



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

INFLUÊNCIA DO CANAL DA BARRA NO NÍVEL DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR DE MARICÁ-RJ

Ana Beatriz de Brito Fernandes Pradel

Felipe Muntzberg Barrocas

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro(a).

Orientadores:

Marcos Nicolás Gallo

Rodrigo Amado Garcia Silva

Rio de Janeiro

Setembro – 2017

INFLUÊNCIA DO CANAL DA BARRA NO NÍVEL DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR DE MARICÁ-RJ

Ana Beatriz de Brito Fernandes Pradel

Felipe Muntzberg Barrocas

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO(A) AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D. Sc.

Prof. Rodrigo Amado Garcia Silva, M. Sc.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2017

Pradel, Ana Beatriz de Brito Fernandes

Barrocas, Felipe Muntzberg

Influência do Canal da Barra no Nível de Água do Sistema Lagunar de Maricá-RJ/ Ana Beatriz de Brito Fernandes Pradel e Felipe Muntzberg Barrocas. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

xv, 105 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcos Nicolás Gallo

Co-orientador: Rodrigo Amado Garcia Silva

Projeto de Graduação - UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Ambiental, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 101-105.

1. Sistema Lagunar de Maricá. 2. Controle de Cheias. 3. Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. 4. Perfil Topobatimétrico. 5. Nível d'Água.

I. Gallo, Marcos Nicolás *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Influência do Canal da Barra no Nível de Água do Sistema Lagunar de Maricá-RJ.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer, primeiramente, aos nossos respectivos companheiros de vida, Yuri e Amanda, por todo o amor, incentivo e apoio, incondicionais, desde os momentos mais difíceis aos mais felizes, ao longo desta jornada.

Agradecemos também, aos nossos familiares e amigos mais próximos, que sempre estiveram ao nosso lado dispostos a contribuir positivamente, das mais diversas formas, trocar experiências, e nos proporcionar momentos felizes, ao longo de toda a nossa existência.

Ao nosso querido amigo, conselheiro e engenheiro ambiental Arthur, pela parceria desde o início da graduação, e sua incansável e admirável vontade de viver e de somar às nossas, e quaisquer outras, vidas.

Aos nossos queridos professores orientadores Marcos Gallo e Rodrigo Silva, por toda a paciência, didática e dedicação neste projeto. Ambos, não mediram esforços durante a elaboração deste trabalho, e estiveram sempre dispostos a nos transmitir todo o conhecimento pessoal e profissional possível.

Ao nosso querido professor Paulo Cesar Rosman, por estar sempre disponível e radiante em compartilhar conosco um pouco da sua sabedoria de SisBaHiA®, Engenharia Costeira e vida. Sua contribuição, junto às suas aulas, foi essencial para este projeto.

Aos queridos Werner e Vitória, pela grande ajuda e empenho no Trabalho de Campo. A participação de ambos neste trabalho foi crucial e muito enriquecedora.

A todos os integrantes do LDSC por nos acompanharem ao longo deste processo, se mostrarem sempre acessíveis e terem o constante prazer em nos ajudar.

A toda família de professores e alunos da Engenharia Ambiental/UFRJ, que foi elementar em nossa evolução e formação como engenheiros, cidadãos e pessoas de bem.

A todos aqueles que, de alguma forma, participaram da nossa jornada até este momento, e nos fizeram, a partir das mais diferentes experiências, o que somos hoje.

E, finalmente, ao meio ambiente, que além de abrigar e reger nossas vidas, nos dá a honra, o prazer e a oportunidade de viver a busca por um desenvolvimento sustentável.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro(a) Ambiental.

Influência do Canal da Barra no Nível de Água do Sistema Lagunar de Maricá-RJ

Ana Beatriz de Brito Fernandes Pradel / Felipe Muntzberg Barrocas

Setembro/2017

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo / Rodrigo Amado Garcia Silva

Curso: Engenharia Ambiental

Nos últimos anos, tem sido cada vez mais frequente a ocorrência de alagamentos na região em torno do Sistema Lagunar de Maricá, em períodos de fortes chuvas, trazendo impactos econômicos, sociais e ambientais negativos ao município de Maricá. Este trabalho se propôs a verificar a eficácia da abertura do Canal da Barra, em diferentes conjunturas, no extravasamento de cheias no sistema, através da análise da variação do nível lagunar em um evento de cheia similar ao ocorrido em 29 de fevereiro de 2016.

A metodologia foi dividida em duas etapas: Trabalho de Campo na região do Canal da Barra para atualização da batimetria original através de dados topo-batimétricos novos, análise da condição ambiental e hidrológica da área de estudo, coleta de informações com moradores e medição de níveis do mar e da lagoa; Utilização do software SisBaHiA® para modelagem hidrodinâmica ambiental do sistema, simulando diferentes cenários de abertura do Canal da Barra, com dados de chuva, vento, maré e vazão (calculados por modelagem hidrológica).

Concluiu-se que, para o controle de cheia do Sistema Lagunar de Maricá, em uma situação de chuva extrema, o Canal da Barra se mostra um importante instrumento, se: aberto antes do início do evento de chuva, ou mesmo de forma permanente; provido de uma seção hidráulica ótima, onde se atinja o menor nível lagunar possível e a maior rapidez na redução desse nível, atentando para os fatores limitantes do escoamento e os possíveis impactos ambientais envolvidos.

Palavras-chave: Sistema Lagunar de Maricá, Controle de Cheias, Modelagem Hidrodinâmica Ambiental, Perfil Topobatimétrico, Nível d'Água.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

Influence of the Barra Channel on the Water Level of the Lagoon System of Maricá-RJ

Ana Beatriz de Brito Fernandes Pradel / Felipe Muntzberg Barrocas

September/2017

Advisors: Marcos Nicolás Gallo / Rodrigo Amado Garcia Silva

Course: Environmental Engineering

In the past few years, flooding events on heavy rain periods around the Lagoon System of Maricá have become more frequent, bringing negative impacts to Maricá on economic, social and environmental aspects. This work intended to verify the effectiveness of opening the Barra Channel to drain the system floods, at different scenarios, through the analysis of the variation of lagoon water level in a flood event, similar to that occurred on February 29, 2016. The methodology was divided in two steps. Firstly, the fieldwork at Barra Channel region for updating the original bathymetry by acquiring new topobathymetric data, analyzing the environmental and hydrological condition of the studied area, interviewing residents and measuring the sea and lagoon water levels. Secondly, the environmental hydrodynamic modelling of the system using SisBaHiA® software and simulating different scenarios of opening the Barra Channel, taking into account rain, wind, tide and river flow data (calculated by hydrological modeling).

As a conclusion, in an extreme rainfall condition, the Barra Channel is an important tool for flood control if: opened before the rain event starts, or even permanently; provided of an optimum hydraulic section, on which the lowest possible lagoon water level is achieved and the water level reduction is the fastest, taking into account the water flow constraints and the possible environmental impacts involved.

Keywords: Lagoon System of Maricá, Flood Control, Environmental Hydrodynamic Modeling, Topobathymetric Profile, Water Level.

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO	1
I - 1. MOTIVAÇÃO	1
I - 2. OBJETIVOS	3
II - CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL	4
II - 1. PERFIL SOCIOECONÔMICO.....	4
II - 2. GEOGRAFIA E HIDROGRAFIA.....	7
II - 3. PERFIL CLIMÁTICO E METEOROLÓGICO	13
II - 4. HISTÓRICO DE ALAGAMENTOS	18
III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
III - 1. TRABALHOS LEVANTADOS SOBRE O TEMA	22
III - 2. MODELAGEM HIDROLÓGICA APLICADA AO TEMA	24
III - 3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS APLICADAS AO TEMA	25
III - 4. MODELAGEM HIDRODINÂMICA APLICADA AO TEMA.....	26
IV - METODOLOGIA	29
IV - 1. TRABALHO DE CAMPO	29
IV - 2. MODELO COMPUTACIONAL.....	38
IV - 2.1. <i>Modelo Chuva-Vazão</i>	39
IV - 2.2. <i>Malha e Batimetria</i>	46
IV - 2.3. <i>Dados de Entrada</i>	52
IV - 2.4. <i>Cenários Propostos</i>	56
V - RESULTADOS	59
V - 1. CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA LAGUNAR – SEM CHUVA.....	60
V - 1.1. <i>Canal da Barra Fechado</i>	61
V - 1.2. <i>Canal da Barra Aberto</i>	64
V - 2. RECONSTITUIÇÃO DO EVENTO DE CHEIA DE 29 DE FEVEREIRO DE 2016.....	70
V - 3. CANAL DA BARRA ABERTO APÓS O PICO DE CHEIA DO EVENTO DE CHUVA.....	72
V - 3.1. <i>Maré de Sizígia + Maré Meteorológica</i>	73
V - 3.2. <i>Maré de Quadratura</i>	76
V - 4. CANAL DA BARRA ABERTO ANTES DO EVENTO DE CHUVA	79
V - 4.1. <i>Maré de Sizígia + Maré Meteorológica</i>	79
V - 4.2. <i>Maré de Quadratura</i>	82

VI - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
VI - 1. COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS.....	85
VI - 2. CANAIS DE PROFUNDIDADE ALTERNATIVA.....	90
VII - CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
VII - 1. CONCLUSÕES.....	97
VII - 2. RECOMENDAÇÕES	99
VIII -REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolução Populacional – Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. Censo Demográfico 1991, Contagem Populacional 1996, Censo Demográfico 2000, Contagem Populacional 2007 e Censo Demográfico 2010 (Ibge, 2017).	5
Figura 2: IDH - Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA, 2013 (Ibge, 2017).	5
Figura 3: PIB <i>per capita</i> - Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA, 2013 (Ibge, 2017).	6
Figura 4: PIB (Valor Adicionado) – Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA (Ibge, 2017).	6
Figura 5: Mapa Domínios Geomorfológicos do Município de Maricá – RJ (Costa, 2016)..	7
Figura 6: Bacia Hidrográfica de Maricá - Impactos Ambientais no Sistema Lagunar de Maricá-Guarapina (Cruz e Carvalho, 1996).	8
Figura 7: Corpos d`água contribuintes ao Complexo Lagunar de Maricá (adaptado de (Rosman, 2007)).	9
Figura 8: Extrato da Carta Náutica 1506 da Marinha do Brasil mostrando o Sistema Lagunar de Maricá (1962). O espelho d`água lagunar já sofreu pequenas variações desde então, porém, o sistema como um todo, não sofreu nenhuma mudança drástica (adaptado de (Rosman, 2007)).	10
Figura 9: Mapa Uso e Cobertura da Terra no Município de Maricá – RJ (Costa, 2016)....	12
Figura 10: Gráfico Climático Maricá (Climate-Data, 2017).	14
Figura 11: Gráfico Precipitação 2016 – Saquarema, obtido a partir dos dados diários da Estação Automática A667, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (adaptado de (Inmet, 2017)).	15
Figura 12: Histograma direcional da velocidade dos ventos (rosa dos ventos) calculado para o período ANUAL de 1 de maio a 31 de dezembro de 2011 e 1 de janeiro a 30 de abril de 2012; para o período VERÃO de 1 de janeiro a 31 de março de 2012; e para o período INVERNO de 1 de junho a 31 de agosto de 2011 (convenção vetorial) (Tetrattech, 2013).	16
Figura 13: Gráfico série temporal de elevação da superfície do mar em Ponta Negra, Maricá, para o período de 29 de março de 2012 a 03 de maio de 2012 (Tetrattech, 2013).	17
Figura 14: Abertura artificial do Canal da Barra de Maricá em 2 de março de 2016 (Maricáinfo, 2016).	20
Figura 15: Registro do processo de coleta de dados topo-batimétricos, com utilização do nível óptico, para elaboração dos perfis (acervo pessoal).	30
Figura 16: Registro da região do Canal da Barra, que se encontrava fechado no dia do trabalho de campo. Na foto está representada a vista frontal do Canal, do mar para a lagoa (acervo pessoal).	30
Figura 17: Registro da boca do Canal junto à margem da lagoa da Barra, por onde foi marcado o corte Ponte presente nos perfis topo-batimétricos (acervo pessoal).	31

Figura 18: Registro do processo de coleta de dados topo-batimétricos para elaboração dos perfis e análise da área de estudo. Na foto, pode ser observada a vista da margem esquerda da Lagoa da Barra (acervo pessoal).....	31
Figura 19: Registro do processo de coleta de dados topo-batimétricos para elaboração dos perfis. Na foto, utilização da mira em medições dentro da Lagoa da Barra para criação do corte Lagoa (acervo pessoal).	32
Figura 20: Gráfico da sobreposição da imagem do Canal da Barra extraída do Google Earth e dos pontos do campo marcados no GPS (elaboração própria).	33
Figura 21: Gráfico de registro de nível da série extraída do marégrafo Thalimedes - Ilha do Fundão (31/10/16 – 12/05/17) (elaboração própria).....	34
Figura 22: Gráfico da vista superior dos perfis do Canal da Barra (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).....	35
Figura 23: Gráfico da vista lateral dos perfis do Canal da Barra (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).....	36
Figura 24: Gráfico da vista frontal dos perfis do Canal da Barra (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).....	36
Figura 25: Imagem retirada do Google Earth dos pontos atingidos pela água da lagoa nas cheias de 2010 e 2016, segundo relato dos moradores (elaboração própria).	37
Figura 26: Gráfico de nível (m) por distância (m) do alagamento nas cheias de 2010 e 2016, contendo o talude da margem (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).	38
Figura 27: Imagem obtida pelo Google Earth da delimitação da área de contribuição da bacia hidrográfica para o Sistema Lagunar de Maricá, e do traçado do Rio Ubatiba, que além de maior rio é o principal contribuinte ao sistema (elaboração própria).	40
Figura 28: Imagem obtida pelo Google Earth do perfil de elevação estimado para o Rio Ubatiba (elaboração própria).	41
Figura 29: Hidrograma de projeto obtido através do método HUT-SCS e utilizado como dado de entrada de vazões no modelo hidrodinâmico (elaboração própria).	45
Figura 30: Contornos de mar e de terra demarcados através do Google Earth e utilizados como dados de entrada no modelo computacional para a situação em que o Canal da Barra encontra-se aberto (elaboração própria).	46
Figura 31: Domínio modelado do Sistema Lagunar de Maricá, contendo a malha de discretização em elementos finitos, para a situação em que o Canal da Barra encontra-se aberto (elaboração própria).....	48
Figura 32: Curva de maré astronômica genérica de Maricá para um período mensal e profundidade mínima da seção transversal mais rasa do Canal da Barra aberto (elaboração própria).	50
Figura 33: Domínio modelado do Sistema Lagunar de Maricá, contendo a batimetria produzida, quando o Canal da Barra se encontra aberto (elaboração própria).....	51
Figura 34: Domínio modelado na região do Canal da Barra de Maricá, contendo a batimetria produzida, quando o canal se encontra aberto (elaboração própria).	52
Figura 35: Imagem retirada do SisBaHiA® contendo todos os nós da malha elaborada, onde os grupos de nós que possuem vazões contribuintes encontram-se marcados de vermelho (elaboração própria).....	53

Figura 36: Gráfico do registro de nível (m) por tempo (data) do Marégrafo Thalimedes, contendo a variação obtida entre o Nível Médio da série completa e o Nível Médio Móvel Diário Máximo, representando assim uma maré meteorológica positiva (elaboração própria).	55
Figura 37: Rosa dos Ventos contendo direção, velocidade (ms^{-1}) e frequência (%) dos ventos entre os dias 29 de fevereiro e 2 de março de 2016, para a Estação Automática A667 – Saquarema (adaptado de (Inmet, 2017)).	56
Figura 38: Mapa contendo as estações (nós da malha) do sistema definidas para análise do nível lagunar (elaboração própria).	60
Figura 39: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 129$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).	61
Figura 40: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 136$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).	61
Figura 41: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 311$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).	62
Figura 42: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 318$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).	62
Figura 43: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as 7 estações definidas. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).	63
Figura 44: Gráfico da figura 43 em escala de nível reduzida desconsiderando a estação Canal Ponta Negra (elaboração própria).	63
Figura 45: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 129$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	64
Figura 46: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 136$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	65
Figura 47: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 311$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	65
Figura 48: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 318$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	66
Figura 49: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 140$ h, no fim da vazante antes da baixa-mar de quadratura, representando a influência do vento local. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	66

Figura 50: Mapa de nível d'água e direção e sentido da velocidade de corrente do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 311$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	67
Figura 51: Mapa de nível d'água e direção e sentido da velocidade de corrente do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 320$ h, representando o comportamento hidrodinâmico no início da enchente logo após a baixa-mar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (Elaboração própria).	68
Figura 52: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as 7 estações definidas. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).	69
Figura 53: Gráfico da figura 52 em escala de nível reduzida desconsiderando a estação Canal Ponta Negra (elaboração própria).	69
Figura 54: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 1$ h, após o início da chuva. Cenário da chuva de 29/02/2016 (elaboração própria).	70
Figura 55: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h, após o início da chuva. Cenário da chuva de 29/02/2016 (elaboração própria).	71
Figura 56: Gráfico de variação do nível lagunar (m) por tempo (h), para as estações Canal da Barra e Prefeitura, sobreposto ao hidrograma das vazões contribuintes (m^3s^{-1}) ao longo do tempo (h). Cenário da chuva de 29/02/2016 (elaboração própria).	71
Figura 57: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	73
Figura 58: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	73
Figura 59: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	74
Figura 60: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura. Cenário de abertura do Canal da Barra após o pico de cheia do sistema, sendo iniciado na maré de sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	75
Figura 61: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a quadratura (elaboração própria).	76
Figura 62: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a quadratura (elaboração própria).	76
Figura 63: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a quadratura (elaboração própria).	77

Figura 64: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura. Cenário de abertura do Canal da Barra após o pico de cheia do sistema, sendo iniciado na maré de quadratura (elaboração própria).	78
Figura 65: Mapa de nível d`água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	79
Figura 66: Mapa de nível d`água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	80
Figura 67: Mapa de nível d`água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	80
Figura 68: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura. Cenário de abertura do Canal da Barra antes da Chuva de 29/02/2016, sendo iniciado na maré de sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).	81
Figura 69: Mapa de nível d`água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a quadratura (elaboração própria).	82
Figura 70: Mapa de nível d`água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a quadratura (elaboração própria).	82
Figura 71: Mapa de nível d`água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a quadratura (elaboração própria).	83
Figura 72: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura. Cenário de abertura do Canal da Barra antes da Chuva de 29/02/2016, sendo iniciado na maré de quadratura (elaboração própria).	84
Figura 73: Gráfico comparativo de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para a estação Canal da Barra nas conjunturas 2; 3.1; 3.2; 4.1 e 4.2 (elaboração própria). .	86
Figura 74: Gráfico comparativo de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para a estação Prefeitura nas conjunturas 2; 3.1; 3.2; 4.1 e 4.2 (elaboração própria).	87
Figura 75: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para as estações Canal da Barra e Prefeitura, considerando o Canal da Barra com 1 m de profundidade, aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria).	91
Figura 76: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para as estações Canal da Barra e Prefeitura, considerando o Canal da Barra com 2 m de profundidade, aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria).	91

Figura 77: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para a estação Canal da Barra, comparando as profundidades propostas para o Canal da Barra, esse aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria). 93

Figura 78: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para a estação Canal da Barra, comparando as profundidades propostas para o Canal da Barra, esse aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria). 94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Área e percentual de uso e cobertura da terra do município de Maricá (adaptado de (Costa, 2016)).	12
Tabela 2: Constantes harmônicas da maré em Maricá, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 13 (adaptado de (Tetrattech, 2013)).	18
Tabela 3: Valores de CN para cada classe (uso e cobertura do solo) e tipo de solo do SCS (adaptado de (Carvalho Junior, 2013)).	25
Tabela 4: Equações da Quantidade de Movimento e da Continuidade de Volume para um modelo 2DH promediado na vertical (adaptado de (De Paula Oliveira, 2013)).	27
Tabela 5: Parâmetros das equações apresentadas na tabela 5 (adaptado de (De Paula Oliveira, 2013)).	27
Tabela 6: Valores de CN estimados a partir do percentual para cada uso/cobertura da terra no município de Maricá (Elaboração própria).	42
Tabela 7: Equações para a definição do Hidrograma Unitário Triangular pelo SCS (adaptado de (Barboza, 2014)).	45
Tabela 8: Instantes definidos como mais relevantes para a visualização da variação do nível d'água lagunar do sistema, através dos mapas gerados nas simulações (elaboração própria).	59

I - INTRODUÇÃO

I - 1. Motivação

O Sistema Lagunar de Maricá-Guarapina, localizado no município de Maricá, vem sofrendo consideráveis e constantes alterações ambientais, sejam estas por processos naturais ou por intervenções humanas. O sistema, como um todo, é particularmente sensível e basicamente influenciado pelo regime de chuvas, ventos e marés locais. O complexo lagunar é constituído por quatro lagoas costeiras rasas e extensas (Lagoas de Maricá, Barra, Padre e Guarapina), caracterizadas por ocuparem uma grande área da bacia, mas apresentarem pequenas profundidades. A natureza do sistema, o terreno de baixa altitude e os taludes bastante sutis nas margens das lagoas, favorecem, por exemplo, o avanço das águas para geração de áreas alagadas, através do aumento do nível lagunar, em épocas de cheias.

