médio da temperatura¹ de aproximadamente 1° C e devem provocar um aumento de 1,5°C entre os anos de 2030 e 2052. O aumento da temperatura já resultou em profundas alterações no planeta Terra, sendo uma delas a elevação do nível do mar. A expansão térmica oceânica e o derretimento das geleiras são responsáveis pela maior parte do aumento do nível do mar observado nas últimas décadas (CHURCH et al., 2013).

A elevação do nível do mar, e seu impacto na zona costeira, foi identificado como um dos principais desafios enfrentados pela comunidade científica no século XXI. O GGOS (*Global Geodetic Observing System*), estabelecido pela IAG (*International Association of Geodesy*) para integrar as três áreas fundamentais da Geodésia, observa o Sistema Terra em escala global, contribuindo para a pesquisa de mudanças globais por meio do monitoramento e modelagem dos processos dinâmicos da Terra. Variação, variabilidade e previsão do nível do mar é um dos temas do GGOS (*Theme 3 – Sea Level Change, Variability and Forecasting*) e tem como objetivo demonstrar a importância da sua estrutura para uma integração do monitoramento e da previsão do nível do mar (CHURCH et al., 2010, GGOS, 2019).

O estudo de séries temporais do nível do mar fornece uma melhor compreensão da mudança do nível do mar. Alguns bancos de dados internacionais disponibilizam gratuitamente os registros históricos do nível do mar obtido nas estações maregráficas ao longo da zona costeira. Como exemplo, têm-se o PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*), que disponibiliza registros médios mensais e anuais de 1535 estações maregráficas, e o UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*), que fornece registros médios horários e diários de 614 estações maregráficas. No Brasil, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) estabeleceu a RMPG (Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia), que atualmente conta com cinco estações maregráficas ativas, com medições do nível do mar a cada 5 minutos.

¹ O nível atual de aquecimento global é definido como a média de um período de 30 anos centrado em 2017, supondo que a recente taxa de aquecimento continue.

As estações maregráficas, geralmente, estão referenciadas a um marco geodésico fixado na superfície terrestre. Assim, os marégrafos medem o nível relativo do mar, sendo afetados pelos movimentos verticais crustais (ou movimentos tectônicos). Em algumas regiões, devido a subsidência da placa tectônica, por exemplo, o nível do mar pode apresentar uma elevação exagerada, e em outros, devido a um soerguimento da crosta, pode apresentar um rebaixamento exagerado do nível do mar. Essa movimentação vertical da crosta pode ser detectada com o uso de técnicas de levantamentos geodésicos utilizando o monitoramento contínuo por GNSS (ABLAIN et al, 2019).

Assim, o objetivo geral e os específicos a serem tratados envolvendo a análise do nível do mar na América do Sul são definidos na seção a seguir.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é de analisar o nível do mar na América do Sul com base em dados de marégrafos e Posicionamento GNSS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar séries temporais maregráficas disponibilizadas pelos centros PSMSL, UHSLC e RMPG;
- b) Determinar a variação relativa e absoluta do nível do mar nas estações maregráficas em estudo;
- c) Detectar o movimento vertical crustal nas proximidades das estações maregráficas da América do Sul utilizando dados da rede SIRGAS-CON.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. No Capítulo 2 é feita uma revisão de literatura com os aspectos teóricos relacionados a marés. Ainda neste capítulo, destaca-se o Sistema Global de Observação Geodésica (GGOS – *Global Geodetic Observing System*). No Capítulo 3 é apresentada a área de estudo. No Capítulo 4, apresentam-se os materiais e métodos com um fluxograma descrevendo os procedimentos empregados, bem como é discorrido onde foram obtidos os dados e o método aplicado na análise das séries temporais. Os Artigos, resultados desta dissertação, estão apresentados no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as recomendações para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo de revisão de literatura, optou-se por destacar informações sobre o estudo do nível do mar. Portanto, um breve histórico sobre o estudo de marés, os conceitos de força e potencial de maré, os tipos de marés, os equipamentos utilizados para obter a variação do nível do mar e sobre o movimento vertical da crosta são apresentados a seguir. Para finalizar o capítulo é retratado o GGOS, definido pela Associação Internacional de Geodésia (IAG – *International Association of Geodesy*).

2.1 MARÉS

O deslocamento de partículas líquidas e as deformações elásticas da crosta, marés oceânicas e terrestres, respectivamente, sofrem a influência gravitacional da Lua e do Sol e constituem um assunto de grande relevância pelas suas implicações na Oceanografia, na Geofísica e na Geodésia (GEMAEL, 2012).

2.1.1 Breve histórico

As marés oceânicas e terrestres são exploradas desde a antiguidade. Aproximadamente em 300 a.C., o astrônomo e explorador grego, Pytheas fez uma longa viagem navegando da parte ocidental do Mar Mediterrâneo para as Ilhas Britânicas e observando as grandes marés do oceano, percebeu que as marés oceânicas, de alguma forma, eram controladas pelo dia lunar e pelas fases da Lua (EKMAN, 1993).

No ano 23 d.C., o grego Strabon, em seu livro *Geographika*, descreve, baseado nos estudos de Posidônio, que o fluxo e o refluxo das marés, tornam-se maiores no tempo da lua nova e então diminuem no quarto crescente, aumentando novamente até a lua cheia e diminuindo novamente no quarto minguante. Posidônio ainda observou que um poço se comportava inversamente ao fluxo e refluxo do mar, sendo essas as primeiras observações das marés terrestres (EKMAN, 1993).

Assim, as características mais importantes das marés eram conhecidas. 1600 anos depois, Kepler e Galileu tentaram explicar o fenômeno das marés de forma física, porém, a solução física para o fenômeno foi dada em 1687, quando Isaac Newton publicou a Lei da Gravitação Universal em seu livro *Philosophiae Naturalis Principia*

Mathematica, indicando que a origem das marés era a força atrativa da Lua e do Sol, sendo diferente a diferentes distâncias dos corpos celestes (EKMAN, 1993).

Deste modo, o fenômeno das marés pode ser definido como a oscilação vertical da superfície do mar sobre a Terra ao longo do tempo, causado, *a priori*, pelas diferenças na atração gravitacional da Lua e, em menor proporção, do Sol sobre os diversos pontos da Terra (MIGUENS, 1996; CORDINI, 1998).

A descoberta de uma teoria matemática das marés foi feita por Laplace. Ele introduziu o potencial de maré e mostrou, matematicamente, que a maré é separável em três tipos diferentes: longa periódica, diurna e semidiurna. Além disso, Laplace foi o primeiro a tratar as marés oceânicas fora do estado de equilíbrio (EKMAN, 1993).

Já durante a segunda metade do século XIX, o físico inglês William Thomson, introduziu a ideia de que a Terra não é um corpo totalmente rígido, estando sujeito as deformações em consequência da força de atração da Lua e do Sol, a exemplo do que ocorre com os oceanos, entretanto com uma amplitude reduzida. Propondo assim, a existência de marés terrestres, as quais poderiam ser descobertas e medidas por observações de marés oceânicas de longo período (EKMAN, 1993).

Thomson ainda introduziu a análise harmônica na predição de marés, que continuou sendo estudada por George Darwin e Arthur Doodson, sendo este último, o responsável por compilar as amplitudes e velocidades angulares de todos os constituintes das marés que podem ser determinadas com base na teoria gravitacional das marés (LISITZIN, 1974).

2.1.2 Força e Potencial de Maré

Essa oscilação recebe o nome de força de maré, justamente por decorrer, basicamente, da Lei da Gravitação Universal, de Isaac Newton, onde dois corpos se atraem com força proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância, que separa seus centros de gravidade.

Os corpos celestes influenciam a força de maré, sendo a Lua, por sua proximidade com a Terra, o que mais influencia, seguidamente do Sol, esse por sua vez, por sua enorme massa. Os planetas e estrelas também influenciam, mas de forma bem menos significativa.

Considerando um modelo esférico e rígido, designa-se força de maré em um ponto P a diferença entre a força de atração exercida pelo Sol e pela Lua sobre a

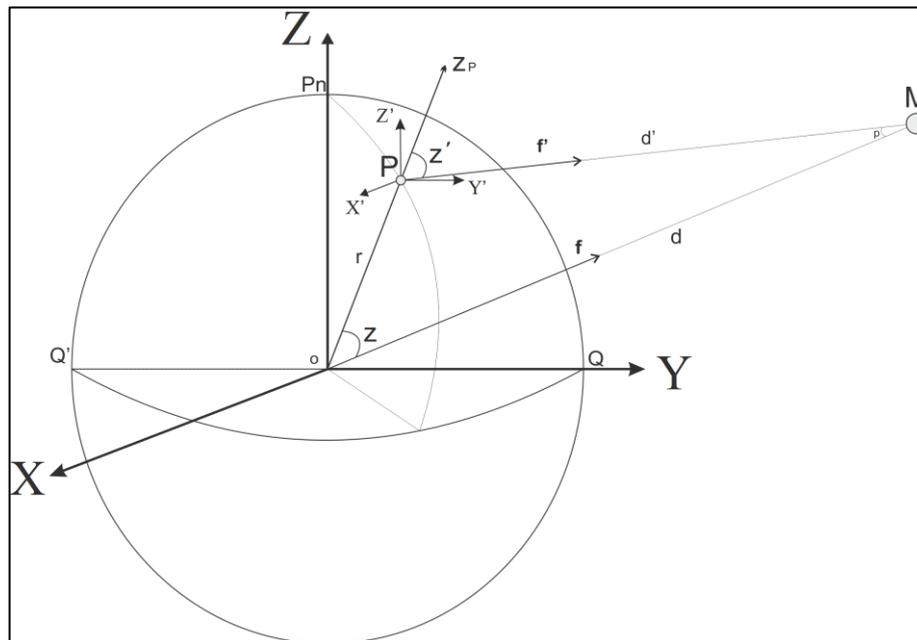
unidade de massa colocada nesse ponto e no centro do modelo (TORGE, 2001; GEMAEL, 2012).

Portanto, a partir da Figura 1, a Força de Maré F é dada pela Equação 1:

$$F = f' - f \quad (1)$$

em que f' é a força de atração em um ponto P da Terra e f é a força de atração no centro da Terra.

Figura 1 – Força de maré.



Fonte: Adaptado de Gemael (2012).

Aplicando a Lei da Gravitação, considerando, portanto, a massa da Terra sendo unitária, e M sendo a massa de um dos astros, Lua ou Sol, obtêm-se as forças de atração f e f' de acordo com as Equações 2 e 3, respectivamente (TORGE, 2001; GEMAEL, 2012):

$$f = \frac{GM}{d^2} \quad (2)$$

$$f' = \frac{GM}{d'^2} \quad (3)$$

onde:

- a) G é a constante de gravitação universal;

- b) M é a massa do astro perturbador;
- c) d é a distância entre o centro de massa da Terra e o astro perturbador;
- e
- d) d' é a distância entre o ponto P na Terra e o astro perturbador.

Conhecendo a distância zenital (Z), encontra-se a força vertical (F_v) e a força horizontal (F_h) atuantes no sistema aplicadas ao centro da Terra, que ficam definidas pelas Equações 4 e 5 (GEMAEL, 2012):

$$F_v = GM \left(\frac{\cos Z'}{d'^2} - \frac{\cos Z}{d^2} \right) \quad (4)$$

$$F_h = GM \left(\frac{\sin Z'}{d'^2} - \frac{\sin Z}{d^2} \right) \quad (5)$$

Com algumas manipulações algébricas, (GEMAEL, 2012), é possível obter a força horizontal resultante e a força vertical resultante, descritas nas Equações 6 e 7:

$$F_v = \frac{GMp^3}{r^2} (3 \cos^2 Z - 1) \quad (6)$$

$$F_h = \frac{3GMp^3 \sin 2Z}{2r^2} \quad (7)$$

A partir das derivadas direcionais do potencial de maré (W), definido como a diferença entre o potencial no ponto P e no centro da Terra, pode-se obter as componentes da força de maré. A Equação 8 apresenta o potencial de maré (GEMAEL, 2012):

$$W = \frac{GM}{d} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r}{d} \right)^n P_n(Z) \quad (8)$$

sendo:

- a) M : massa do astro perturbador;
- b) d : distância geocêntrica do astro perturbador;
- c) Z : distância zenital; e

d) P_n : Polinômio de Legendre de grau n .

Segundo Gemael (2012), nas aplicações geodésicas o desenvolvimento do potencial de maré (W) pode ser limitado ao primeiro termo, ou seja, $n = 2$. Resultando assim, na Equação 9.

$$W = \frac{GMr^2(3\cos^2 Z - 1)}{2d^3} \quad (9)$$

2.1.3 Tipos de Marés

Devido aos efeitos de massa terrestres, latitude do lugar, águas restritas, somados aos efeitos do Sol e da Lua, entre outros efeitos, as marés não ocorrem todos os dias à mesma hora em um mesmo local, podendo ser divididas em marés diurnas, semidiurnas e mistas.

Segundo Miguens (1996), as marés diurnas constituem um padrão onde ocorre apenas uma preamar e uma baixa-mar em cada dia lunar, nas semidiurnas ocorrem duas preamares e duas baixa-mares, e as marés mistas são caracterizadas por grandes diferenças de altura entre duas preamares e duas baixa-mares consecutivas, sendo a preamar a maior altura que alcançam as águas em uma elevação de maré e a baixa-mar a menor altura que alcançam as águas em uma declinação de maré.

Na teoria, cada ponto na Terra apresentaria duas preamares e duas baixa-mares no período de 24 horas, tempo este que a Terra leva para rotacionar em torno de seu eixo. Entretanto, a Lua gira em torno da Terra no mesmo sentido em que a Terra gira em torno de seu eixo e, assim, o tempo que a Terra leva para efetuar uma rotação completa com relação à Lua é chamado de dia lunar, e dura aproximadamente 24 horas e 50 minutos. Como resultado da inclinação do eixo da Terra e o dia lunar, as preamares e as baixa-mares sucessivas não são normalmente de níveis iguais (MIGUENS, 1996).

A depender da posição relativa do sistema Lua-Terra-Sol, tem-se amplitudes de marés diferentes. Isso, deve-se aos movimentos celestiais como rotação da Terra, declinação da Lua e do Sol, translação da Terra e da Lua e a precessão da Lua.

Quando a Lua, a Terra e o Sol estão alinhados, as forças de atração da Lua e do Sol se somam gerando as maiores marés altas (preamares) e as menores marés

baixas (baixa-mares). Esse alinhamento acontece duas vezes por mês, e é caracterizado pela Lua Nova e Lua Cheia, produzindo assim, as marés de sizígia, ou seja, a maior amplitude de maré (MCCORMICK e THIRUVATHUKAL, 1981; MIGUENS, 1996).

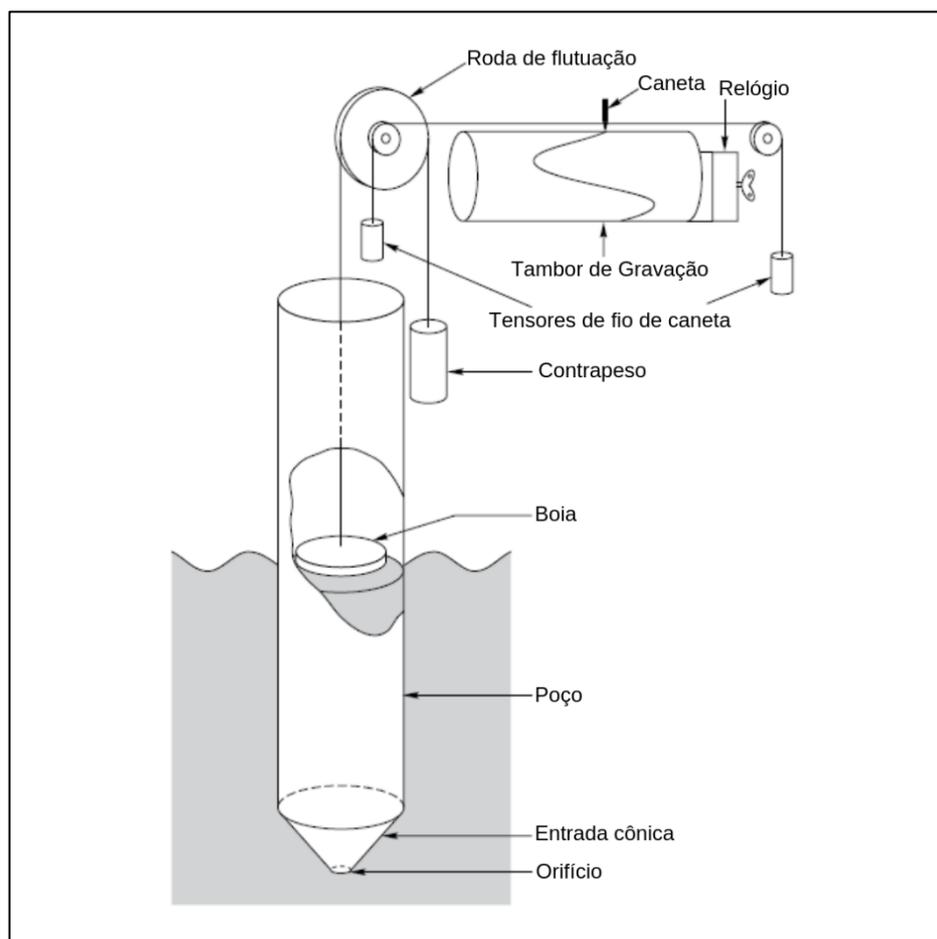
Quando os três astros formam um ângulo de 90° entre si, tem-se, por ocasião, o quarto crescente e o quarto minguante da Lua. Então, nessa configuração, as forças de atração do Sol e da Lua se subtraem e tem-se as marés de quadratura, ou seja, a menor amplitude de maré, com menores marés altas e maiores marés baixas (MCCORMICK e THIRUVATHUKAL, 1981; MIGUENS, 1996).

Para melhor conhecimento do fenômeno das marés é de suma importância a distinção entre as marés oceânicas e as marés terrestres. Segundo Wang (1985), as marés oceânicas dependem da composição da costa, da topografia do fundo oceânico, das ressonâncias em bacias costeiras e das correntes do oceano. Já as marés terrestres, que são as deformações do fundo oceânico e da Terra, dependem das forças gravitacionais do Sol, da Lua e de outros planetas. As marés terrestres, dividem-se em maré gravimétrica, sendo esta a responsável por alterações na componente vertical, em maré extensométrica, causando alterações na componente horizontal, e em maré clinométrica, afetando a inclinação da vertical (DE FREITAS, 1993).

2.1.4 Instrumentos para medição do nível do mar

Os marégrafos, ou indicadores de maré, se originaram da proposta de Moray, datada de 1665, de usar um poço, tubo vertical no qual uma boia, ou flutuador, se move para cima e para baixo à medida que o nível de água no seu interior varia, para medir as mudanças no nível do mar. A Figura 2 ilustra o esquema de um marégrafo deste tipo, onde o mesmo possui no fundo do tubo um orifício que permite que a água do mar flua para dentro e para fora de modo que o nível dentro do tubo seja, *a priori*, o mesmo que o exterior (WOODWORTH, PUGH e PLATER, 2015).

Figura 2 – Marégrafo tradicional com gravador e gráfico.



Fonte: Adaptado de IOC (2006).

Os métodos de calibração de um marégrafo permitem que os níveis observados do mar estejam relacionados com as altitudes dos marcos de referência, obtendo assim, o nível relativo do mar, ou seja, em relação ao referencial terrestre.

O Volume IV do Manual do Nível do Mar, da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (IOC, 2006), lista quatro tipos de tecnologias de medição maregráfica em uso comum:

- a) poço de assentamento e flutuação: no qual a filtragem das ondas é feita através do projeto mecânico do poço;
- b) sistemas de pressão: em que a pressão subsuperficial é monitorada e convertida em cota com base no conhecimento do nível da água e aceleração local devido à gravidade. Tais sistemas têm aplicação específica adicional em estudos de circulação oceânica, nos quais diferenças de pressão são mais relevantes do que diferenças de cotas;

- c) sistemas acústicos: em que o tempo de trânsito de um pulso sonoro é usado para calcular a distância até a superfície do mar;
- d) sistemas de radar: similares à transmissão acústica, mas usam frequências de radar.

Segundo Woodworth, Pugh e Plater (2015), destes, os medidores de radar são os que oferecem mais vantagens, sendo a principal a facilidade de instalação e manutenção, não exigindo fixações extensas em uma parede do porto ou píer. Além disso, ao contrário dos sistemas acústicos, as medições por radar não são afetadas por gradientes de temperatura ou temperatura vertical. Assim, os medidores de radar, tornaram-se uma opção econômica para as estações de nível do mar, porém com algumas ressalvas. Uma de suas desvantagens inclui sua exposição potencial a danos durante grandes tempestades ou tsunamis, ou que fragmentos flutuantes ou barcos possam passar sob o feixe, resultando em falsas medições.

Novas técnicas para medições do nível do mar vêm sendo estudadas e aprimoradas, como por exemplo: sensores flutuantes (boias) equipados com GPS para a determinação instantânea das alturas da superfície do mar, servindo para calibrar dados de satélites altímetros, e reflectometria GNSS, onde os sinais diretos e refletidos pelo oceano são detectados pelos receptores, e a informação altimétrica é extraída do atraso nos tempos de chegada dos sinais refletidos em relação aos sinais diretos (IOC, 2006).

Mais detalhes técnicos sobre marégrafos podem ser encontrados nos manuais da Comissão Oceanográfica Intergovernamental sobre medição e interpretação do nível do mar (IOC, 2002; IOC, 2006, IOC, 2016).

2.1.5 Movimentos Verticais da Crosta da Terra

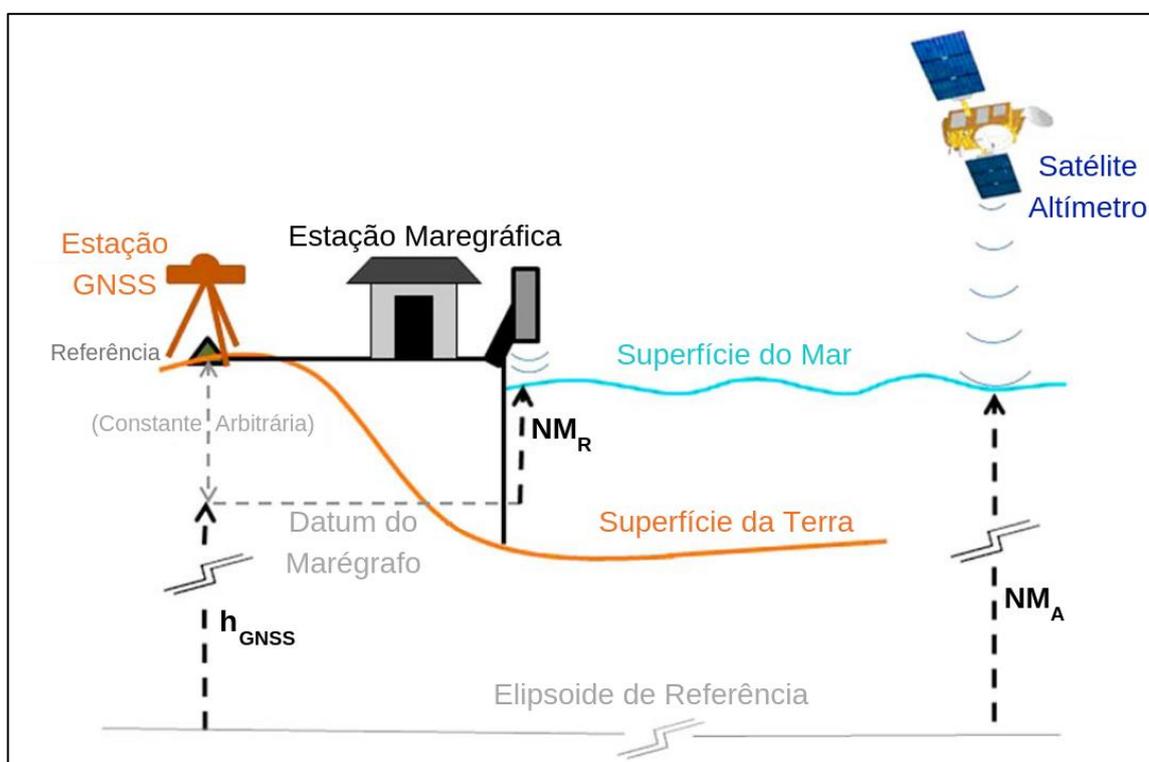
Os marégrafos medem as mudanças no nível do mar na posição relativa entre a crosta e a superfície do oceano. Essas medidas são difíceis de interpretar porque são influenciadas por vários fenômenos que induzem movimentos verticais crustais. Entretanto, os movimentos verticais crustais, que afetam os marégrafos, podem ser medidos com precisão por meio de técnicas geodésicas, como GPS e DORIS, possibilitando assim, separar os movimentos crustais das variações geocêntricas do nível do mar (BLEWITT et al., 2010, WÖPPELMANN e MARCOS, 2016).

Segundo Blewitt et al. (2010), o GPS contínuo é a técnica de escolha na determinação do movimento vertical crustal devido a sua alta precisão e conexão direta com o ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) por meio dos produtos IGS (*International GNSS Service*).

A Figura 3 ilustra a situação observacional do monitoramento geodésico dos marégrafos utilizando uma estação GNSS. O marégrafo fornece a taxa de variação relativa do nível do mar (NM_R), em relação ao terreno representado pelo marco de referência, e a taxa de variação vertical geocêntrica (h_{GNSS}), ou altitude geodésica, pode ser estimada usando a estação GNSS. Assim, uma expressão básica para a mudança absoluta, ou geocêntrica, do nível do mar (NM_A) é dada, na Equação 10, por (WÖPPELMANN e MARCOS, 2016):

$$NM_A = NM_R + h_{GNSS} \quad (10)$$

Figura 3 – Situação observacional básica de monitoramento geodésico do marégrafo.



Fonte: Adaptado de WÖPPELMANN e MARCOS (2016)

Portanto, conhecendo a movimentação vertical crustal no marco geodésico ligado ao marégrafo, ou em marcos geodésicos nas suas proximidades, é possível

referir os dados maregráficos ao mesmo sistema de referência global, permitindo a comparação, em termos absolutos, entre os diferentes conjuntos de dados maregráficos espalhados pelo mundo e, também, com os dados dos satélites altímetros.

2.2 SISTEMA GLOBAL DE OBSERVAÇÃO GEODÉSICA – GGOS

A IAG começou o projeto do Sistema Global de Observação Geodésica (GGOS – *Global Geodetic Observing System*) durante a reunião da IUGG (*The International Union Of Geodesy and Geophysics*) em 2003, no Japão. Os dois primeiros anos foram dedicados à definição de toda estrutura organizacional interna do GGOS e sua relação com as organizações externas, em 2005 iniciou a implementação do projeto e em 2007 definiu o GGOS como o Sistema de Observação da IAG. O GGOS fornece as ligações entre os Serviços da IAG e os principais programas nas observações da Terra e nas ciências da Terra, sendo uma fonte única para os usuários dos serviços geodésicos (PLAG e PEARLMAN, 2009).

Avançando na compreensão da dinâmica do Sistema Terra, quantificando as mudanças do nosso planeta no espaço e no tempo, o GGOS visa fornecer as observações necessárias para monitorar, mapear e entender as mudanças na forma, rotação e distribuição de massa da Terra, fornecer o referencial geodésico global fundamental para medir e interpretar consistentemente os principais processos de mudança global e para muitas outras aplicações científicas e sociais, e beneficiar a ciência e a sociedade, fornecendo a base sobre a qual os avanços na ciência e nas aplicações do sistema planetário e da Terra são construídos (KUTTERER e NEILAN, 2016).