Nos últimos anos devido, sobretudo, aos impactos gerados pelo crescente processo de urbanização na região no entorno do Complexo Lagunar de Maricá, tem sido cada vez mais frequente eventos de alagamentos relacionados a cheias por fortes chuvas. Tais eventos são extremamente prejudiciais à Maricá, trazendo impactos econômicos, sociais e ambientais negativos ao município.

Na ocorrência de chuvas mais intensas na região, a bacia hidrográfica de Maricá, muito bem definida por maciços costeiros junto aos limites do município, recebe todo esse volume precipitado e escoada superficialmente grande parte dessa água direto para o Sistema Lagunar. Além disso, a área baixa e plana marginal ao sistema, apresenta sérios problemas de drenagem ocasionados pelas ações antrópicas sofridas ao longo do tempo, aumentando ainda mais esse contingente escoado. Esse acúmulo de água na área do complexo, tem como consequência imediata, o aumento acentuado do nível d'água lagunar, e esse gera as problemáticas enchentes e alagamentos na região.

Quando eventos de grandes enchentes e alagamentos ocorrem, são tomadas medidas urgentes paliativas pela prefeitura da cidade, muitas vezes sem um planejamento adequado prévio, visando o controle das cheias naquele dado momento e a redução dos prejuízos à cidade e à população. Tais medidas costumam ser: desobstrução emergencial de canais drenantes; abertura do Canal da Barra para o mar por máquinas; e fornecimento de abrigo e donativos

aos desalojados e desabrigados. Assim, vale destacar a importância de uma análise da eficácia da abertura artificial do Canal da Barra, como medida urgente na redução do nível lagunar e consequente tentativa de amenizar os alagamentos provocados por esse aumento de nível, nesses eventos extremos.

Este trabalho foi desenvolvido, tendo como foco central, analisar a influência da abertura do Canal da Barra, esse localizado na Lagoa da Barra, no nível d'água do sistema lagunar como um todo. Visando assim, o controle de cheias e consequente redução do risco de possíveis alagamentos que possam vir a prejudicar a cidade de Maricá. As ferramentas metodológicas fundamentais aplicadas para a elaboração deste trabalho foram, essencialmente, o trabalho de campo e o modelo hidrodinâmico ambiental computacional. Essas proporcionaram, respectivamente, coleta de dados recentes úteis e a geração de resultados proveitosos a partir dos mesmos.

O processo de elaboração deste trabalho se deu a partir de uma pesquisa bibliográfica abrangendo artigos, projetos e estudos sobre canais de maré, estimativas de vazões máximas, modelagem hidrodinâmica ambiental na região de interesse e em regiões semelhantes, ou mesmo trabalhos diversos que identificassem as peculiaridades da região. Uma pesquisa quantitativa e qualitativa quanto aos dados ambientais disponíveis para a região de interesse também foi realizada. Após essa etapa preliminar, foi planejado e realizado um trabalho de campo no Canal da Barra de Maricá que fornecesse dados específicos relevantes e atuais para o desenvolvimento do estudo e implementação dos modelos, possibilitando que os mesmos trouxessem resultados confiáveis e próximos da realidade a partir dos dados coletados.

O método de estimativa de vazões máximas pela transformação dos dados de chuva fornecidos pelo INMET escolhido foi o Hidrograma Unitário Triangular. Esse, além de ser relativamente simples e amplamente difundido, gera uma boa aproximação, considerando um evento de chuva real, a partir de dados meteorológicos e ambientais disponíveis.

O modelo computacional elegido para o estudo, por apresentar maior compatibilidade com a natureza do sistema lagunar de interesse e tipo de análise de nível feita, foi o modelo hidrodinâmico de elementos finitos 2DH, ou seja, bidimensional e horizontal, oferecido pelo software SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Esse torna possível uma análise consistente do nível d'água lagunar, em diferentes situações meteorológicas e

astronômicas, para que se possa assim verificar a eficácia de uma abertura artificial do Canal da Barra como alternativa no controle do nível d'água no Complexo Lagunar de Maricá.

I - 2. Objetivos

Esse trabalho se propõe, a partir de uma melhor interpretação hidrológica, hidráulica e hidrodinâmica do Complexo lagunar de Maricá, a obter uma análise da funcionalidade do Canal da Barra de Maricá para escoamento do volume excessivo de água no sistema, sobretudo nos eventos específicos de chuvas extremas e aumento exacerbado do nível lagunar. Essa análise foi realizada por meio de, essencialmente, dados de campo coletados e modelagem hidrodinâmica ambiental. O principal objetivo do trabalho é:

- ✓ Verificar a eficácia da abertura do Canal da Barra, em diferentes situações, no extravasamento de cheias no Sistema Lagunar de Maricá, através da análise da variação do nível lagunar em um evento de cheia similar ao ocorrido em fevereiro de 2016.

II - CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O município de Maricá se localiza na Região Metropolitana do Rio de Janeiro e faz vizinhança com os municípios de Niterói, São Gonçalo, Itaboraí, Tanguá e Saquarema. O mesmo se estende por cerca de 363 km², sendo subdividido em quatro distritos: Maricá (sede), Ponta Negra, Inoã e Itaipuaçu. No último censo em 2010, contava com 127.461 habitantes, sendo aproximadamente 150 mil a estimativa populacional do IBGE para 2016. A densidade demográfica obtida no censo de 2010, foi de 351,6 habitantes por km² no território do município (Ibge, 2017).

A seguir é apresentada uma breve caracterização de Maricá nos diferentes âmbitos socioeconômico, ambiental e histórico.

II - 1. Perfil Socioeconômico

Nas últimas décadas a população de Maricá vem avançando quase que exponencialmente, como pode ser observado nos gráficos comparativos com a cidade do Rio de Janeiro e o país (Figura 1). Ainda assim, o IDH se mantém alto, se comparado à cidade do Rio de Janeiro e ao Brasil, graças à evolução socioeconômica que vem acompanhando o crescimento acelerado do município (Figura 2). A partir do gráfico PIB per capita comparativo entre os anos de 2010 e 2013, nota-se claramente o rápido desenvolvimento do município em relação ao município do Rio de Janeiro e ao país (Figura 3). Esse desenvolvimento foi propulsionado principalmente pelo avanço dos setores industrial e de serviços (Figura 4), além do fato de Maricá ser uma das cidades que mais recebem royalties derivados do petróleo no estado do Rio de Janeiro. Apesar do município ser historicamente conhecido por suas propriedades rurais, a agropecuária perdeu grande força na região nas últimas décadas.

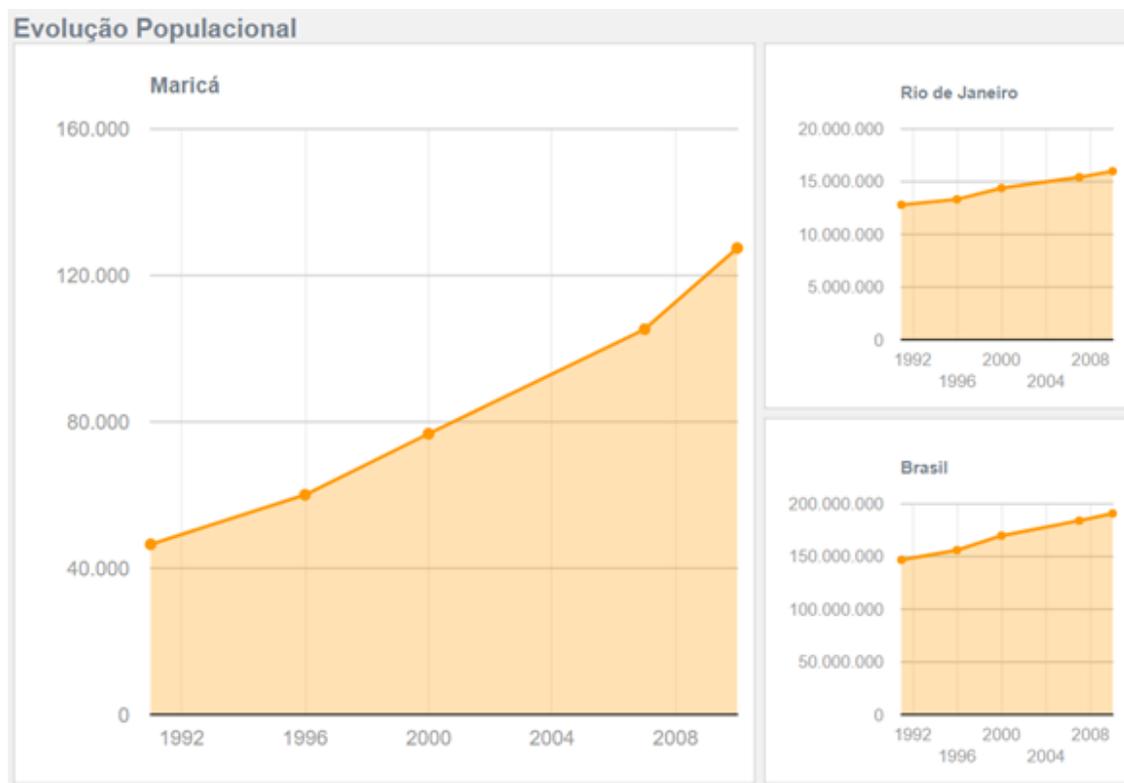


Figura 1: Evolução Populacional – Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. Censo Demográfico 1991, Contagem Populacional 1996, Censo Demográfico 2000, Contagem Populacional 2007 e Censo Demográfico 2010 (Ibge, 2017).

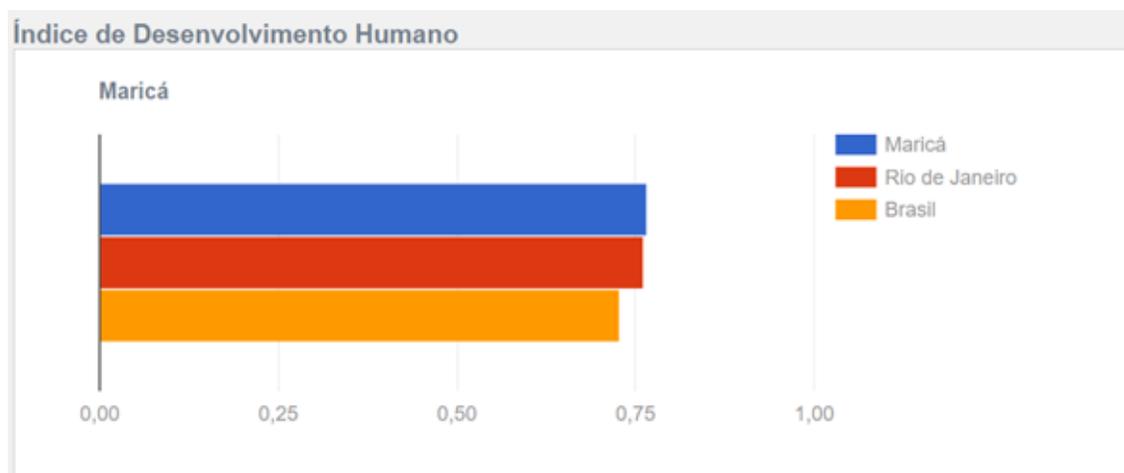


Figura 2: IDH - Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA, 2013 (Ibge, 2017).

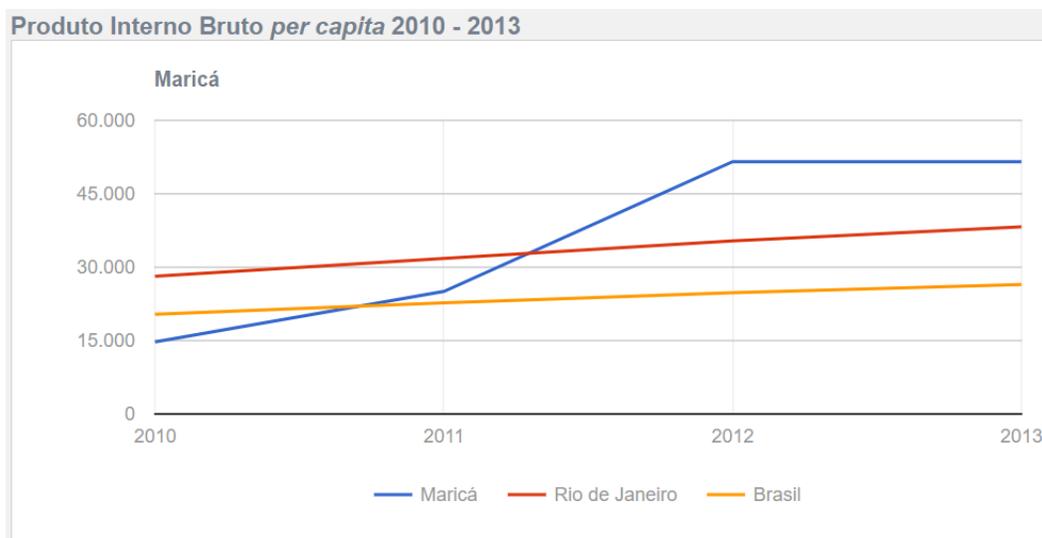


Figura 3: PIB *per capita* - Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA, 2013 (Ibge, 2017).

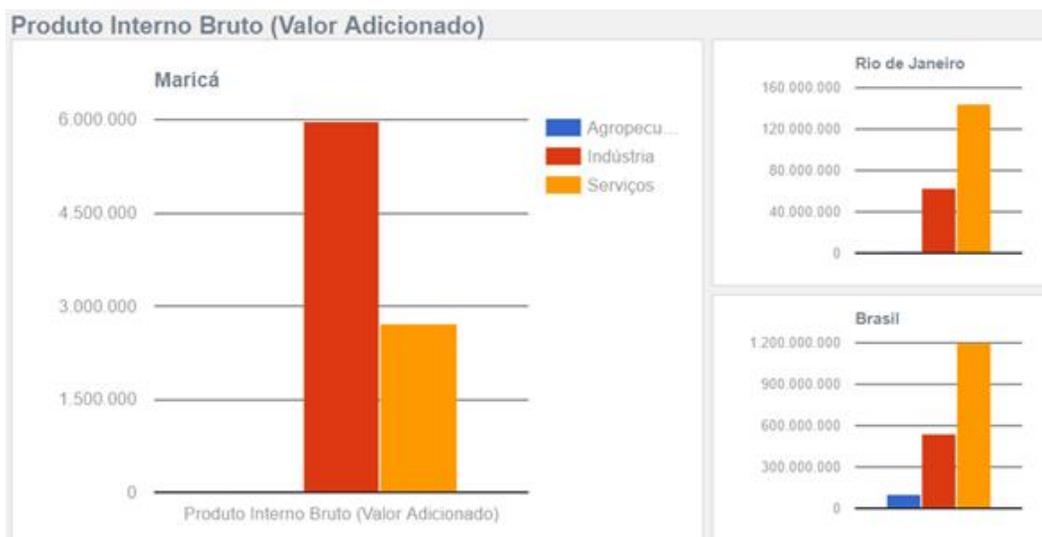


Figura 4: PIB (Valor Adicionado) – Maricá, Rio de Janeiro e Brasil. IBGE em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA (Ibge, 2017).

NOTA 1: Os dados de 2014 estarão sujeitos a revisão na próxima divulgação.

NOTA 2: Os dados da série revisada (2010 a 2014) têm como referência o ano de 2010, seguindo a nova referência das Contas Nacionais.

II - 2. Geografia e Hidrografia

Bacia Hidrográfica

Geograficamente, Maricá tem baixa altitude, em torno de 5 m, e é rodeada por maciços costeiros de grande porte, como apresentado na Figura 5, muitos ainda possuindo áreas preservadas da Mata Atlântica, o que caracteriza de forma clara sua bacia hidrográfica, essa representada na Figura 6. Coincidentemente, a área da bacia hidrográfica de Maricá corresponde praticamente à área do município, ocupando uma área total de aproximadamente 330 Km². Essa diferença de aproximadamente 30 Km², compreende uma pequena parte do município, em sua extremidade Leste próxima à divisa com o município de Saquarema, pertencente à Bacia do Complexo Lagunar da Lagoa de Saquarema, onde está situada a Lagoa de Jaconé (Hora *et al.*, 2001).