Segundo Plag e Pearlman (2009), o GGOS adiciona nova qualidade e dimensão à pesquisa do sistema terrestre, combinando as técnicas geodésicas em um sistema de observação da mais alta precisão em um quadro terrestre global bem definido e reproduzível. Para atingir seus objetivos, o sistema de observação deve combinar a mais alta precisão de medição (uma precisão relativa de 0,01 ppb, ou seja 10^{-11}) com consistência espacial e temporal mantida ao longo de décadas.

O GGOS possui o foco em quatro temáticas, que são:

- a) sistema de altitude unificado (*Unified Height System*):

Tem como objetivo unificar os sistemas de referência vertical existentes em todo o mundo, e isto deve ser alcançado com a definição e realização de um sistema vertical de referência global, IHRS (*International Height Reference System*) e IHRF (*International Height Reference Frame*), respectivamente.

b) Monitoramento de riscos geológicos (*Geohazards Monitoring*):

Essa área foco tem como objetivo acelerar e orientar a aceitação de novas capacidades geodésicas para melhorar a resiliência aos riscos ambientais global e regional;

c) Alteração, variabilidade e previsão do nível do mar (*Sea Level Change, Variability, and Forecasting*):

O GGOS identificou a mudança do nível do mar como um dos temas transversais da Geodésia e estabeleceu este tópico como uma de suas áreas de foco, pois sua elevação e seu impacto nas zonas costeiras é uma das questões-chave na discussão sobre as mudanças climáticas;

d) Pesquisa Geodésica sobre o Clima Espacial (*Geodetic Space Weather Research*):

Tem como objetivos principais a melhoria do posicionamento e navegação através do desenvolvimento de modelos de alta precisão e melhoria da determinação da órbita de satélites através do desenvolvimento de modelos de arrasto atmosférico de alta resolução.

3 ÁREA DE ESTUDO

A América do Sul, área de estudo da presente dissertação, é um subcontinente que compreende a porção meridional da América (Figura 4). Localiza-se entre as latitudes 12°N e 56°S, compreendendo terras tanto em baixas quanto em médias latitudes, possuindo uma geografia bastante diversificada (REBOITA et al., 2010). Ao Norte une-se à América Central pelo Panamá, e, ao sul separa-se da Antártida pelo estreito de Drake. Seus limites naturais são: ao norte com o mar do Caribe; a leste, nordeste e sudeste com o Oceano Atlântico; e a oeste com o Oceano Pacífico.

Figura 4 – América do Sul



Fonte: Adaptado de IBGE (2018)

Na área de estudo, localizam-se diversos marégrafos e estações GNSS. O Quadro 1 apresenta a disponibilidade das estações maregráficas e estações GNSS, seu respectivo banco de dados e a latência dos dados.

Quadro 1 – Quantidade de estações maregráficas e GNSS (SIRGAS-CON) na área de estudo

Banco de Dados	Quantidade	Latência dos dados
PSMSL	67	Mensais/Anuais
UHSLC	59	Horários/Diários
RMPG	6	5min/1min
SIRGAS-CON	≈340	Semanais

Fonte: O Autor (2019).

Os detalhes de cada um dos bancos de dados são apresentados no Capítulo 4.

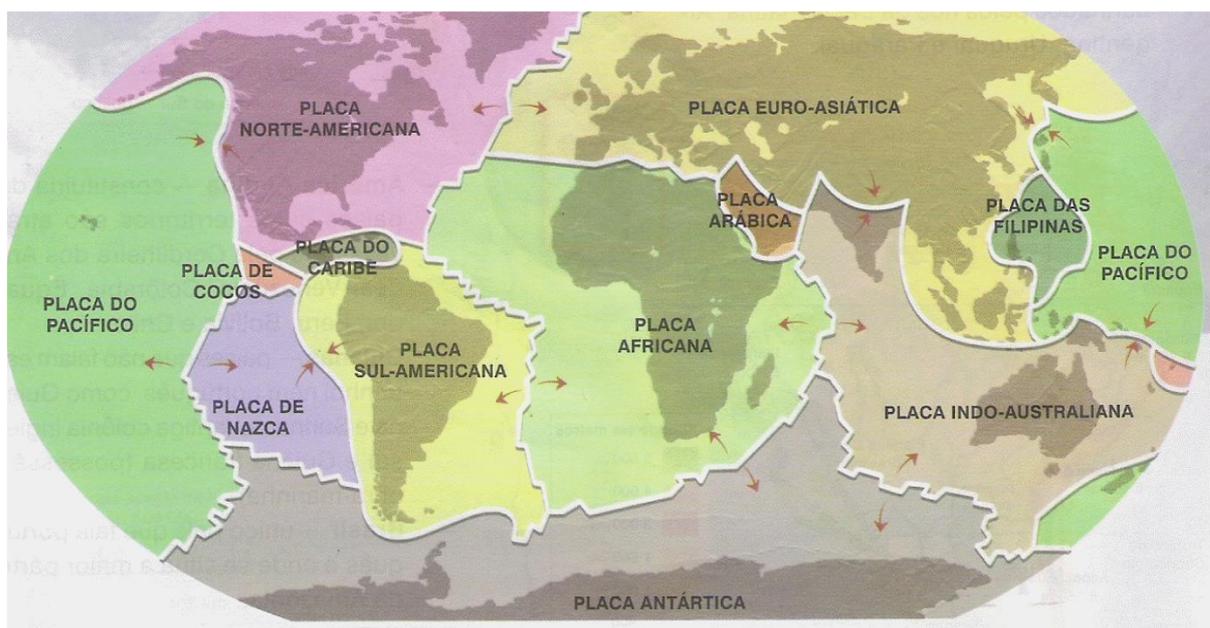
3.1 A PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA (SOAM)

A placa tectônica Sul-Americana (SOAM), segundo a divisão de Condie (1997), é uma das sete grandes placas, as principais do mundo (placa Euroasiática, placa da Antártida, placa Norte-Americana, placa Sul-Americana, placa do Pacífico, placa Africana e placa Australiana). A SOAM limita-se a leste pela placa Africana, a oeste pela placa de Nazca, a placa Antártica ao sul, e ao norte pela placa do Caribe e Norte-Americana, Figura 5. Sabe-se que os continentes estão localizados sobre as placas, mas, não necessariamente a margem da placa é coincidente com a margem continental.

Como a Terra está sujeita a aspectos geodinâmicos, as placas se movimentam continuamente em diferentes direções a depender da região em que elas se encontram. Esta dinâmica faz com que as coordenadas geodésicas de um determinado ponto, localizado sobre as placas, variem e assim tornam-se dependentes da época na qual foram obtidas. Conhecendo a direção e a magnitude do movimento da placa, é possível determinar as coordenadas em função do tempo (PEREZ, 2002). Como exemplo, tem-se as coordenadas do SGB (Sistema Geodésico

Brasileiro) referidas a época de referência do SIRGAS2000, época 2000,4 (IBGE, 2005).

Figura 5 – Divisão das placas tectônicas no mundo



Fonte: <http://8oanobemilie.blogspot.com/2011/06/america-do-sul-e-seus-aspectos.html>

Existem diversos modelos de velocidade desenvolvidos para a América do Sul, entre eles: COSTA, SANTOS e GEMAEL (2003); PEREZ, MONICO e CHAVES (2003); VEMOS2009 (DREWES e HEIDBACH, 2009); SOUZA (2013); SOUZA E GARNÉS (2014); VEMOS2015 (SÁNCHEZ e DREWES, 2016); VEMOS2017 (DREWES e SÁNCHEZ, 2017).

Tais modelos mostram que existe um deslocamento da placa SOAM no sentido noroeste ($\approx 20^\circ\text{NW}$) em torno de 1cm por ano do lado do oceano Atlântico e do lado do Pacífico a direção muda para nordeste, em torno da mesma ordem de magnitude. Embora os modelos sejam bastante eficientes para obter o deslocamento horizontal da placa, ainda são carentes do movimento vertical da crosta. Os valores das velocidades pontuais em latitude, longitude, X, Y e Z para cada um dos modelos citados acima podem ser obtidos no módulo: modelo SOAM @ versão 2017.11.29 do software AstGeoTop (GARNÉS, 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para uma coordenação dos trabalhos que foram executados objetivando atingir os propósitos expostos para esta investigação, dividiu-se em três etapas principais a organização da parte metodológica, sendo elas: estudo do tema, aquisição dos dados, tratamentos dos dados e resultados, que são apresentados esquematicamente no fluxograma da Figura 6, que por sua vez mostra as subdivisões de cada uma das etapas. A seguir, cada uma das etapas será explanada com mais detalhes.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia



Fonte: O Autor (2019).

- **Estudo do tema:** Se refere a parte de levantamento bibliográfico sobre o assunto de estudo, apresentado no Capítulo 2, e delimitação da área de estudo, apresentado no Capítulo 3.
- **Aquisição dos dados:** Compreendeu a obtenção das séries temporais oriundas das estações maregráficas dos respectivos bancos de dados (PSMSL, UHSLC e RMPG) e das estações GNSS de monitoramento contínuo da Rede SIRGAS-CON para a área de estudo, descritos na seção 4.1. Por se ter uma grande quantidade de dados, utilizou-se *scripts* de arquivos em lotes (*.bat*) para fazer *download* dos dados e, quando necessário, códigos em linguagem MATLAB para formatar os dados ao modo de entrada do *software AstGeoTop*.

- **Tratamento dos dados e resultados:** Nesta etapa os dados coletados foram tratados e interpretados. Todo processamento foi executado no *software* AstGeoTop, módulo Análise de Maré @ versão 2016.09.01 (GARNÉS, 2019). Nesta versão do *software* é possível realizar filtragem, análise estatística, análise por regressão, análise por harmônicos, predição, pareamento, calibração e agrupamento dos dados (mais detalhes podem ser encontrados em CALADO, GARNÉS e JAMUR (2018), Seção 5.1 desta dissertação). As séries temporais foram analisadas por regressão linear (tendência) e regressão quadrática (aceleração).

4.1 SÉRIES TEMPORAIS

Entende-se como série temporal um conjunto de observações feitas sequencialmente ao longo do tempo, tendo como principal característica a dependência das observações vizinhas. Portanto, neste subitem, estão apresentadas as fontes dos dados das estações maregráficas e das estações GNSS selecionadas para a área de estudo. Os bancos de dados das séries temporais são apresentados dividindo-os em quatro subitens: **i)** Serviço Permanente para Nível Médio do Mar, **ii)** Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Havaí, **iii)** Rede Maregráfica Permanente para Geodésia e **iv)** Rede GNSS SIRGAS-CON.

4.1.1 Serviço Permanente para Nível Médio do Mar – PSMSL

Estabelecido em 1993, o PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*), ou Serviço Permanente para Nível Médio do Mar, tem sido responsável pela coleta, publicação, análise e interpretação de dados do nível do mar da rede global de marégrafos. O PSMSL está integrado ao NOC (*National Oceanography Centre*), em Liverpool, e é financiado pelo NERC (*Natural Environment Research Council*), do Reino Unido. Tem papel fundamental no GLOSS (*Global Sea Level Observing System*) e contribui para o GGOS da IAG (HOLGATE et al., 2013; PSMSL, 2019).

O banco de dados do PSMSL contém valores médios mensais e anuais do nível do mar. O conjunto de dados e informações auxiliares são fornecidos gratuitamente e disponibilizados através do *site* do PSMSL (<www.psmsl.org>). Os metadados incluem as descrições das estações e suas localizações, tipos de instrumentação, e,

quando disponível, frequência de coleta de dados, bem como anotações sobre outras questões, das quais os usuários devem estar cientes, como por exemplo terremotos nas regiões próximas aos marégrafos (PSMSL, 2016).

Para a área de estudo desta dissertação, o PSMSL dispõe de 67 estações distribuídas da seguinte forma: 15 estações na Argentina, 12 no Brasil, 21 no Chile, 4 na Colômbia, 5 no Equador, 6 no Peru e 4 no Uruguai.

Para construir as séries temporais de medições do nível do mar, as médias mensais e anuais devem ser reduzidas a um referencial comum. O PSMSL faz essa redução para um referencial único, denominando de RLR (Referência Local Revisada). Para os dados de RLR o referencial da estação maregráfica local é assegurado fixando sua altura a um marco geodésico fixado em terra. Então, as medições feitas a partir dos marégrafos são conhecidas como nível do mar relativo e a altura é medida em relação à superfície física da Terra.

4.1.2 Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Havaí – UHSLC

O Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Havaí, UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*), desempenha vários papéis em apoio a operações oceanográficas em tempo real, bem como pesquisas climáticas e oceanográficas. Seus dados são usados, por exemplo, para assimilação em modelos numéricos operacionais, calibração de dados dos satélites altímetros, pesquisas com séries temporais e alertas de tsunamis (CALDWEL, MERRIFIELD e THOMPSON, 2015).

O UHSLC oferece dados de medição de maré em dois níveis de controle de qualidade: Entrega Rápida (FD - *Fast Delivery*) e Qualidade de Pesquisa (RQ - *Research Quality*). Os dados de Entrega Rápida são liberados dentro de um prazo de um a dois meses após a coleta dos dados e recebem apenas um controle de qualidade básico. Já os dados com Qualidade de Pesquisa levam de um a dois anos para serem liberados, pois eles recebem controle de qualidade completo e são considerados o conjunto final de dados pronto para as pesquisas. Em ambos os casos, o UHSLC fornece os dados das estações maregráficas por hora ou a média diária. Os dados em Tempo Real (*Real-Time*) são organizados pelo VLIZ (*Flanders Marine Institute*).

Existem três maneiras de obter os dados maregráficos disponibilizados pelo UHSLC:

- a) *Legacy Data Portal* (<<http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/>>);
- b) THREDDS Data Server (<<http://uhslc.soest.hawaii.edu/thredds/catalog.html>>);
- c) Via *ftp* anônimo (<<ftp://ftp.soest.hawaii.edu/uhslc/>>).

Os dados estão referidos a marcos geodésicos fixos na Terra, ou seja, a medição é relativa à superfície física onde, o marco geodésico está estabelecido. Assim, se houver rebaixamento da crosta terrestre, este efeito aparecerá nos dados maregráficos como um aumento relativo do nível do mar (UHSLC, 2019).

Para a América do Sul, área de estudo desta dissertação, o UHSLC dispõe de 59 estações distribuídas da seguinte forma: 8 estações na Argentina, 22 no Brasil, 11 no Chile, 5 na Colômbia, 5 no Equador, 7 no Peru e 1 na Venezuela.

4.1.3 Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG

A RMPG (Rede Maregráfica Permanente para Geodésia) teve início em 1996 pelo Departamento de Geodésia do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que hoje recebe o nome de CGED (Coordenação de Geodésia), com a finalidade de, *a priori*, determinar e acompanhar a evolução temporal e espacial dos referenciais altimétricos do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro). Com o passar dos anos, novas possibilidades de uso dos dados foram se desenvolvendo: integração com as missões dos satélites altímetros, modelagem da TNMM (Topografia do Nível Médio do Mar) e auxílio na modelagem matemática do PVCG (Problema de Valor de Contorno da Geodésia) (IBGE, 2019).

O Centro de Controle da RMPG recebe as observações das estações e as organiza em arquivos diários, correspondendo a sessões iniciando às 00h00min e encerrando às 23h55min ou às 23h59min, do TUC (Tempo Universal Coordenado), dependendo se a resolução temporal do sensor for 5 min ou 1 min. Após a recepção dos dados, são criados novos arquivos em formato .txt, é realizado um controle de qualidade das observações, reformatação do horário para o fuso horário de Brasília, desconsiderando o horário de verão, quando o mesmo está vigente, e uma filtragem das observações. Por fim, os arquivos de dados .txt são compactados e disponibilizados na área de *download* do portal do IBGE (IBGE, 2019).

As estações da RMPG possuem pelo menos dois sensores de observação do nível do mar, seguindo orientações da COI (Comissão Oceanográfica Intergovernamental), garantindo redundância de dados e minimizando problemas de

ausência de informação devido a falha instrumental. Todas as estações possuem régua de marés, poços verticais para os sensores de nível do mar e painéis solares para fornecimento de energia.

Os tipos de sensores utilizados nas estações são:

- a) radar, com precisão de ± 2 mm;
- b) contrapeso e boia eletrônica, com precisão de ± 2 mm;
- c) pressão hidrostática, com precisão de ± 5 mm; e
- d) em algumas estações, sensores meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade, precipitação atmosférica, direção e intensidade do vento).

Atualmente a RMPG disponibiliza os dados de seis estações, são elas: EMMIMB (Estação Maregráfica e Meteorológica de Imbituba – Santa Catarina), EMMAC (Estação Maregráfica de Macaé – Rio de Janeiro), EMSAL (Estação Maregráfica de Salvador – Bahia), EMFOR (Estação Maregráfica de Fortaleza – Fortaleza), EMMSAN (Estação Maregráfica e Meteorológica de Santana – Amapá) e EMMARC (Estação Maregráfica e Meteorológica de Arraial do Cabo – Rio de Janeiro). Dessas seis estações, cinco delas estão ativas (a estação EMMAC está inativa).

4.1.4 Rede GNSS SIRGAS-CON

Na América do Sul, a rede SIRGAS-CON (rede SIRGAS de monitoramento CONTínuo) é formada por cerca de 400 estações distribuídas na América Latina e no Caribe, das quais 67 são da rede global IGS, materializadas pelo SIRGAS (Sistemas de Referência Geocêntrico para as Américas) por meio de uma rede de estações GNSS de monitoramento contínuo que possuem coordenadas de precisão e suas variações ao longo do tempo (SIRGAS, 2019). Nos locais das estações maregráficas, ou nas proximidades, existem 22 estações pertencentes a rede SIRGAS-CON.

A rede SIRGAS-CON é operada com a contribuição voluntária de mais de 50 entidades, as quais implantam estações e mantêm sua operação de forma adequada para colocar as informações à disposição dos centros de análises. Devido ao número crescente de países latino-americanos que estão implantando estações de monitoramento contínuo, e que tais estações devem ser integradas a rede de referência continental de forma consistente, a rede SIRGAS-CON compreende a rede

SIRGAS-C, de cobertura continental, e a rede SIRGAS-N, que compreende as redes de referência nacionais (SIRGAS, 2019).

Os dados da rede SIRGAS-C são processados semanalmente pelo centro de análise IGS RNAAC SIRGAS (*IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS*) e os dados da rede SIRGAS-N são processados pelos centros de processamento locais SIRGAS. Os centros locais geram soluções semanais semilivres da rede SIRGAS-N, as quais são combinadas com a rede continental SIRGAS-C, realizada pelos Centros de Combinação SIRGAS: IBGE e o IGS RNAAC SIRGAS. Assim, o processamento garante que cada estação regional SIRGAS-CON esteja incluída em três soluções individuais:

- a) Soluções semanais semilivres (fracamente injuncionadas);
- b) Coordenadas semanais das estações SIRGAS-CON;
- c) Soluções multianuais (coordenadas + velocidades).

As soluções semanais semilivres fracamente injuncionadas são obtidas da combinação das soluções semanais disponibilizadas pelos Centros de Processamento SIRGAS e os arquivos são disponibilizados em formato SINEX (*Solution INdependent Exchange*).

As posições semanais das estações SIRGAS-CON estão alinhadas com o sistema de referência IGS e são geradas para toda rede, SIRGAS-C e SIRGAS-N, posterior a combinação das soluções semanais fornecidas pelos centros. As coordenadas semanais do SIRGAS empregam o sistema de referência do IGS, sendo esse sistema de referência utilizado no cálculo das órbitas dos satélites.

As soluções multianuais determinam as variações temporais das coordenadas das estações da rede de referência SIRGAS. Seu cálculo inclui a identificação de descontinuidades na posição das estações causadas por deslocamentos sísmicos ou mudanças na configuração da antena, e é executado no programa ADDNEQ do *Bernese GNSS Software V5.2* (SIRGAS, 2019).

Os dados GNSS podem ser utilizados para transformar a medida relativa do marégrafo em uma medida geocêntrica e, assim, comparar com o nível do mar obtido por meio dos satélites altímetros (BLEWITT et al., 2010; WÖPPELMANN e MARCOS, 2016; DA SILVA, DE FREITAS e DALAZOANA, 2018).

4.2 ANÁLISE POR REGRESSÃO

As tendências do nível do mar são, geralmente, calculadas pelo ajuste linear das cotas de maré e as acelerações no nível do mar são calculadas pelo ajuste parabólico das cotas de maré (PARKER e OLLIER, 2017).

Se t é o tempo e y a cota de maré, usando a regressão linear (11) e a regressão quadrática (12):

$$y = at + b \quad (11)$$

$$y = c + bt + at^2 \quad (12)$$

a é então a tendência (inclinação da reta) $\frac{dy}{dt}$ e $2a$ é a aceleração $\frac{dy^2}{dt^2}$ para modelo quadrático.

Parker e Ollier (2017) destacam que, por causa das oscilações decadais e multi-decadais, as acelerações do nível do mar calculadas pela regressão quadrática (12) são mais sensíveis às séries temporais curtas do que as tendências do nível do mar obtidas pela regressão linear (11).

A relação entre a regressão linear e quadrática pode ser observada no Quadro 2. Se a regressão linear indicar um aumento do nível do mar (+) e a concavidade da parábola na regressão quadrática for voltada para cima, o nível do mar tende a continuar subindo (↑). Entretanto, se a concavidade da parábola for voltada para baixo, o nível do mar tende a baixar (↓) em algum momento. Já, se a regressão linear indicar um rebaixamento do nível do mar (-), e a concavidade da parábola na regressão quadrática for voltada para cima, o nível do mar tende a subir (↑) em algum momento. Com a concavidade da parábola voltada para baixo, o nível do mar, que está sofrendo rebaixamento indicado pela regressão linear, tende a continuar rebaixando (↓).

Quadro 2 – Relação entre a regressão linear e regressão quadrática

Linear	Quadrática	Tendência
+	Para cima	↑
+	Para baixo	↓
-	Para cima	↑
-	Para baixo	↓

Fonte: O Autor (2019).

A análise de regressão feita no AstGeoTop, *software* utilizado nesta dissertação, refere-se ao ajuste de curvas aos dados seguindo o modelo de ajuste paramétrico do MMQ – Método dos Mínimos Quadrados (GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN, 2015) sem ponderação da variável dependente y .

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os três artigos, frutos dos resultados obtidos nesta dissertação.

5.1 ARTIGO 1 – ANÁLISE DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA PARA DETERMINAR AS VARIAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

Autores: Lucas Gonzales Lima Pereira Calado¹, Silvio Jacks dos Anjos Garnés¹, Karoline Paes Jamur¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco

ARTIGO PUBLICADO NO ANAIS DO VII SIMGEO: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO (7.: 2019 NOV. 08-09: RECIFE, PE). ANAIS DO VII – SIMGEO – MAPEAMENTO DA SUPERFÍCIE TERRESTRE – ESTADO DA ARTE (ISBN: 978-85-415-1056-1)*

ANÁLISE DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA PARA DETERMINAR AS VARIAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

LUCAS GONZALES LIMA PEREIRA CALADO
SILVIO JACKS DOS ANJOS GARNÉS
KAROLINE PAES JAMUR

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG
Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias das Geoinformação - PGC GTG
calado.lucaslima@gmail.com, sjgarnes@gmail.com, karoljamur@gmail.com

RESUMO – Neste trabalho apresentamos uma metodologia para determinar as variações do nível do mar utilizando dados de estações maregráficas da RMPG e da UHSLC. Também utilizamos as coordenadas semanais da Rede SIRGAS-CON para poder obter a variação da altitude elipsoidal e identificar possíveis movimentos da crosta. As análises conduzidas tiveram como base observações de cinco séries distintas da estação maregráfica de Fortaleza e uma série de dados GNSS da estação CEFT. O resultado da série mais atual, utilizando só dados maregráficos, indica uma elevação no NMM da estação estudada de 0,6 mm/ano. Já na análise do movimento da crosta verificou um soerguimento de 0,8 mm/ano.

ABSTRACT – In this work was present a methodology to determine sea level variations using data from tide gauge stations of RMPG and UHSLC. Was also used the weekly coordinates of the SIRGAS-CON Network to be able to obtain the ellipsoidal height variation and to identify possible crust movements. The analysis conducted were based on observations from five distinct series of the Fortaleza tide station and a series of GNSS data from the CEFT station. The result of the most current series, using only tide data, indicates an increase in MSL of the studied station of 0.6 mm/year. Already in the analysis of the movement of the crust verified a uplift of 0.8 mm/year.

1 INTRODUÇÃO

O aumento do NM (Nível dos Mares), segundo estudos atuais como em Cazenave e Le Cozannet (2013) e NASA (2018), está associado às mudanças relacionadas ao clima, as temperaturas oceânicas e ao derretimento das geleiras. Nos últimos 25 anos, o derretimento das geleiras, por exemplo, ocasionou um aumento de 7,6 milímetros no NMM (Nível Médio dos Mares) (IMBIE, 2018). Para encontrar os padrões dessas mudanças, foram desenvolvidas técnicas de monitoramento pontuais e globais utilizando marégrafos, sensores flutuantes, altimetria e gravimetria por satélite (NASA, 2018 e GGOS, 2018).

Segundo UHSLC (2018a), as consequências da elevação do NM no século XXI afetará a infraestrutura, os ecossistemas e as vidas de milhões de pessoas no mundo, de maneira que o NMM serve como um indicador do impacto social. Organizações internacionais, tal como o GGOS (*Global Geodetic Observin System* - Sistema Global de Observação Geodésica), definiu como um dos temas de estudo a “Alteração, Variabilidade e Previsão do Nível do Mar – *Sea Level Change, Variability, and Forecasting*”, que tem como foco principal demonstrar as técnicas geodésicas disponíveis para verificar o aumento do NM, incluindo estudos dos impactos de sua mudança sobre as regiões e ilhas costeiras do mundo para apoiar aplicações práticas (GGOS, 2018).

Como o geodesta sempre esteve interessado na determinação da forma e da dimensão da Terra, a determinação do NMM é de suma importância, visto que, o geóide, superfície a qual estão vinculadas as altitudes ortométricas, é uma superfície equipotencial do campo de gravidade que mais se aproxima do NMM (GEMAEL, 2012).

A altitude ortométrica é associada as atividades de engenharia em suas diversas modalidades e para a obtenção da mesma, é necessário o conhecimento da gravidade no ponto médio no interior da crosta, entre a superfície terrestre e o geóide. No Brasil, em função da ausência de suficientes observações gravimétricas, apenas a correção do efeito sistemático do não paralelismo das superfícies equipotenciais era aplicada aos desníveis observados, resultando em altitudes ortométricas-normais (ou normais-ortométricas). Cumpre ressaltar que a utilização da gravidade normal (calculada), em substituição à gravidade real (medida), era procedimento padrão para os casos de cobertura gravimétrica insuficiente, por esse motivo foi mantido a denominação ortométricas para as altitudes assim obtidas (IBGE, 2018a).

Seguindo as recomendações internacionais sobre a definição da componente física do sistema de referência vertical para o SIRGAS, o IBGE disponibilizou, em julho de 2018, as altitudes normais das Referências de Nível que compõem a RAAP (Rede Altimétrica de Alta Precisão), sendo essas, referidas aos referenciais altimétricos vigentes no Brasil, Imbituba e Santana (IBGE, 2018a).

Com a grande dimensão do Brasil, uma melhora significativa de um geóide local deveria considerar o nível médio do oceano Atlântico ao longo de toda costa brasileira. Assim, em 1996, deu-se início a RMPG (Rede Maregráfica Permanente para Geodésia) (IBGE, 2013), composta, atualmente, por seis estações, onde cada uma utiliza marégrafos digitais com medidas de altura de maré de cinco em cinco minutos.