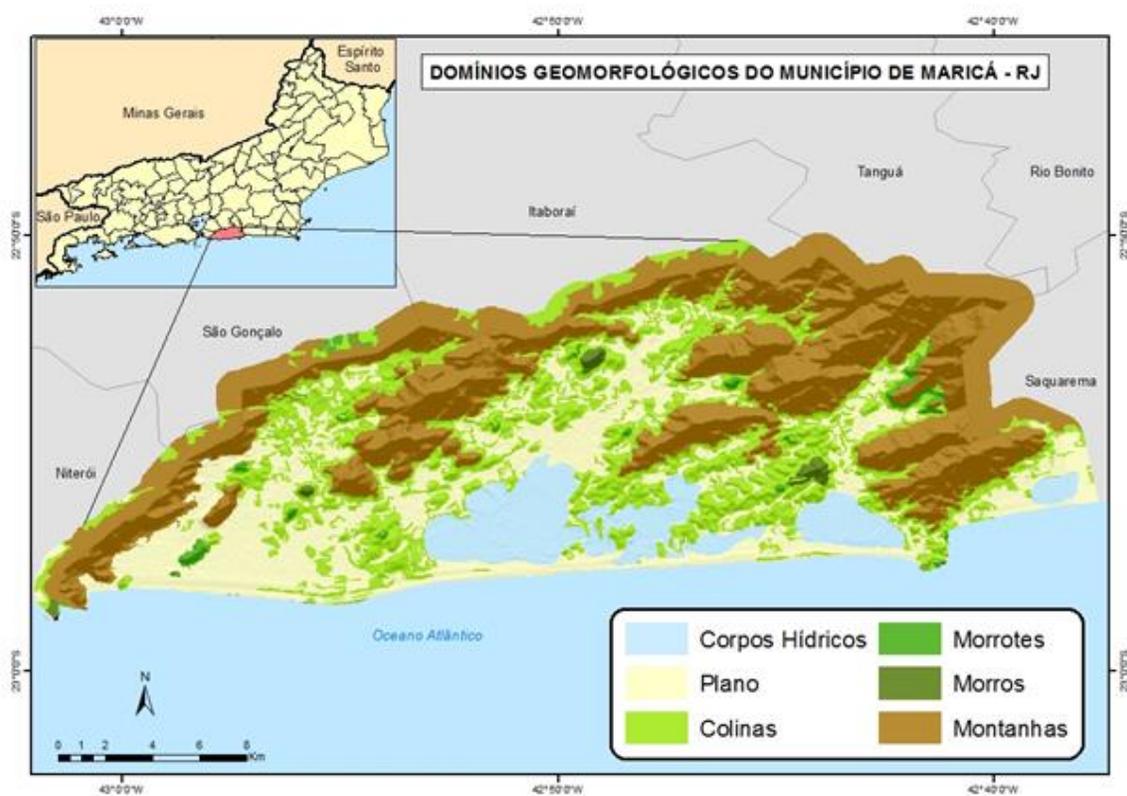


Figura 5: Mapa Domínios Geomorfológicos do Município de Maricá – RJ (Costa, 2016).

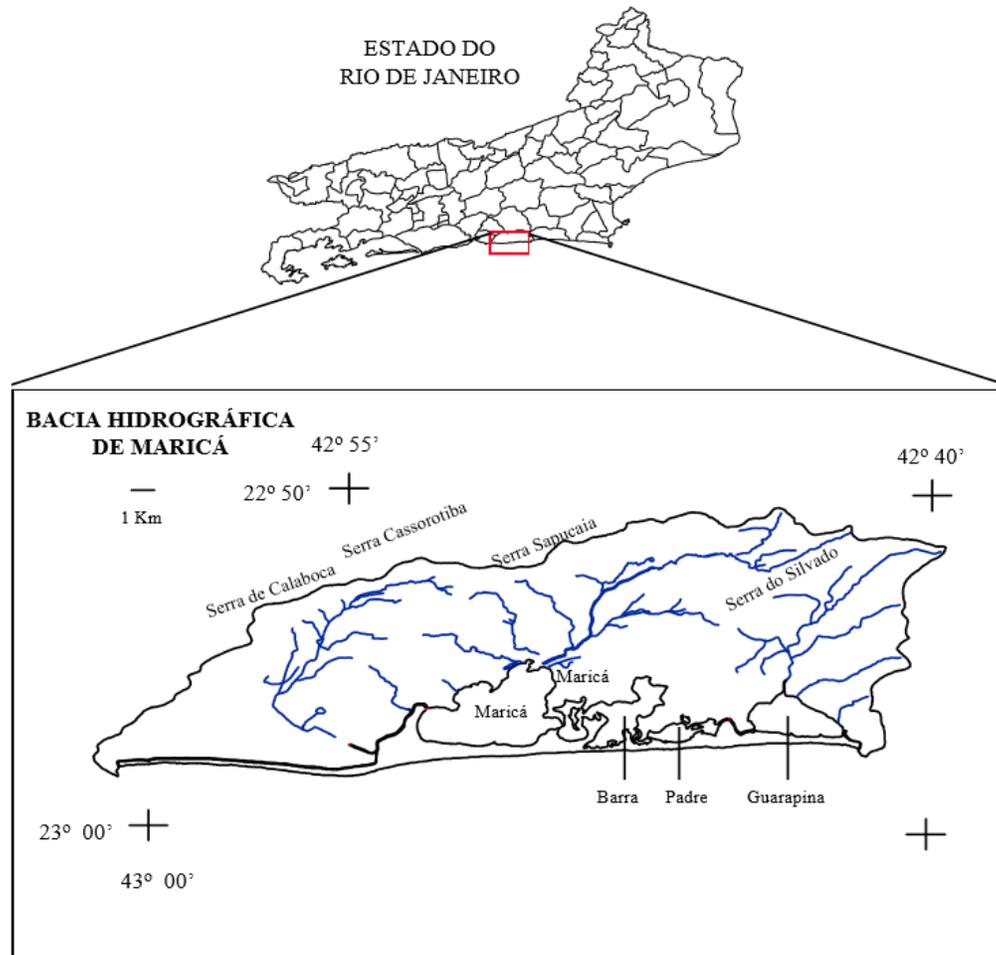


Figura 6: Bacia Hidrográfica de Maricá - Impactos Ambientais no Sistema Lagunar de Maricá-Guarapina (Cruz e Carvalho, 1996).

Em sua grande maioria, os rios pertencentes à bacia de interesse, nascem e desaguam dentro do território municipal, com exceção do Rio Inoã que nasce no bairro Várzea das Moças em Niterói. O Rio de maior importância para o sistema é o Ubatiba que, apesar de ter uma vazão consideravelmente pequena, provem abastecimento para vários bairros, incluindo a região do centro da cidade de Maricá (Cedae, 2013). Diversos outros rios também contribuem para o sistema, como pode ser observado na Figura 7, porém muitos deles possuem vazões pouco significativas, sendo a soma das vazões provenientes de todos os rios, canais e córregos contribuintes algo em torno de 1 m³/s (Rosman, 2007). As lagoas da região recebem todo o esgoto produzido na bacia, aumentando assim a oferta de nutrientes e sólidos em suspensão no meio, contribuindo para a eutrofização e assoreamento do sistema lagunar.

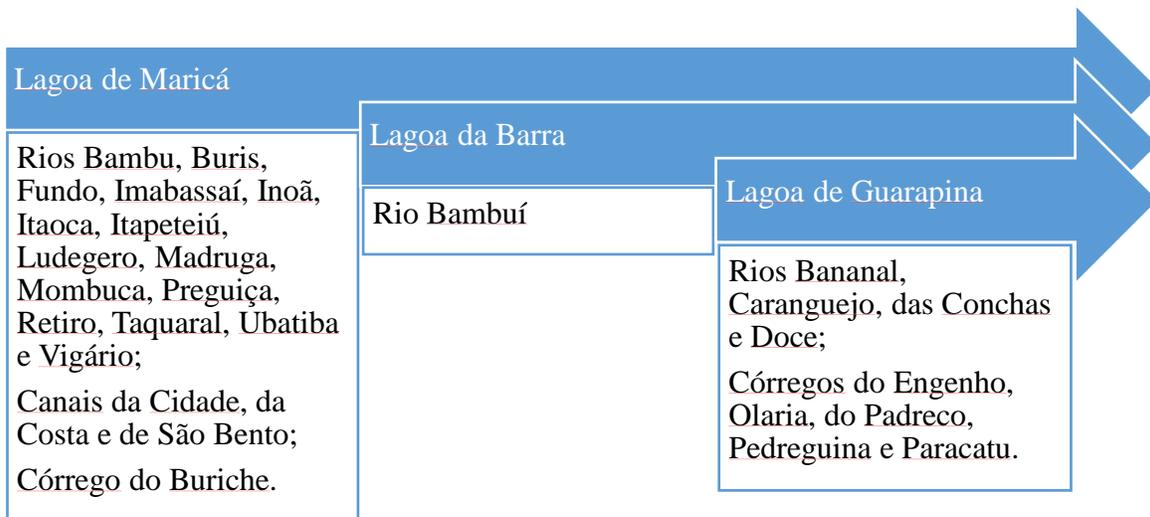


Figura 7: Corpos d'água contribuintes ao Complexo Lagunar de Maricá (adaptado de (Rosman, 2007)).

Sistema Lagunar

O Sistema Lagunar Maricá-Guarapina, um dos maiores do estado do Rio de Janeiro, é formado (de Oeste para Leste) pelas lagoas Maricá ($\approx 18 \text{ Km}^2$), Barra de Maricá - também conhecida por Guaratiba ($\approx 8 \text{ Km}^2$), Padre ($\approx 2 \text{ Km}^2$) e Guarapina ($\approx 6 \text{ Km}^2$), além de ser integrado por diversos rios, riachos e brejos. No passado, ainda existia a lagoa Brava, conectada à lagoa de Maricá nas proximidades do canal da Costa, porém essa foi transformada em área de alagadiço. A área total do espelho d'água do complexo lagunar, varia entre algo em torno de 34 a 38 Km^2 (Cruz e Carvalho, 1996; Ana, 2017).

Esse sistema possui todas as suas lagoas interligadas contendo apenas dois pontos permanentes de fronteira com o mar, os quais são os canais de Itaipuaçu à Oeste (também conhecido como Canal da Costa, saindo da lagoa de Maricá) e Ponta Negra à Leste (saindo da Lagoa de Guarapina). Na imagem a seguir, pode-se entender melhor o sistema lagunar (Figura 8).

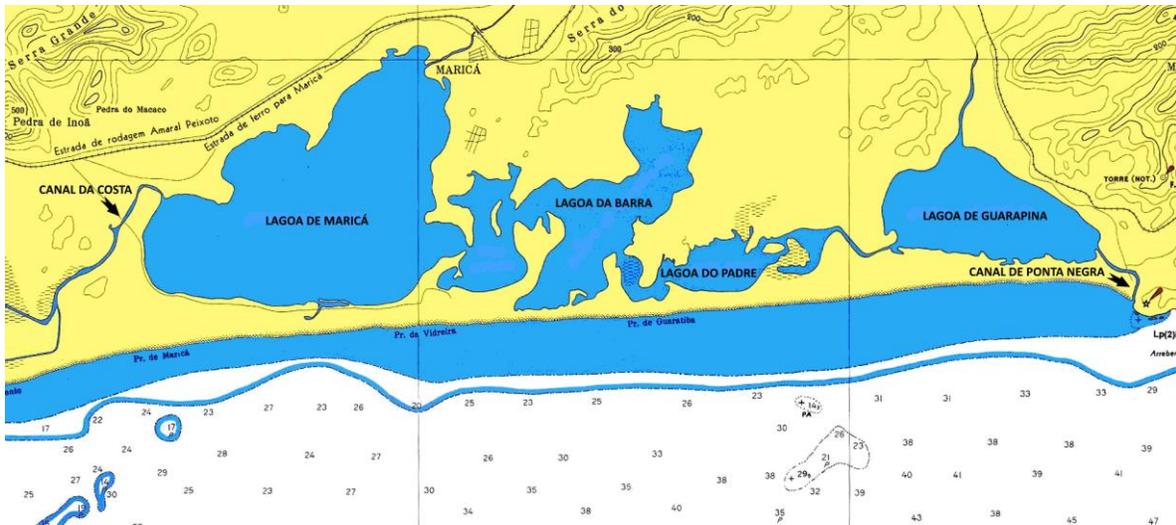


Figura 8: Extrato da Carta Náutica 1506 da Marinha do Brasil mostrando o Sistema Lagunar de Maricá (1962). O espelho d'água lagunar já sofreu pequenas variações desde então, porém, o sistema como um todo, não sofreu nenhuma mudança drástica (adaptado de (Rosman, 2007)).

Canais Artificiais

Os dois canais permanentes do sistema lagunar (Figura 8) foram abertos artificialmente nos anos de 1950 prejudicando assim o regime de abertura natural de canais de escoamento que costumava ocorrer, quando necessário, nas faixas mais estreitas de areia ao longo da restinga. Esses canais que se abriam naturalmente, ocorriam principalmente nos trechos limítrofes à Lagoa da Barra onde existem locais de menor resistência à ação das águas. Tal processo natural era intensificado com a ajuda dos pescadores locais, sendo o mesmo uma tradição cultural hoje desaparecida. Além disso, os canais artificiais, por serem permanentes e escoarem as águas do sistema lagunar mesmo em épocas mais secas, vieram a causar uma baixa geral do nível d'água do sistema ao longo dos anos. Em épocas de cheia, o nível d'água das lagoas ficava até 1,2 m acima do nível médio do mar, e após a abertura dos canais artificiais, essa diferença passou a ser mínima (Ibama, 2000).

O Canal de Ponta Negra, com aproximadamente 1,5 km de extensão, foi construído como parte de um programa de saneamento para a baixada fluminense. Tinha como principal

justificativas o controle de inundações e extermínio de focos de mosquito transmissores da malária. Porém, tal obra impactou consideravelmente o ecossistema costeiro local, a produção pesqueira foi drasticamente reduzida em quantidade e diversidade, o volume e o espelho d'água lagunar diminuíram, as variações dos mesmos durante os períodos de cheia e vazante sofreram reduções, e a salinidade e a quantidade de nutrientes dissolvidos saudáveis à um sistema lagunar também foram alteradas. Esse desequilíbrio dos meios físico e químico, impulsionou o prejuízo à biodiversidade local, desaparecendo assim várias espécies características da região de camarões, peixes, siris e moluscos (Oliveira *et al.*, 1955; Mello, S.D.).

Atualmente, o Canal de Itaipuaçu ou Canal da Costa tem cerca de 15 km de extensão e funciona basicamente como uma vala de drenagem dos campos alagadiços às suas margens. Devido ao seu longo comprimento e condições atuais de assoreamento, esse não exerce praticamente nenhuma influência no escoamento das lagoas para controle de cheias ou contribuição na vazão de entrada no sistema (Rosman, 1998). Infelizmente, além de não terem contribuído de fato com o ecossistema local desde suas implantações, os canais artificiais nos dias de hoje ainda se apresentam em condições degradadas, não proporcionando assim uma renovação eficiente e saudável das águas do complexo lagunar. Assim, em épocas em que o nível lagunar se encontra acima do nível de segurança para a cidade, é feita a abertura artificial emergencial do Canal da Barra, no cordão de areia mais estreito entre a Lagoa da Barra e o mar, para extravasamento de cheia.

Áreas de Preservação Ambiental

As principais áreas de preservação ambiental no município são o Parque Estadual da Serra da Tiririca e a Área de Proteção Ambiental Estadual de Maricá. O parque, localizado na divisa com os municípios de Niterói e São Gonçalo, contemplando ainda área marinha, foi criado em 1991 como parte integrante da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. A APA de Maricá foi criada em 1984 e abrange uma considerável área costeira do município, contendo parte da Restinga de Maricá, a Ponta do Fundão e a Ilha Cardoso. A região se caracteriza por um ecossistema de restinga e Floresta Atlântica, que ainda abriga comunidades pesqueiras tradicionais e sítios históricos e arqueológicos (Inea, 2015). Essa área de proteção ambiental sofre possível ameaça, seja pelo impacto causado pela crescente urbanização e turismo na

região, seja pela possibilidade de pequenos e grandes projetos de condomínios, resorts, portos, entre outros. A seguir, pode-se verificar o mapa de uso e cobertura da terra no município de Maricá e sua respectiva tabela contendo área e percentual de cada classe (Figura 9; Tabela 1):

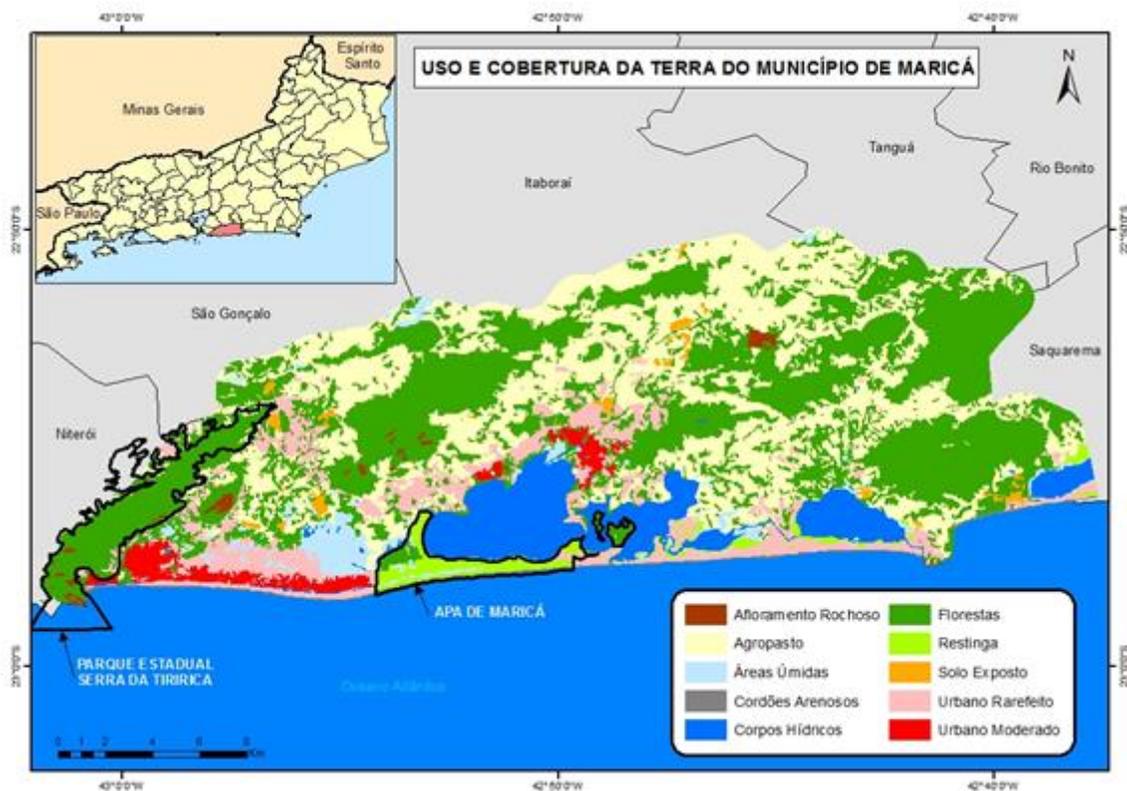


Figura 9: Mapa Uso e Cobertura da Terra no Município de Maricá – RJ (Costa, 2016).

Tabela 1: Área e percentual de uso e cobertura da terra do município de Maricá (adaptado de (Costa, 2016)).

<i>Classe</i>	<i>Área aproximada (km²)</i>	<i>%</i>
<i>Florestas</i>	<i>150,39</i>	<i>41,43</i>
<i>Agropasto</i>	<i>111,66</i>	<i>30,76</i>
<i>Urbano rarefeito</i>	<i>35,10</i>	<i>9,67</i>
<i>Corpos Hídricos</i>	<i>31,98</i>	<i>8,81</i>
<i>Áreas Úmidas</i>	<i>10,82</i>	<i>2,98</i>
<i>Urbano Moderado</i>	<i>8,13</i>	<i>2,24</i>
<i>Restinga</i>	<i>7,55</i>	<i>2,08</i>
<i>Solo Exposto</i>	<i>3,16</i>	<i>0,87</i>
<i>Cordões Arenosos</i>	<i>2,29</i>	<i>0,63</i>
<i>Afloramento Rochoso</i>	<i>1,92</i>	<i>0,53</i>
<i>Total Município</i>	<i>363,00</i>	<i>100</i>

Socioambiental

A área urbana de Maricá é extensa e constituída por diversos bairros e condomínios, porém ainda possui baixa densidade construída. As residências são basicamente de moradores, nas regiões mais próximas ao centro, e de veranistas, nas regiões às margens das lagoas e beira das praias (Seabra e Silva, 2011). O crescimento da cidade foi parcialmente desordenado por falta de planejamento urbano adequado, logo, isso trouxe deficiências de infraestrutura, principalmente, em relação ao saneamento básico, malha viária e distribuição de energia elétrica, que acabam impactando de forma negativa o meio ambiente. O município tem como atrativos turísticos principalmente as lagoas e praias oceânicas, além da topografia local, que proporcionam ambientes ideais para práticas esportivas e de lazer ao ar livre (Cruz e Carvalho, 1996).

A área ambiental já foi caracterizada em diversos estudos e projetos, e pode-se considerar que grande parte das modificações ambientais observadas na região foram provenientes da ação humana, não somente as diretamente ligadas à bacia hidrográfica, como também as relacionadas à: urbanização, desmatamento, uso e parcelamento do solo, drenagem de áreas alagadas e construção de aterros, mineração artesanal nas margens dos rios, poluição por esgotos dos mais variados, obras de dragagem e hidráulicas da construção dos canais artificiais de ligação com o mar, construção de pontes e quaisquer outras atividades que tenham promovido assoreamento do sistema e alterações ambientais diversas (Barroso *et al.*, 2001).

II - 3. Perfil Climático e Meteorológico

Maricá tem um clima tropical, característico por chover muito mais no verão do que no inverno. A temperatura média do município é de 23,3 °C e a pluviosidade média anual é de 1181 mm. O mês mais seco costuma ser julho, com uma média de 49 mm de precipitação, enquanto o mês de dezembro desponta como o mais chuvoso, com uma média de 151 mm. O mês mais quente do ano é fevereiro com uma temperatura média de 26,4 °C e, opostamente, julho é o mês mais frio com temperatura média de 20,5 °C (Climate-Data, 2017). Na imagem a seguir, é apresentado o climograma de Maricá (Figura 10):

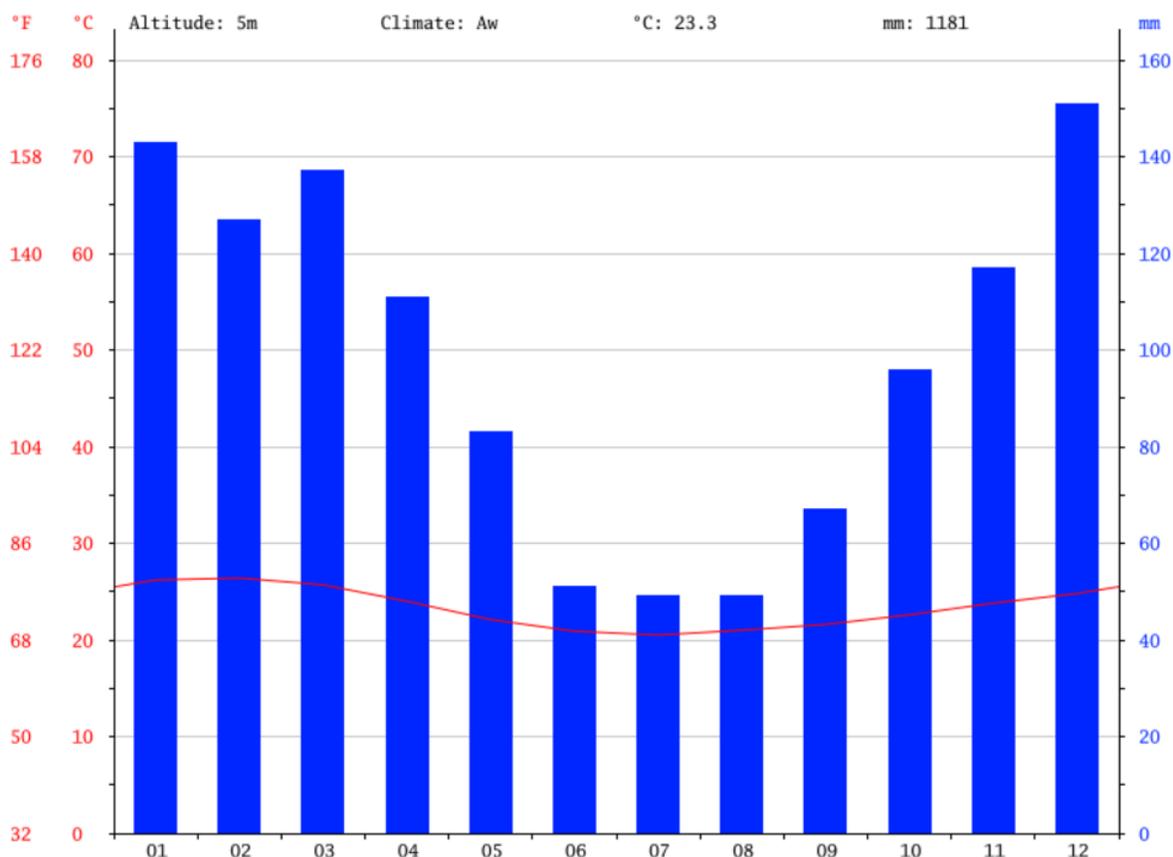


Figura 10: Gráfico Climático Maricá (Climate-Data, 2017).

Apesar do padrão climático da região, em alguns anos ocorrem eventos pontuais de chuvas mais intensas que o comum, geralmente observados no fim do verão. Um bom exemplo extremo a ser considerado foi a chuva que atingiu o município de Maricá e grande parte do estado do Rio de Janeiro no dia 29 de fevereiro de 2016, totalizando 258 mm medidos em apenas um dia de chuva na Estação Automática A667 (Saquarema/ Sampaio Correa) do Instituto Nacional de Meteorologia, essa a estação meteorológica mais próxima de Maricá, localizada no município vizinho Saquarema. Pode-se visualizar melhor o evento e constatar sua particularidade no gráfico de precipitação abaixo (Figura 11):

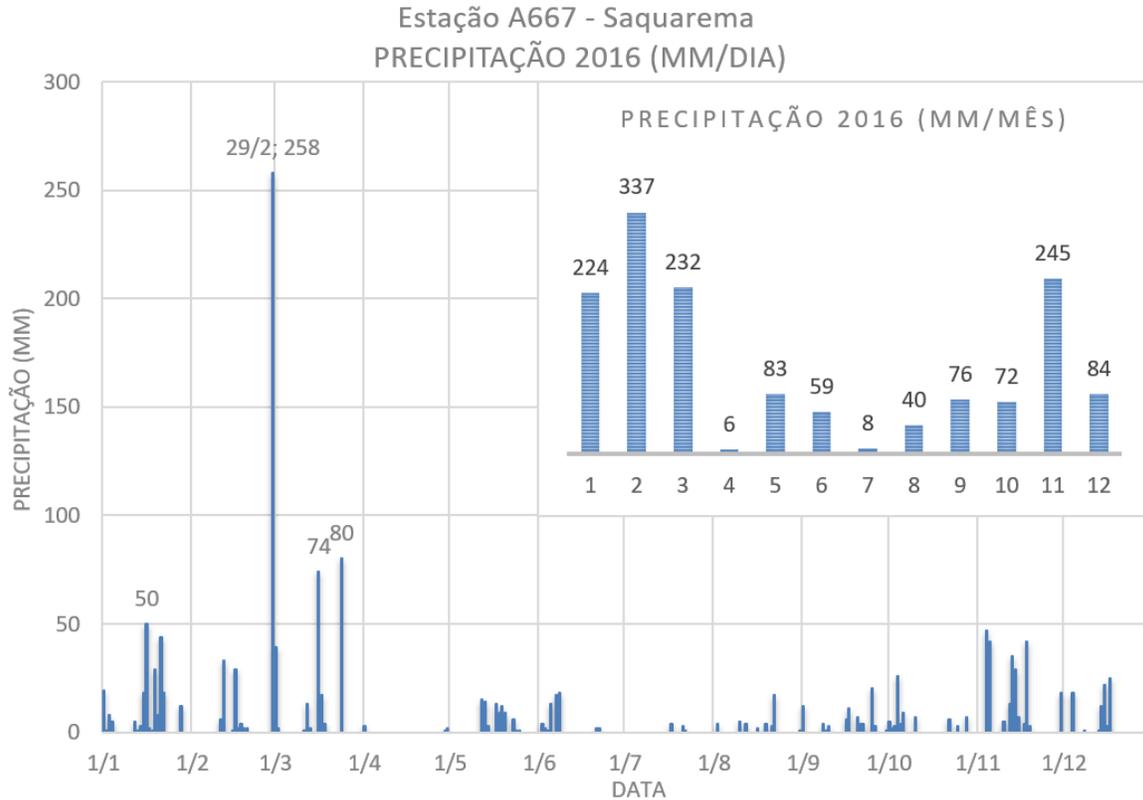


Figura 11: Gráfico Precipitação 2016 – Saquarema, obtido a partir dos dados diários da Estação Automática A667, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (adaptado de (Inmet, 2017)).

O clima de vento e ondas na região varia basicamente com a época do ano e com a ocorrência de frentes frias. Ao longo do ano, de forma geral, predominam ventos de NE na região de interesse. No verão, predominam ventos de NE e de L, com velocidades geralmente inferiores a 10 ms^{-1} , e ondas de N-NE com alturas normalmente entre 1,5 e 2,0 m. Já no inverno, os ventos de NE continuam a predominar, porém aqueles característicos de frentes frias se tornam mais frequentes, esses são provenientes de SO, com velocidades, normalmente, superiores às observadas no verão, e a ondulação vem principalmente de SO-SE, com altura entre 2,0 e 3,0 m (Petrobras, 2009). O regime local de ventos é apresentado nos histogramas direcionais na

Figura 12. A região de Maricá possui uma costa perpendicularmente orientada ao eixo Norte-Sul (Da Silva *et al.*, 2008). Dessa maneira, quando as frentes frias de sul características do

inverno atingem o litoral, trazem ventos e ondas de maiores intensidades, gerando um empilhamento e aprisionamento de água na costa (Oliveira, 2009).

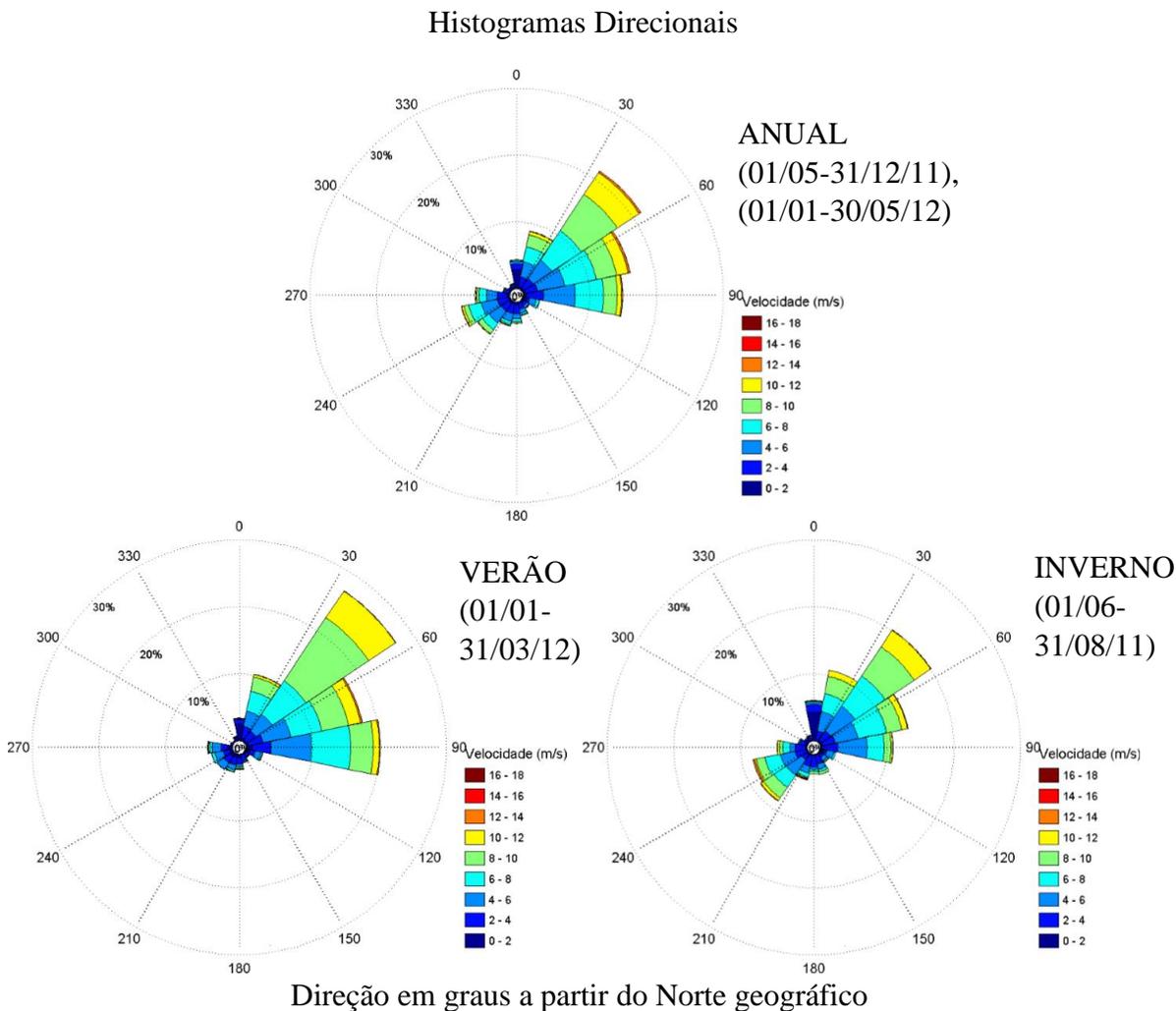


Figura 12: Histograma direcional da velocidade dos ventos (rosa dos ventos) calculado para o período ANUAL de 1 de maio a 31 de dezembro de 2011 e 1 de janeiro a 30 de abril de 2012; para o período VERÃO de 1 de janeiro a 31 de março de 2012; e para o período INVERNO de 1 de junho a 31 de agosto de 2011 (convenção vetorial) (Tetrattech, 2013).

Os dados de vento levantados, extraídos de (Tetrattech, 2013), foram coletados no Aeroporto de Cabo Frio, e pertencem à base de dados do METAR (*METeoroological Aerodrome Report*). Esses dados, se encontravam disponíveis em séries medidas por 12 h diárias, de 9 h às 21 h. Assim, nas outras 12 h em que havia ausência de dados, foram utilizados dados do modelo GFS (*Global Forecast System*), operacionalizado pelo Centro Norte-Americano para

Previsões Ambientais NCEP (*National Center for Environmental Prediction*). Foi constatado que a direção mais frequente ao longo do ano é NE, seguida por ENE, E, NNE, OSO e SO, esse último registrado principalmente no inverno.

Com relação ao regime de maré de Maricá, foi adotada para o trabalho a lista de componentes harmônicas retirada de (Tetrattech, 2013). Os dados base do processo, foram adquiridos no mês de abril de 2012, a partir da medição da pressão por ADCP, convertida em profundidade, fornecendo, desse modo, o padrão de variação de elevação da superfície do mar em Ponta Negra, Maricá.

A série temporal contendo esse padrão de variação de elevação de nível, em um ciclo mensal, está representada no gráfico abaixo (Figura 13). Pode se observar no gráfico, apesar dos efeitos causados por fatores meteorológicos, um ciclo lunar completo compreendendo dois períodos de sizígia (03/04-10/04, 17/04-24/04) e dois períodos de quadratura (10/04-17/04, 24/04-01/05). As constantes harmônicas foram extraídas da série temporal através do método de Schuremann, 1941, e se encontram listadas, juntamente com seus períodos, amplitudes e fases, na Tabela 2.