Em caráter global, a UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center* - Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Havaí), colabora com agências de diversos países para instalar e manter uma rede global de estações maregráficas que servem, tanto para avaliar a elevação global do NM, como também, para alertar sobre possíveis Tsunamis (UHSLC, 2018a). Atualmente, o banco de dados da UHSLC, *Research Quality*, disponibiliza 22 estações para a costa brasileira, sendo uma delas a estação maregráfica de Fortaleza, com dados diários por hora ou dados mensais.

Porém, o NM observado ao longo de qualquer costa pode mudar, pois a terra pode “descer” ou “subir”, devido a movimentos tectônicos, extração de água subterrânea ou até mesmo pela contínua recuperação da crosta terrestre do peso do gelo da última era glacial (UHSLC, 2018a). Assim, o soerguimento de terra mitiga o efeito do aumento do NM em alguns lugares, enquanto em outros, a subsidência exacerba a elevação do NM.

Alguns estudos sobre os movimentos e as velocidades das placas tectônicas vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos (PEREZ, 2002; COSTA et. al., 2003; SOUZA, 2013; SOUZA e GARNÉS, 2014). Uma forma de verificar os movimentos da crosta é com a utilização de dados das estações GNNS de monitoramento contínuo da rede SIRGAS-CON. Portanto, neste trabalho, buscou-se determinar as taxas de variação do NM no marégrafo de Fortaleza, com dados da RMPG e UHSLC, e os movimentos da crosta na proximidade do mesmo com os dados da rede SIRGAS-CON.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estação Maregráfica

As análises realizadas neste trabalho foram efetuadas com os dados disponibilizados pela UHSLC e pela RMPG, para a estação maregráfica de Fortaleza. A UHSLC e a RMPG disponibilizam estes dados através dos seus sites, ver referências (UHSLC, 2018b) e (IBGE, 2018b).

A UHSLC dispõe de três séries de dados para a estação de Fortaleza, com os arquivos separados por ano, e a RMPG disponibiliza uma única série de dados para esta estação, com os dados separados por dia. Na Tabela 1, estão sumarizadas as informações dos órgãos que originaram os dados, o tipo de dado originalmente coletado e a taxa de coleta dos dados. Já as informações de localização das estações, que são fornecidas nos seus respectivos relatórios, podem ser encontradas na Tabela 2, em grau, minuto e segundo, como também o ano de início, o ano de fim e de onde foram obtidas as séries de dados.

Tabela 1 – Estações maregráficas da UHSLC e da RMPG, em Fortaleza, com os órgãos que originaram os dados, tipo de dado originalmente gerado e taxa de coleta de dados.

Marégrafo	Originador dos dados	Dados original	Taxa de coleta de dados
Fortaleza-A (283a)	USCGS	Analogico	Hora em hora
Fortaleza-B (283b)	LPAO/INPE	Digital	Hora em hora
Fortaleza-C (283c)	UHSLC/DHN/IBGE	Digital	2 min
Fortaleza (EMFOR)	RMPG/IBGE	Analogico e Digital	5 min

Tabela 2 – Estações maregráficas da UHSLC e da RMPG, em Fortaleza, com anos de origem e fim da série de dados.

Marégrafo	Latitude	Longitude	Ano inicial	Ano final
Fortaleza (283a)	03°43'00.00" S	38°29'00.00" W	1955	1968
Fortaleza (283b)	03°43'00.00" S	38°28'00.00" W	1995	1998
Fortaleza (283c)	03°42'54.00" S	38°28'36.00" W	2008	2015
Fortaleza (EMFOR)	03°42'52.55" S	38°28'36.54" W	2008	2018

As séries temporais são suficientes para fazer uma previsão de elevação ou redução do NM e também conhecer as amplitudes de maré. Entretanto, a interrupção da série de dados, da UHSLC, prejudica um estudo mais elaborado dessa localidade.

Dentre as estações em estudo, a estação Fortaleza-A (283a), é a mais antiga e que possui a mais longa série temporal, com 13 anos de dados observados. Esta estação operou com marégrafo que utilizava boia e contrapeso por todos esses anos e era coordenada pela USCGS (*US Coastal Geodetic Survey*).

O Quadro 1 apresenta o padrão dos arquivos da série temporal fornecida pela UHSLC, onde possui um cabeçalho com as seguintes informações:

- **Número da estação:** sempre com 3 dígitos;
- **Versão da estação:** iniciando em A até Z;
- **Nome da estação;**
- **Região ou País da estação;**
- **Ano da série;**

- **Latitude:** em graus, minutos e segundos implícitos;
- **Longitude:** em graus, minutos e segundos implícitos;
- **Deslocamento do GMT;**
- **Método de decimação:** 1-filtrado, 2-média simples de todas as amostras, 3-leituras pontuais, 4-outro;
- **Deslocamento de referência:** deslocamento constante a ser adicionado a cada dado para os dados serem relativos ao zero de referencial da maré;
- **Código de referência:** R-dados referenciados e X-dados não referenciados;
- **Unidade:** MM-milímetros.

Quadro 1 – Formato dos arquivos disponibilizados pela UHSLC

283A Fortaleza-A,USCGS Brazil	1961 03430S 038290W 0000 1 00000R MM
283A Fort	196101011 1429 1033 972 1307 1612 1916 2313 2526 2526 2435 2160 1856
283A Fort	196101012 1520 1307 1185 1368 1703 2069 2465 2709 2739 2618 2374 2038
283A Fort	196101021 1642 1276 972 1154 1459 1795 2130 2465 2557 2557 2374 2069
283A Fort	196101022 1734 1459 1185 1246 1520 1856 2282 2587 2770 2770 2618 2252
283A Fort	196101031 1886 1551 1154 1002 1307 1551 1947 2313 2557 2587 2496 2282
283A Fort	196101032 1856 1307 819 1185 1642 2191 2191 2618 2892 2953 2739 2282
283A Fort	196101041 1703 1154 758 667 789 1246 1734 2252 2618 2800 2678 2343
283A Fort	196101042 1825 1337 972 819 1002 1368 1825 2374 2770 2922 2892 2557
283A Fort	196101051 2099 1520 1033 758 728 1033 1490 2008 2435 2709 2739 2526
283A Fort	196101052 2130 1612 1185 941 941 1185 1581 2130 2557 2831 2861 2678

Já o Quadro 2, apresenta o padrão dos arquivos da série temporal fornecida pela RMPG, onde os dados estão separados por colunas na seguinte ordem:

- **Data:** dd/mm/aaaa;
- **Hora da coleta:** hh:mm:ss;
- **Valor do nível:** em metros

Quadro 2 – Formato dos arquivos disponibilizados pela RMPG.

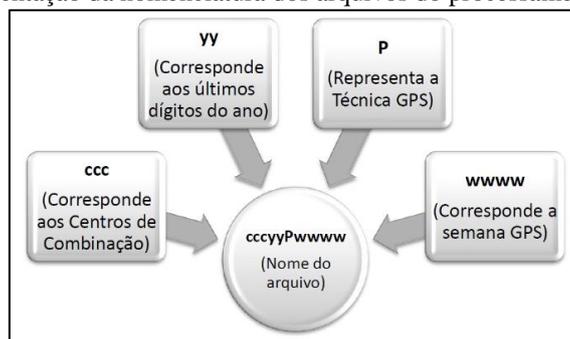
18/04/2008 00:00:00	6,213
18/04/2008 00:05:00	6,265
18/04/2008 00:10:00	6,298
18/04/2008 00:15:00	6,335
18/04/2008 00:20:00	6,381
18/04/2008 00:25:00	6,417
18/04/2008 00:30:00	6,468
18/04/2008 00:35:00	6,519
18/04/2008 00:40:00	6,569
18/04/2008 00:45:00	6,614
18/04/2008 00:50:00	6,659

2.2 Estações GNSS (Rede SIRGAS-CON)

Os produtos GNSS do processamento da rede SIRGAS-CON, encontram-se disponíveis no site do SIRGAS: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/coordinates/>>. É possível obter as Soluções semanais semilivres, as **Coordenadas semanais das estações**, sendo esta a utilizada neste trabalho, e as Soluções multianuais.

As coordenadas semanais finais são geradas para toda rede SIRGAS-CON a partir da combinação das soluções individuais proporcionadas pelos centros de processamento SIRGAS. Os arquivos com a extensão CRD contém as posições semanais finais das estações e os arquivos com a extensão SUM são os relatórios da semana correspondente. Tais arquivos são disponibilizados no site <<ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/>> e são nomeados conforme o esquema apresentado na Figura 1:

Figura 1 – Representação da nomenclatura dos arquivos do processamento SIRGAS-CON.



Fonte: SOUZA (2013)

Foram selecionados todos os arquivos CRD, com as coordenadas finais, disponíveis no site do SIRGAS. Desses arquivos foi selecionada a estação que se encontra mais próxima ao marégrafo de Fortaleza, denominada CEFT. A Tabela 3 informa a identificação da estação, a latitude e longitude em graus, minutos e segundos, o status da estação, a rede pertencente e a agência que é responsável pela estação.

Tabela 3 – Descrição da estação pertencente a rede SIRGAS-CON utilizada neste trabalho.

Id	Latitude	Longitude	Status	Rede	Agência
CEFT	3° 42' 38,91600" S	38° 28' 22,50588" W	Ativa	RBMC	IBGE

As coordenadas são disponibilizadas por dois centros de combinação: IBGE e IGS-RNAAC-SIR. A partir do dia 1 de janeiro de 2012, as soluções combinadas pelo IBGE fornecem as posições semanais oficiais das estações, enquanto que as soluções combinadas calculadas pelo IGS-RNAAC-SIRGAS possibilitam controle e cópia de segurança (SIRGAS, 2018). Para este trabalho foram utilizadas as coordenadas disponibilizadas pelo IBGE, e sua descrição esta apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição das estações com combinação IBGE.

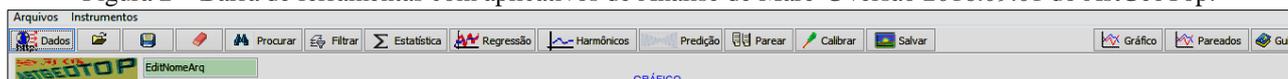
Id	Intervalo (Semana GPS)	Semana Início	Semana Fim	Referência
CEFT	1637 1718	25/05/2011	12/12/2012	IGS08
CEFT	1719 1933	19/12/2012	25/01/2017	IGb08
CEFT	1934 2004	01/02/2017	06/06/2018	IGS14

Para atualizar as coordenadas para o SIRGAS2000 utilizou-se a transformação de Helmert generalizada, por meio de um módulo do *software* AstGeoTop, denominado Transformação ITRF's @ Versão 2012.11.28 (GARNÉS, 2012), com os parâmetros de translação, rotação e escala fornecidos pelo *Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP* (IBGE, 2017).

2.3 Software AstGeoTop

Para processar e analisar os dados maregráficos foi desenvolvido um módulo no *software* AstGeoTop, denominado Análise de Maré @ versão 2016.09.01 (GARNÉS, 2016). Nesta versão do *software*, é possível ler e analisar as cotas de maré. O *software* ainda conta com uma parte gráfica, a qual permite uma iteração de zoom (ampliações maior que o nível milimétrico das cotas) relacionando a data e hora da medição da maré com a observação visual na tela do computador. Nesse desenvolvimento foi utilizada a ferramenta *teeChart* do *Delphi 10 Seattle Professional* (EMBARCADEIRO, 2015). A Figura 2 mostra a barra de ferramentas implementadas nesse módulo.

Figura 2 – Barra de ferramentas com aplicativos de Análise de Maré @ versão 2016.09.01 do AstGeoTop.



Fonte: GARNÉS (2016)

A parte de **filtragem** é responsável por eliminar os erros grosseiros e/ou detectar e eliminar automaticamente *outliers*, permitindo desde a simples eliminação de valores acima, abaixo, entre ou fora dos limites, seja por cota ou por data. Também permite eliminar valores discrepantes em relação a um modelo de maré, sendo o padrão desse tipo de filtragem eliminar discrepâncias maiores do que cinco vezes o desvio padrão determinado pelo modelo de maré, podendo ser personalizado para cada problema específico. Uma outra opção é fazer a filtragem de forma iterativa, com uma filtragem e geração de modelo sucesso até que não haja mais valores discrepantes do último modelo gerado acima do limite máximo estabelecido.

Para gerar o modelo de maré, utiliza-se um ajuste pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), considerando as componentes astronômicas da força de maré. O *software* utiliza o modelo de maré dado pela Equação (1), e também pela sua forma equivalente, apresentada na Equação (2):

$$h(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(w_i t) + B_i \sin(w_i t). \quad (1)$$

$$h(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n R_i \cos(w_i t + \phi_i). \quad (2)$$

Sendo:

- n : número de componentes harmônicos de maré;
- w_i : i -ésima velocidade da onda;
- t : o instante em que se deseja ter a cota de maré;
- A_i e B_i : coeficientes da i -ésima componente de maré;
- H_0 : cota inicial do modelo;
- R_i : amplitude da i -ésima constituinte de maré;
- Φ_i : fase da i -ésima constituinte de maré; e
- $h(t)$: valor da cota calculada pelo modelo.

Na ferramenta **estatística** é possível obter os valores da média, de máximo, de mínimo e a amplitude entre o máximo e o mínimo, podendo ser feito para todo espaço amostral ou para um intervalo amostral específico do espaço amostral. Também pode ser obtido a média acumulada época a época, a média diária, a média mensal e a média anual das cotas de maré.

A ferramenta **regressão** se refere ao ajuste de curvas aos dados seguindo o modelo de ajuste paramétrico do método dos mínimos quadrados, conforme GEMAEL et al. (2015), sem ponderação da variável dependente y . Os modelos disponíveis são o polinomial, quadrático e cúbico, com as opções de ajustamento época por época, ajustamento por dia, por mês e por ano.

A ferramenta **harmônicos** realiza o ajustamento das Equações (1) e (2) as cotas medidas com as opções de utilizar 9 constituintes de maré (HARARI E CAMARGO, 1994), 37 constituintes de maré (BOON E KILEY, 1978) ou com uma quantidade de constituinte que pode ir até 69 constituintes de maré. Existe a opção de injuncionar a cota inicial igual a média ou não, e também pode-se usar o modelo linear e não-linear de ajuste.

A ferramenta **predição** é a aplicação do modelo de maré criado na ferramenta harmônicos e calculada para época desejado, seja esta, anterior, no período, ou posterior aos dados utilizado para gerar o modelo.

A ferramenta **parear** compara dois arquivos de dados fornecendo elementos estatísticos. A ferramenta **calibrar** permite adicionar ou multiplicar as cotas por um número real.

Além dessas ferramentas, na aba **instrumentos**, é permitido fazer um agrupamento de arquivos no formato da RMPG, na ordem cronológica, deixando tudo em um arquivo único.

Os dados maregráficos são lidos nos formatos da RMPG e dos dados da marinha. Para colocar os dados maregráficos disponibilizados pela UHSLC no formato da RMPG, e poder proceder o processamento no AstGeoTop, foi desenvolvido um aplicativo específico em linguagem MATLAB.

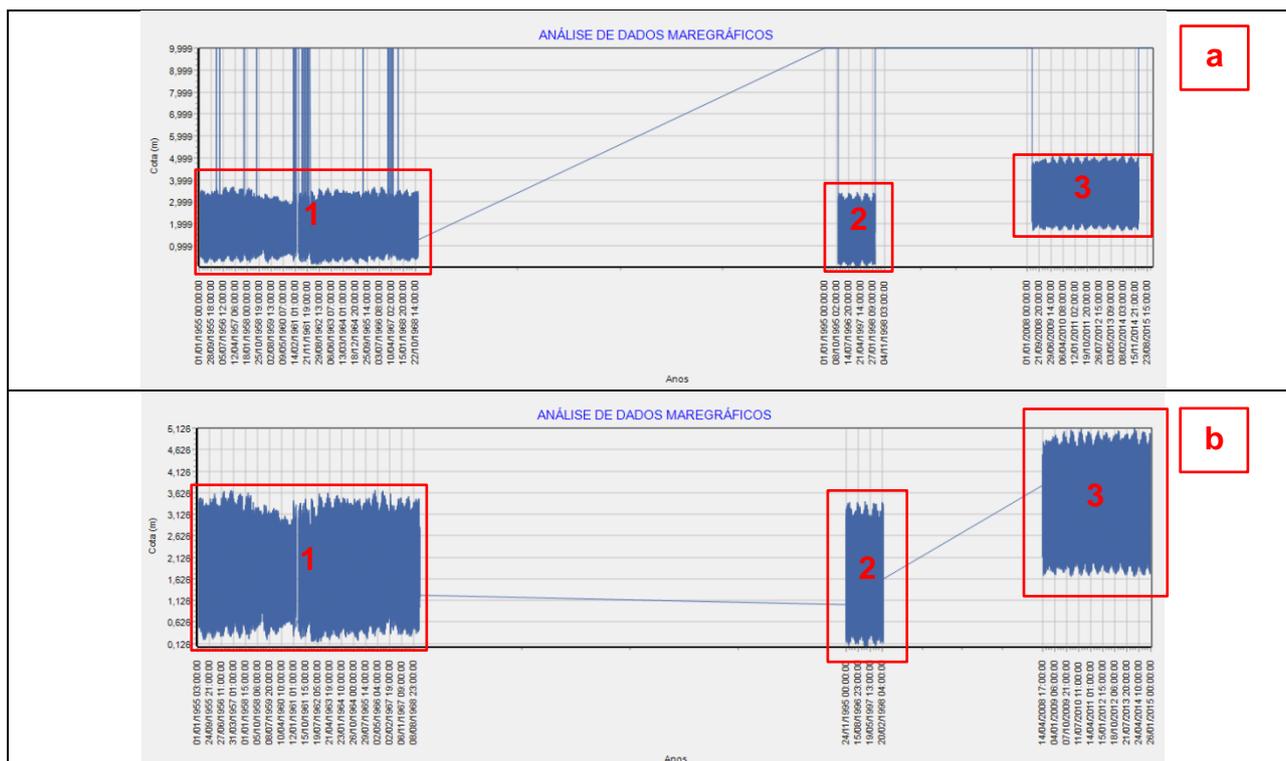
Os dados das estações SIRGAS-CON também foram analisados a partir do módulo de Análise de Maré do AstGeoTop. Para tal, os dados foram colocados no formato de leitura do software com a data correspondente a semana GPS, hora e a altitude elipsoidal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 UHSLC

A junção das três séries temporais com os dados fornecidos pela UHSLC, conforme a Tabela 1, compreende o período que vai do ano de 1955 até 2015. A série veio com *outliers*, os dados que não tiveram medições para a data são preenchidos com uma cota padrão de 9,999m, e o gráfico da Figura 3a ilustra o comportamento das cotas medidas antes da filtragem. Os três blocos destacados pelos retângulos vermelhos, foram submetidos individualmente a uma filtragem para eliminar os *outliers* de valor 9,999m e posteriormente a uma filtragem iterativa, com um critério de segurança de cinco sigma (5σ), a partir do modelo harmônico gerado com 37 constituintes de maré. O resultado dessa filtragem pode ser observado no gráfico da Figura 3b.

Figura 3 – Dados maregráficos da estação Fortaleza - UHSLC, série temporal de 1955 a 1968 (1), 1995 a 1998 (2) e 2008 a 2015 (3). (a) série temporal com os dados brutos; (b) série temporal filtrada;



Ainda na Figura 3b é possível observar que o bloco 3 está com referencial deslocado, no período dos anos de 2008 a 2015. Analisando os dados do bloco 2 observou-se uma cota média de 1,691m e no bloco 3 é observada uma cota média de 3,361m. Existe, portanto, uma diferença de 1,670m entre as médias dos arquivos, onde não pode ser atribuída a aumento do NM em 10 anos nessa região. Para calibrar, foi gerado o modelo harmônico de maré com 37 constituintes para os dados do bloco 2 e depois fazendo a predição para o ano de 2008, correspondente ao início do bloco 3. Gerando-se o modelo para os dados do bloco 2, fazendo-se a predição para os dados de 2008 e depois pareando o modelo predito com o real, chegou-se a média das discrepâncias entre os modelos com valor de -1,658m e um coeficiente de correlação de 99,9%. Esse valor de correção foi aplicado às cotas do bloco 3, levando os dados ao mesmo referencial dos demais arquivos, como mostra o gráfico da Figura 4.

Figura 4 - Dados maregráficos da estação Fortaleza - UHSLC, série temporal de 1955 a 1968 (1), 1995 a 1998 (2) e 2008 a 2015 (3), com os dados filtrados e calibrados.



Com os dados corrigidos, conforme elucidado anteriormente, gerou-se uma análise de regressão usando a equação da reta (1º grau) e a equação da parábola (2º grau) para o período completo e também para cada um dos blocos. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores analisados para a estação Maregráfica de Fortaleza – UHSLC.

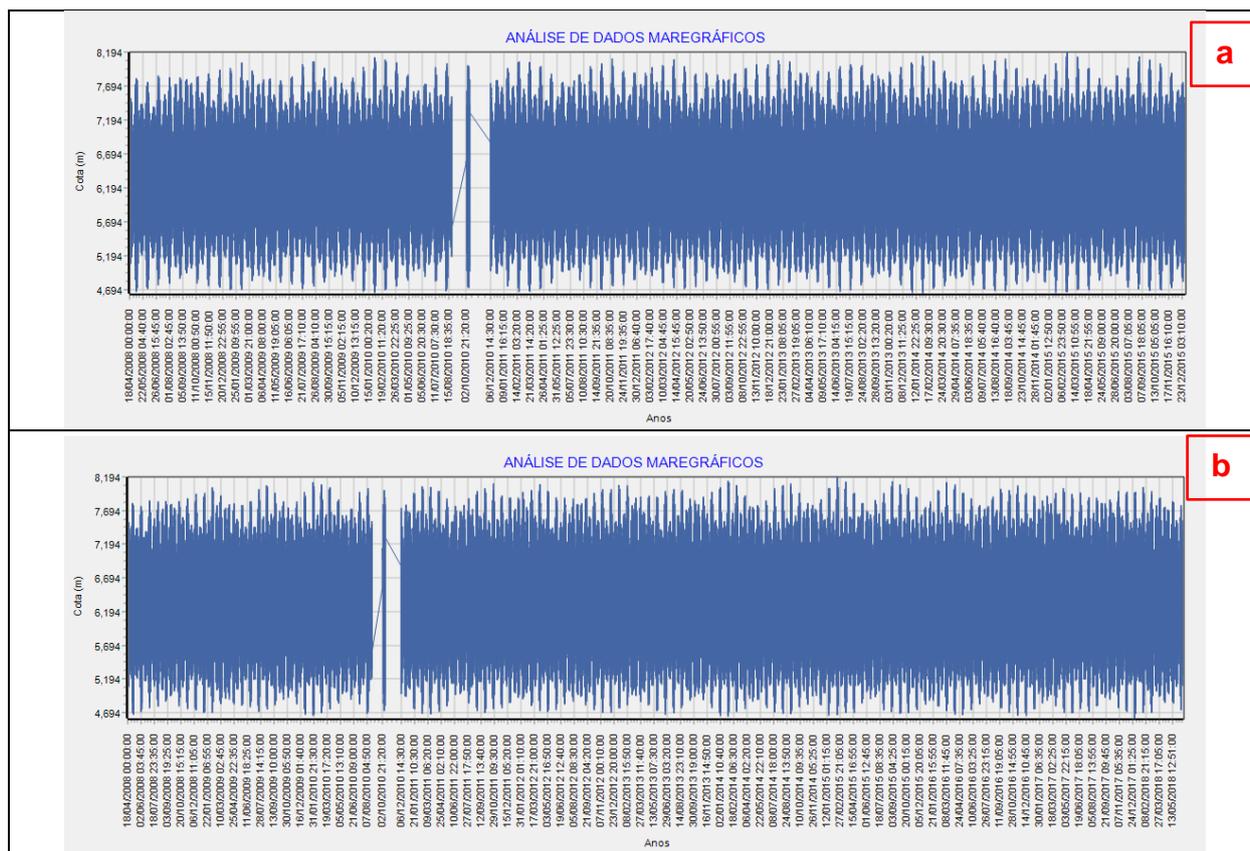
UHSLC – Estação 283a (Fortaleza)	01/01/1955 - 31/12/1968	UHSLC – Estação 283b (Fortaleza)	24/11/1995 - 28/03/1998
	<p>~14 anos Amostra = 116457 Cota Média = 1,875m Regressão Linear Cota origem c0: 1,866m Cota final cf: 1,883m Desnível cf-c0: 0,0176m Aumento: 1,3 mm/ano Regressão Quadrática a = 0,000000016 Cota origem c0: 1,934m Cota final cf: 1,953m Desnível cf-c0: 0,018m</p>		<p>~2 anos e 4 meses Amostra = 20544 Cota Média = 1,691m Regressão Linear Cota origem c0: 1,697m Cota final cf: 1,686m Desnível cf-c0: -0,0106m Rebaixamento: -4,5 mm/ano Regressão Quadrática a = 0,000000148 Cota origem c0: 1,715m Cota final cf: 1,704m Desnível cf-c0: -0,011m</p>
UHSLC – Estação 283c (Fortaleza)	14/04/2008 - 04/02/2015	UHSLC – Estação 283 (Fortaleza)	01/01/1955 - 04/02/2015
	<p>~7 anos e 10 meses Amostra = 59693 Cota Média = 3,361m Regressão Linear Cota origem c0: 3,352m Cota final cf: 3,371m Desnível cf-c0: 0,0181m Aumento: 2,7 mm/ano Regressão Quadrática a = -0,000000023 Cota origem c0: 3,328m Cota final cf: 3,347m Desnível cf-c0: 0,0181m</p>		<p>~60 anos Amostra = 196694 Cota Média = 1,803m Regressão Linear Cota origem c0: 1,895m Cota final cf: 1,682m Desnível cf-c0: -0,213m Rebaixamento: -3,5 mm/ano Regressão Quadrática a = 0,000000000 Cota origem c0: 1,904m Cota final cf: 1,689m Desnível cf-c0: -0,215m</p>

Para o bloco 1, a regressão linear indicou um aumento no NM de 1,3 mm/ano e a regressão quadrática confirmou essa elevação com a concavidade da parábola voltada para cima. Para o bloco 2, a regressão linear indicou um rebaixamento de -4,5 mm/ano, mas a concavidade da parábola voltada para cima indica um que esse rebaixamento passará a diminuir a partir de algum momento. Toda via, esse é o bloco mais curto para algum prognóstico realístico local. Para o bloco 3, a regressão linear indicou um aumento de 2,7 mm/ano, porém, a concavidade da parábola está voltada para baixo, indicando que esse aumento passará a diminuir em um determinado momento. A série completa, compreendendo os três blocos, indicou um rebaixamento de -3,5 mm/ano na regressão linear, e a regressão quadrática forneceu uma reta. Um prognóstico mais realístico do local, com os três blocos juntos, seria possível se a série não tivesse uma defasagem de aproximadamente 37 anos de dados, dos 60 anos da série.

3.2 RMPG

Para os dados fornecido pela RMPG, foram separados dois períodos: 2008 a 2015, Figura 5a, para fazer uma comparação com o relatório fornecido pelo IBGE (IBGE, 2016) e também com os dados da UHSLC, e 2008 a 2018, Figura 5b, para poder utilizar a série temporal completa disponibilizada.