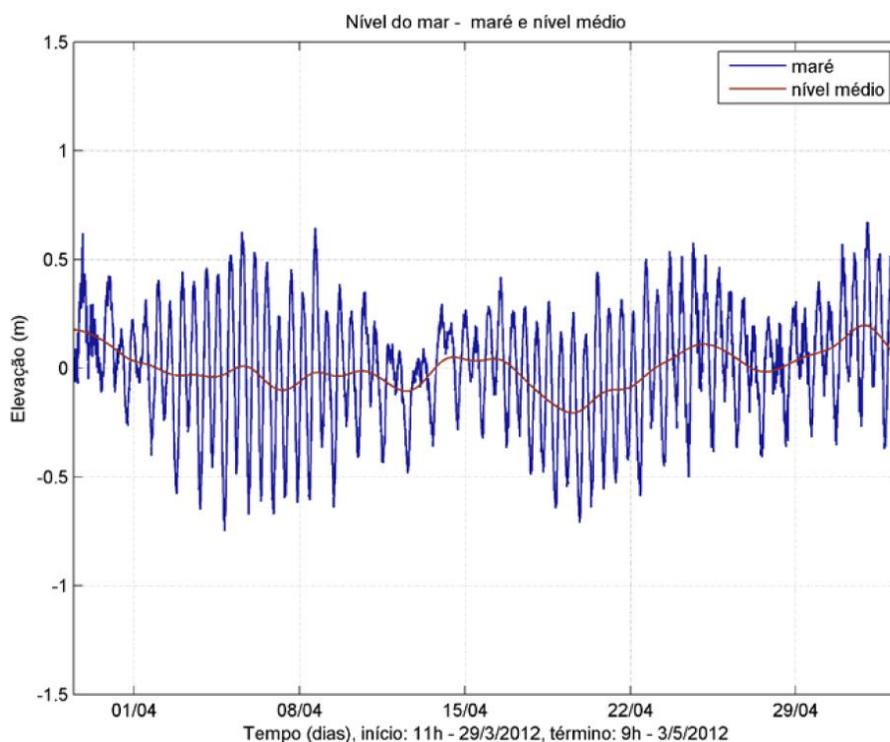


Figura 13: Gráfico série temporal de elevação da superfície do mar em Ponta Negra, Maricá, para o período de 29 de março de 2012 a 03 de maio de 2012 (Tetrattech, 2013).

Tabela 2: Constantes harmônicas da maré em Maricá, extraídas a partir da série temporal de elevação apresentada na Figura 13 (adaptado de (Tetrattech, 2013)).

<i>Constante Harmônica</i>	<i>Período (h)</i>	<i>Amplitude (cm)</i>	<i>Fase (°)</i>
<i>Q1</i>	26,87	2,84	65
<i>O1</i>	25,82	10,43	90
<i>P1</i>	24,07	5,69	121
<i>K1</i>	23,93	9,55	155
<i>N2</i>	12,66	4,34	125
<i>M2</i>	12,42	28,92	89
<i>S2</i>	12,00	15,94	100
<i>K2</i>	11,97	5,65	69
<i>M3</i>	8,28	0,56	185
<i>MN4</i>	6,27	1,08	9
<i>M4</i>	6,21	2,22	39
<i>MS4</i>	6,10	1,35	118

A partir do padrão de maré obtido, pode-se caracterizar o regime pela predominância das componentes semi-diurnas, ou seja, está mais próximo de um regime em que cada ciclo de maré ou dia lunar apresenta duas preamares e duas baixa-mares. Através da equação do número de forma de Defant, 1960 (Eq.1), a maré pode ser devidamente classificada como mista predominantemente semi-diurna pelo valor de F, nesse caso $F = 0,45$:

$$F = (K1 + O1)/(M2 + S2) \quad (Eq.1)$$

onde $0,00 < F$ semidiurna $< 0,25$; $0,25 < F$ mista semidiurna $< 1,50$;

$1,50 < F$ mista diurna $< 3,00$; $3,00 < F$ diurna

II - 4. Histórico de Alagamentos

Eventos pontuais de chuvas muito intensas também geram fortes enchentes, principalmente considerando uma região urbanizada às margens de um grande sistema lagunar, que ainda possui uma bacia hidrográfica muito bem delimitada por serras em todo o seu entorno. Além disso, o aumento crescente populacional na região não só altera a capacidade de drenagem natural do ecossistema local, como também faz com que o número de pessoas afetadas nos episódios de enchentes seja cada vez maior.

No ano de 2010, mais precisamente nos dias 6,7 e 9 de abril, o Município de Maricá foi impactado com chuvas muito intensas. Somando uma carga de aproximadamente 300 mm de chuva em apenas 3 dias, ocasionando a maior enchente no local dos últimos 40 anos e um

aumento geral do nível da lagoa em relação ao mar de pelo menos 1,2 m, valor calculado através do monitoramento do nível das águas feito pela equipe de topógrafos do Comperj (Leisecamarcá, 2013).

Devido a tal situação, a prefeitura de Maricá junto ao INEA, optaram pela realização de uma obra de abertura do Canal da Barra de Maricá, o qual se encontrava fechado há 24 anos, conectando assim, o sistema lagunar ao mar, para que a cheia da lagoa fosse devidamente extravasada. A obra de abertura foi realizada no próprio dia 9 de abril durante a tarde, no período de baixa-mar. O procedimento foi acompanhado por mais de 500 pessoas que comemoraram o sucesso da operação (R7, 2010).

Porém, a obra também foi criticada por muitos reivindicando que, apesar de ‘salvar vidas’, a abertura do canal colocava em risco a saúde das lagoas de Maricá, pois a redução do volume de água acarretaria em grande impacto ambiental, devido aos problemas de assoreamento já existentes nas lagoas da região, principalmente, na lagoa do Padre. No dia 10 de abril, dia seguinte à obra de abertura do canal, o mesmo foi fechado pelo mar. A partir de então, as águas do mar e da lagoa foram se distanciando, até que no dia 7 de maio deu-se início o processo de aterramento do canal, possibilitando assim, o acesso de pedestres entre os bairros de Cordeirinho e Barra de Maricá no dia 9 de maio (Globo, 2010).

O canal se manteve fechado por cerca de 6 anos, até que no dia 29 de fevereiro de 2016 o município foi atingido novamente por fortes chuvas totalizando 258 mm precipitados em apenas um dia, valor obtido na estação automática mais próxima (Saquarema/Sampaio Correa). O município de Maricá entrou em estado de emergência com aproximadamente 3 mil pessoas afetadas pelas chuvas, vários locais foram alagados e casas invadidas pela água (Globo, 2016b; a). O nível da lagoa subiu cerca de 1 m acima do nível do mar e, tendo em vista toda a problemática, a prefeitura determinou novamente a abertura do canal da Barra de Maricá, como pode ser observado na Figura 14, com o intuito de reduzir o volume de água do sistema e assim reduzir os transtornos causados aos moradores pela enchente (Maricáinfo, 2016).



Figura 14: Abertura artificial do Canal da Barra de Maricá em 2 de março de 2016 (Maricáinfo, 2016).

Essa abertura artificial por máquinas foi realizada no dia 2 de março e, logo após concluída, a prefeitura optou por manter o canal fechado. Isso porque, por força maior da natureza, representada pela maré alta e fortes ondas no momento da abertura, ocorreu o contrário do que se planejava: ao invés da água da lagoa escoar para o mar, a água do mar avançou para a lagoa. Assim, o canal foi reaberto novamente de forma artificial na maré baixa do dia 3 de março (Maricá, 2016).

Desde então, ressacas mais fortes, que costumam atingir o litoral do Rio de Janeiro, principalmente, no outono e no inverno, costumam abrir momentaneamente de forma natural o canal da Barra de Maricá, reconectando a ligação entre o mar e a lagoa. Essas ressacas são, predominantemente, de sul, com ondas que atingem a costa da região perpendicularmente, com alturas na faixa dos 2 m ou mais. Vale lembrar, que a interação entre as águas do mar e da lagoa depende, essencialmente, do nível do mar gerado pelas marés astronômica e meteorológica, e do nível d'água da lagoa em um determinado momento (Lins-De-Barros, 2010).

Tais eventos de enchentes vêm se tornando cada vez mais frequentes, até mesmo fora da época das grandes chuvas de fim de verão. Recentemente, no dia 20 de junho de 2017, uma forte chuva que caiu no município deixou ruas e casas alagadas. Em alguns bairros a água chegou a 1 metro dentro das casas e pontos da RJ-106, a Rodovia Amaral Peixoto, chegaram inclusive a ficar interditados. Isso se deve, sobretudo, às ações antrópicas na região em torno do complexo lagunar que, compactam e impermeabilizam os solos, degradam a fauna e flora locais, poluem os corpos d'água e promovem assoreamento dos rios e canais, prejudicando assim a drenagem geral e equilíbrio do sistema. A prefeitura vem trabalhando na limpeza dos canais artificiais de Ponta Negra e Itaipuaçu, assim como de canais drenantes nas áreas urbanizadas, para promover assim um melhor escoamento das águas (Maricá, 2017).

III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas que foram mais expressivas para a elaboração, tanto da parte teórica quanto da parte prática, deste trabalho. As metodologias adotadas para esse, são apontadas juntamente com suas respectivas referências fundamentais, assim como conceitos, dados, ou quaisquer informações significativas consideradas no projeto.

III - 1. Trabalhos Levantados sobre o Tema

Foi realizado inicialmente um levantamento de trabalhos, estudos e projetos de considerável relevância para o assunto deste trabalho. Esses, em sua maioria, na área de hidrodinâmica ambiental em sistemas lagunares, utilizando ou não modelagem computacional, na região de interesse, ou mesmo em regiões semelhantes. Alguns trabalhos antigos sobre o tema, tendo como interesse as peculiaridades do Sistema Lagunar de Maricá (Oliveira *et al.*, 1955; Barroso *et al.*, 2001) e as mudanças sofridas ao longo do tempo principalmente devido a intervenções antrópicas no sistema (Cruz e Carvalho, 1996; Mello, S.D.), foram essenciais no entendimento do ecossistema da região, assim como na caracterização natural e histórica do Complexo Lagunar e Bacia Hidrográfica (Rosman, 2007).

Na caracterização socioeconômica foram usados dados do IBGE (Ibge, 2017). Já na caracterização do perfil climático e meteorológico de Maricá, os dados de precipitação de 2016 foram extraídos da Estação Automática A667 do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2017) e, vale lembrar, que essa estação só foi implantada no ano de 2015, o que limitou o trabalho para análise do evento de chuva extrema somente de 2016. Para determinação do regime de vento e maré da região, foi usado como base de dados o Suporte Técnico para Elaboração do EIA/RIMA para Construção dos Terminais Ponta Negra, Maricá – RJ (Tetrattech, 2013). No histórico da problemática de alagamentos em Maricá, foram coletadas informações abrangendo diversas fontes, incluindo: notícias de mídias locais, regionais e nacionais; relatórios, medições e estimativas de órgãos ambientais; e entrevistas de autoridades políticas, técnicos e moradores (Globo, 2016a; Maricá, 2016; Maricáinfo, 2016; Maricá, 2017).

Como base conceitual para apresentação das propriedades básicas referentes a um canal de maré, foram utilizadas dissertações de mestrado elaboradas na COPPE/UFRJ sobre estabilidade hidráulico-sedimentológica de canais de maré (Calixto, 1990; Pinto, 1999). O escoamento em um canal pode ser teoricamente caracterizado a partir das equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, e o nível da lagoa, que esse venha a conectar com o mar, depende essencialmente da área hidráulica e geometria do canal (Silva, 2013).

Na escolha do processo de obtenção de vazões máximas aproximadas, como dados de entrada no modelo a partir de dados de chuva, foram analisados estudos hidrológicos que apresentassem metodologias de modelo chuva-vazão compatíveis com o perfil deste trabalho (Santos, 2010; Carvalho Junior, 2013). O método aplicado, para estimativa da vazão total contribuinte consequente do evento de chuva extrema de 2016, foi o do Hidrograma Unitário Triangular. Esse devido, especialmente, à sua simplicidade e estimativa suficientemente precisa para as necessidades desse projeto, além de ser um modelo de cálculo coerente à natureza da região de interesse e à disponibilidade de dados coletados e fornecidos (Barboza, 2014).

O estudo que foi definido como base para o modelo de circulação hidrodinâmica foi o relatório final desenvolvido pela Coppetec para fins de projetos particulares na região da APA do Sistema Lagunar de Maricá. Esse apresenta, além da caracterização hidrodinâmica de níveis de água e padrões de correntes através de simulações computacionais no sistema lagunar, um projeto de canais de ligação com o mar e seus possíveis desdobramentos ambientais (Rosman, 2007).

Estudos desenvolvidos nos programas de pós-graduação de Engenharia Civil e Oceânica da UFRJ que, apesar de não apresentarem a região de Maricá como área de interesse, abordavam conceitos de circulação hidrodinâmica associados a modelagem computacional também foram considerados neste trabalho, especialmente na elaboração da metodologia (Sampaio, 2003; Morais, 2007; Fonseca, 2009; Lima, 2010). Também foram levantadas dissertações de mestrado mais recentes que contemplassem não só o modelo adotado, mas também a Região dos Sistemas Lagunares de Maricá e Saquarema (Cruz, 2010; De Paula Oliveira, 2013).

III - 2. Modelagem Hidrológica Aplicada ao Tema

O modelo Chuva-Vazão adotado para o trabalho foi o método do Hidrograma Unitário Triangular. Esse se caracteriza por ser um dos métodos mais simples e mais utilizados para estimar o volume de escoamento superficial resultante de um evento de chuva. Desenvolvido pelo *National Resources Conservation Center* (antigo *Soil Conservation Service – SCS*), o método possibilita a determinação de vazões máximas de cheia para diferentes tempos de recorrência. Essas vazões são resultantes do cálculo do escoamento superficial obtido a partir de dados pluviométricos e fisiográficos da bacia de interesse. Além disso, contribui para uma boa caracterização do regime hidrológico em questão (Barbosa e Fill, 2001; Santos, 2010).

O HUT funciona como uma boa aproximação quando não se tem dados fluviométricos consistentes contemplando longos períodos. Além disso, independe da dimensão da área de drenagem da bacia hidrográfica, diferente de outros métodos limitados a faixas de áreas específicas. Esse método, basicamente, divide a precipitação em duas: aquela que se acumula na bacia por infiltração ou outras formas; e aquela que escoar superficialmente e diretamente para os rios. A partir dessa última, considerada a precipitação efetiva, pode-se definir então o hidrograma de cheia (Amaral, 2003; Carvalho Junior, 2013).

A obtenção da precipitação efetiva é possível graças ao parâmetro de impermeabilidade do solo-cobertura vegetal característico da bacia hidrográfica, esse conhecido por CN (curva-número). O CN varia de 0 a 100, seguindo a lógica de totalmente permeável a totalmente impermeável, respectivamente, dependendo da natureza e uso do solo, como apresentado na Tabela 3 (Tucci e Clarke, 1997). Assim, uma dada precipitação efetiva P_e , que se estende por um período de tempo t , gera um hidrograma triangular com dimensões estimadas a partir das características da bacia hidrográfica. Tais dimensões, são representadas pela vazão de pico, tempo de ascensão e recessão. Logo, o hidrograma de projeto obtido a partir do somatório dos hidrogramas triangulares, apresenta uma altura pluviométrica total, sua respectiva duração e tempo de recorrência, além de um padrão específico de distribuição espacial e temporal (Barboza, 2014).

Tabela 3: Valores de CN para cada classe (uso e cobertura do solo) e tipo de solo do SCS (adaptado de (Carvalho Junior, 2013)).

<i>Classe / Tipos de Solo do SCS</i>	<i>A. arenosos e profundos</i>	<i>B. menos arenosos e profundos</i>	<i>C. argilosos</i>	<i>D. muito argilosos e rasos</i>
<i>Florestas</i>	15	44	54	61
<i>Agropasto</i>	49	69	79	84
<i>Urbano rarefeito</i>	61	75	83	87
<i>Corpos Hídricos</i>	100	100	100	100
<i>Áreas Úmidas</i>	37	51	68	70
<i>Urbano Moderado</i>	77	85	90	92
<i>Restinga</i>	12	35	43	49
<i>Solo Exposto</i>	77	86	91	94
<i>Cordões Arenosos</i>	12	35	43	49
<i>Afloramento Rochoso</i>	98	98	98	98

III - 3. Propriedades Hidráulicas Aplicadas ao Tema

A diferença entre o nível d'água de uma lagoa e o nível d'água do mar é o fator gerador de um escoamento entre ambos os corpos d'água, por diferença de pressão, caso exista ou tenda a se formar um canal entre os mesmos. Nas condições naturais, um escoamento desse tipo ocorre, em especial, devido às variações das marés astronômica e meteorológica que regem o nível do mar, ou devido a eventos específicos que modificam o nível lagunar, tais como alterações na descarga fluvial recebida, no regime pluvial ou de evaporação, na drenagem do sistema, ou em quaisquer aspectos ambientais relevantes (Rosman, 2012).

Em geral, quando se tem uma ligação aberta entre mar e lagoa, na preamar o escoamento deve ocorrer do mar para a lagoa, configurando a corrente de enchente, enquanto na baixamar esse deve ocorrer da lagoa para o mar, caracterizando a corrente de vazante. Já, quando os níveis d'água são aproximadamente iguais, a velocidade de escoamento é praticamente nula (Sigaúque, 2013). Porém, em casos em que o canal se encontra majoritariamente fechado, e a lagoa sofre diversos impactos ambientais, somados a eventos meteorológicos extremos, essa dinâmica padrão de canais de maré se torna um pouco mais complexa (Calixto, 1990; Pinto, 1999).

Outra propriedade hidráulica relevante quanto a interação de sistemas lagunares com o mar, consiste nas diferenças de amplitude e fase da maré dentro de um sistema se comparada a maré no mar, conseqüentes da perda de carga gerada pelo canal de ligação entre os corpos. A amplitude de maré dentro de uma lagoa sofre amortecimento, assim, enquanto maior a área superficial de um sistema lagunar e menor a seção do canal de ligação desse sistema com o mar, maior será o amortecimento e menor será a amplitude no interior desse sistema. Enquanto isso, a fase da maré sofre atraso, da mesma maneira, enquanto maior o espelho d'água lagunar e menor a vazão do canal, maior será esse atraso na elevação (enchente) ou redução (vazante) do nível d'água lagunar se comparado com o nível do mar (Silva, 2013).

III - 4. Modelagem Hidrodinâmica Aplicada ao Tema

Os modelos de circulação hidrodinâmica bidimensionais comumente usados para sistemas estuarinos podem ser promediados na horizontal (2DH) ou na vertical (2DV). No presente trabalho, foi utilizado um modelo 2DH. Esse modelo, o qual suas variáveis possuem dimensão (x,z,t) , deve ser aplicado a um corpo d'água verticalmente homogêneo, onde a área superficial seja consideravelmente maior do que a profundidade, como é o caso do sistema lagunar de interesse (Cruz, 2010).

O sistema de modelagem de corpos d'água com superfície livre utilizado no trabalho, resolve as equações de Navier-Stokes, considerando a distribuição de pressão hidrostática e aproximações de águas rasas. As equações fundamentais no modelo para o cálculo das quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica (u,v,w,ζ) , são adaptações das equações da Conservação da Quantidade de Movimento, proveniente do Princípio Fundamental da Dinâmica - Segunda Lei de Newton, e da Continuidade de Volume, Princípio da Conservação do Volume.

A continuidade do volume (Eq.2) é expressa a partir da integração ao longo da coluna d'água (Eq.3), considerando o fluido incompressível e o escoamento vertical permanente, ou seja, considerando a superfície livre e o fundo permanentes ao longo do tempo. Essas são chamadas Condições de Contorno Cinemáticas na Superfície Livre e no Fundo e são representadas na equação 3 pelo termo Σq , esse podendo ser nulo caso a infiltração no fundo, evaporação e precipitação na superfície sejam desprezáveis. Assim, com auxílio da

Regra de Leibniz, a qual permite a diferenciação de produtos de funções diferenciáveis, as equações da quantidade de movimento tridimensionais podem ser simplificadas em 2DH (Rosman, 1997). Dessa maneira, a quantidade de movimento pode ser expressa em forma de balanço promediado na vertical nas direções x (Eq.4) e y (Eq.5). Abaixo, são apresentadas a Tabela 4, contendo as equações citadas anteriormente, e a Tabela 5, com os respectivos parâmetros dessas equações:

Tabela 4: Equações da Quantidade de Movimento e da Continuidade de Volume para um modelo 2DH promediado na vertical (adaptado de (De Paula Oliveira, 2013)).

<i>Princípio</i>	<i>Equação</i>
<i>Continuidade (Volume) (Eq.2)</i>	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$
<i>Continuidade Integrada ao longo da Vertical (Eq.3)</i>	$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q$
<i>Balanço de Quantidade de Movimento em X (Eq.4)</i>	$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\varphi \sin \theta v$
<i>Balanço de Quantidade de Movimento em Y (Eq.5)</i>	$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\varphi \sin \theta u$

Tabela 5: Parâmetros das equações apresentadas na tabela 5 (adaptado de (De Paula Oliveira, 2013)).

Parâmetros

u, v e w = componentes da velocidade do escoamento nas direções x, y e z
 U e V = componentes da velocidade promediada na vertical em x e y , respectivamente
 ζ = elevação da superfície livre
 $-h$ = batimetria do fundo
 H = altura da coluna d'água, diferença entre a cota da superfície e do fundo ($\zeta + h$)
 Σq = termos resultantes das condições de contorno de superfície livre e de fundo
 g = aceleração da gravidade
 ρ = massa específica local do fluido
 ρ_0 = massa específica constante de referência
 φ = velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local
 θ = ângulo de latitude

O modelo utilizado para modelagem da região de interesse está incluído no SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. O SisBaHiA® encontra-se em ampliação e aperfeiçoamento na COPPE/UFRJ desde 1987, e é bastante utilizado em teses e projetos de pesquisa. Em sua grande maioria os estudos e projetos envolvem modelagem de corpos de água naturais. Basicamente, o software contém os seguintes modelos:

- ✓ Modelo Hidrodinâmico
- ✓ Modelo de Transporte Euleriano
- ✓ Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização
- ✓ Modelo de Transporte Lagrangeano – Determinístico
- ✓ Modelo de Transporte Lagrangeano – Probabilístico
- ✓ Modelo de Geração de Ondas
- ✓ Módulo de Análise & Previsão de Marés

Todos os modelos acima, assim como ferramentas de edição de malha e saídas gráficas, são integrados na interface de trabalho, essa que interage diretamente com os seguintes programas comerciais: *Argus One*, *Grapher* e *Surfer* (Rosman, 2013). O software também conta com um Módulo de Análise e Previsão de Marés, possibilitando análises harmônicas de registros de níveis e correntes, para geração das constantes harmônicas e criação de previsões.

O trabalho se apoiou no Modelo Hidrodinâmico, por ser o mais adequado para os dados disponíveis e para o tipo de análise desejada. Este é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH otimizado, ou seja, gera excelente representação de escoamentos em domínios com geometria complexa, para corpos de água naturais nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados. Os resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada, no caso do presente trabalho 2DH. O modelo de elementos finitos 2DH é ideal para corpos d'água de extensa área superficial e baixa profundidade. Além do mais, processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multiescala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES) (Rosman, 2013).

IV - METODOLOGIA

Este trabalho teve, basicamente, duas metodologias adotadas para sua elaboração:

- ✓ Realização de Trabalho de Campo na região do Canal da Barra de Maricá, após vasta pesquisa bibliográfica, para: aprimoramento da batimetria utilizada através de dados topo-batimétricos recentes medidos por diversos perfis do canal; análise da condição ambiental atual do Canal e da Lagoa da Barra, assim como das características hidrológicas da região; coleta de informações diversas com moradores; e medição de níveis d'água do mar e da lagoa. Esse último, considerando os níveis atual e atingidos nas enchentes passadas de interesse para o projeto (2010 e 2016).
- ✓ Utilização do software SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - para simulações computacionais usando modelagem hidrodinâmica ambiental contemplando o Sistema Lagunar de Maricá. Os modelos levam em consideração diferentes cenários de abertura do Canal da Barra de Maricá, considerando os dados de chuva, vento e maré a partir de dados reais medidos no ano de 2016. Os dados batimétricos foram atualizados pelo Trabalho de Campo. Já os dados de vazão contribuinte, foram estimados a partir de modelagem hidrológica, pela definição de um hidrograma de cheia.

IV - 1. Trabalho de Campo

No dia 13 de fevereiro de 2017 foi realizado um trabalho de campo na região do canal da Barra de Maricá, com o objetivo principal, de enriquecer com dados topo-batimétricos mais recentes a batimetria já existente do complexo lagunar. Foram coletadas, com os moradores, informações sobre o sistema lagunar e eventos de chuva extrema e cheia lagunar ocorridos nos últimos anos. Também foi analisada a condição ambiental atual do local, assim como o nível d'água lagunar naquele dado momento e o nível d'água lagunar atingido nos alagamentos passados (2010 e 2016) relativos ao nível do mar. Nas figuras a seguir, encontram-se registrados alguns momentos do trabalho de campo (Figura 15; Figura 16; Figura 17; Figura 18; Figura 19):



Figura 15: Registro do processo de coleta de dados topo-batimétricos, com utilização do nível óptico, para elaboração dos perfis (acervo pessoal).



Figura 16: Registro da região do Canal da Barra, que se encontrava fechado no dia do trabalho de campo. Na foto está representada a vista frontal do Canal, do mar para a lagoa (acervo pessoal).



Figura 17: Registro da boca do Canal junto à margem da lagoa da Barra, por onde foi marcado o corte Ponte presente nos perfis topo-batimétricos (acervo pessoal).



Figura 18: Registro do processo de coleta de dados topo-batimétricos para elaboração dos perfis e análise da área de estudo. Na foto, pode ser observada a vista da margem esquerda da Lagoa da Barra (acervo pessoal).



Figura 19: Registro do processo de coleta de dados topo-batimétricos para elaboração dos perfis. Na foto, utilização da mira em medições dentro da Lagoa da Barra para criação do corte Lagoa (acervo pessoal).

Para o levantamento de perfis topo-batimétricos contemplando a praia, o suposto canal e a entrada da lagoa, foram utilizados um nível óptico e mira para o nivelamento dos pontos escolhidos, estes marcados por GPS na região de interesse do Canal da Barra de Maricá, esta escolhida por ser o principal ponto atual de controle de cheias do sistema. Os equipamentos utilizados no trabalho de campo foram fornecidos pelo LDSC/UFRJ. Os pontos marcados, delimitaram as margens esquerda e direita do canal, tendo como referência o sentido do mar para a lagoa e a beira-mar num dado instante (11:15 h). Tais pontos também constituíram 3 cortes transversais ao canal: um seguindo a fiação elétrica que corta o canal pela praia, caracterizando a região onde o canal seco se curva em direção à lagoa e deixa a região das dunas; outro junto a ponte que atravessa a entrada do canal na lagoa, caracterizando o limite

da região alagada; e o último um corte dentro da lagoa em uma área com maiores profundidades, essas até em torno de até 2 m, caracterizando uma região permanentemente submersa. Também foram marcados pontos marginais que caracterizassem o alagamento proporcionado pelas cheias de 2010 e 2016, esses identificados através de relatos dos moradores, e utilizados posteriormente para cálculo do talude marginal lagunar. Os pontos marcados e medidos em campo são apresentados na Figura 20 abaixo:



Figura 20: Gráfico da sobreposição da imagem do Canal da Barra extraída do Google Earth e dos pontos do campo marcados no GPS (elaboração própria).

O Nível Médio do Mar de Maricá (0,69 m) foi assumido igual ao NM do porto do Rio de Janeiro, pela estimativa do cálculo da média a partir dos NM dos portos do Rio de Janeiro – Ilha Fiscal (0,69 m) e do Forno (0,68 m) fornecidos pela DHN – Marinha do Brasil, pois ambos os portos se encontram a distâncias aproximadamente iguais do ponto de interesse em Maricá, porém opostas, ao Sul e ao Norte respectivamente. O Nível do Mar previsto de

Maricá às 11:15 h do dia 13 de fevereiro, foi estimado da mesma forma, sendo nessa data e horário o valor de 0,4 m fornecido pela DHN para os portos do Rio de Janeiro e do Forno. Logo, o valor do Nível do Mar previsto usado para Maricá também foi de 0,4 m (Dhn, 2017).

Para a obtenção do valor do Nível do Mar de Maricá real no dia do trabalho de campo, foi preciso considerar também a provável variação de nível gerada pela maré meteorológica no dia 13 de fevereiro. O cálculo da influência da maré meteorológica foi feito a partir de uma série semestral com medições a cada 5 min, do dia 31 de outubro de 2017 ao dia 12 de maio de 2017, geradas pelo marégrafo Thalimedes na Ilha do Fundão, referenciada pelo NM local. A média de nível de toda a série foi de 0,00 m, enquanto a média entre os dias 11 a 15 de fevereiro, considerando assim os eventos meteorológicos ocorridos na época do trabalho de campo, foi de - 0,33 m. Logo a diferença entre esses valores caracteriza a Influência da Maré Meteorológica a ser considerada no dado de nível previsto pela DHN, ou seja, no dia 13 de fevereiro o nível do mar estava aproximadamente 0,33 m abaixo da média, gerando uma Cota Influência Meteorológica igual a - 0,33 m, como pode ser observado na Figura 21:

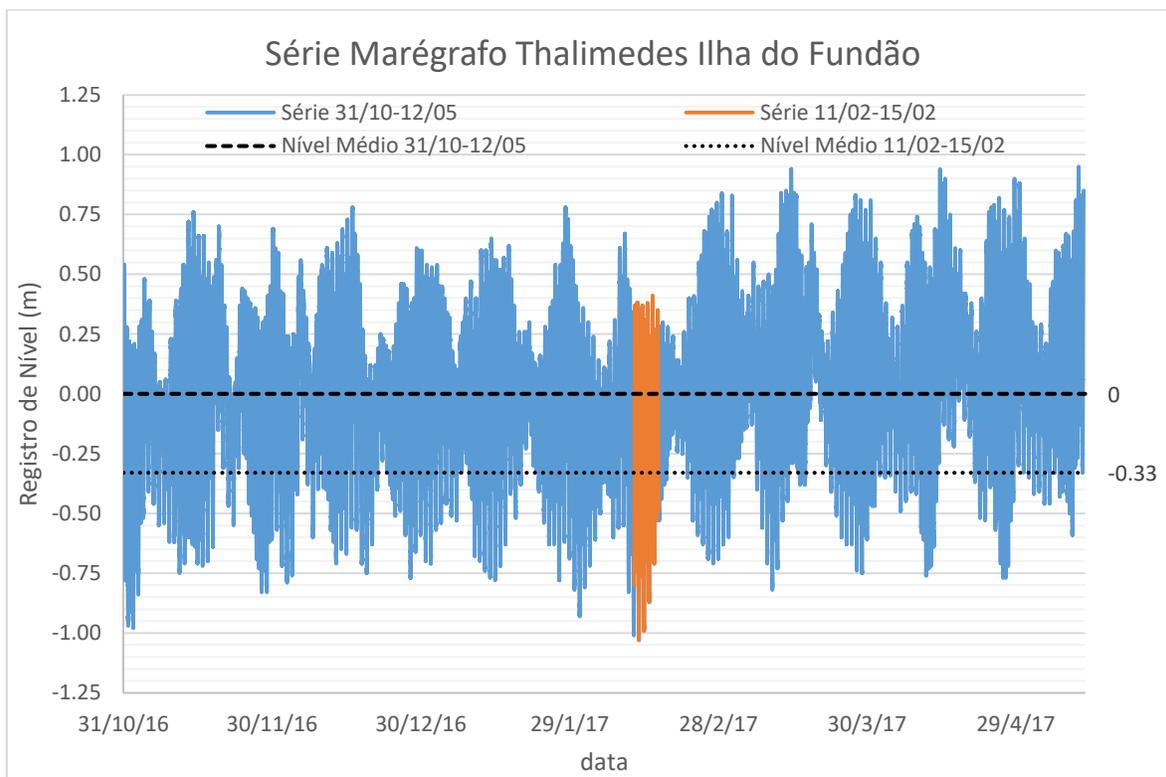


Figura 21: Gráfico de registro de nível da série extraída do marégrafo Thalimedes - Ilha do Fundão (31/10/16 – 12/05/17) (elaboração própria).

Finalmente, o Nível do Mar de Maricá real às 11:15 h do dia 13 de fevereiro foi obtido pelo seguinte cálculo (Eq.6):

$$N_{Real} = (N_{Previsão\ Maricá} + Cota\ Influência\ Meteorológica - NM\ Maricá) \quad (Eq.6)$$

Substituindo pelos valores já mencionados, $N_{Real} = (0,40 - 0,33 - 0,69) = - 0,62$ m. Dessa maneira, a conversão das alturas obtidas através da mira no trabalho de campo para valores referenciados ao NM de Maricá sendo 0,00 m seguiu a seguinte lógica (Eq.7):

$$N_{Real} - N_{Campo} = Valor\ a\ ser\ somado\ à\ tabela\ de\ alturas\ obtidas\ no\ Campo \quad (Eq.7)$$

A partir dessa conversão de alturas, foi obtida a cota Z (m) relativa ao Nível Médio do Mar de Maricá.

Analisando-se os gráficos dos perfis produzidos em campo, pôde-se ter uma melhor visualização da topografia do canal caracterizada pelas margens, bermas e dunas, assim como ter uma noção da variação de nível entre o mar e a lagoa (Figura 22; Figura 23; Figura 24).

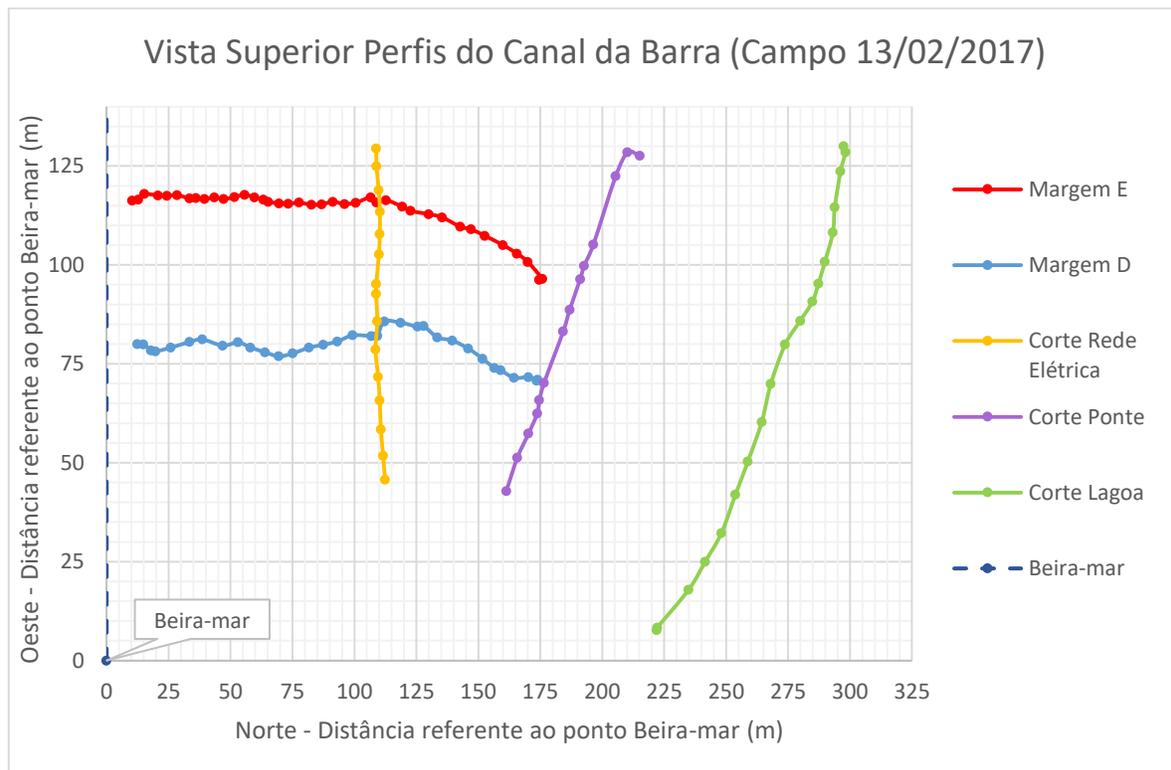


Figura 22: Gráfico da vista superior dos perfis do Canal da Barra (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).