Figura 5 - Dados maregráficos da estação Fortaleza – RMPG. (a) série temporal de 2008 a 2015; (b) série temporal de 2008 a 2018;



O relatório da RMPG indicou um aumento de 2,1 mm/ano na variação do NM e uma cota média de 6,342m (IBGE, 2016), ficando de acordo com o processamento dos AstGeoTop, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores analisados para a estação Maregráfica de Fortaleza – RMPG

	18/04/2008 - 31/12/2015		18/04/2008 - 20/06/2018
RMPG – Estação EMFOR (Fortaleza)	~8 anos	RMPG – Estação EMFOR (Fortaleza)	~10 anos
	Amostra = 782423 Cota Média = 6,342m Regressão Linear Cota origem c0: 6,333m Cota final cf: 6,350m Desnível cf-c0: 0,017m Aumento: 2,2 mm/ano Regressão Quadrática a = -0,000000014 Cota origem c0: 6,315m Cota final cf: 6,332m Desnível cf-c0: 0,017m		Amostra = 1116030 Cota Média = 6,341m Regressão Linear Cota origem c0: 6,338m Cota final cf: 6,344m Desnível cf-c0: 0,006m Aumento: 0,6 mm/ano Regressão Quadrática a = -0,000000006 Cota origem c0: 6,323m Cota final cf: 6,333m Desnível cf-c0: 0,010m

Fazendo a análise de regressão linear para a série de 2008 a 2015, obteve-se um aumento no NM de 2,2 mm/ano, porém, a regressão quadrática indicou a concavidade da parábola para baixo, portanto esse aumento deverá baixar em um determinado momento. Para a série de 2008 a 2018, observa-se um aumento do NM de 0,6 mm/ano e a concavidade da parábola para baixo. A regressão quadrática para a segunda série confirma que o aumento do NM começa a ter um rebaixamento, pois a série passou de um aumento de 2,2 mm/ano para um aumento de 0,6 mm/ano. Assim, a série de maior duração, aproximadamente 10anos, comprova a importância de ter uma série temporal longa para ter um prognóstico mais realístico do local.

3.3 SIRGAS-CON

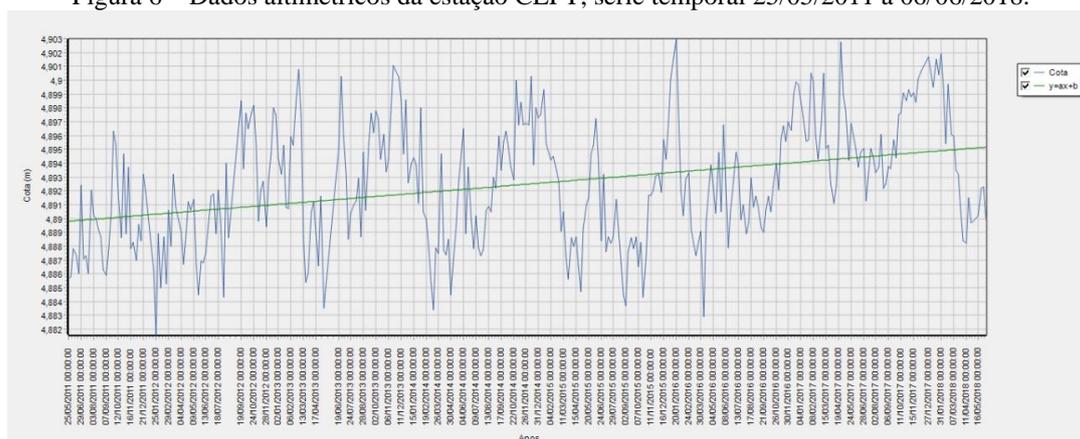
Os resultados apresentados neste trabalho não estão corrigidos dos movimentos verticais devido a série temporal GNSS ser curta. Contudo, os valores disponibilizados pelas coordenadas semanais do SIRGAS-CON permitem uma

discussão da movimentação vertical observada pelas estações GNSS da rede. Vale salientar que a utilização desses dados para corrigir movimentos verticais de origem não oceânica não é prudente. A Tabela 7 resume a distância entre a estação GNSS e o marégrafo, a variação altimétrica observada na estação GNSS por meio da regressão linear e o período dos dados disponibilizado.

Estação SIRGAS-CON	Distância Estação/Marégrafo	Variação altimétrica por regressão linear	Período
CEFT	~600m	0,8 mm/ano	25/05/2011 – 06/06/2018

A estação CEFT indicou uma variação de 0,8 mm/ano através da regressão linear. Ou seja, em um período de 7 anos, a placa tectônica sofreu um soerguimento que ocasionou uma elevação da altitude elipsoidal nesta estação. A nível de comparação, o relatório da RMPG indicou um rebaixamento da placa de -0,8 mm/ano (IBGE, 2016).

Figura 6 – Dados altimétricos da estação CEFT, série temporal 25/05/2011 a 06/06/2018.



4 CONCLUSÕES

Uma análise minuciosa foi realizada nos dados maregráficos que compõem o acervo da UHSLC e da RMPG para a estação de Fortaleza. Foram detectados erros e inconsistências em algumas cotas de maré, onde tais problemas foram apontados com exatidão ao longo do trabalho para proceder a filtragem.

De acordo com os dados analisados foi possível observar momentos de aumento e rebaixamento do nível do mar. O resultado da série mais atual, utilizando só dados maregráficos, indica uma elevação no NMM da estação estudada de 0,6 mm/ano. Já na análise do movimento da crosta verificou um soerguimento de 0,8 mm/ano.

A metodologia de manipulação de dados, filtragem, análise de qualidade e de resultados está pronta para ser aplicada a qualquer conjunto de dados maregráficos e deve somar esforços de metodologias desenvolvidas por outros pesquisadores, a fim de estabelecer análise mais consistentes e um referencial altimétrico confiável, com as características da costa brasileira e da placa Tectônica Sul-Americana.

Como recomendação, os autores sugerem uma investigação mais aprofundada sobre o movimento da crosta, pois os dados fornecidos pelo SIRGAS-CON indicaram um aumento das altitudes elipsoidais, e consequentemente um soerguimento da placa, enquanto o relatório da RMPG (IBGE, 2016) indicou um rebaixamento da placa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PGCGTG-UFPE – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, pela estrutura, equipamentos e recursos humanos integrados que tornaram possível a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOON, J. D.III; KILEY, K. P. **Harmonic analysis and tidal prediction by the method of least squares: a user's manual**. Applied Marine Science and Ocean Engineering. Special Report n. 186. Virginia Institute of Marine Science Gloucester Point, 49 p., 1978.
- CAZENAVE, A; LE COZANNET, G. **Sea level rise and its coastal impacts**. Earth's Future, 2, 15-34. Doi: 10.1002/2013EF000188, 2013.
- COSTA, S.M.A.; SANTOS, M. C.; GEMAEL, C. **A velocity field estimation of the Brazilian portion of the SOAM plate**. GPS solutions, 7, 186 – 193, 2003.
- EMBARCADERO. **Delphi 10 Seattle Professional Version 23.0.20618.2753**. Software. Copyright © 2015 Embarcadero Technologies, Inc. All Rights Reserved. Licensed for Silvio Jacks dos Anjos Garnés.

- GARNÉS, S. J. A. **AstGeoTop (2012). Módulo: Transformação ITRF's @ versão 2012.11.28.** Software. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.
- GARNÉS, S. J. A. **AstGeoTop (2016). Módulo: Análise de maré @ versão 2016.09.01.** Software. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.
- GEMAEL, C. **Introdução a geodésia física.** Curitiba, Ed. UFPR, 2012.
- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.** 2Ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.
- GGOS, 2018. **The Global Geodetic Observing System: Introducing GGOS – Additional Information: GGOS Components.** Disponível em: <<http://www.ggos.org/>>. Acesso: 20 de agosto de 2018.
- HARARI, J.; CAMARGO, R. de. **Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico.** Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo: 42(1). p. 35-54, 1994.
- IBGE. **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível de Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012.** Relatório. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf>. Acesso: 24 de agosto de 2018.
- IBGE. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015.** Relatório. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf>. Acesso: 24 de agosto de 2018.
- IBGE. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: abril 2017.** Manual. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf>. Acesso: 24 de agosto de 2018.
- IBGE. **Relatório Reajustamento da rede altimétrica com Número Geopotenciais REALT-2018.** Relatório. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf>. Acesso: 24 de agosto de 2018.
- IBGE. **Estações maregráficas da RMPG-IBGE - Download.** Site. 2018b. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/dados/>. Acesso: 24 de agosto de 2018.
- IMBIE. **Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017.** Nature International Journal of Science. Vol. 558, 219-222, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>>. Acesso: 17 de agosto de 2018.
- NASA. **Understanding Sea Level.** 2018. Disponível em: <<https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/>>. Acesso: 24 de agosto de 2018.
- PEREZ, J. A. S. **Campo de Velocidade para as Estações da RBMC e do IGS Localizadas na Placa Sul-Americana: Estimativa a partir do Processamento de Dados GPS.** Presidente Prudente, 2002. 166p. Dissertação, Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.
- SIRGAS. **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.** 2018. Disponível em: <<http://www.sirgas.org>>. Acesso em: 24 de agosto de 2018.
- SOUZA, W. O. **Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana por meio de dados VLBI e GNSS.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2013.
- SOUZA, W. O.; GARNÉS, S. J. A. **Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana usando as velocidades das estações SIRGAS-CON.** V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife – PE, 12 – 14 de novembro de 2014.
- UHSLC. **University of Hawaii Sea Level Center.** 2018a. Disponível em: <<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>>. Acessado: 24 de agosto de 2018.
- UHSLC. **University of Hawaii Sea Level Center – Download.** 2018b. Disponível em: <<https://uhslc.soest.hawaii.edu/data/?rq>>. Acessado: 24 de agosto de 2018.

5.2 ARTIGO 2 – ESTIMATIVAS DO NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL A PARTIR DE REGISTROS MAREGRÁFICOS E COORDENADAS SIRGAS-CON

Autores: Lucas Gonzales Lima Pereira Calado¹, Silvio Jacks dos Anjos Garnés¹, Karoline Paes Jamur¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco

ARTIGO FORMATADO SEGUNDO AS ESPECIFICAÇÕES DO PERIÓDICO:
REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (RBC) (ISSN: 0560-4613)

Estimativas do Nível do Mar na América do Sul a partir de Registros Maregráficos e Coordenadas SIRGAS-CON

Sea Level Estimates in South America from Tide Gauge Records and SIRGAS-CON Coordinates

Lucas Gonzales Lima Pereira Calado

Silvio Jacks dos Anjos Garnés

Karoline Paes Jamur

RESUMO

Neste estudo, avaliou-se a taxa relativa do nível do mar em 20 estações maregráficas, com dados mensais do *Permanet Service for Mean Sea Level* (PSMSL), na América do Sul. Para a estimativa do movimento vertical crustal foram utilizadas 12 estações do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) da rede de monitoramento contínuo do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS-CON), que ficam nas proximidades do marégrafo a uma distância máxima de 10km. Com o conhecimento da variação vertical, foi possível obter a taxa absoluta do nível do mar para 12 estações maregráficas. A análise estatística se procedeu pela regressão linear (linha de tendência) e regressão polinomial quadrática (aceleração). Assim, na América do Sul, a taxa de variação média do nível absoluto do mar resultou em $0,98 \text{ mm/ano} \pm 0,93 \text{ mm/ano}$, para um período médio de 1950 a 2018.

PALAVRAS-CHAVE: América do Sul. Movimento vertical crustal. Nível do mar.

ABSTRACT

In this study, the relative sea level rate was evaluated in 20 maregraphic stations, with monthly data from the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), in South America. To estimate the crustal vertical movement, 12 stations from the Global Navigation Satellite System (GNSS) of the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS-CON) continuous monitoring network, which is located near the tide gauge at a maximum distance of 10km. With the knowledge of vertical variation, it was possible to obtain the absolute sea level rate for 12 sea stations. Statistical analysis was performed by linear regression (trend line) and quadratic polynomial regression (acceleration). Thus, in South America, the average rate of change in absolute sea level resulted in $0.98 \text{ mm/year} \pm 0.93 \text{ mm/year}$ for an average period from 1950 to 2018.

KEYWORDS: South America. Crustal vertical movement. Sea level

* * *

Introdução

O aumento do nível do mar está associado às mudanças relacionadas ao clima, as temperaturas oceânicas e ao derretimento das geleiras, e nos últimos 25 anos, o derretimento das geleiras da Antártida, por exemplo, segundo Imbie (2018), ocasionou um aumento de 7,6 milímetros no nível médio dos mares. As técnicas utilizadas para encontrar tais variações, envolvem dados regionais e globais por meio de medições: maregráficas, de sensores flutuantes, de altimetria e gravimetria por satélite (GGOS, 2019).

As consequências da elevação do nível do mar no século XXI tem afetado a infraestrutura, os ecossistemas e as vidas de pessoas no mundo, de maneira que o nível médio dos mares serve como um indicador do impacto social. O GGOS (*Global Geodetic Observin System*), definiu como um dos temas de estudo a “Alteração, Variabilidade e Previsão do Nível do Mar – *Sea Level Change, Variability, and Forecasting*”, que tem como foco principal demonstrar as técnicas geodésicas disponíveis para verificar o aumento do nível do mar, incluindo estudos dos impactos de sua mudança sobre as regiões e ilhas costeiras do mundo (GGOS, 2019).

Muitos pesquisadores vêm abordando a temática do nível do mar nos últimos anos. Dalazoana, Luz e De Freitas (2005), integraram séries temporais armazenadas no banco de dados do Serviço Permanente para o Nível Médio do Mar (PSMSL – *Permament Service for Mean Sea Level*) e dados digitais para obtenção do Nível Médio do Mar no Porto de Imbituba, obtiveram uma elevação em torno de 2 mm/ano. Fiore et al. (2008), obtiveram um aumento do nível do mar relativo, na costa da província de Buenos Aires, na Argentina, da ordem de 1,5 mm/ano. Da Silva, De Freitas e Dalazoana (2016), identificam uma variação temporal absoluta do nível do mar de aproximadamente $2,4 \text{ mm/ano} \pm 0,2 \text{ mm/ano}$ na região do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. López, Cevallos e Torres (2017), reúnem 23 séries maregráficas de longa duração no litoral do Pacífico Sul Oriental e, ajustando uma tendência linear, chegam a uma variação de -4,0 mm/ano até 5,7 mm/ano

para a região em estudo. Albarici, Guimarães e Trabanco (2018), analisaram o nível médio do mar relativo para a estação de Cananeia, em São Paulo, e obtiveram uma elevação de 3,8 mm/ano para o período de 1955-2007. Calado, Garnés e Jamur (2018), determinaram as variações do nível do mar relativo na estação maregráfica de Fortaleza, obtendo uma taxa de aumento de 2,2 mm/ano no período 2008-2015, mas com indicativa de diminuição da taxa pela desaceleração do modelo quadrático. Tal expectativa foi confirmada pelos autores quando a série considerou o período de 2008-2018, cuja taxa de aumento do nível relativo pela regressão linear foi de 0,6 mm/ano.

Nesse estudo, tem-se como objetivo estimar as taxas de mudança relativa do nível do mar com registros maregráficos mensais do banco de dados do PSMSL e, com as coordenadas semanais das estações da rede de monitoramento contínuo SIRGAS-CON, a taxa de mudança absoluta do nível do mar para a América do Sul. As estimativas serão realizadas por meio de análises estatísticas de regressão linear e regressão polinomial quadrática, utilizando 20 estações maregráficas e 12 estações GNSS.

1 Materiais e métodos

Nesta sessão são descritos os tipos de dados maregráficos e GNSS e as fontes públicas de onde foram obtidos, bem como os locais escolhidos para proceder as análises. Descreve-se também as principais equações e o procedimento aplicado para a obtenção dos resultados.

1.1 Estações maregráficas

Os marégrafos são as fontes de medições históricas do nível do mar com precisão. Os registros obtidos nas estações maregráficas têm sido, tradicionalmente, usados para avaliar o nível do mar para fins de navegação, para estudar e prever marés em um determinado local. Na Geodésia é

utilizado para definir o nível médio do mar na definição do Datum de Sistemas Verticais de Referência Clássicos.

No presente estudo, os dados de nível do mar, das estações maregráficas, foram obtidos do banco de dados do PSMSL (HOLGATE et al., 2013; PSMSL, 2019). As séries temporais de medições do nível do mar utilizadas em cada estação, foram as reduzidas a mesma superfície de referência (mesmo *datum* origem). Essa redução é realizada pelo PSMSL a uma Referência Local Revisada (RLR). O ponto de referência RLR em cada estação é definido como sendo aproximadamente 7,0 metros abaixo do nível médio do mar para evitar valores negativos nas médias do RLR resultante (PSMSL, 2019).

Os marégrafos disponíveis para a América do Sul, utilizados neste estudo, foram selecionados de acordo com os seguintes critérios:

- a) registros iguais ou maiores a 20 anos;
- b) contínuos, ou seja, com menos de 10% de valores ausentes;
- c) caso tenha dois marégrafos no mesmo local, utiliza-se o marégrafo com série temporal de maior duração.

Na Tabela 1, encontram-se as informações das estações maregráficas: País, identificação, nome da estação, latitude e longitude, início e fim da série temporal, número de anos da série, número de dados mensais totais, número de dados mensais faltantes e porcentagem de dados mensais faltantes.

As 20 séries maregráficas que foram analisadas apresentam as seguintes características: oito estações superam os 50 anos de registro, cinco delas possuem mais de 30 anos e sete superam os 20 anos de representação temporal.

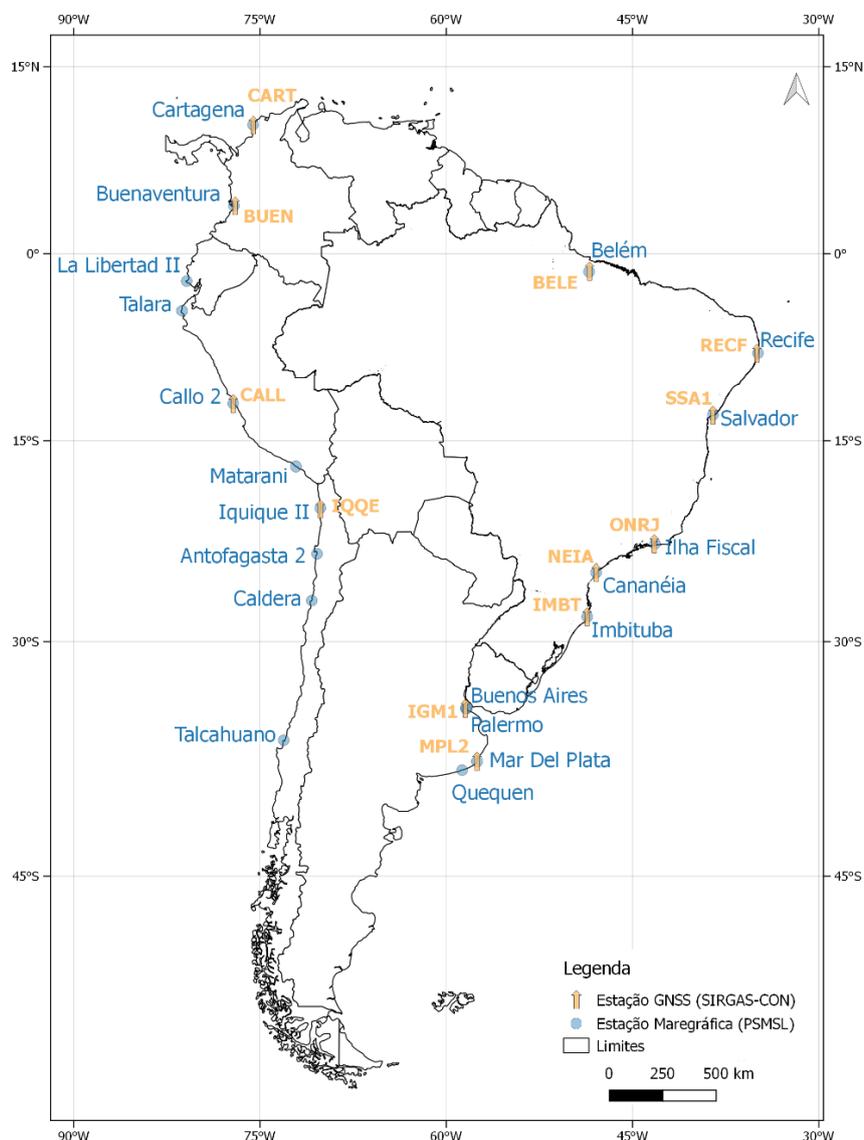
Tabela 1 – Estações maregráficas

País	Id da estação	Nome da estação	Localização (Lat Long)	Início	Fim	Nº de anos	Nº de dados	Nº de dados faltantes	Dados faltantes (%)
ARG	157	Buenos Aires	-34,600000° -58,366667°	01/1905	12/1987	83	996	0	-
	223	Quequen	-38,583333° -58,700000°	01/1918	12/1982	65	780	12	1,54
	819	Mar Del Plata	-38,033333° -57,516667°	07/1957	12/2017	60	726	30	4,13
	832	Palermo	-34,566667° -58,400000°	07/1957	12/2017	60	726	13	1,79
BRA	542	Imbituba	-28,233333° -48,650000°	09/1948	12/1968	20	244	0	-
	556	Recife	-8,050000° -34,866667°	10/1948	12/1968	20	243	0	-
	578	Salvador	-12,966667° -38,516667°	01/1949	12/1968	20	240	7	2,92
	580	Belém	-1,450000° -48,500000°	01/1949	12/1968	20	240	0	-
	726	Cananéia	-25,016667° -47,933333°	03/1954	12/2006	53	634	19	3,00
	1032	Ilha Fiscal	-22,896667° -43,166667°	02/1963	12/2016	54	647	33	5,10
CHI	510	Antofagasta 2	-23,653056° -70,404444°	12/1945	12/2017	72	865	61	7,05
	571	Talcahuano	-36,683333° -73,100000°	08/1949	12/2017	68	821	51	6,21
	619	Caldera	-27,066667° -70,833333°	12/1950	12/1991	41	493	6	1,22
	2261	Iquique II	-20,204444° -70,147778°	10/1984	12/2017	33	339	20	5,01
COL	456	Buenaventura	3,900000° -77,100000°	01/1941	12/1969	29	348	32	9,20
	572	Cartagena	10,400000° -75,550000°	01/1949	12/1992	44	528	24	4,55
EQU	544	La Libertad II	-2,200000° -80,916667°	10/1948	12/1994	46	555	23	4,14
PER	458	Matarani	-17,000000° -72,116667°	05/1941	12/1969	29	334	18	5,23
	475	Talara	-4,616667° -81,283333°	01/1942	12/1969	28	336	0	-
	1274	Callao 2	-12,050000° -77,150000°	01/1970	10/2016	47	562	5	0,89

Fonte: Adaptado de PSMSL (2019).

Os marégrafos selecionados estão distribuídos da seguinte forma: quatro na Argentina, seis no Brasil, quatro no Chile, dois na Colômbia, um no Equador e três no Peru. A Figura 1 ilustra as suas localizações geográficas.

Figura 1 – Estações maregráficas com séries temporais com mais de 20 anos de dados na América do Sul e estações GNSS da rede SIRGAS-CON próximas aos marégrafos.



Fonte: Elaborada pelos autores.

1.2 Estações GNSS

Para poder analisar o movimento vertical crustal, foram utilizados os produtos GNSS do processamento da rede SIRGAS-CON disponíveis no *site* do SIRGAS: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/coordinates/>. Nele, é possível obter as soluções semanais semilivres, as coordenadas semanais das estações, e as soluções multianuais. Entretanto, para este trabalho, foram utilizadas as coordenadas semanais das estações.

As coordenadas semanais finais são geradas para toda rede SIRGAS-CON a partir da combinação das soluções individuais proporcionadas pelos centros de processamento SIRGAS. Os arquivos com a extensão CRD (coordenadas) contém as posições semanais finais das estações e os arquivos com a extensão SUM (sumário) são os relatórios da semana correspondente. Tais arquivos são disponibilizados no *site* <<ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/>>.

Foram selecionados todos os arquivos CRD, com as coordenadas finais, disponíveis no *site* do SIRGAS até a semana GPS 2033, que corresponde a semana entre os dias 24 e 28 de dezembro de 2018. Desses arquivos foram selecionadas as estações que se encontram mais próximas aos marégrafos estudados, num raio máximo de 10 km. A Tabela 2 informa o país, a identificação da estação, a latitude e longitude em graus decimais, a cidade, a data de início da série, a data final da série, a quantidade de anos da série, o número de dados da estação, o número de dados faltantes, a porcentagem de dados faltantes e o *status* da estação. A Figura 1 ilustra também, a posição geográfica das estações GNSS, SIRGAS-CON, utilizadas na análise.

Tabela 2 – Estações GNSS.

Id Est	Localização (Lat Long)	Cidade País	Início	Fim	Nº de anos	Nº de dados	Dados faltantes	Dados faltantes (%)	Status
IGM1	-34° 34' 20" -58° 26' 22"	Buenos Aires Argentina	09/11/2003	26/12/2018	15	756	5	0,66	Ativa
MPL2	-38° 02' 08" -57° 31' 52"	Mar Del Plata Argentina	11/11/2009	26/12/2018	9	387	61	13,62	Ativa
BELE	-01° 24' 32" -48° 27' 45"	Belém Brasil	02/01/2004	26/12/2018	14	740	14	1,86	Ativa
IMBT	-28° 14' 05" -48° 39' 21"	Imbituba Brasil	05/09/2007	26/12/2018	11	552	10	1,78	Ativa
NEIA	-25° 01' 13" -47° 55' 30"	Cananeia Brasil	04/01/2006	26/12/2018	12	615	34	5,24	Ativa
ONRJ	-22° 53' 45" -43° 13' 28"	Ilha Fiscal Brasil	04/04/2007	26/12/2018	11	584	3	0,51	Ativa
RECF	-08° 03' 03" -34° 57' 05"	Recife Brasil	19/01/2000	21/02/2018	18	876	69	7,30	Desativada

Continua

Fim

Id Est	Localização (Lat Long)	Cidade País	Início	Fim	Nº de anos	Nº de dados	Dados faltantes	Dados faltantes (%)	Status
SSA1	-12° 58' 31" -38° 30' 59"	Salvador Brasil	05/09/2007	26/12/2018	11	560	2	0,36	Ativa
IQQE	-20° 16' 25" -70° 07' 54"	Iquique Chile	03/07/2002	05/12/2018	16	604	220	26,70	Ativa
BUEN	03° 53' 55" -77° 00' 38"	Buenaventura Colômbia	05/10/2005	26/12/2018	13	522	140	21,15	Ativa
CART	10° 23' 29" -75° 32' 02"	Cartagena Colômbia	02/02/2000	28/11/2018	18	407	550	57,47	Ativa
CALL	-12° 03' 46" -77° 08' 58"	Callao Peru	29/07/2009	25/04/2018	9	412	45	9,85	Removida

Fonte: Adaptado de SIRGAS (2019).

As coordenadas são disponibilizadas por dois centros de combinação: IBGE e IGS-RNAAC-SIR. Desde o dia 1 de janeiro de 2012, as soluções combinadas pelo IBGE fornecem as posições semanais oficiais das estações, enquanto as soluções combinadas calculadas pelo IGS-RNAAC-SIRGAS possibilitam controle e cópia de segurança (SIRGAS, 2019). Para este trabalho foram utilizadas as coordenadas disponibilizadas pelos dois centros, sendo que as coordenadas do IBGE serviram para validar as coordenadas fornecidas pelo IGS, obtendo uma correlação maior que 99% em todas as estações analisadas.

As coordenadas fornecidas pelo SIRGAS estão no Sistema Cartesiano Geocêntrico. Para poder proceder a análise, deve-se ter a altitude geodésica (elipsoidal). Portanto, as coordenadas foram transformadas de Cartesianas Geocêntricas (X, Y, Z) para Geodésicas Elipsoidais (Latitude Geodésica, Longitude Geodésica, Altitude Geodésica), referidas ao elipsoide GRS-80.