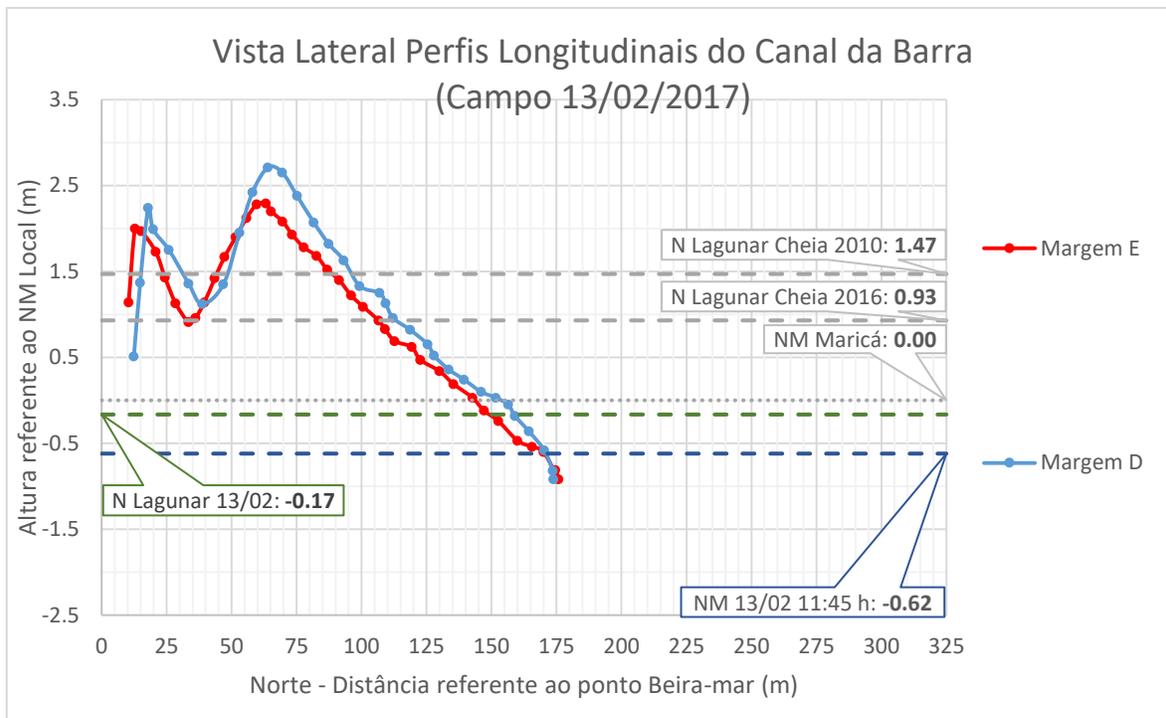


Figura 23: Gráfico da vista lateral dos perfis longitudinais do Canal da Barra (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).

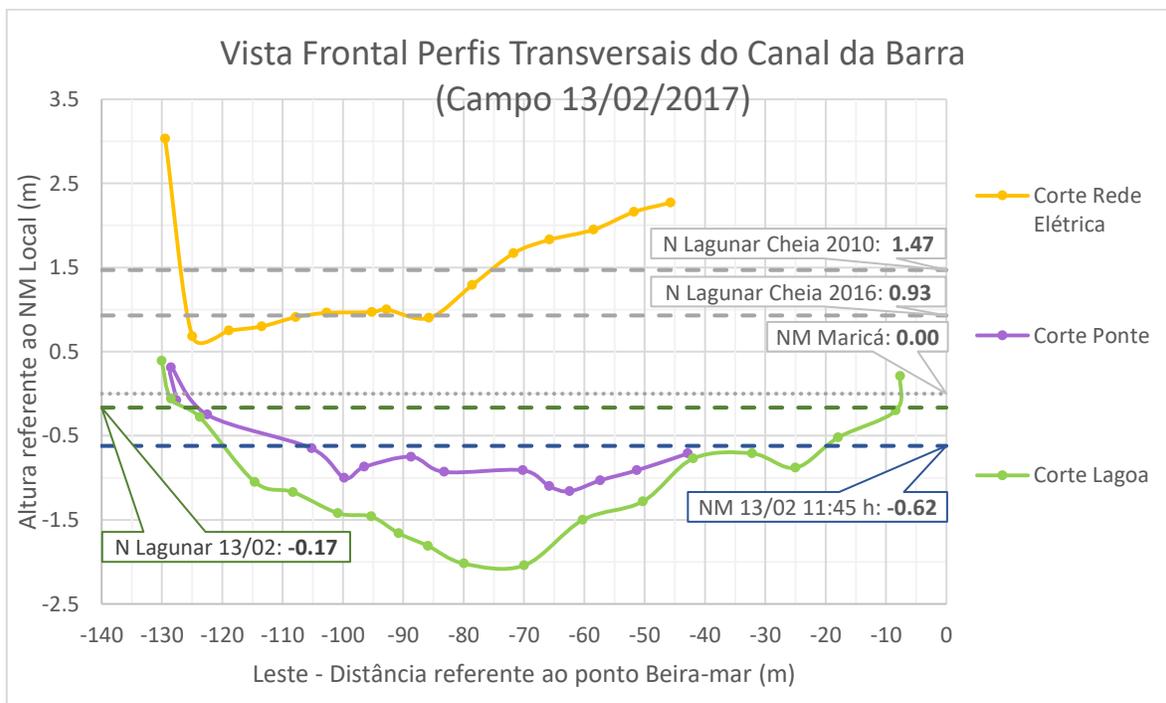


Figura 24: Gráfico da vista frontal dos perfis transversais do Canal da Barra (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).

Com a informação coletada sobre os pontos atingidos nos alagamentos anteriores, pôde-se definir a distância da margem atual até as supostas margens alagadas, e assim calcular a inclinação média do terreno marginal à lagoa, como também, os possíveis níveis d'água máximos locais atingidos durante as respectivas cheias de 2010 e 2016. Na Figura 25 a seguir, são apresentados os pontos atingidos nas cheias passadas, e na Figura 26, é apresentado o gráfico de cálculo do talude. A inclinação do terreno foi útil para delimitar regiões alagadas no modelo computacional.



Figura 25: Imagem retirada do Google Earth dos pontos atingidos pela água da lagoa nas cheias de 2010 e 2016, segundo relato dos moradores (elaboração própria).

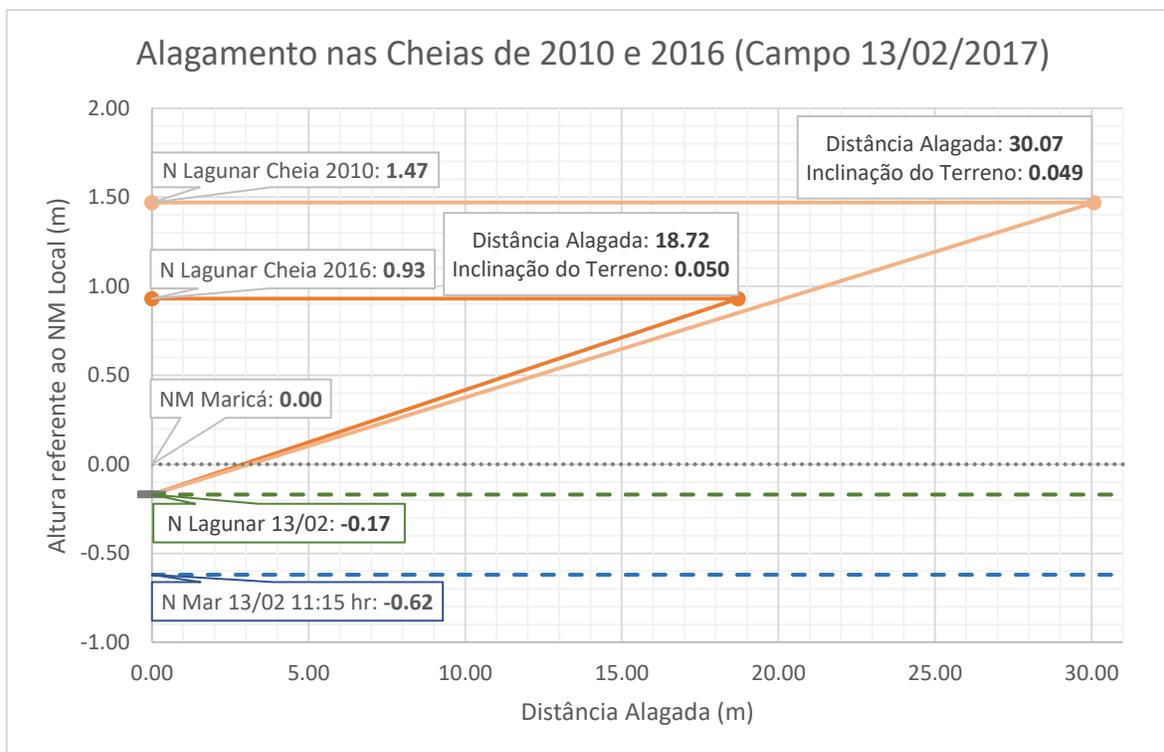


Figura 26: Gráfico de nível (m) por distância (m) do alagamento nas cheias de 2010 e 2016, contendo o talude da margem (Campo 13/02/2017) (elaboração própria).

IV - 2. Modelo Computacional

O processo de modelagem foi realizado seguindo as seguintes etapas:

- ✓ Definição de um Hidrograma de Cheia pelo método HUT, para que os dados de precipitação fossem transformados realisticamente em dados de vazão contribuinte ao longo do tempo para o Sistema Lagunar de Maricá.
- ✓ Elaboração da malha para o sistema lagunar através do SisBaHiA®, a partir do contorno de terra traçado no Google Earth; e atualização da batimetria original com os dados topo-batimétricos coletados no Trabalho de Campo.
- ✓ Seleção dos dados de entrada do modelo a partir dos dados disponíveis de maré astronômica (Tetrattech, 2013), maré meteorológica (LDSC/UFRJ), vento e chuva (Inmet, 2017), talude (Trabalho de Campo) e vazão (estimada pelo método HUT).

- ✓ Definição de cenários para as simulações no modelo, considerando o Canal da Barra fechado, aberto após e aberto antes da chuva extrema ocorrida em 2016, adicionando o efeito do vento local e as possíveis variações de maré; tendo em vista a comparação da variação do nível lagunar ao longo do tempo nas diferentes situações.

Tais etapas são apresentadas de forma mais detalhada nos itens a seguir.

IV - 2.1. Modelo Chuva-Vazão

A partir do entendimento conceitual do método Chuva-Vazão adotado, foram realizadas, de forma simples e objetiva, as seguintes etapas para a determinação de um hidrograma de cheia, suficientemente preciso, como dado de entrada no modelo hidrodinâmico:

a) Delimitação da Área de Drenagem

A área de drenagem foi delimitada através do Google Earth, com o auxílio das imagens do mapa de Domínios Geomorfológicos do Município de Maricá e da Bacia Hidrográfica de Maricá (Figura 5; Figura 6). O processo de delimitação seguiu o método tradicional, onde são identificados os divisores de águas da bacia, reconhecidos em geral pelos cumes das cadeias montanhosas. Foi desconsiderada a parte de Itaipuaçu da Bacia Hidrográfica de Maricá, pois devido a topografia do terreno e as condições ambientais de degradação atuais, pode-se considerar que as águas provenientes dos rios dessa área não contribuem de forma relevante para o sistema lagunar, e acabam sendo drenadas diretamente para o mar através dos canais presentes na região. Na Figura 27 abaixo, encontra-se a delimitação da área de drenagem adotada para o trabalho, calculada no valor de $AD = 217 \text{ Km}^2$. Também está representado o maior rio contribuinte ao sistema, este o Rio Ubatiba com comprimento de 19,6 Km, valor necessário para o cálculo da declividade.

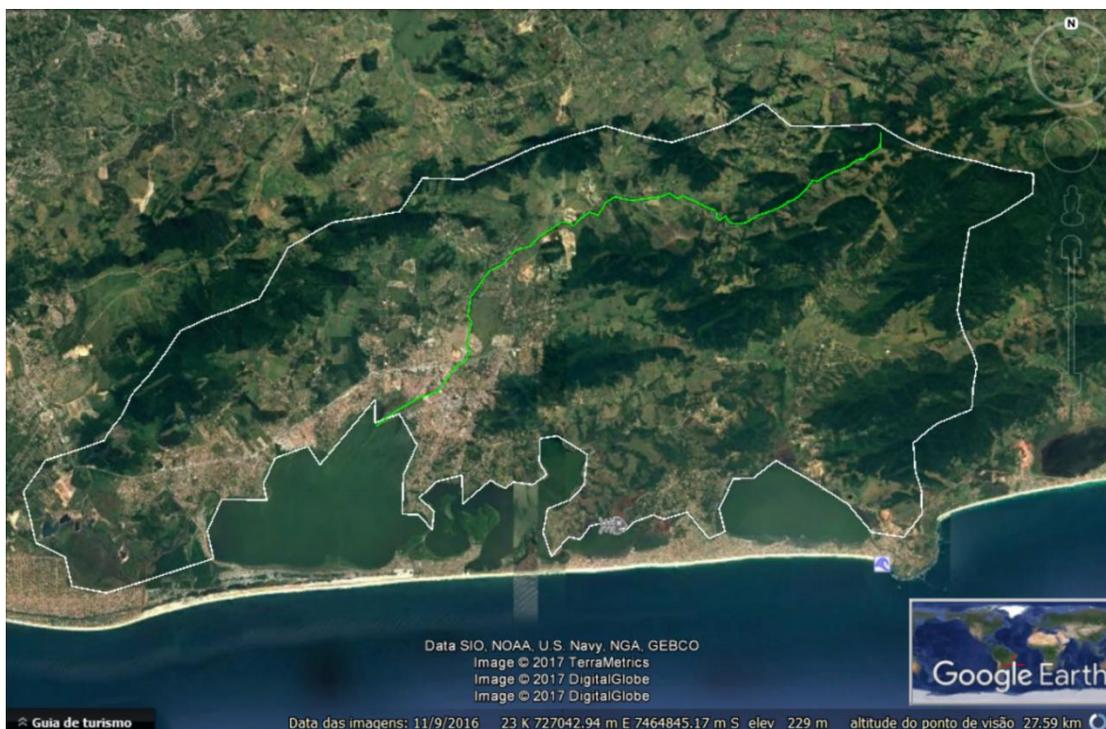


Figura 27: Imagem obtida pelo Google Earth da delimitação da área de contribuição da bacia hidrográfica para o Sistema Lagunar de Maricá, e do traçado do Rio Ubatiba, que além de maior rio é o principal contribuinte ao sistema (elaboração própria).

b) Cálculo da Declividade

O cálculo da declividade do curso d'água é fundamental para a definição do tempo de concentração da bacia. A declividade média é obtida pela razão entre a elevação da nascente pela distância da nascente à desembocadura do rio, nesse caso até o sistema lagunar. Porém esse valor é superestimado devido as quedas e curvas ao longo do rio, que influenciam na velocidade do curso d'água e no pico de cheia (Águas, 2010). Para este trabalho, foi utilizado como base o conceito de declividade equivalente adotado pelo INEA, a partir do perfil longitudinal de elevação do rio, esse mostrado na Figura 28. Assim, foi estimado o valor de $DE = 0,005$, considerando a razão entre um desnível de aproximadamente 100 m e uma distância de aproximadamente 20 km. Esse valor obtido para o desnível, desconsidera a variação abrupta de nível existente entre a região montanhosa e a planície costeira em torno de 550 m, que representa grande parte do desnível total de 650 m do curso d'água. Já o valor de 20 km da distância, é uma aproximação do comprimento do rio encontrado.

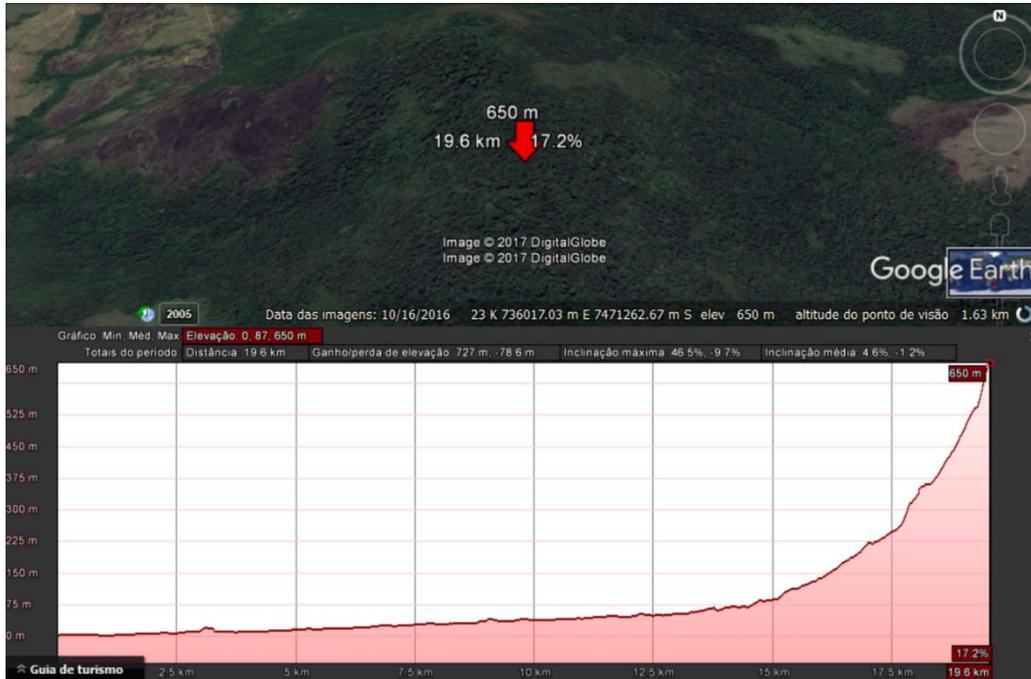


Figura 28: Imagem obtida pelo Google Earth do perfil de elevação estimado para o Rio Ubatiba (elaboração própria).

c) Cálculo do Tempo de Concentração

O tempo de concentração de uma bacia pode ser definido como o tempo, a partir do início da chuva, até que toda a bacia contribua para o escoamento em um ponto final de interesse. Esse tempo define a forma do HUT calculado, logo tem grande influência nas vazões resultantes ao longo do tempo. O estabelecimento do tempo de concentração de uma bacia é algo bastante complexo devido aos diversos fatores envolvidos, seja o comprimento do rio principal, o desnível equivalente do mesmo, a área de drenagem ou outros parâmetros a serem considerados. Por isso, existem diversas fórmulas para esse cálculo na literatura, muitas delas limitadas a áreas de drenagem pequenas (Dnit, 2005). Para este trabalho, foi adotada a formulação de George Ribeiro apresentada abaixo (Eq.8), pois, além de ser a utilizada pelo INEA, é indicada tanto para áreas de drenagem pequenas quanto grandes, variando entre 0,03 e 1300 Km² (Farias Junior e Botelho, 2011):

$$t_c = \frac{16 L}{(1.05 - 0.2p)(100 I)^{0.04}} \quad (Eq.8)$$

$t_c(\text{min}) = \text{tempo de concentração}$

$L (\text{Km}) = \text{comprimento do curso d'água}$

$p = \text{percentual da área da bacia coberta por vegetação}$

$I = \text{declividade}$

Os valores utilizados para o cálculo acima foram: $L = 19,6$, $p = 70\%$ e $I = 0,005$. Consequentemente, o tempo de concentração aproximado obtido e utilizado no modelo hidrológico foi $t_c = 354$ min, logo $t_c = 6$ h.

d) Definição do Valor de CN Médio da Bacia

O valor do CN médio calculado para a área de drenagem do Sistema Lagunar de Maricá, foi obtido a partir de uma média ponderada considerando os percentuais de cada uso/cobertura de terra do município de Maricá definidos por (Costa, 2016), juntamente com o respectivo CN estimado para cada uso/cobertura de terra. Esses valores de CN foram estimados a partir dos valores de CN apresentados por (Carvalho Junior, 2013), adotando-se um solo tipo B, segundo a tipologia de solo do SCS, por ser o tipo de solo mais próximo daquele característico e observado na região de Maricá (Sartori *et al.*, 2005; Solos, 2013). Dessa maneira, o valor médio obtido para a Bacia de Maricá e aplicado no modelo chuva-vazão foi $CN = 57$, como pode ser observado na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Valores de CN estimados a partir do percentual para cada uso/cobertura da terra no município de Maricá (Elaboração própria).