1.3 Nível do mar relativo

Os marégrafos medem as variações do nível do mar como variações na posição relativa entre a superfície do mar e uma RN (Referência de Nível) permanente em Terra. É usual a existência de várias RRNN (Referências de

Nível) na região do marégrafo para evitar possíveis transtornos quanto à destruição de alguma delas (DALAZOANA e DE FREITAS, 2006).

Esse sistema local dificulta a comparação de dados de diferentes estações e a distinção entre a mudança do nível do mar e os movimentos de terra, pois a RN pode ter movimentos verticais a uma taxa muito próxima ao sinal do nível do mar. Os movimentos verticais no local do marégrafo podem ser causados por marés terrestres, movimentos tectônicos, isostasia, efeitos de carga e movimentos artificiais (induzidos pelo Homem). Assim, o movimento vertical da crosta terrestre e as variações do nível do mar estão incluídos nos registros maregráficos. Apesar de que, para escalas de tempo curtas, os movimentos verticais possam ser insignificantes, a longo prazo os movimentos da crosta constituem efeitos locais e regionais com a mesma importância que os efeitos responsáveis pelas mudanças no nível dos mares (BARBOSA, 2005).

Segundo Barbosa (2005), esses problemas impedem as estimativas de mudança do nível do mar somente com as medições dos marégrafos, pois, assim, obtêm-se o nível do mar relativo à superfície terrestre. Porém, os sinais terrestres nos registros dos marégrafos são corrigidos usando estimativas a partir de técnicas geodésicas espaciais ou de modelos de recuperação pós-glacial e, os movimentos verticais podem ser discretizados através de técnicas GNSS e utilizando gravidade absoluta.

1.4 Nível do mar absoluto ou geocêntrico

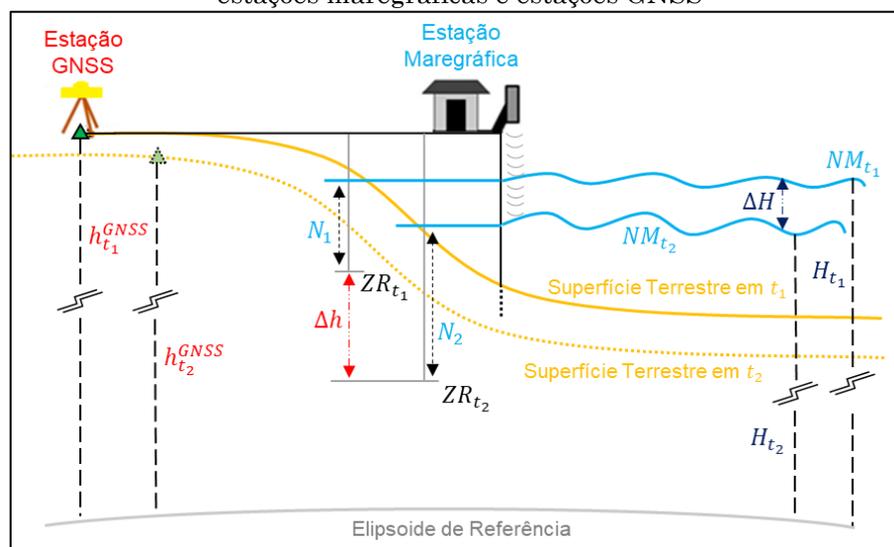
Como visto anteriormente, as estações maregráficas podem ser afetadas por movimentos verticais terrestres, pois os marégrafos fornecem o nível do mar relativo. Então, com o conhecimento da velocidade vertical crustal obtida através das observações GNSS é possível obter o valor do nível do mar absoluto (ΔH) para uma futura comparação com altímetros orbitais através da Equação 1. A Figura 2 apresenta a relação entre os elementos da equação.

$$\Delta H = \Delta N + \Delta h = H_{t_2} - H_{t_1} \quad (1)$$

Sendo:

- H_{t_1} e H_{t_2} corresponde à altitude do nível do mar obtido por altímetros orbitais para as épocas t_1 e t_2 , respectivamente, referidas ao elipsoide;
- $h_{t_1}^{GNSS}$ e $h_{t_2}^{GNSS}$ corresponde a altitude da estação GNSS para as épocas t_1 e t_2 , respectivamente, referidas ao elipsoide;
- N_1 e N_2 corresponde ao nível do mar obtido pelo marégrafo para as épocas t_1 e t_2 , respectivamente, referidos ao zero da régua;
- ZR_{t_1} e ZR_{t_2} corresponde ao zero da régua (escala maregráfica) para as épocas t_1 e t_2 , respectivamente;
- ΔN corresponde à diferença do nível do mar medida num marégrafo para as épocas t_1 e t_2 , respectivamente (mudança relativa do nível do mar);
- Δh corresponde diferença de altitude geodésica no mesmo ponto entre as épocas t_1 e época t_2 ;
- ΔH corresponde a variação absoluta do nível do mar (quanto subiu ou baixou, de fato, o nível na estação analisada).

Figura 2 – Representação para obtenção do valor do nível do mar absoluto integrando estações maregráficas e estações GNSS



Fonte: Elaborada pelos autores.

1.5 Processamento e análises

O processamento e análise dos dados das séries temporais foi realizada no módulo Análise de Maré @ versão 2016.09.01 do *software* AstGeoTop (GARNÉS, 2019), por ser uma ferramenta de desenvolvimento específica para tratar com dados maregráficos, tendo uma componente gráfica bastante iterativa com o usuário que permite visualização de comportamentos anômalos de dados na presença de *outliers*. Tem vários procedimentos de filtragem em cotas e datas, incluindo métodos iterativos com os harmônicos de maré. Possui modelos de predição e trabalha com regressão linear, polinomial quadrática e polinomial cúbica. Fornece as velocidades da variação do nível do mar com as respectivas incertezas: 1 sigma (68% nível de confiança) e 1,966 sigma (95% de nível de confiança). Na versão utilizada, permite trabalhar com 1.048.558 cotas de maré. Uma descrição mais detalhada das ferramentas disponíveis pode ser encontrada em (CALADO, GARNÉS E JAMUR, 2018).

Neste trabalho, no entanto, não foram realizadas filtrações a menos de quando se usava números 999 nos dados originais, para representar a ausência de uma observação.

Os modelos de regressão disponíveis para a análise foram o linear, o polinomial quadrático e o polinomial cúbico, Equações 2, 3 e 4 respectivamente:

$$y = at + b \quad (2)$$

$$y = at^2 + bt + c \quad (3)$$

$$y = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (4)$$

sendo: y o valor da cota ou da altitude observada em metros; a , b , c , d são os parâmetros do modelo de ajuste; t é a época da observação (usou-se dias julianos em relação a uma época média).

Qualquer um dos modelos das Equações 2, 3 ou 4, pode ser colocado na forma matricial como apresentado na Equação 5:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

sendo: \mathbf{y} um vetor m-dimensional contendo as observações; \mathbf{A} é a matriz de coeficientes dos parâmetros; \mathbf{x} o vetor n-dimensional dos parâmetros; e $\boldsymbol{\varepsilon}$ o vetor m-dimensional de erros aleatórios.

A estimativa pelo Método dos Mínimos Quadrados desse sistema, pode ser obtida por meio das equações normais (GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN, 2015):

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{y} \quad (6)$$

Os resíduos estimados ($\mathbf{v} = -\boldsymbol{\varepsilon}$), a variância da unidade peso estimada ($\hat{\sigma}_0^2$) e a Matriz Variância Covariância dos parâmetros estimada ($\boldsymbol{\Sigma}_x$), são obtidos, respectivamente, pelas equações 7, 8 e 9:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y} \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T\mathbf{V}}{m - n} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_x = \hat{\sigma}_0^2(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \quad (9)$$

A velocidade e a aceleração do movimento vertical (nível do mar ou placa litosférica) obtidas com os modelos de regressão é calculado pelas derivadas primeira (*velocidade*= dy/dt) e segunda (*aceleração*= d^2y/dt^2) e as incertezas obtidas pela lei de propagação das covariâncias (GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN, 2015):

$$\boldsymbol{\sigma} = \sqrt{\mathbf{G}\boldsymbol{\Sigma}_x\mathbf{G}^T} \quad (10)$$

sendo: \mathbf{G} um vetor linha ($1 \times n$) representando os coeficientes das equações de velocidade e de aceleração; e a matriz $\boldsymbol{\Sigma}_x$, que aparece na Equação 10, uma submatriz da matriz $\boldsymbol{\Sigma}_x$ que aparece na Equação 9.

As incertezas dadas pelos desvios padrão, devem ser convertidas adequadamente para representarem mm/ano para a velocidade e mm/ano² para a aceleração.

2 Resultados e Discussões

Douglas (1991; 1995), demonstrou que apenas registros de maré que abrangem mais de 50 anos são capazes de fornecer estimativas estáveis das taxas relativas do nível do mar, devido à forte variabilidade interdecadal que os registros de marés contêm. Entretanto, neste estudo, inclui-se marégrafos com menos de 50 anos para poder ter uma melhor representação da área em estudo.

2.1 Nível relativo do mar

A tendência do nível relativo do mar foi obtida utilizando a regressão linear, onde os valores calculados estão apresentados na Tabela 3 e são discutidos em seguida. Destaca-se que as incertezas apresentam 95% de confiança.

Tabela 3 – Resultado da regressão linear para as estações maregráficas

Id da Estação	Nome da Estação e País	Nº de anos	Relatório Estatístico			
			Cota Média (m)	Cota Máxima (m)	Cota Mínima (m)	Regressão Linear (mm/ano)
157	***Buenos Aires, AR	83	6,998	7,482	6,652	1,55 ± 0,27
223	***Quequen, AR	65	6,961	7,280	6,680	0,82 ± 0,33
819	***Mar Del Plata, AR	60	7,046	7,380	6,810	1,22 ± 0,36
832	***Palermo, AR	60	7,017	7,484	6,678	1,80 ± 0,48
542	#Imbituba, BR	20	7,068	7,295	6,838	0,99 ± 1,52
556	#Recife, BR	20	6,969	7,104	6,844	-0,26 ± 1,04
578	#Salvador, BR	20	6,924	7,055	6,817	2,30 ± 1,03
580	#Belém, BR	20	7,068	7,332	6,905	0,00 ± 1,73
726	***Cananéia, BR	53	6,932	7,192	6,663	4,13 ± 0,42
1032	***Ilha fiscal, BR	54	6,928	7,212	6,544	2,22 ± 0,50
510	***Antofagasta 2, CL	72	7,025	7,352	6,832	-0,90 ± 0,19
571	***Talcahuano, CL	68	6,966	7,265	6,785	0,67 ± 0,27
619	++Caldera, CL	41	7,000	7,325	6,831	2,94 ± 0,39
2261	++Iquique II, CL	33	6,973	7,224	6,831	-0,71 ± 0,65
456	Buenaventura, CO	29	7,065	7,228	6,831	1,16 ± 1,00

572	++Cartagena, CO	44	7,091	7,326	6,878	$5,38 \pm 0,40$
544	++La Libertad II, EC	46	7,000	7,319	6,729	$-1,02 \pm 0,45$
458	#Matarani, PE	29	7,073	7,205	6,943	$-1,08 \pm 0,61$
475	#Talara, PE	28	7,043	7,242	6,919	$0,92 \pm 0,75$
1274	++Callao 2, PE	47	7,008	7,350	6,846	$-0,36 \pm 0,45$

Fonte: Elaborada pelos autores.

(***) Estações com séries \geq que 50 anos; (++) Estações com series \geq que 30 anos; (#) Estações com séries \geq que 20 anos.

Nas estações com mais de 50 anos, destacadas com (***), a regressão linear indicou o maior aumento do nível do mar na estação de Cananéia-BR, com $4,13 \pm 0,42$ mm/ano, e o maior rebaixamento na estação de Antofagasta 2, no Chile, com $-0,90 \pm 0,19$ mm/ano. Vale ressaltar que as quatro estações da Argentina possuem mais de 50 anos e possuem coerência nos seus resultados, com o nível do mar variando de $0,82$ mm/ano até $1,80$ mm/ano.

Nas estações com mais de 30 anos, destacadas com (++) , a estação de Cartagena, na Colômbia, teve um aumento de $5,38 \pm 0,40$ mm/ano no nível do mar e a estação de La Libertad II, no Equador, apresentou o maior rebaixamento, com uma taxa de $-1,02 \pm 0,45$ mm/ano.

Já nas estações com mais de 20 anos, destacadas com (#), a estação de Salvador, no Brasil, apresentou uma taxa de elevação de $2,30 \pm 1,03$ mm/ano, sendo essa a de maior taxa positiva, e o maior rebaixamento foi observado na estação Matarani, no Peru, com uma taxa de $-1,08 \pm 0,61$ mm/ano.

Comparando os resultados com outros autores, no marégrafo de Cananeia, ¹Albarici, Guimarães e Trabanco (2018), encontraram um aumento de $3,8$ mm/ano para o período de 1955-2007, sendo coerente com os valores encontrados para esta estação neste estudo e o mesmo período para ambos os estudos.

Em Imbituba, ²Dalazoana e De Freitas (2006) evidenciaram uma elevação no nível do mar de $2,0$ mm/ano, integrando altimetria por satélite, dados da série temporal disponível pelo PSMSL e dados digitais de 2001 a 2004. Ainda em IMBITUBA, Da ³Silva, De Freitas e Dalazoana (2016) obtiveram uma elevação em torno de $2,4$ mm/ano a partir de séries temporais

de processamento GNSS, associadas com séries maregráficas de 2007 a 2014. Finalizando IMBITUBA, ⁴Da Silva (2017) obteve como tendência do marégrafo uma elevação de 3,1 mm/ano no nível do mar, utilizando a integração de séries temporais de três centros (1948 a 1968; 2001 a 2016) e utilizando a série de 1948 a 1968 obteve uma elevação de cerca de 1,2 mm/ano.

Para os marégrafos da Argentina, ⁵Fiore et al. (2008), observaram nas estações de BUENOS AIRES (1905-2006), MAR DEL PLATA (1953-2006) e QUEQUEN (1918-1981), um aumento do nível do mar de 1,67 mm/ano, 1,53 mm/ano e 1,6 mm/ano, respectivamente.

⁶López, Cevallos e Torres (2017), verificaram as tendências do nível do mar no Oceano Pacífico em 23 estações: duas na Colômbia, cinco no Equador, uma no Peru e 15 no Chile, e os seus resultados estão coerentes com os apresentados neste trabalho, com exceção do marégrafo de La Libertad.

As comparações descritas anteriormente estão apresentadas no Quadro 1.

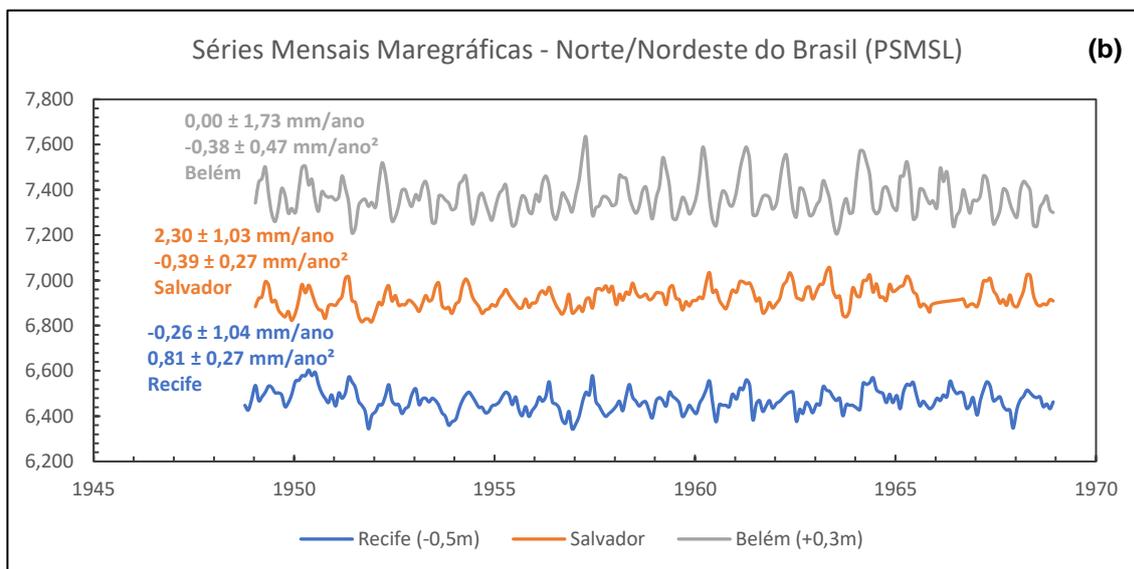
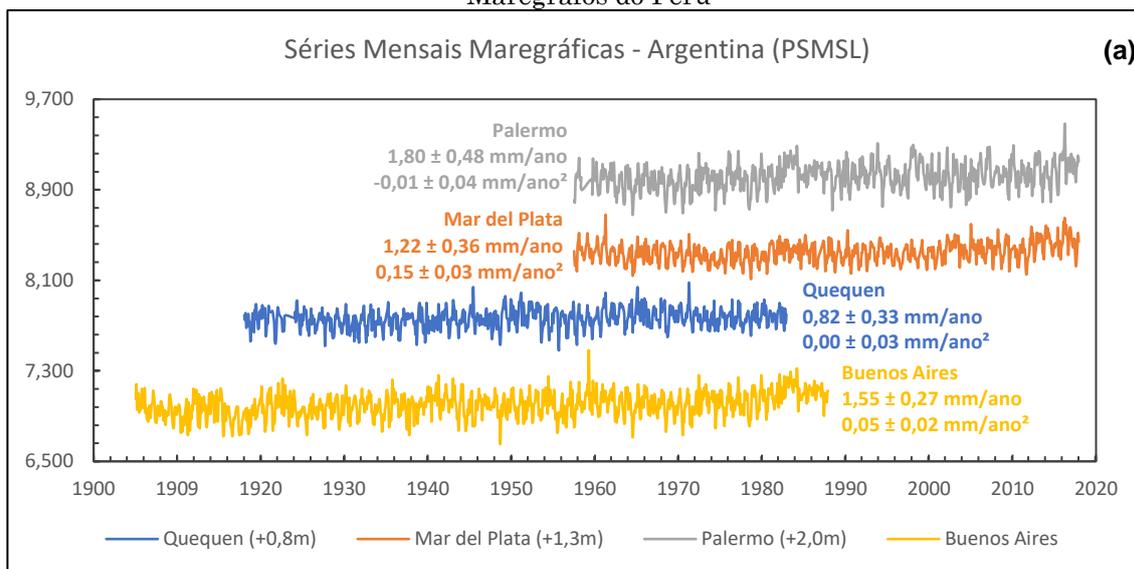
Quadro 1 – Comparação entre tendência (velocidade) do nível relativo do mar obtida pelos autores com outros autores

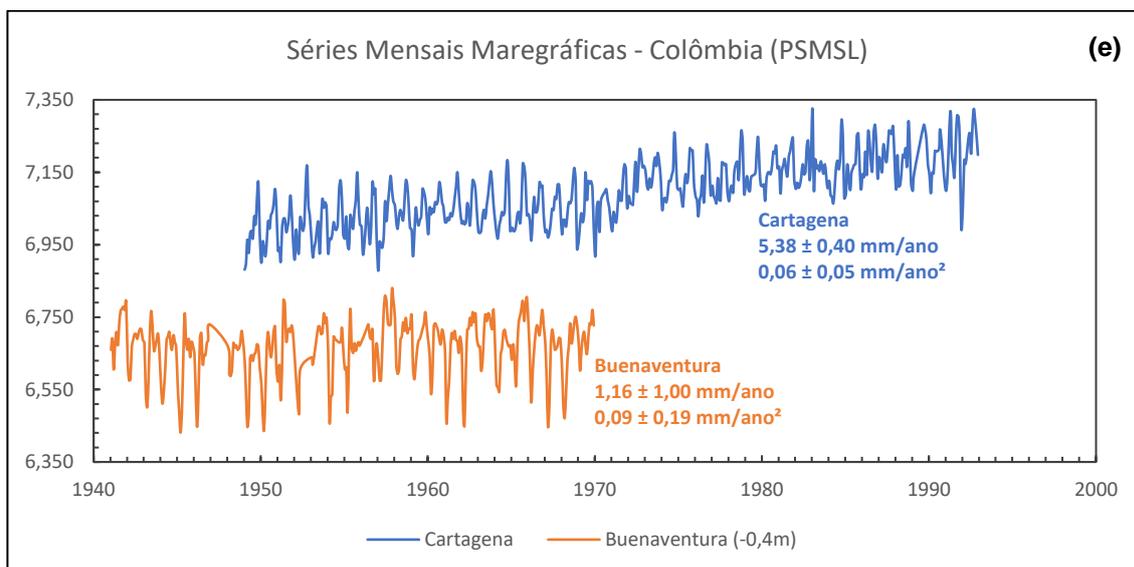
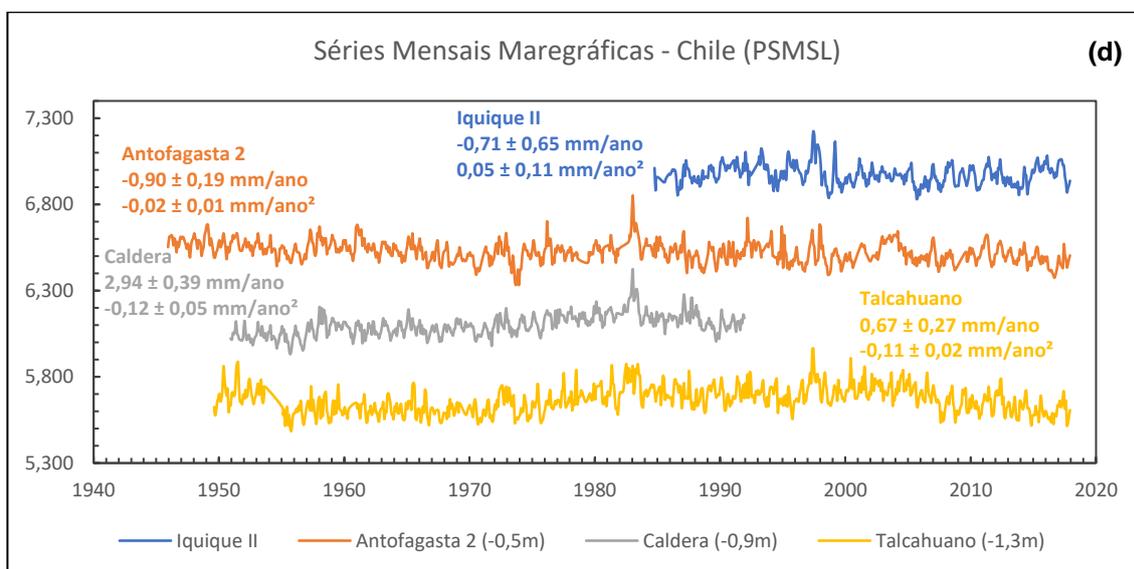
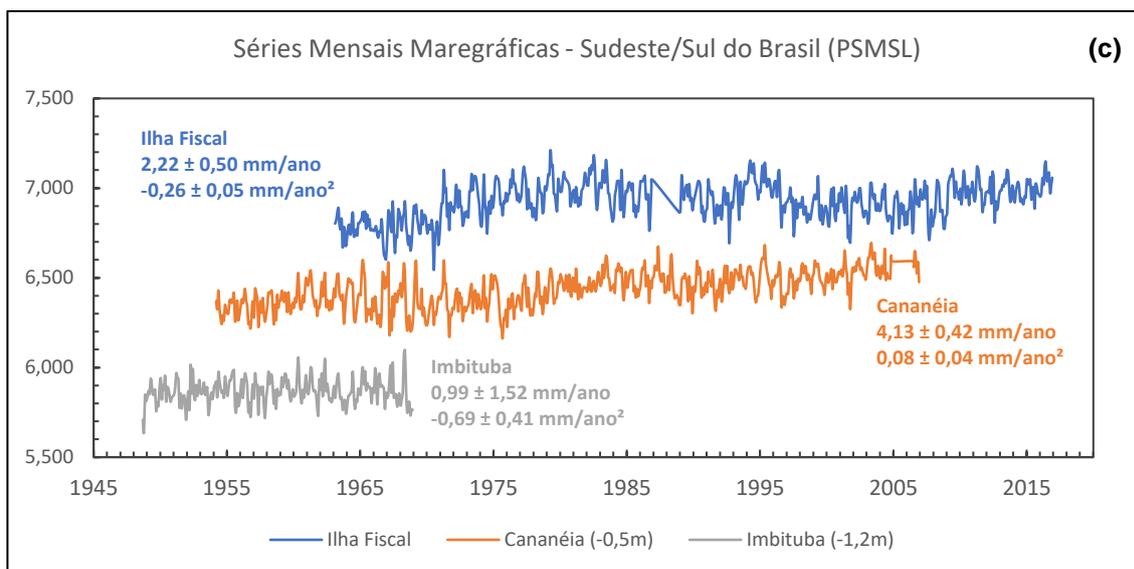
Marégrafo	Tendência (os autores)	Outros autores
Cananéia	(4,13 ± 0,42) mm/ano (1954-2006)	3,8 mm/ano (1955-2007) ¹
Imbituba	(0,99 ± 1,52) mm/ano (1948-1968)	2,0 mm/ano (1948-1968 e 2001-2004) ²
Imbituba		2,4 mm/ano (2007 a 2014) ³
Imbituba		3,1 mm/ano (1948-1968 e 2001-2016) ⁴
Imbituba		1,2 mm/ano (1948-1968) ⁴
Buenos Aires	(1,55 ± 0,27) mm/ano (1905-1987)	1,67 mm/ano (1905-2006) ⁵
Mar Del Plata	(1,22 ± 0,36) mm/ano (1957-2017)	1,53 mm/ano (1953-2006) ⁵
Quequen	(0,82 ± 0,33) mm/ano (1918-1982)	1,60 mm/ano (1918-1981) ⁵
Buenaventura	(1,16 ± 1,00) mm/ano (1941-1969)	2,3 mm/ano (1953-2014) ⁶
Callao	(-0,36 ± 0,45) mm/ano (1970-2016)	-0,3 mm/ano (1970-2016) ⁶
La Libertad	(-1,02 ± 0,45) mm/ano (1948-1994)	5,70 mm/ano (1949-2016) ⁶
Antofagasta	(-0,90 ± 0,19) mm/ano (1945-2017)	-0,80 mm/ano (1945-2016) ⁶
Caldera	(2,94 ± 0,39) mm/ano (1950-1991)	1,20 mm/ano (1950-2015) ⁶
Talcahuano	(0,67 ± 0,27) mm/ano (1949-2017)	1,00 mm/ano (1949-2015) ⁶

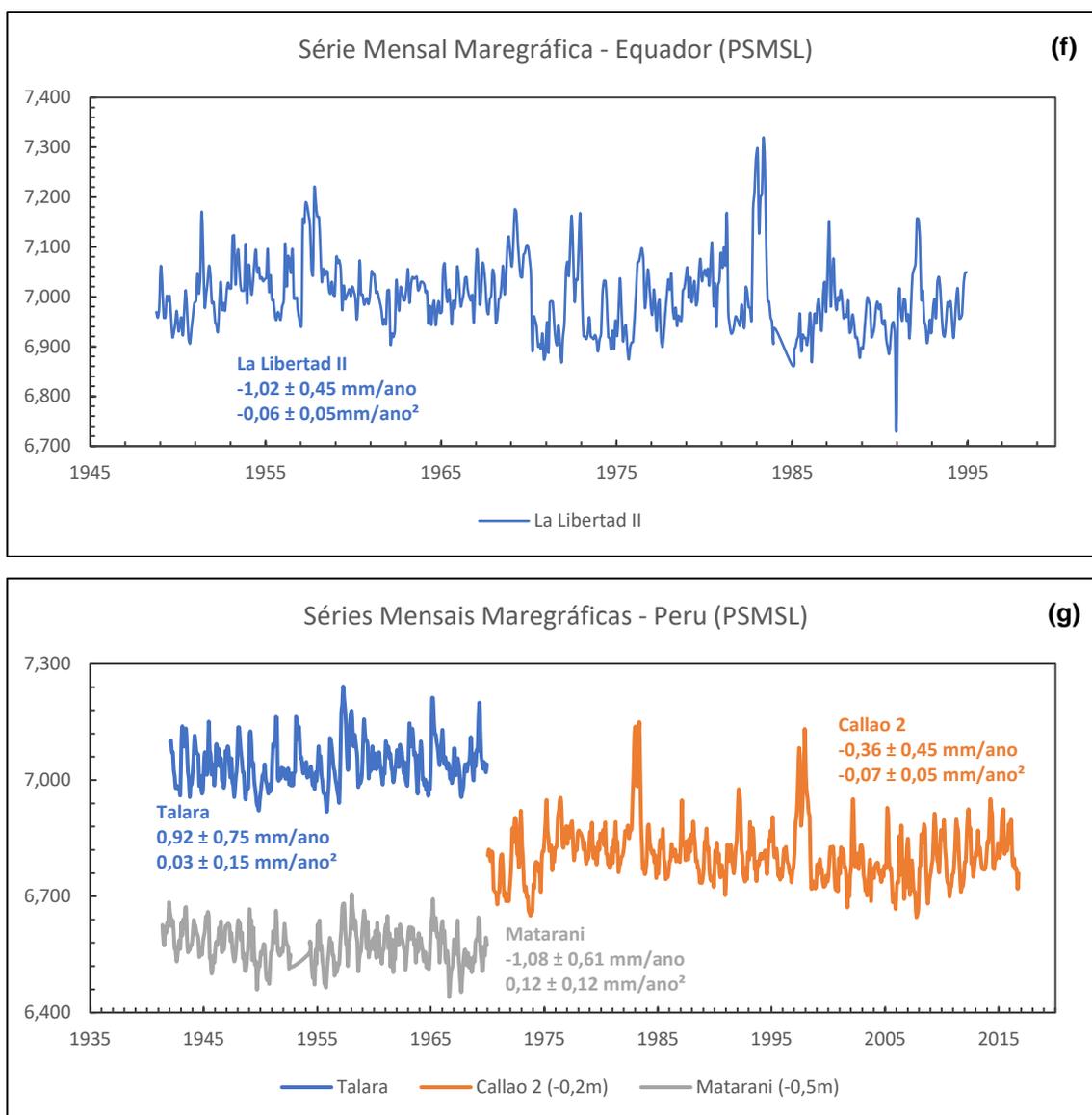
Fonte: Elaborada pelos autores; ¹ ALBARICI, GUIMARÃES E TRABANCO, 2018; ² DALAZOANA E DE FREITAS, 2006; ³ DA SILVA, DE FREITAS E DALAZOANA, 2016; ⁴ DA SILVA, 2017; ⁵ FIORE ET AL., 2008; ⁶ LÓPEZ, CEVALLOS E TORRES, 2017

Na Figura 3, as séries mensais dos marégrafos são apresentadas, junto com sua tendência e a sua aceleração. As estações foram agrupadas por países para verificar uma possível correlação nos dados.

Figura 3 – Médias mensais do nível do mar a partir dos dados do PSMSL **(a)** Marégrafos da Argentina; **(b)** Marégrafos do Norte e Nordeste do Brasil; **(c)** Marégrafos do Sudeste e Sul do Brasil; **(d)** Marégrafos do Chile; **(e)** Marégrafos da Colômbia; **(f)** Marégrafo do Equador; **(g)** Marégrafos do Peru







Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 3a, é possível ver picos positivos entre os anos 1957 e 1959, entre os anos de 1972 e 1973, e no ano de 2015 e 2016. Na Figura 3d observa-se também os picos nos anos 1982/1983 e 1997/1998. Esses picos se apresentam também nas Figuras 3e, 3f e 3g. É possível observar os picos de 1982/83 e 1997/98 nitidamente na estação Callao 2, Figura 3g. Esses picos, geralmente, são devidos a tsunamis ou eventos climáticos, como por exemplo *El Nino*. Ferreira et al (2017), classificam o *El Nino* de 1972/73 como forte, e os de 1982-83, 1997-98 e 2015-2016, como muito forte, explicando, possivelmente, esses picos registrados pelos marégrafos.

Ainda na Figura 3, tem-se o resultado da regressão polinomial quadrática. Esta regressão auxilia na compreensão dos resultados da análise por regressão linear. Quando a regressão linear indica um aumento do nível do mar (tendência positiva '+') e a concavidade da parábola obtida na regressão quadrática for voltada para cima (aceleração positiva '+'), indica que essa elevação continuará aumentando por algum tempo. Caso contrário, com a parábola voltada para baixo (aceleração negativa '-'), indica que esse aumento passará a diminuir em algum momento. Quando a regressão linear indica um rebaixamento do nível do mar (tendência negativa '-') e a concavidade da parábola obtida na regressão quadrática for voltada para cima (aceleração positiva '+'), indica que esse rebaixamento irá diminuir com o tempo. Caso contrário, com a parábola voltada para baixo (aceleração negativa '-'), indica que esse rebaixamento ainda continuará acontecendo por um tempo.

Como exemplo, pode-se observar o marégrafo de Cananeia (Figura 3c), no Brasil, com um aumento de 4,13 mm/ano indicado na regressão linear e a concavidade da parábola voltada para cima (aceleração $+0,08 \pm 0,04$ mm/ano²), no período de 1954-2006, indicando que a elevação continuará por um tempo. Albarici, Guimarães e Trabanco (2018) encontraram uma taxa de aumento do nível do mar para Cananeia de 7 mm/ano para o período de 2012-2015, indicando assim, esse aumento.

Para o marégrafo de Caldera (Figura 3d), no Chile, no período de 1950-1991, é observado uma taxa de elevação do nível do mar de 2,94 mm/ano e a concavidade da parábola é voltada para baixo (aceleração $-0,12 \pm 0,05$ mm/ano²), indicando que esse aumento diminuirá com o decorrer do tempo. López (2012), encontra para o marégrafo de Caldera, no período de 1950-2006, uma taxa de elevação 1,2 mm/ano, indicando essa redução no aumento do nível do mar com o decorrer do tempo.

2.2 Movimentação vertical crustal

Para obter a movimentação vertical crustal, avaliou-se as altitudes geodésicas (h) disponibilizadas pelas coordenadas semanais do SIRGAS-CON, das estações GNSS da rede. Vale salientar que a utilização desses dados para corrigir movimentos verticais de origem não tectônica não é aconselhável (IBGE, 2016). A Tabela 4 apresenta a distância aproximada entre a estação GNSS e o marégrafo, o movimento vertical observado na estação GNSS por meio da regressão linear, o período dos dados avaliado, o movimento vertical obtido no SIR15P01 (SÁNCHEZ e DREWS, 2016) e seu período, e o movimento vertical obtido no SIR17P1 (SÁNCHEZ, 2017) e seu período.

Tabela 4 – Resultados da movimentação vertical crustal das estações GNSS por regressão linear

Id	GNSS Marégrafo Dist (m)	¹Movimento Vertical (mm/ano)	Período Início Fim	²Movimento Vertical (mm/ano)	Período Início Fim	³Movimento Vertical (mm/ano)	Período Início Fim
IGM1	~7338	-0,69 ± 0,12	11/2003 12/2018	-3,2 ± 0,7	04/2011 04/2015	-1,3 ± 0,9	04/2011 01/2017
MPL2	~6	-0,70 ± 0,27	11/2009 12/2018	-2,1 ± 0,6	04/2010 04/2015	-2,1 ± 1,1	10/2014 01/2017
BELE	~6260	-1,65 ± 0,17	01/2004 12/2018	-2,6 ± 0,1	04/2010 04/2015	-0,3 ± 0,6	04/2011 01/2017
IMBT	~670	-1,38 ± 0,17	09/2007 12/2018	-3,4 ± 0,3	03/2010 04/2015	-2,0 ± 0,7	04/2011 01/2017
NEIA	~10	-2,66 ± 0,40	01/2006 12/2018	-4,6 ± 0,4	09/2012 04/2015	-3,9 ± 0,7	09/2012 10/2016
ONRJ	~5993	1,04 ± 0,30	04/2007 12/2018	0,1 ± 0,2	04/2010 06/2013	0,8 ± 0,6	03/2015 01/2017
RECF	~9353	-2,05 ± 0,07	01/2000 02/2018	-3,3 ± 0,4	09/2012 03/2015	-2,2 ± 0,7	04/2011 11/2017
SSA1	~157	-0,48 ± 0,13	09/2007 12/2018	-3,5 ± 0,2	04/2011 04/2015	-2,3 ± 0,6	10/2012 05/2015
IQQE	~7308	1,23 ± 0,29	02/2002 12/2018	2,5 ± 1,1	04/2010 03/2014	-2,1 ± 1,4	04/2015 01/2017
BUEN	~7868	-0,08 ± 0,12	10/2005 12/2018	0,3 ± 0,7	04/2010 03/2015	0,5 ± 1,1	10/2012 01/2017
CART	~1442	-1,86 ± 0,07	02/2000 12/2018	-0,2 ± 1,4	01/2013 12/2014	-0,2 ± 1,1	01/2013 11/2016
CALL	~1435	3,37 ± 0,23	07/2009 04/2018	3,6 ± 0,7	03/2010 04/2015	3,6 ± 0,8	04/2011 01/2017

Fonte: ¹Elaborada pelos autores; ² SÁNCHEZ E DREWES, 2016; ³ SÁNCHEZ, 2017.

A fim de comparação dos resultados obtidos, o relatório da RMPG (Rede Maregráfica de Permanente para Geodésia) do IBGE (IBGE, 2016), indica um rebaixamento na placa de 0,48 mm/ano na estação SSA1, e o resultado obtido com os dados da rede SIRGAS-CON indicou um rebaixamento de 0,5 mm/ano.

Para a estação IMBT, o mesmo relatório indica uma taxa de rebaixamento da placa de 2,6 mm/ano, e com os dados aqui analisados é possível observar um rebaixamento de 1,38 mm/ano. Também para comparação, as soluções Multianuais da rede SIRGAS-CON estão apresentadas na Tabela 4 e apontam coerência com os resultados aqui obtidos.

Comparando com outros autores, Da Silva (2017) encontrou um rebaixamento de 3,02 mm/ano da componente altimétrica para o período de 2007 a 2016 na estação de Imbituba e Da Silva e De Freitas (2015) encontraram o valor de rebaixamento na estação IMBT de 0,2 mm/ano.

Para estação CART, Bosch (2005) encontrou uma taxa de rebaixamento de 5,5 mm/ano e neste trabalho é possível observar na estação CART um rebaixamento de 1,86 mm/ano. Vale ressaltar que a estação CART é a que possui a maior defasagem na série dos dados, com 57,47% de dados faltantes (indicado na Tabela 2), atrapalhando assim, uma análise mais realista.

A estação de NEIA, que está localizada a 10 metros do marégrafo, possui uma taxa de rebaixamento de -2,66 mm/ano. Essa observação da estação NEIA é importante, pois a estação maregráfica de Cananéia apresentou uma variação do nível relativo do mar significativamente superior às demais estações brasileiras, podendo ser justificada com os dados da rede SIRGAS-CON que apontam uma variação crustal significativa. Esse rebaixamento contribui, parcialmente, para o valor exagerado da elevação do nível do mar na estação de Cananeia.

A menos da estação ONRJ que deve possuir uma peculiaridade a ser investigada, todas as demais estações na costa leste do continente Sul-Americano tiveram rebaixamento, com a taxa média de 1,37 mm/ano. Do outro lado, no Pacífico, por conta da subducção da placa de Nazca sob a placa

SOAM há uma elevação média de 2,3 mm/ano, conforme mostram os resultados das estações CALL e IQQE. Um pouco mais ao norte devido a influência da placa de Cocos e da placa do Caribe na placa SOAM, as estações BUEN e CART têm um rebaixamento de 0,68mm/ano e 1,86mm/ano.

2.3 Nível absoluto do mar

O último resultado deste trabalho, foi a obtenção da taxa do nível absoluto do mar, obtido da soma das taxas do nível relativo do mar, dado pelo mareógrafo, com a taxa de movimento vertical crustal, dada pelo GNSS. A Tabela 5 apresenta os resultados.

Tabela 5 – Nível absoluto do mar nas estações maregráficas

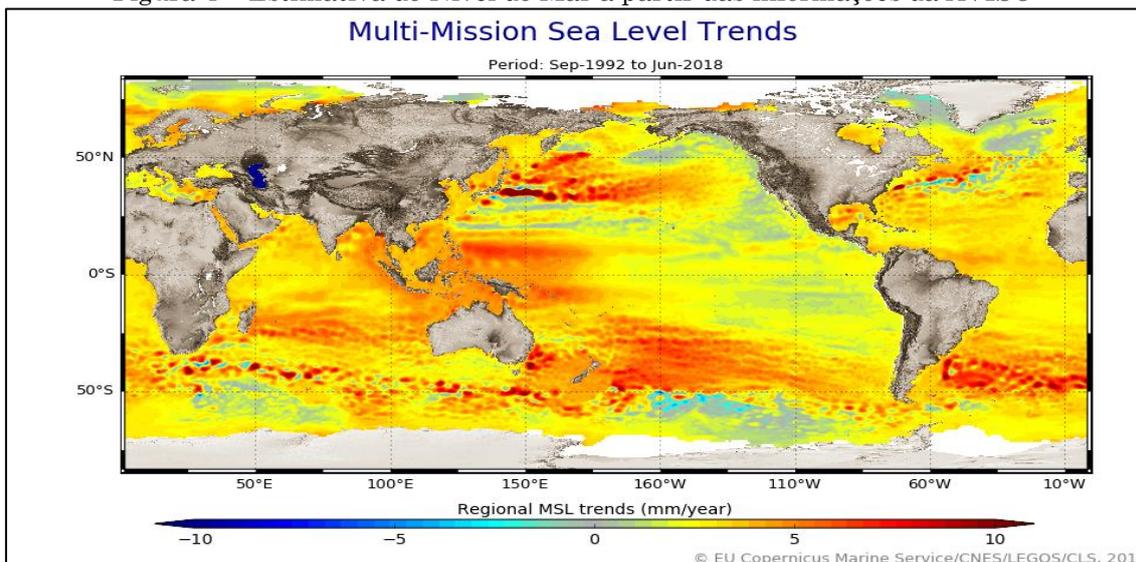
Período	ΔN (mm/ano)	Δh (mm/ano)	NM absoluto ΔH (mm/ano)	Estação Maregráfica	Estação GNSS
1905-2018	$1,55 \pm 0,27$	$-0,69 \pm 0,12$	$0,86 \pm 0,30$	Buenos Aires, AR	IGM1
1957-2018	$1,22 \pm 0,36$	$-0,70 \pm 0,27$	$0,52 \pm 0,45$	Mar Del Plata, AR	MPL2
1948-2018	$0,99 \pm 1,52$	$-1,38 \pm 0,17$	$-0,39 \pm 1,53$	Imbituba, BR	IMBT
1948-2018	$-0,26 \pm 1,04$	$-2,05 \pm 0,07$	$-2,31 \pm 1,04$	Recife, BR	RECF
1949-2018	$2,30 \pm 1,03$	$-0,48 \pm 0,13$	$1,82 \pm 1,04$	Salvador, BR	SSA1
1949-2018	$0,00 \pm 1,73$	$-1,65 \pm 0,17$	$-1,65 \pm 1,74$	Belém, BR	BELE
1954-2018	$4,13 \pm 0,42$	$-2,66 \pm 0,40$	$1,47 \pm 0,58$	Cananéia, BR	NEIA
1963-2018	$2,22 \pm 0,50$	$1,04 \pm 0,30$	$3,26 \pm 0,58$	Ilha Fiscal, BR	ONRJ
1984-2018	$-0,71 \pm 0,65$	$1,23 \pm 0,29$	$0,52 \pm 0,71$	Iquique II, CL	IQQE
1941-2018	$1,16 \pm 1,00$	$-0,08 \pm 0,12$	$1,08 \pm 1,01$	Buenaventura, CO	BUEN
1949-2018	$5,38 \pm 0,40$	$-1,86 \pm 0,07$	$3,52 \pm 0,41$	Cartagena, CO	CART
1970-2018	$-0,36 \pm 0,45$	$3,37 \pm 0,23$	$3,01 \pm 0,51$	Callao 2, PE	CALL

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 4 (AVISO, 2019), é possível observar a tendência do nível absoluto do mar obtido com dados de altimetria por satélite no período de setembro de 1992 a junho de 2018. Verifica-se que os resultados aqui apresentados estão coerentes com a estimativa para o nível do mar obtido com satélites altímetros.

As estações que apresentaram taxas negativas do nível absoluto do mar, (Imbituba, Recife e Belém), apresentaram um alto valor do sigma e como os valores do movimento crustal são coerentes, possíveis problemas estão relacionados com os dados das séries maregráficas.

Figura 4 – Estimativa do Nível do Mar a partir das informações da AVISO



Fonte: Adaptado de AVISO (2019).

3 Conclusões e Recomendação

Neste trabalho foram executadas análises do nível relativo e absoluto do mar para a América de Sul. As estações maregráficas analisadas foram obtidas no banco de dados do PSMSL e separadas da seguinte forma: estações com mais de 50 anos de dados, em um total de oito estações; estações com mais de 30 anos de dados, em um total de cinco estações; estações com mais de 20 anos de dados, em um total de sete estações. Também foram utilizadas as Coordenadas semanais de 12 estações da rede SIRGAS-CON, disponibilizadas pelo próprio SIRGAS, até a semana GPS 2033, no qual três estações possuem menos de 10 anos de dados, e dez estações possuem mais de 10 anos de dados.

As variações relativas do nível apresentaram taxas variando de $-0,71$ mm/ano $\pm 0,65$ mm/ano (Iquique II, no Chile) até $5,38$ mm/ano $\pm 0,40$ mm/ano (Cartagena, na Colômbia). Indicando rebaixamento e aumento do nível relativo do mar.

A movimentação vertical crustal, obtida com as coordenadas semanais do SIRGAS-CON, indica um rebaixamento médio da placa SOAM na costa brasileira de $1,64$ mm/ano.

A variação absoluta do mar, apresentou um aumento de $0,98$ mm/ano $\pm 0,93$ mm/ano na região de estudo, sendo compatível com os resultados do aumento do nível do mar global atual.

Como recomendação, sugere-se investigação integrando dados de satélites altímetros, principalmente nas estações discrepantes, como ONRJ, em relação ao movimento crustal, e RECF, para os dados maregráficos.

Agradecimentos

A Universidade Federal de Pernambuco, por meio do Departamento de Engenharia Cartográfica (DECart) e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PGCGTG), que disponibilizaram suas instalações e aplicativos computacionais.

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

Referências

- ALBARICI, F. L.; GUIMARÃES, G. N.; TRABANCO, J. L. A. Análise relativa do nível médio do mar em Cananeia/SP. **Revista Brasileira de Geomática**, vol. 6, n.3, jul/set 2018, p. 176-193.
- AVISO. Data: Mean Sea Level. Site <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>>, acessado em fevereiro de 2019.
- BARBOSA, S. A. **Sea level change in the North Atlantic from tide gauges and satellite altimetry**. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Matemática Aplicada. 2005
- BOSCH, W. **The Sea Surface Topography and its Impact to Global Height System Definition**. In: DREWES, H. et al. (Ed.). IAG Symposia 124, Vertical Reference Systems. Springer: Berlin. P. 225-230, 2002.
- CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. A.; JAMUR, K. P. Análise da estação maregráfica de Fortaleza para determinar as variações do nível do mar. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, 2018.
- DA SILVA, L. M. **Análise da evolução temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. Tese de doutoramento. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2017. 270 p.
- DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. Análise de Séries Temporais Maregráficas correlacionadas com observações GNSS do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba-SC. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 68, 2016. pp. 73-90.

- DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. Estimativa da posição atual do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba a partir de dados maregráficos, observações GNSS e Altimetria por Satélites. **Simpósio SIRGAS**, Santo Domingo, República Dominicana, 2015.
- DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro. **Boletim de Ciências Geodésicas: Resumos**, vol. 12, n. 1, 2006. pp. 173-174.
- DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos do NMM a partir de séries temporais maregráficas e de Altimetria por satélites visando a integração da rede vertical brasileira ao SIRGAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 57, n. 2, ago 2005. pp. 140-153.
- DOUGLAS, B. C. Global Sea Level Rise. **Journal of Geophysical Research**, vol. 96, N. C4, April 1991. pp. 6981-6992.
- DOUGAS, B. C. Global Sea Rise: A redetermination. **Surveys in Geophysics**. vol. 18, 1995. pp. 279-292.
- FERREIRA, L. G. B., CARAMORI, P. H., MORAIS, H., NITSCHKE, P. R., DA COSTA, A. B. F. **O fenômeno El Niño de 2015/2016 e seus impactos nas chuvas do Paraná**. LAPAR, Paraná, 2017.
- FIORE, M.; ONOFRIO, E.; GRISMEYER, W.; MEDIAVILLA, D. El ascenso del nivel del mar em la costa de la provincia de Buenos Aires. **CIENCIA HOY**, vol. 18, n. 106, ago/set 2008.
- GARNÉS, S. J A. AstGeoTop (2019). Módulo: Análise de maré @ versão 2016.09.01. **Software**. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2ª ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.
- GGOS, 2019. The Global Geodetic Observing System: Introducing GGOS – Additional Information: GGOS Components. Site <<http://www.ggos.org/>>, acessado em fevereiro de 2019.
- HOLGATE, S. J.; MATTHEWS, A.; WOODWORTH, P. L.; RICKARDS, L. J.; TAMISIEA, M. E.; BRADSHAW, E.; FODEN, P. R.; GORDON, K. M.; JEVREJEVA, S.; PUGH, J. New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level. **Journal of Coastal Research**, vol. 29, n. 3, 2013. pp. 493 – 504.
- IBGE. Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015. **Relatório**. Rio de Janeiro, 2016.
- IMBIE. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. **Nature International Journal of Science**, vol. 558, 2018. pp. 219-222.
- LÓPEZ, M. C. Sea-Level Variability In The Southeastern Pacific: Coast Of Chile. **Congreso de Ciencias Del Mar Del Perú - CONCIMAR**, Lima, Peru, 2012.
- LÓPEZ, M. C.; CEVALLOS, J.; TORRES, R. Tendencias del nivel del mar em el litoral del Pacífico Sur Oriental. **Vulnerabilidad de las zonas costeras de Lationamérica al cambio climático**, 2017. pp. 165-176.
- PSMSL. PERMANENT SERVICE FOR MEAN SEA LEVEL "Tide Gauge Data". Site <<http://www.psmsl.org/data/obtaining/>>, acesso em fevereiro 2019.
- SÁNCHEZ L., DREWES H. **SIR15P01: Multiyear solution for the SIRGAS Reference Frame**, open access, 2016. doi: 10.1594/PANGAEA.862536,

SÁNCHEZ L. SIRGAS reference frame realization SIR17P01. Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut DGFI-TUM, IGS RNAAC, 2017.

SIRGAS. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. Site <<http://www.sirgas.org>>, acessado em agosto de 2019.

5.3 ARTIGO 3 – O NÍVEL DO MAR NA AMÉRICA DO SUL POR MEIO DE ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Autores: Lucas Gonzales Lima Pereira Calado¹, Silvio Jacks dos Anjos Garnés¹, Karoline Paes Jamur¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco

ARTIGO FORMATADO SEGUNDO AS ESPECIFICAÇÕES DO PERIÓDICO:
ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (ANUÁRIO IGEO) (ISSN: 0101-9759)

**O Nível do Mar na América do Sul
por meio de Análise de Séries Temporais**
Sea Level in South America
through Time Series Analysis

Luca Gonzales Lima Pereira Calado; Silvio Jacks dos Anjos Garnés
& Karoline Paes Jamur

*Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Cartográfica,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil
E-mails: calado.lucaslima@gmail.com; sjgarnes@gmail.com; karoljamur@gmail.com*

Resumo

Para estudos da mudança global do nível do mar, analisaram-se 14 estações maregráficas, sendo 10 cujos dados estão disponibilizados na UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*), com mais de 50 anos de dados, e quatro da RMPG (Rede Maregráfica Permanente para Geodésia), com 12 anos de dados. Para a detecção do movimento vertical, utilizaram-se as coordenadas semanais da rede SIRGAS-CON. Obteve-se assim a tendência do nível absoluto do mar para a América do Sul, entre os anos 1950-2015, de $1,31 \pm 0,54$ mm/ano.

Palavras Chaves: Nível do mar; SIRGAS-CON; América do Sul.

Abstract

For studies of global sea-level change, 14 tidal stations were analyzed, 10 of the UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*), with more than 50 years of data, and four of the RMPG (Permanent Maregraphic Network for Geodesy). with 12 years of data. For the vertical movement detection, the weekly coordinates of the SIRGAS-CON network were used. Thus, the absolute sea level trend for South America between the years 1950-2015 was 1.31 ± 0.54 mm/year.

Keywords: Sea Level; SIRGAS-CON; South America.

1 Introdução

O nível do mar mensurado por estações maregráficas tem sido necessário para várias finalidades, como exemplo, pode-se citar: as operações portuárias e navegação (CHRISTODOULOU, CHRISTIDIS E DEMIREL, 2018), a definição de um *Datum* Vertical para os sistemas de altitudes nacionais (ALENCAR, 1990; WÖPPELMANN *et al.*, 2014) e também para pesquisas científicas que visam entender as mudanças do nível do mar e seus impactos (NICHOLLS e CAZENAVE, 2010; CARVALHO e WANG, 2019). Nas zonas costeiras, o monitoramento do nível do mar tem se tornado cada vez mais importante para prever e alertar riscos de inundações e tsunamis, e também para determinar os impactos do aumento, ou declínio, do nível do mar nas populações costeiras e no ecossistema local (MARCOS *et al.*, 2019). Cabe salientar que o NMM (Nível Médio do Mar), no inglês, MSL (*Mean Sea Level*), é a média aritmética das medições regularmente amostradas (por exemplo, baseado em valores horários) do nível do mar durante o período de pelo menos um ano (WOODWORTH, 2017) ou, para fins geodésicos, de vários anos.

Os marégrafos são as principais fontes de observações costeiras do nível do mar, fornecendo medições pontuais no local do marégrafo em relação a uma referência fixa na superfície física da Terra, ou seja, propiciando o nível relativo do mar (CHELTON e ENFIELD, 1986). Assim, o nível do mar medido por marégrafos, está sujeito aos movimentos verticais da crosta terrestre, soerguimento ou subsidência, sendo uma das poucas fontes de informações pontuais, contínuas no tempo, sobre os movimentos verticais crustais (VANICEK, 1978).

Desde outubro de 1992 as variações do nível do mar também estão sendo medidas por satélites altímetros de alta precisão, somando hoje, pouco mais de 25 anos de medições contínuas (ABLAIN *et al.*, 2019). Tais variações, obtidas diretamente com os satélites altímetros, não são afetadas pelos movimentos verticais crustais, pois estão referidas ao geocentro ou a um elipsoide de referência, de acordo com a órbita do satélite. Entretanto, perto da costa, os dados de nível do mar obtidos a partir de medições altimétricas tornam-se particularmente complexos e, com o progresso dos instrumentos a bordo dos satélites altímetros e dos algoritmos de processamento, estão disponíveis, geralmente, de 2km a 10km da costa fornecendo informações valiosas para os estudos costeiros (ABLAIN *et al.*, 2019).

Existe uma diferença importante no referencial dos dois conjuntos de dados: marégrafos e altímetros. Enquanto os marégrafos fornecem o nível relativo do mar, usando uma referência na crosta terrestre; a altimetria por satélite mede as variações absolutas do nível do mar, tendo como referência o elipsoide do sistema que está associado.

Então, para obter o nível do mar absoluto a partir de dados maregráficos distribuídos globalmente, é preciso o conhecimento do nível relativo medido nos marégrafos, bem como do movimento vertical crustal na estação maregráfica. As observações dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*), sendo o GPS (*Global Positioning System*) o mais utilizado, fornecem a maneira mais precisa de mensurar a movimentação crustal, tornando possível a separação entre os valores oceânicos e terrestres nos marégrafos (CARTER, 1994; ABLAIN et al, 2019).

Sanli e Blewitt (2001) publicaram a primeira estimativa de movimento vertical crustal em uma estação maregráfica, utilizando uma estação GPS referida ao ITRF96 (*International Terrestrial Reference Frame*), no litoral norte da Grã-Bretanha. Já Wöppelmann et al (2007), demonstraram que a análise com dados GPS é capaz de fornecer informações para separar, ou corrigir, o movimento vertical crustal dos registros maregráficos. A partir disto, as estimativas de GPS do movimento vertical crustal foram gradativamente introduzidas em estudos do nível do mar (WÖPPELMANN e MARCOS, 2016).

Este trabalho tem como objetivo correlacionar as séries temporais maregráficas de dois centros: RMPG (Rede Maregráfica Permanente para Geodésia) e UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*); com observações GNSS da rede SIRGAS-CON (rede SIRGAS de monitoramento CONTínuo), para obter o nível relativo e absoluto do mar em 14 estações maregráficas da América do Sul.

2 Materiais e métodos

Foram utilizados dados das séries temporais maregráficas e dados GNSS para o cálculo do nível absoluto do mar, as quais passam a ser descritas nos itens subsequentes.

2.1 Séries temporais maregráficas

Levando-se em conta que para qualquer marégrafo, uma das premissas é a realização da filtragem das ondas já na sua instalação, então, medir o nível da água do mar para gerar uma série temporal, garante muito mais informações que apenas o nível do mar, no sentido de que os efeitos meteorológicos (ressacas e outros) e a variação crustal fazem parte da composição da altura de maré. No entanto, em tais medidas, surgem muito evidentes as respostas para as marés semidiurnas e diurnas da localidade.

Douglas (2001), indica a necessidade da utilização de filtros nas análises de mudança do nível do mar a longo prazo, para a remoção de *outliers* de maré. Ele ressalta que, na zona costeira, as observações são afetadas por efeitos das marés em águas rasas, ventos, tempestades

e/ou precipitações, e uma forma de filtrar, eliminando essas perturbações, é o cálculo da média do nível da água em intervalos mensais ou anuais, ou seja, calcular o NM (Nível do Mar) em períodos mensais ou anuais. Variações sazonais e interanuais, devido a eventos temporalmente mais duradouros, como o *El Nino* e *La Nina*, influenciam na determinação de uma tendência coerente do nível do mar.

Neste trabalho, a tendência do nível do mar, valor do aumento ou rebaixamento fornecido em mm/ano (milímetros por ano), é obtido a partir de uma regressão linear dos valores mensais do nível do mar, conforme (DOUGLAS, 1991; DOUGLAS, 1997; DOUGLAS, 2001; PARKER e OLLIER, 2017). Para o cálculo da regressão nesse trabalho foi utilizado software AstGeoTop: Análise de Maré @Versão 2016.09.01 (GARNÉS,2019), com os detalhes do modelo esclarecidos no Artigo 2 – Seção 5.2.

Os registros de marés foram obtidos de dois conjuntos de dados: RMPG e UHSLC. O UHSLC disponibiliza os dados médios horários do nível do mar de diversas estações pelo mundo e as séries temporais foram selecionadas de acordo com os seguintes critérios: i) estações por toda a costa litorânea da América do Sul; ii) com 50 anos, ou mais, de registro de dados maregráficos; e iii) no mínimo, 80% de dados válidos para o período disponibilizado. Já a RMPG disponibiliza os dados diários do nível do mar, a cada 6 minutos, 5 minutos ou 1 minuto, para o litoral do Brasil. Em ambos os casos, foram obtidas as médias mensais por meio do *software* AstGeoTop para proceder o cálculo da tendência.

2.2 Séries temporais GNSS

As estações maregráficas registram o valor do nível do mar e, em conjunto, o valor da movimentação vertical da crosta terrestre. Assim, um aumento do nível relativo do mar, observado por uma estação maregráfica, pode ser exacerbado, por uma movimentação vertical negativa, ou atenuado, por uma movimentação positiva.

A rede SIRGAS-CON disponibiliza arquivos com extensão “.*crd*” contendo as posições semanais finais das suas estações. As coordenadas são fornecidas no Sistema Cartesiano Geocêntrico (X, Y, Z) e precisam ser transformadas para Geodésicas Elipsoidais (Latitude Geodésica, Longitude Geodésica e Altitude Geodésica), referidas ao elipsoide GRS-80. Outra opção seria utilizar as coordenadas das estações diretamente do arquivo SINEX, porém, este fornece a Altitude Geodésica com precisão decimétrica e não atenderia as expectativas de precisão que se espera para esse trabalho.

Para obter a tendência do movimento vertical da estação GNSS, utilizou-se a regressão linear no *software* AstGeoTop. Foram selecionadas 14 estações que atendem o seguinte critério:

i) a distância entre o marégrafo e a estação GNSS não pode ser superior a 10km.

3 Resultados e discussões

Os resultados das tendências do nível relativo do mar, do movimento vertical crustal e do nível absoluto do mar estão apresentados na Tabela 1. Nesta tabela encontram-se as informações referentes as estações maregráficas: nome, país, período (P) em anos, tendência (TM) em mm/ano; a distância entre a estação GNSS e o Marégrafo (M) em metros; o período (P), a tendência (TS) do movimento vertical obtido com as coordenadas semanais da rede SIRGAS-CON e a tendência do nível absoluto do mar no marégrafo (M+SIRGAS).

Nome, País	Marégrafo (M)		GNSS/ M	SIRGAS-CON		M + SIRGAS (mm/ano)
	P (anos)	TM (mm/ano)	Dist (m)	P (anos)	TS (mm/ano)	
Buenos Aires, AR*	56	1,34 ± 0,47	3657	15	-0,69 ± 0,12	0,65 ± 0,49
Cananeia, BR*	52	4,18 ± 0,41	10	12	-2,66 ± 0,40	1,52 ± 0,57
Rio de Janeiro, BR*	50	2,04 ± 0,56	5993	11	1,04 ± 0,30	3,08 ± 0,64
Antofagasta, CL*	71	-0,87 ± 0,20	-	-	-	-
Valparaiso, CL*	72	-1,20 ± 0,23	25	4	-2,94 ± 0,27	-4,14 ± 0,35
Buenaventura, CO*	61	2,21 ± 0,40	7875	13	-0,08 ± 0,12	2,13 ± 0,42
Cartagena, CO*	63	5,30 ± 0,26	1442	18	-1,86 ± 0,07	3,44 ± 0,27
Tumaco, CO*	63	-1,27 ± 0,43	317	12	2,99 ± 0,15	1,72 ± 0,46
La Libertad, EC*	68	5,74 ± 0,29	-	-	-	-
Callao, PE*	62	-0,08 ± 0,26	1435	9	3,37 ± 0,23	3,29 ± 0,35
Fortaleza, BR**	11	1,00 ± 0,94	490	18	-0,91 ± 0,17	0,09 ± 0,96
Imbituba, BR**	13	-59,00 ± 13,16	670	11	-1,38 ± 0,17	-60,38 ± 13,16
Salvador, BR**	12	1,41 ± 2,72	157	11	-0,48 ± 0,13	0,93 ± 2,72
Santana, BR**	12	-46,64 ± 14,18	138	3	-0,42 ± 1,42	-47,06 ± 14,25

Tabela 1 Tendências do nível relativo do mar (TM) obtidas a partir dos marégrafos (M); Tendências do movimento vertical obtidas com as coordenadas da rede SIRGAS-CON (TS); Nível absoluto do mar, corrigido dos movimentos verticais crustais (M+SIRGAS). *Estações do UHSLC; ** Estações da RMPG

De acordo com a Tabela 1, as duas séries temporais de maior duração encontram-se no Chile (Antofagasta, com 71 anos, e Valparaíso, com 72 anos). Na Figura 1, apresentam-se as séries maregráficas mensais dos dois marégrafos.

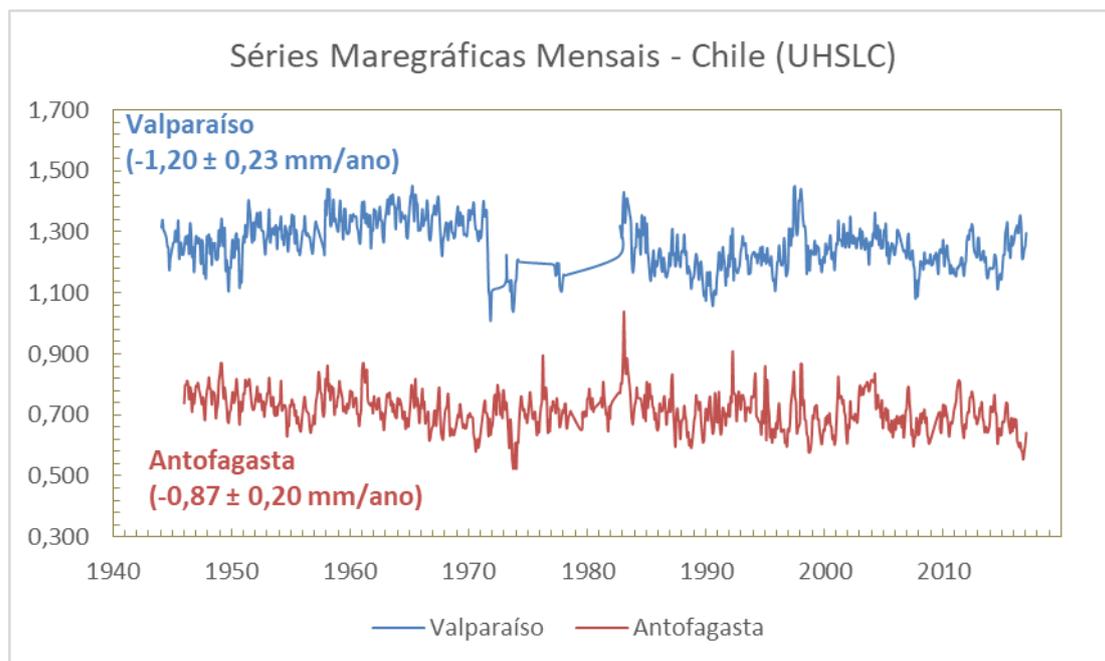


Figura 1 Séries maregráficas mensais no Chile, nas estações Antofagasta e Valparaíso com dados do UHSLC.

Pelos gráficos, é possível observar uma descontinuidade ano de 1971. Ela é devida a um terremoto que ocorreu na região de Valparaíso com 7,50 graus de magnitude na escala *Richter* (INDIRLI et al, 2011). Dessas duas séries, só foi possível obter o nível absoluto do mar na estação Valparaíso, pois não existem dados GNSS próximo à estação Antofagasta. Portanto, na estação de Valparaíso, existe uma tendência de rebaixamento de $-4,14 \pm 0,35$ mm/ano e uma movimentação vertical crustal de $-2,94 \pm 0,27$ mm/ano.

As séries temporais mensais dos marégrafos de Buenaventura, Cartagena e Tumaco, na Colômbia, foram agrupadas na Figura 2 (b). Buenaventura e Tumaco são banhadas pelo Oceano Pacífico e Cartagena pelo Mar do Caribe, sendo esta uma possível explicação para a não correlação de eventos climáticos na estação Cartagena com as outras duas. A série temporal da estação Cartagena apresentou uma possível troca de referência, Figura 2 (a). Para colocar os dados no mesmo referencial, procedeu-se a calibração dos dados conforme Calado, Garnés e Jamur (2018), utilizando harmônicos e predição de marés, adicionando assim, o valor de 0,492m às cotas identificadas com a mudança de referência. A tendência para estação de Cartagena, antes da calibração, era de uma diminuição de $-4,69 \pm 0,65$ mm/ano, e após a calibração a tendência foi de um aumento de $5,30 \pm 0,26$ mm/ano. Nas séries que estão no Oceano Pacífico, é possível observar dois picos: um nos anos de 1982/1983 e outro pico nos anos de 1997/1998. Esses picos coincidem com o evento climático *El Nino*, que para os anos de 1982/1983 e 1997/1998 foram considerados os maiores do século passado (SEYMOUR,

1998). As estações apresentaram um aumento no nível absoluto do mar de 2,13 mm/ano, 3,44 mm/ano e 1,72 mm/ano para Buenaventura, Cartagena e Tumaco, respectivamente.

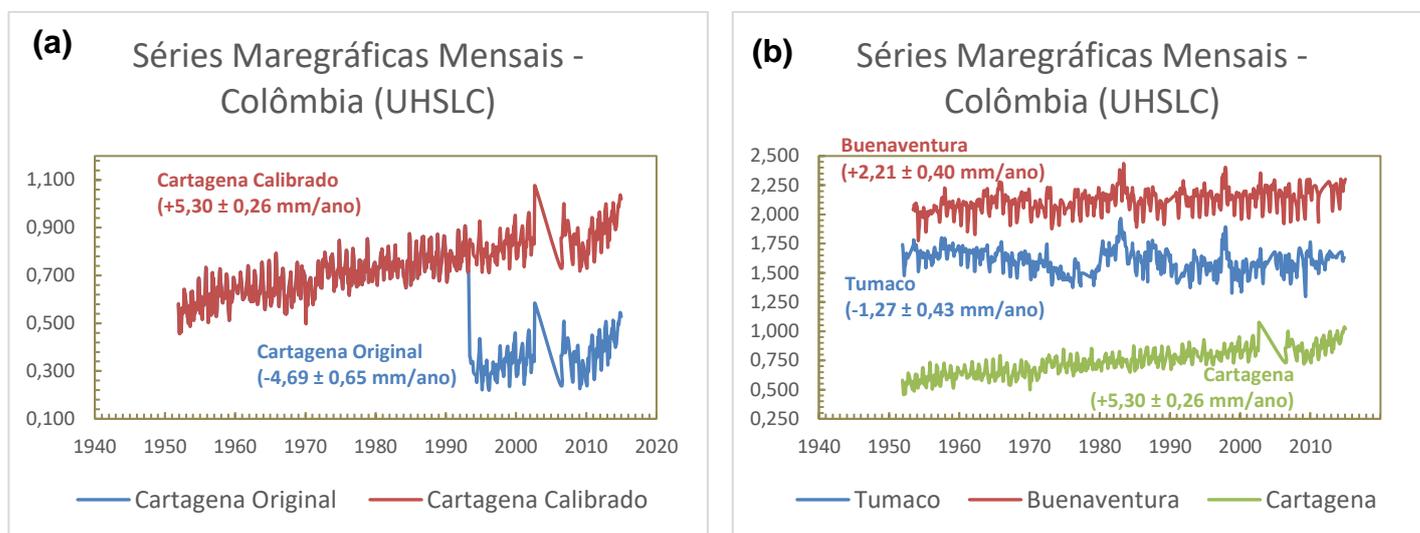


Figura 2 Séries maregráficas da Colômbia. (a) Série maregráfica de Cartagena com possível problema de referencial; (b) Séries maregráficas mensais na Colômbia, nas estações Buenaventura, Tumaco e Cartagena com dados do UHSLC.

A estação Callao, no Peru, também apresentou uma possível mudança de referencial, conforme apresentado na Figura 3 (a). Após a calibração no valor de +0,661m, na Figura 3 (b), a série é apresentada junto com a estação La Libertad, do Equador, devido à proximidade entre elas (≈ 500 km). É possível observar que o *El Nino* de 1982/1983 e o *El Nino* de 1997/1998 (SEYMOUR, 1998), também afetou as observações maregráficas do Equador e do Peru. A estação La Libertad apresentou uma elevação exacerbada do nível do mar relativo para a região em estudo. Com a falta de dados GNSS para essa estação, não foi possível detectar se esse aumento é realmente um aumento do nível do mar ou se é um rebaixamento da placa. Já para a estação Callao, no Peru, os dados GNSS estão disponíveis e o nível absoluto do mar obtido para a estação foi de $3,29 \pm 0,35$ mm/ano.

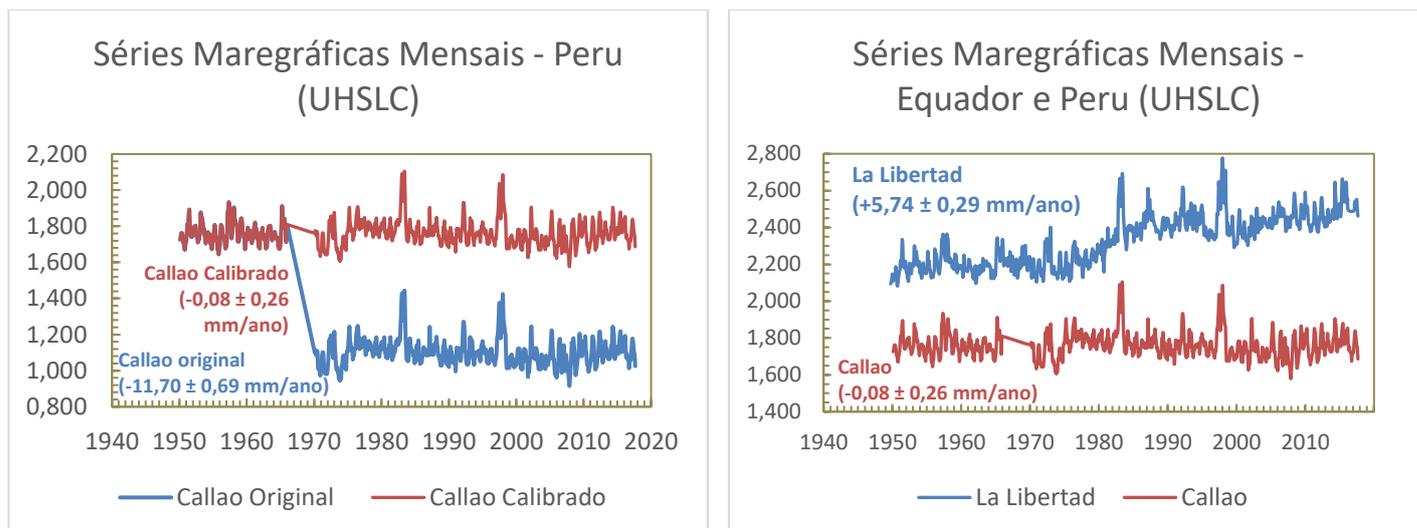


Figura 3 Séries maregráficas do Equador e do Peru. (a) Série maregráfica de Callao com possível problema de referencial; (b) Séries maregráficas mensais no Equador, estação La Libertad, e no Peru, estação Callao, com dados do UHSLC.

Na Figura 4, observa-se os marégrafos da Argentina e do Brasil com dados do UHSLC. Os três marégrafos encontram-se no Oceano Atlântico, e é possível ver uma tendência positiva para esta região em estudo. Os marégrafos brasileiros apresentam uma correlação, mas observa-se que o *El Nino* ocorrido em 1962/63 não tem tanto impacto na estação Cananéia como apresenta na estação Buenos Aires. A tendência positiva para o aumento do nível relativo do mar é identificada também no nível absoluto do mar, condizentes com estudos atuais.

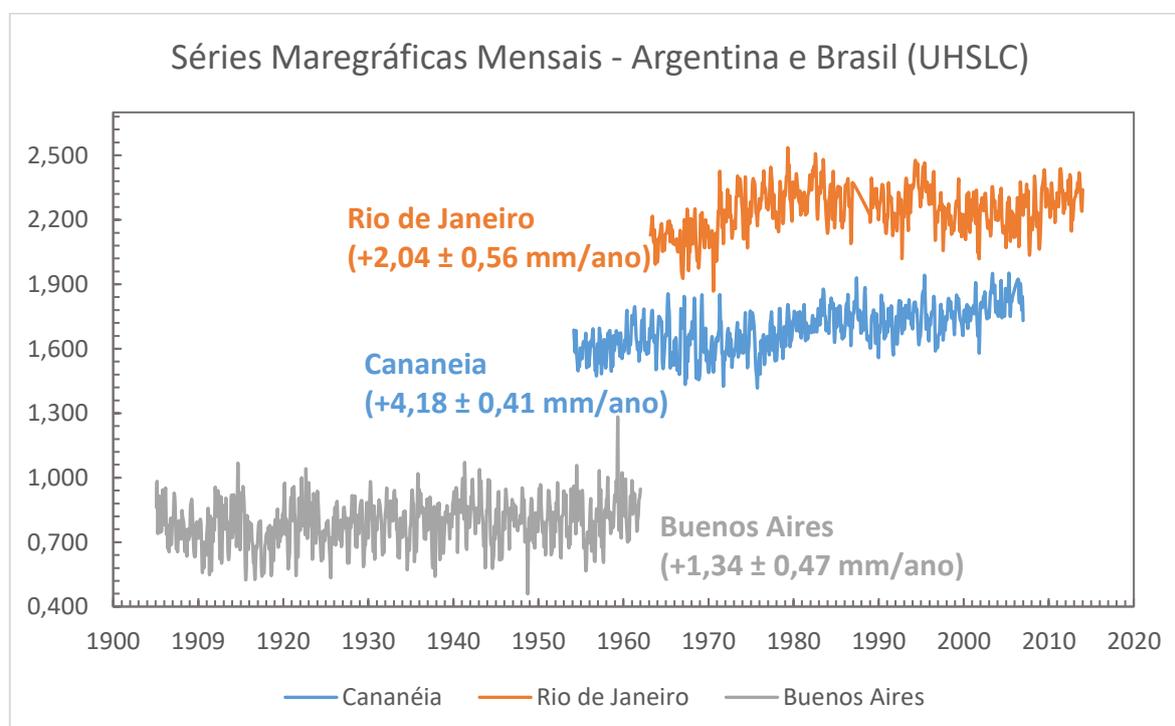


Figura 4 Séries maregráficas mensais no Brasil, na estação Rio de Janeiro e Cananéia, e na Argentina, estação Buenos Aires, com dados do UHSLC.

A RMPG ainda não possui séries tão longas quanto as do UHSLC, ficando com um média de 12 anos de dados para cada uma das suas estações e prejudicando principalmente a análise da regressão polinomial quadrática. Porém, com as cotas de maré fornecidas, geralmente, a cada 5 minutos, é possível identificar de forma mais clara possíveis mudanças no referencial. A Figura 5 apresenta as séries temporais com essas possíveis mudanças.

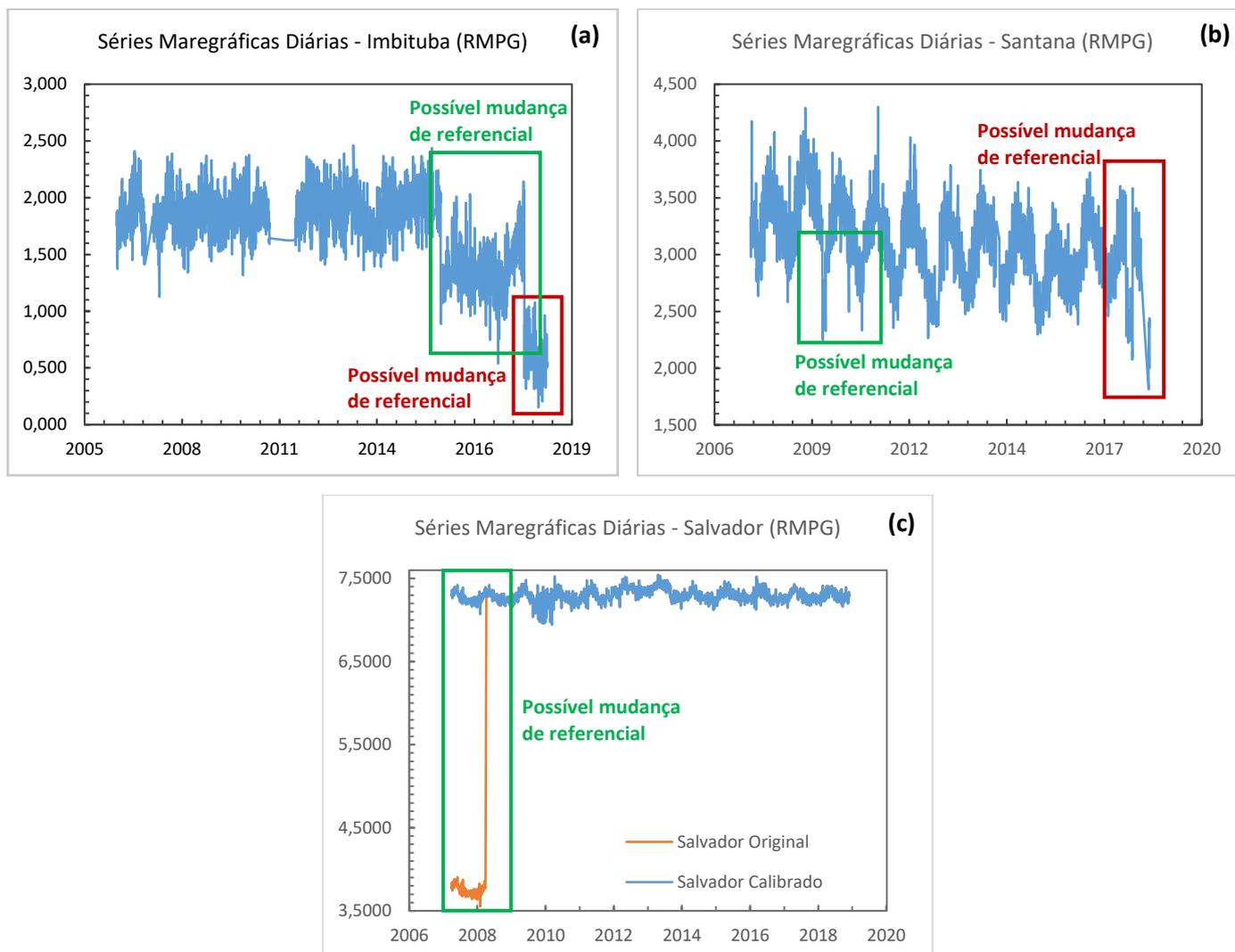


Figura 5 Séries maregráficas diárias da RMPG com possíveis mudanças de referencial: (a) Imbituba; (b) Santana; (c) Salvador.

Na Figura 5 (a), observa-se possíveis mudanças de referência para a série maregráfica de Imbituba. Na Figura 5 (b), estão identificadas possíveis mudanças na série de Santana, e na Figura 5 (c), observa-se a mudança brusca na série inicial de Salvador. O procedimento de calibração conforme (CALADO, GARNÉS E JAMUR, 2018) só foi possível para a estação de

Salvador, adicionando um valor de 3,518m, pois Imbituba e Santana são afetados por efeitos de difícil modelagem com os harmônicos.

Na Figura 6, apresenta-se a série da estação Fortaleza com uma tendência de elevação do nível do mar de $+1,00 \pm 0,94$ mm/ano e a série de Salvador com uma tendência de $+1,41 \pm 2,72$ mm/ano. Ainda na Figura 6, observa-se a aceleração da série temporal, que indica se o mar continua se elevando ou não. Ambas as séries apresentam uma desaceleração no nível do mar, entretanto, a série de dados é muito curta, e o resultado da aceleração precisaria de uma série temporal mais longa (50 anos) para se ter uma confiança maior. Na estação de Fortaleza, o nível absoluto do mar obtido na integração GNSS e marégrafo é de $0,09 \pm 0,96$ mm/ano e para a estação de Salvador é de $0,93 \pm 2,72$ mm/ano.

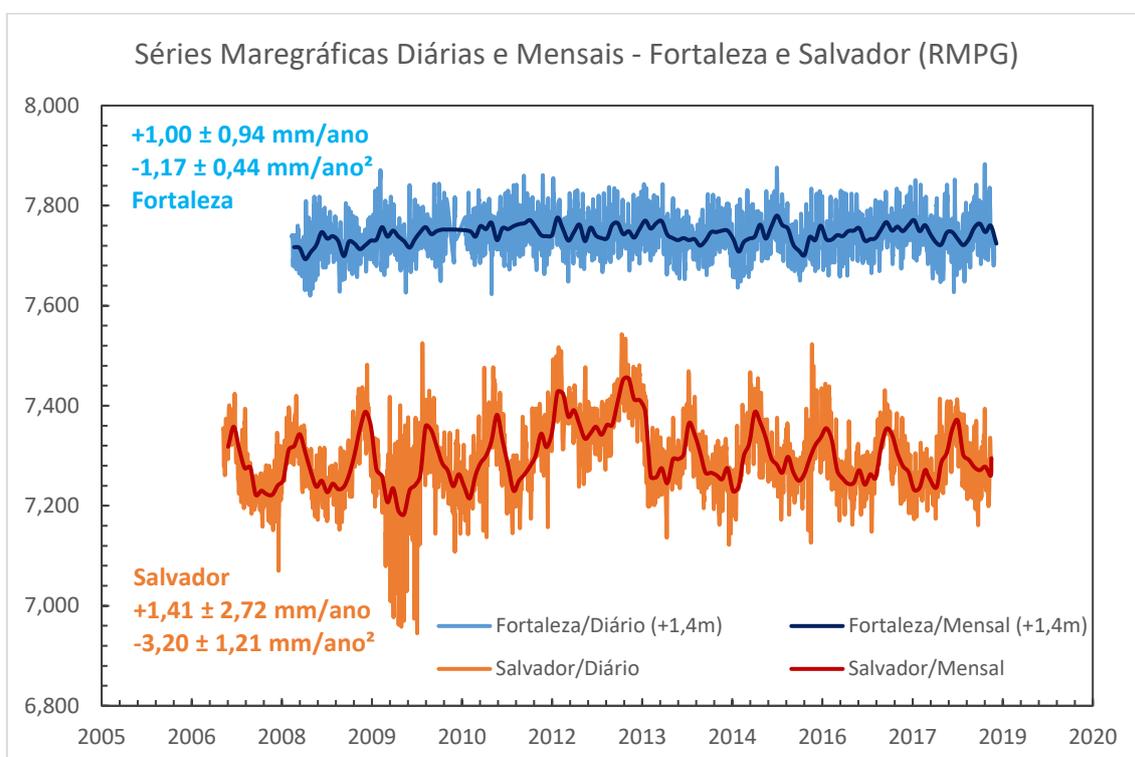


Figura 6 Séries Maregráficas Diárias e Mensais de Fortaleza e Salvador (RMPG)

Na Figura 7, as séries dos marégrafos de Imbituba e Santana são apresentadas. Ressalta-se que os dois *data* verticais brasileiros são referidos ao local dessas estações maregráficas. Devido aos problemas de referencial apresentados na Figura 5, essas duas séries não apresentam resultados realísticos da região em estudo.

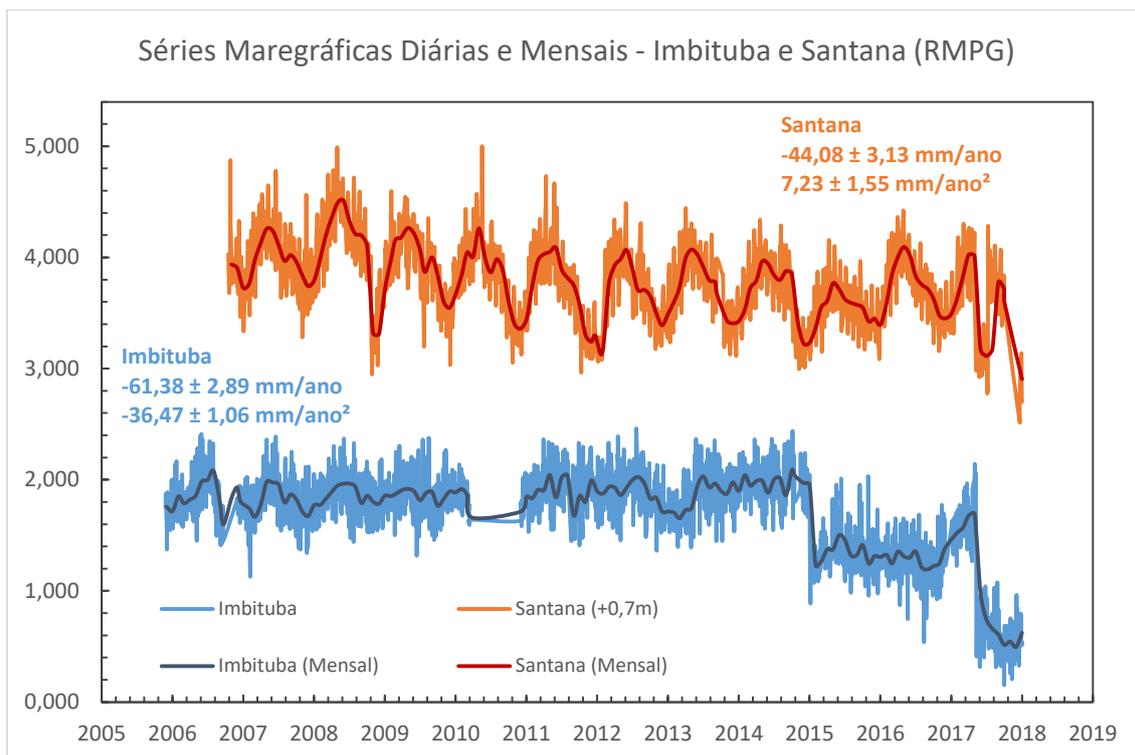


Figura 7 Séries Maregráficas Diárias e Mensais de Santana e Imbituba (RMPG)

4 Conclusões e recomendações

Neste trabalho avaliou-se o nível relativo e o nível absoluto do mar com dados do UHSLC, RMPG e SIRGAS-CON. Foi possível observar um aumento do nível relativo do mar nas estações que estão localizadas no Oceano Atlântico e um rebaixamento do nível relativo do mar nas estações localizadas no Oceano Pacífico.

Para obter a tendência média do nível absoluto do mar na América do Sul, desconsiderou-se as estações Imbituba, Santana e Salvador, pelos altos valores dos *sigmas* apresentados nas estações maregráficas. Portanto, a tendência do nível absoluto do mar foi de $1,31 \pm 0,54$ mm/ano.

Recomenda-se também que o IBGE coloque as informações de troca de referência nos relatórios das estações maregráficas da RMPG, disponibilizados no *site*, para que o usuário possa efetuar a calibração dos dados e proceder a análise da tendência do marégrafo.

Referências

Ablain, M., Meyssignac, B., Zawadzki, L., Jugier, R., Ribes, A., Cazenave, A., e Picot, N.: Uncertainty in Satellite estimate of Global Mean Sea Level changes, trend and acceleration. Earth Syst. Sci. Data Discuss., <https://doi.org/10.5194/essd-2019-10>, in review, 2019.

Alencar, J. C. M. Datum altimétrico brasileiro. Cadernos de Geociências, Rio de Janeiro, v. 5, p. 69-73, 1990

Blewitt G., C. Kreemer, W.C. Hammond, J. Gazeaux (2016). MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. Journal of Geophysical Research, 121, 2054-2068, doi:10.1002/2015JB012552.

Blewitt G., W. C. Hammond, C. Kreemer (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. Eos, 99, doi:10.1029/2018EO104623.

Calado, L. G. L. P.; Garnés, S. J. A.; Jamur, K. P. Análise da estação maregráfica de Fortaleza para determinar as variações do nível do mar. VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE. VII SIMGEO, 2018.

Carter, W. E. (1994) Report of the Surrey Workshop of the IAPSO Tide Gauge Bench Mark Fixing Committee. National Ocean Service, NOAA Technical Report, NOSOES0006.

Carvalho, K. S., Wang, S. Characterizing the Indian Ocean sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. Journal of Hydrology 569 (2019) 373-386. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.072>

Chelton, D. B, Enfield, D. B. Ocean Signals in Tide Gauge Records. Journal of Geophysical Research, Vol 91, No B9, Pages 9081-9098, AUGUST 10, 1986.

Christodoulou, A.; Christidis, P., Demirel, H. (2018) Sea-level rise in ports: a wider focus on impacts. Marti Econ Logist. Doi: <https://doi.org/10.1057/s41278-018-0114-z>

Douglas, B. C. Global Sea Level Rise. Journal of Geophysical Research, vol. 96, N. C4, April 1991. pp. 6981-6992.

Douglas, B. C. Global Sea Rise: A redetermination. Surveys in Geophysics. vol. 18, 1995. pp. 279-292.

Douglas, B.C. Sea Level Change in the Era of the Recording Tide Gauge. Chapter 3. 2001

Garnés, S. J. A. (2019) AstGeoTop. *Software*. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

Marcos. M *et al.* Coastal Sea Level and Related Fields from Existing Observing Systems. Surveys In Geophysics. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09513-3>

Nicholls, R. J., Cazenave, A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. Science 328, 1517 (2010). DOI: 10.1126/science.1185782

Sanli, D. U., Blewitt, G. Geocentric sea level trend using GPS and >100-year tide gauge record on a postglacial rebound nodal line. Journal of Geophysical, Research, Vol. 106, NO. B1, Pages 713-719, January 10, 2001.

Santamaría-Gómez A., M. Gravelle, S. Dangendorf, M. Marcos, G. Spada, G. Wöppelmann (2017). Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. *Earth and Planetary Science Letters*, 473, 24-32.

Seymour, R.J., 1998. Effects of El Niños on the West Coast wave climate. *Shore Beach* 66, 3-6.

UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center). 2019. Disponível em: <<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>>. Acessado: 11 de fevereiro de 2019.

Vanicek, P. To the problem of Noise Reduction in Sea-Level Records used in Vertical Crustal Movement Detection. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 17 (1978) 265-280.

Wöppelmann, G., M. Marcos (2016), Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, *Rev. Geophys.*, 54, 64–92, doi:10.1002/2015RG000502.

Wöppelmann, G. et al (2014) Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849–1851. *Journal of Geodesy* 88: 869-885. The online version of this article (doi:10.1007/s00190-014-0728-6).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

No primeiro artigo foi executada a análise por regressão linear e por regressão quadrática em 20 marégrafos do PSMSL para obter o nível do mar relativo nas estações. Todas as séries temporais utilizadas possuem mais de 20 anos de registro de dados, e menos de 10% de dados faltantes. Para obter a movimentação vertical crustal foram utilizadas 12 estações GNSS da rede SIRGAS-CON.

Como resultado do nível relativo do mar, observou-se um aumento do nível do mar nas estações maregráficas que ficam a leste da América do Sul, no Oceano Atlântico. Já a Oeste, no Oceano Pacífico, foi possível observar um rebaixamento.

Na obtenção do nível absoluto do mar, ou geocêntrico, obteve-se um aumento do nível do mar condizente com estudos recentes do nível do mar global, com uma tendência de $0,98 \pm 0,93$ mm/ano.

No segundo artigo, as séries temporais analisadas possuem mais de 50 anos de registros maregráficos. Obteve-se um aumento do nível relativo do mar para a costa leste da América do Sul e uma redução para a costa oeste. A tendência média do nível absoluto do mar foi de $1,31 \pm 0,54$ mm/ano.

Assim, conclui-se que para a América do Sul, o nível absoluto do mar, obtendo o nível relativo do mar com estações maregráficas e o movimento vertical crustal com estações GNSS, possui uma tendência média de elevação de $1,15 \pm 0,76$ mm/ano.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se integrar os dados provenientes dos satélites altímetros para poder fazer a comparação do valor do nível absoluto do mar obtido com o marégrafo + GNSS.

Recomenda-se uma análise das séries temporais da rede SIRGAS-CON, de modo a avaliar o quanto influencia na detecção do movimento vertical as mudanças de antenas e referencial.

Recomenda-se também ao IBGE, disponibilizar as informações de mudanças de referencial das estações maregráficas da RMPG para proceder o processo de calibração dos dados.

REFERÊNCIAS

- ABLAIN, M.; MEYSSIGNAC, B.; ZAWADZKI, L.; JUGIER, R.; RIBES, A.; CAZENAVE, A.; PICOT, N. Uncertainty in Satellite estimate of Global Mean Sea Level changes, trend and acceleration. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 3, p. 1189-1202, 2019.
- ALBARICI, F. L.; GUIMARÃES, G. N.; TRABANCO, J. L. A. Análise relativa do nível médio do mar em Cananeia/SP. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba, v.6, n.3, p. 176-193, 2018.
- ALENCAR, J. C. M. Datum altimétrico brasileiro. **Cadernos de Geociências**, Rio de Janeiro, v.5, p. 69-73, 1990.
- AVISO. **Data: Mean Sea Level**. *Site*. Disponível em: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- BARBOSA, Susana Alexandra **Sea level change in the North Atlantic from tide gauges and satellite altimetry**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Geográfica) – Departamento de Matemática Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- BLEWITT, G.; ALTAMIMI, Z.; DAVIS, J.; GROSS, R.; KUO, C. Y.; LEMOINE, F. G.; MOORE, A. W.; NEILAN, R. E.; PLAG, H. P.; ROTHACHER, M.; SHUM, C. K.; SIDERIS, M. G.; SCHÖNE, T.; TREGONING, P.; ZERBINI, S. Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea-Level Rise and Variability. *In*: CHURCH, J. A.; WOODWORTH, T. A.; WILSON, T. A. **Understanding Sea-Level Rise and Variability**, 1. ed. Blackwell Publishing, 2010. p. 256-284.
- BLEWITT, G.; KREEMER, C.; HAMMOND, C. W.; GAZEUX, J. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, p. 2054-2068, 2016.
- BLEWITT G., W. C. HAMMOND, C. KREEMER. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. **Earth & Space Science News: Geology e Geophysics**, v. 99, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>. Disponível em: <https://eos.org/science-updates/harnessing-the-gps-data-explosion-for-interdisciplinary-science>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- BOON, J. D. III; KILEY, K. P. Harmonic analysis and tidal prediction by the method of least squares: a user's manual. **Applied Marine Science and Ocean Engineering: Special Report**, n. 186, 49p, 1978.
- BOSCH, W. The Sea Surface Topography and its Impact to Global Height System Definition. *In*: DREWES, H.; DODSON, A. H.; FORTES, L. P. S.; SÁNCHEZ, L.; SANDOVAL, P. **Vertical Reference Systems**. Trabalho apresentado no

International Association of Geodesy Symposia, v. 124. Berlin, Springer, 2002. p. 225-230.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. A.; JAMUR, K. P. Análise da estação maregráfica de Fortaleza para determinar as variações do nível do mar. *In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO*, 2018, Recife. **Anais [...]**. Recife: UFPE, 2018.

CALDWELL, P. C.; MERRIFIELD, M. A.; THOMPSON, P. R. Sea level measured by tide gauges from global oceans as part of the Joint Archive for Sea Level holdings (JASL) since 1846. **NOAA National Centers for Environmental Information**, 2010. DOI: <https://doi.org/10.7289/v5v40s7w>. Disponível em: <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.nodc:JIMAR-JASL#>. Acesso em: 10 fev 2019.

CARTER, W. E. Report of the Surrey Workshop of the IAPSO Tide Gauge Bench Mark Fixing Committee. **National Ocean Service**, NOAA Technical Report, 1994.

CARVALHO, K. S.; WANG, S. Characterizing the Indian Ocean sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. **Journal of Hydrology**, v. 569, p. 373-386, 2019.

CAZENAVE, A; LE COZANNET, G. Sea Level Rise and its Coastal Impacts. **Earth's Future**, v. 2, p. 15-34, 2013.

CHELTON, D. B; ENFIELD, D. B. Ocean Signals in Tide Gauge Records. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 91, n. B9, p. 9081-9098, 1986.

CHRISTODOULOU, A.; CHRISTIDIS, P.; DEMIREL, H. Sea-level rise in ports: a wider focus on impacts. **Maritime Economics e Logistics**, v. 21, p. 482-496, 2018.

CHURCH, J.A.; CLARK, P.U.; CAZENAVE, A; GREGORY, J.M.; JEVREJEVA, S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M.A.; MILNE, G.A; NEREM, R.S.; NUNN, P.D.; PAYNE, A.J.; PFEFFER, W.T.; STAMMER, D.; UNNIKRIISHNAN, A.S. Sea Level Change. *In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University, 2014. p. 1137-1216. DOI: 10.1017/CBO9781107415324

CONDIE, K. C. **Plate Tectonics and Crustal Evolution**. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 1997.

CORDINI, Jucilei. **Aspectos Geodinâmicos no Datum da Rede Altimétrica do SGB**. 1998. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

COSTA, S. M. A.; SANTOS, M. C.; GEMAEL, C. A velocity field estimation of the Brazilian portion of the SOAM plate. **GPS Solutions**, v. 7, p. 186-193, 2003.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. Estimativa da posição atual do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba a partir de dados maregráficos, observações GNSS e

Altimetria por Satélites. *In*: SIMPÓSIO SIRGAS, 2015, Santo Domingo-República Dominicana. **Anais [...]**. Republica Dominicana, 2015.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. Análise de Séries Temporais Maregráficas correlacionadas com observações GNSS do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba-SC. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 68, p. 73-90, 2016.

DA SILVA, Luciana Maria. **Análise da evolução temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DA SILVA, L. M, FREITAS, S. R. C.; DALAZONA, R. Analysis of Dynamic Effects on the Brazilian Vertical Datum. *In*: ZHANG, Y.; HOU, Y.; YANG, X. **Sea Level Rise and Coastal Infrastructure**. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.71546. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/sea-level-rise-and-coastal-infrastructure/analysis-of-dynamic-effects-on-the-brazilian-vertical-datum>. Acesso em: 05 set. 2018.

DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos do NMM a partir de séries temporais maregráficas e de Altimetria por satélites visando a integração da rede vertical brasileira ao SIRGAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 2, p. 140-153, 2005.

DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro. **Boletim de Ciências Geodésicas: Resumos**. v. 12, n. 1, p. 173-174, 2006.

DALAZOANA, Regiane. **Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DE FREITAS, Silvio Rogério Correia. **Marés gravimétricas: implicações para a Placa Sul-Americana**. 1993. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 1993.

DOUGLAS, B. C. Global Sea Level Rise. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. C4, p. 6981-6992, 1991.

DOUGLAS, B. C. Global Sea Rise: A redetermination. **Surveys in Geophysics**, v. 18, p. 279-292, 1994.

DOUGLAS, B.C. Sea Level Change in the Era of the Recording Tide Gauge. **International Geophysics**, v. 75, p. 37-64, 2001.

DREWES, H. A geodetic approach for the recovery of global kinematic plate parameters. **Bulletin Géodésique**, v. 56, p. 70–79, 1982.

DREWES, H., HEIDBACH, O. The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. *In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY SYMPOSIA*, 2012, Berlin. **Proceedings [...]**. Berlin: Springer, v. 136, 2012.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L. Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017. **IGS RNAAC SIRGAS**, 2017.

EMBARCADERO. **Delphi 10 Seattle Professional Version 23.0.20619.2753. Software**. Copyright © 2015 Embarcadero Technologies, Inc. All Rights Reserved. Licensed for Silvio Jacks dos Anjos Garnés, 2015.

EKMAN, M. A concise history of the Theories of Tides, Precession-Nutation and Polar Motion (from antiquity to 1950). **Surveys in Geophysics**, v. 14, p. 585-617, 1993.

FERREIRA, L. G. B.; CARAMORI, P. H.; MORAIS, H.; NITSCHKE, P. R.; DA COSTA, A. B. F. O fenômeno El Niño de 2015/2016 e seus impactos nas chuvas do Paraná. **LAPAR**, Paraná, 2017.

FIORE, M.; ONOFRIO, E.; GRISMEYER, W.; MEDIAVILLA, D. El ascenso del nivel del mar em la costa de la provincia de Buenos Aires. **Ciencia Hoy**, v. 18, n. 106, 2008.

GARNÉS, S. J. A. **AstGeoTop**. Recife: Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, 2019. *Software*.

GARNÉS, S. J. A. **AstGeoTop. Módulo: Transformação ITRF's @ versão 2012.11.28**. Recife: Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, 2012. *Software*.

GARNÉS, S. J. A. **AstGeoTop. Módulo: Análise de maré @ versão 2016.09.01**. Recife: Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, 2016. *Software*.

GEMAEL, C. **Introdução a geodésia física**. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2012.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. ed. Editora UFPR, 2015.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). The Global Geodetic Observing System: Introducing GGOS. **Additional Information: GGOS Components**. Disponível em: <http://www.ggos.org/>. Acesso em: 20 ago. 2018.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). The Global Geodetic Observing System: Introducing GGOS. **Additional Information: GGOS Components**. Disponível em: <http://www.ggos.org/>. Acesso em: 11 fev. 2019.

HARARI, J.; DE CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico

hidrodinâmico. **Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, v.42, n. 1, p. 35-54, 1994.

HOLGATE, S. J.; MATTHEWS, A.; WOODWORTH, P. L.; RICKARDS, L. J.; TAMISIEA, M. E.; BRADSHAW, E.; FODEN, P. R.; GORDON, K. M.; JEVREJEVA, S.; PUGH, J. New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level. **Journal of Coastal Research**, v. 29, n. 3, p. 493-504, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Resolução da Presidência n.º 1, de 25/02/2005 (R.PR 01/05)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. 8 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível de Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em:

ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf. Acesso em: 24 ago. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Disponível em:

ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf. Acesso em: 24 ago. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão**: abril 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em:

https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf. Acesso em: 24 ago. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Relatório Reajustamento da rede altimétrica com Número Geopotenciais REALT-2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018a. Disponível em:

ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf. Acesso em: 24 ago. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Estações maregráficas da RMPG-IBGE - Download. **Site**. 2018b. Disponível em:

ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/dados/. Acesso em: 24 ago. 2018.

IMBIE. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. **Nature International Journal of Science**. v. 558, p. 219-222, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>. Acesso em: 17 ago. 2018.

INDIRLI, M; RAZAFINDRAKOTO, H; ROMANELLI, F.; PUGLISI, C.; LANZONI, L.; MILANI, E.; MUNARI, M.; APABLAZA, S. Hazard Evaluation in Valparaíso: the MAR VASTO Project. **Pure and Applied Geophysics**, v. 168, p. 543-582, 2010.

INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (IOC). **Manual on Sea Level: Measurement and Interpretation. Volume III: reappraisals and recommendations as of the year 2000. Manual and Guides, n. 14, UNESCO, 2002.**

INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (IOC). **Manual on Sea Level: measurement and Interpretation. Volume IV– An update to 2006. Manual and Guides, n. 14, UNESCO, 2006.**

KUTTERER, H.; NEILAN, R. Global Geodetic Observing System (GGOS). **Journal of Geodesy. The Geodesist Handbook, 2016.**

LÓPEZ, M. C. Sea-Level Variability in The Southeastern Pacific: Coast Of Chile. *In: CONGRESO DE CIENCIAS DEL MAR DEL PERU, 2012, Lima. Proceedings [...]. Peru: Lima, 2012.*

LÓPEZ, M. C.; CEVALLOS, J.; TORRES, R., 2017. Tendencias del nivel del mar em el litoral del Pacífico Sur Oriental. *In: Vulnerabilidad de las zonas costeras de Lationamérica al cambio climático. 2017. p. 165-176.*

MARCOS, M.; WÖPPELMANN, G.; MATTHEWS, A.; PONTE, R. M.; BIROL, F.; ARDHUIN, F.; COCO, G.; SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; BALLU, V.; TESTUT, L.; CHAMBERS, D.; STOPA, J. E. Coastal Sea Level and Related Fields from Existing Observing Systems. **Surveys In Geophysics**, v. 40, p. 1293-1317, 2019.

MIGUENS, A. P. **Navegação: A Ciência e a Arte: volume 1: navegação Costeira, estimada e em águas restritas.** Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1996. 509 p.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Understanding Sea Level. **Site.** 2018. Disponível em: <https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/>. Acesso em: 24 ago. 2018.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. **Science**, v. 328, p. 1517-1520, 2010.

PEREZ, José Aurélio Silva. **Campo de Velocidade para as Estações da RBMC e do IGS Localizadas na Placa Sul-Americana: Estimativa a partir do Processamento de Dados GPS.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. **Journal of Global Positioning Systems.** v. 2, n. 2, p. 90-99, 2003.

PLAG, H. P.; PEARLMAN, M. Global geodetic observing system: meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020. **Springer Science & Business Media**, 2009.

PERMANENT SERVICE FOR MEAN SEA LEVEL (PSMSL). **Tide Gauge Data.** Disponível em: <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>. Acesso em: 04 fev. 2019.

REBOITA, M. S.; GAN, A. M.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, v. 102, p. 1-23, 2016.

SÁNCHEZ, L. SIRGAS reference frame realization SIR17P01. *In*: SYMPOSIUM SIRGAS, México, 2018.

SANLI, D. U.; BLEWITT, G. Geocentric sea level trend using GPS and >100-year tide gauge record on a postglacial rebound nodal line. **Journal of Geophysical**, v. 106, n. B1, p. 713-719, 2001.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; GRAVELLE, M.; DANGENDORF, S.; MARCOS, M.; SPADA, G.; WÖPPELMANN, G. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 473, p. 24-32, 2017.

SEYMOUR, R.J. Effects of El Niños on the West Coast wave climate. **Shore e Beach**, v. 66, n. 3, p. 3-6, 1998.

SIRGAS. **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas**. 2019. Disponível em: <http://www.sirgas.org>. Acesso em: 24 ago. 2019.

SOUZA, Wanessa Oliveira. **Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana por meio de dados VLBI e GNSS**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SOUZA, W. O.; GARNÉS, S. J. A. Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana usando as velocidades das estações SIRGAS-CON. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 5., 2014, Recife. **Anais [...]**. Recife: UFPE, 2014.

TORGE, W. **Geodesy**. 3 ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001, 416 p.

UNIVERSITY OF HAWAII SEA LEVEL CENTER (UHSLC). **Site**. 2018a. Disponível em: <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>. Acesso em: 24 ago. 2018.

UNIVERSITY OF HAWAII SEA LEVEL CENTER (UHSLC). **Download**. 2018b. Disponível em: <https://uhslc.soest.hawaii.edu/data/?rq>. Acesso em: 24 ago. 2018.

UNIVERSITY OF HAWAII SEA LEVEL CENTER (UHSLC). **Site**. 2019. Disponível em: <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>. Acesso em: 11 fev. 2019.

VANICEK, P. To the problem of Noise Reduction in Sea-Level Records used in Vertical Crustal Movement Detection. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 17, n. 3, p. 265-280, 1978.

WANG, R. Tidal Response of the Solid Earth. In: WILHELM, H. *et al.* (Ed.). **Tidal Phenomena**. Springer: Berlin Heidelberg, 1985.

WÖPPELMANN, G. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 473, p. 24–32, 2017.

WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. **Reviews of Geophysics**, v. 54, n. 1, p. 64–92, 2016.

WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M.; COULOMB, A.; MÍGUEZ, B. M.; BONNETAIN, P.; BOUCHER, C.; GRAVELLE, M.; SIMON, B.; TIPHANEAU, P. Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849–1851. **Journal of Geodesy**, v. 88, p. 869-885, 2014.