<i>Uso/Cobertura da Terra</i>	<i>%</i>	<i>CN estimado</i>
<i>Florestas</i>	<i>41,43</i>	<i>44</i>
<i>Agropasto</i>	<i>30,76</i>	<i>69</i>
<i>Urbano rarefeito</i>	<i>9,67</i>	<i>75</i>
<i>Áreas Úmidas</i>	<i>2,98</i>	<i>51</i>
<i>Urbano Moderado</i>	<i>2,24</i>	<i>85</i>
<i>Restinga</i>	<i>2,08</i>	<i>35</i>
<i>Solo Exposto</i>	<i>0,87</i>	<i>86</i>
<i>Cordões Arenosos</i>	<i>0,63</i>	<i>35</i>
<i>Afloramento Rochoso</i>	<i>0,53</i>	<i>98</i>
<i>Total Maricá</i>	<i>91,19</i>	<i>57</i>

(desconsiderando os corpos hídricos)

e) Cálculo da Intensidade de Chuva

No método HUT, a chuva excedente, aquela que gera o escoamento superficial direto, é uma das variáveis mais importantes na formação do hidrograma de cheia. A intensidade de uma chuva está relacionada com o volume de água precipitado em um dado espaço de tempo, ou seja, é compreendida como a razão entre a altura de lâmina d'água precipitada e o tempo, podendo ser expressa em mm/h e medida em pluviógrafos (Pfafstetter, 1982). A partir do dado de chuva de 258 mm obtido para o dia 29 de fevereiro de 2016 pelo INMET, na Estação Automática A667 em Saquarema, pode-se iniciar o processo de correção da entrada de chuva a partir de equações que representam a distribuição temporal e espacial da chuva. Para a definição da distribuição temporal, calcula-se primeiramente a Duração Unitária (Eq.9):

$$Du = \frac{2}{15} t_c \quad (Eq.9)$$

$$Du = \text{Duração Unitária}$$
$$t_c = \text{tempo de concentração}$$

O valor 2/15 representa a divisão da chuva total em 7,5 intervalos, logo a distribuição de tempo para o cálculo da chuva é definida em 8 intervalos inteiros. Assim, a chuva correspondente a seu respectivo intervalo é obtida pela diferença entre a precipitação acumulada no intervalo em questão e a precipitação acumulada no intervalo anterior (Eq.10):

$$dP_i = P_i - P_{i-1} \quad (Eq.10)$$

$$dP_i = \text{precipitação do intervalo } i$$
$$P_i = \text{precipitação acumulada até o intervalo } i$$
$$P_{i-1} = \text{precipitação acumulada até o intervalo } i - 1$$

Já para a distribuição espacial da chuva, que considera que a precipitação é heterogênea ao longo da bacia, usa-se o coeficiente de correção abaixo, onde A é a área da bacia em km² (Eq.11):

$$P_{\text{área}} = P_{\text{ponto}} \left(1 - 0.1 \log \left(\frac{A}{25} \right) \right) \quad (Eq.11)$$

Calculadas as distribuições temporal e espacial da chuva, o SCS propõe um reordenamento através de blocos alternados. Esse reordenamento consiste em: ordenar cada dP_i do menor para o maior (1 a 8); e em seguida reordená-los seguindo a ordem 5-3-1-2-4-6-7-8. Após esse processo, a precipitação acumulada é recalculada por (Eq.12):

$$P_i = P_{i-1} + dP_i \quad (\text{Eq. 12})$$

Sequencialmente, pode ser calculada a precipitação efetiva acumulada para cada intervalo i (Eq.13):

$$\begin{aligned} & \text{Se } P_i > 0.2S, \text{ então} \\ & P_{e_i} = \frac{(P_i - 0.2S)^2}{P_i + 0.8S}, \quad (\text{Eq. 13}) \\ & \text{se não } P_{e_i} = 0 \end{aligned}$$

A variável S é a infiltração d'água, em mm, potencial no solo, definida por (Eq.14):

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{Eq. 14})$$

Após o cálculo das precipitações efetivas acumuladas para cada intervalo i , pode-se calcular as precipitações efetivas em cada intervalo i (Eq.15):

$$dP_{e_i} = P_{e_i} - P_{e_{i-1}} \quad (\text{Eq. 15})$$

E finalmente, o somatório de dP_{e_i} corresponde à altura de chuva do hidrograma de cheia.

f) Hidrograma de Cheia

O método HUT considera que uma precipitação efetiva com uma dada duração se propaga em forma de um hidrograma triangular dimensionado pelo pico de cheia e pelos tempos de ascensão e recessão. Na Tabela 7 a seguir, encontram-se as equações necessárias para o dimensionamento do HUT:

Tabela 7: Equações para a definição do Hidrograma Unitário Triangular pelo SCS (adaptado de (Barboza, 2014)).

<i>Variável</i>	<i>Equação</i>
<i>Tempo de Ascensão (Eq. 18)</i>	$Ta = \frac{Du}{2} + 0.6t_c$
<i>Tempo de Recessão (Eq. 19)</i>	$Trec = \frac{5}{3}Ta$
<i>Pico de Vazão (Eq. 20)</i>	$Qp = \frac{A}{1.8(Ta + Trec)}$

O hidrograma de projeto obtido, contemplando o somatório dos hidrogramas unitários, ou seja, os hidrogramas gerados por cada milímetro de precipitação efetiva, é apresentado na Figura 29 abaixo. O tempo de duração da chuva foi estimado em 12 h, a partir, não só do hidrograma de projeto, como também de notícias e relatos dos moradores que presenciaram o evento de chuva do dia 29 de fevereiro de 2016. Além disso, tendo em vista que a vazão é aproximadamente nula a partir de 33 h, o tempo de duração do hidrograma (t_{dh}) foi considerado 32 h e, conseqüentemente, esse foi estimado como o tempo em que é atingido o nível máximo d'água do sistema lagunar. Já a vazão e o tempo de pico do hidrograma obtido, possuem os respectivos valores $Qp = 440 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $t_p = 17 \text{ h}$.

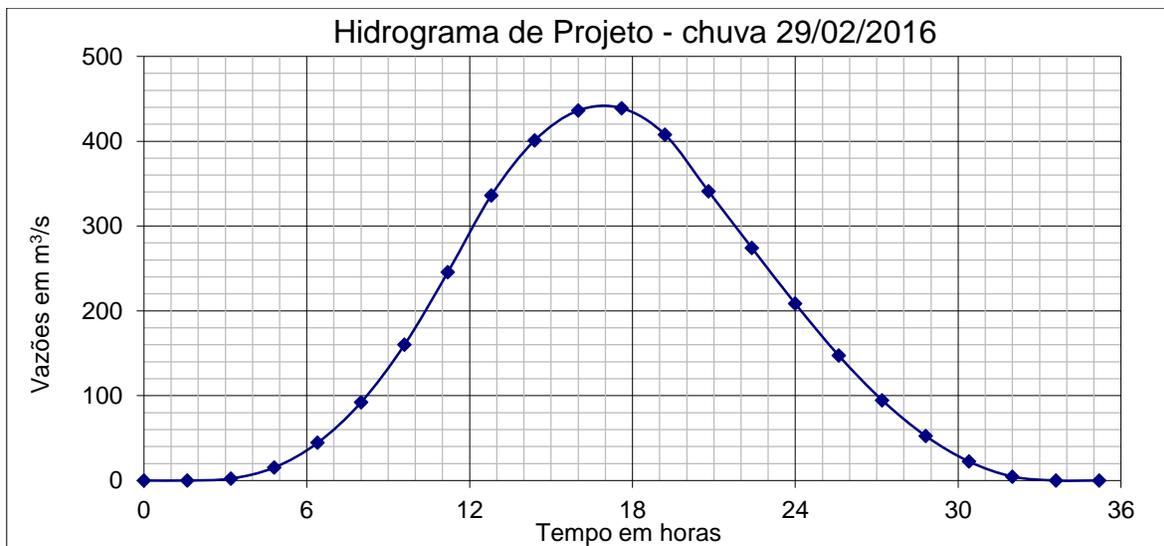


Figura 29: Hidrograma de projeto obtido através do método HUT-SCS e utilizado como dado de entrada de vazões no modelo hidrodinâmico (elaboração própria).

IV - 2.2. Malha e Batimetria

A elaboração da malha de discretização em elementos finitos é a etapa preliminar à simulação que irá definir a base para um bom funcionamento do modelo hidrodinâmico. Uma malha bem feita, seguindo os critérios fundamentais do comportamento de um fluido no espaço, irá, além de salvar tempo no processo de execução das simulações, fazer com que o modelo de circulação hidrodinâmica tenha um bom funcionamento e seja o mais fiel possível à realidade (Rosman, 2002). Primeiramente, foram traçados os contornos de terra e de mar no Google Earth, tanto para a situação com o Canal da Barra aberto, como é mostrado na Figura 30 abaixo, quanto para a situação com o canal fechado, considerando em ambos os casos as ilhas do sistema, os principais canais contribuintes e o Canal de Ponta Negra como ligação permanente do sistema com o mar.

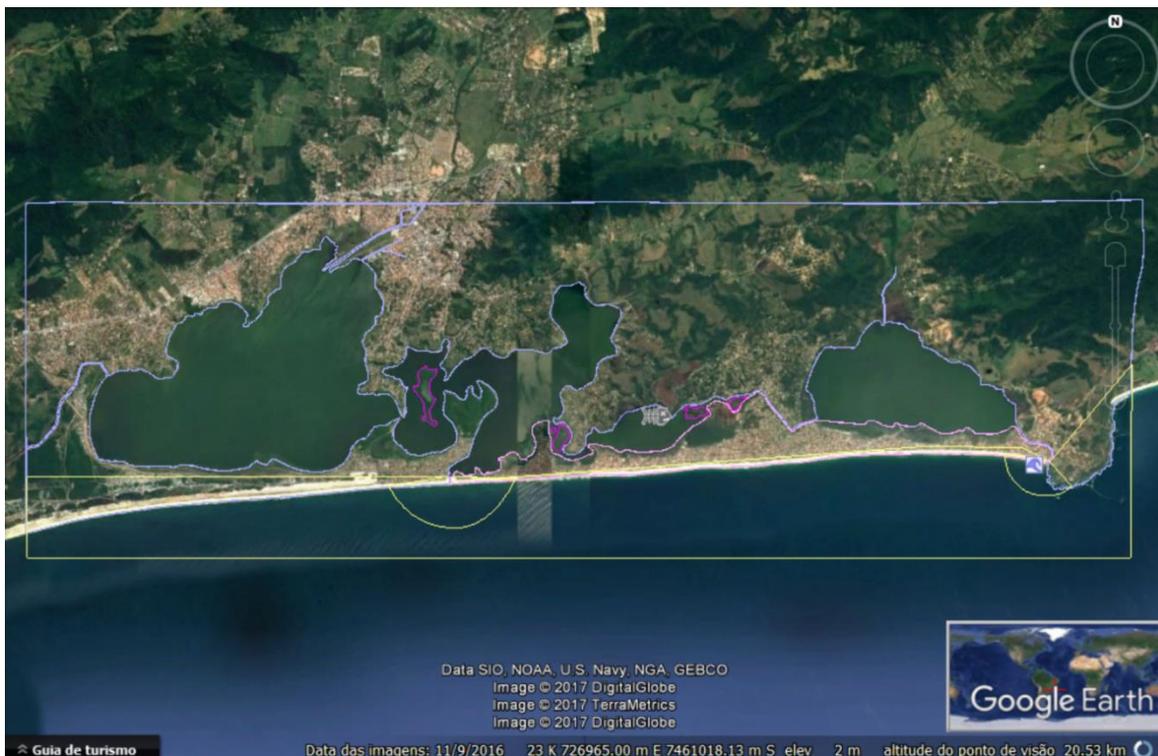


Figura 30: Contornos de mar e de terra demarcados através do Google Earth e utilizados como dados de entrada no modelo computacional para a situação em que o Canal da Barra encontra-se aberto (elaboração própria).

Com a definição dos contornos de terra e de mar, pode-se dar início à elaboração da malha no SisBaHiA®. Essa malha, de elementos finitos, foi elaborada de acordo com a instrução técnica do software (Rosman, 2013), sendo foi feita manualmente, com uma maioria de elementos quadrangulares e uma minoria de elementos triangulares, priorizando sempre a simetria, além de manter a maior dimensão dos retângulos paralela ao fluxo esperado na seção. A malha elaborada para o trabalho encontra-se na Figura 31 a seguir:

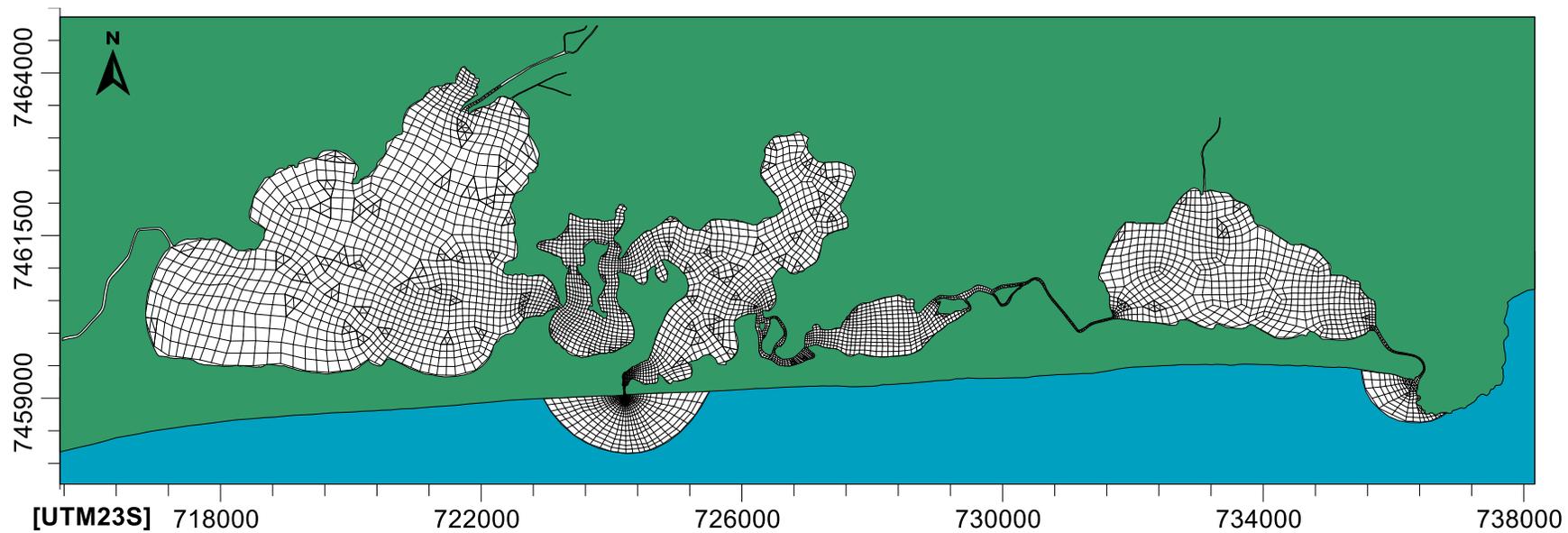


Figura 31: Domínio modelado do Sistema Lagunar de Maricá, contendo a malha de discretização em elementos finitos, para a situação em que o Canal da Barra encontra-se aberto (elaboração própria).

A batimetria utilizada nas simulações foi uma atualização da batimetria baseada na carta náutica do Sistema Lagunar de Maricá produzida em 1996 pela ONG Lagoa Viva. A atualização da batimetria, a partir dos dados coletados no Trabalho de Campo, foi possível pois tanto a batimetria original quanto a produzida em campo foram referenciadas ao NM de Maricá. Assim, os dados topo-batimétricos de campo foram adicionados a batimetria de 1996, e foi realizada uma interpolação entre esses pontos para que fossem definidos valores de batimetria para todos os nós da malha. A rugosidade padrão da lagoa adotada foi extraída de (Rosman, 2007), tendo o seu valor estimado em 0,03 m.

Uma constatação do Trabalho de Campo, foi que a condição do Canal da Barra no dia 13 de fevereiro de 2016 era que o mesmo se encontrava fechado. Isso, principalmente, devido à presença de dunas com alturas em torno 2 m e 2,5 m que impedem a troca de água através do canal, com pôde ser observado na Figura 23, inclusive em situações de elevação do nível do mar ou do nível lagunar, pois essas não costumam ser maiores que 1 m. Logo, ao adicionar à batimetria todos os dados topo-batimétricos obtidos em campo, o Canal da Barra se mantém fechado em qualquer conjuntura avaliada. Assim, a malha contendo essa batimetria, foi definida para os instantes anteriores à abertura do canal nos cenários propostos, onde o mesmo se encontrava fechado.

Para a simulação dos cenários com o Canal da Barra aberto, foi elaborada uma batimetria para o canal considerando apenas os perfis topo-batimétricos produzidos em campo que se encontravam abaixo do NM de Maricá, ou seja, os cortes Ponte e Lagoa, como pôde ser analisado na Figura 24, desconsiderando todos os outros que impediriam o escoamento no canal. Dessa maneira, foi definido um canal com profundidades em torno de 0,5 m, que representasse bem o canal real, porém não assoreado. A seção hidráulica limitante mais rasa do canal aberto teve profundidade mínima de 0,34 m, valor mínimo obtido para possibilitar o escoamento do mar para a lagoa durante todo (se na maré de quadratura) ou quase todo (se na maré de sizígia) um ciclo de maré. Essa profundidade também promove o escoamento praticamente constante da lagoa para o mar, pois mesmo nas menores baixa-mares de sizígia, o nível lagunar não se reduz muito além disso, principalmente em situações de chuva intensa. Na Figura 32 a seguir, está representada a curva de maré mensal astronômica de Maricá e a profundidade mínima da seção transversal mais rasa do canal:

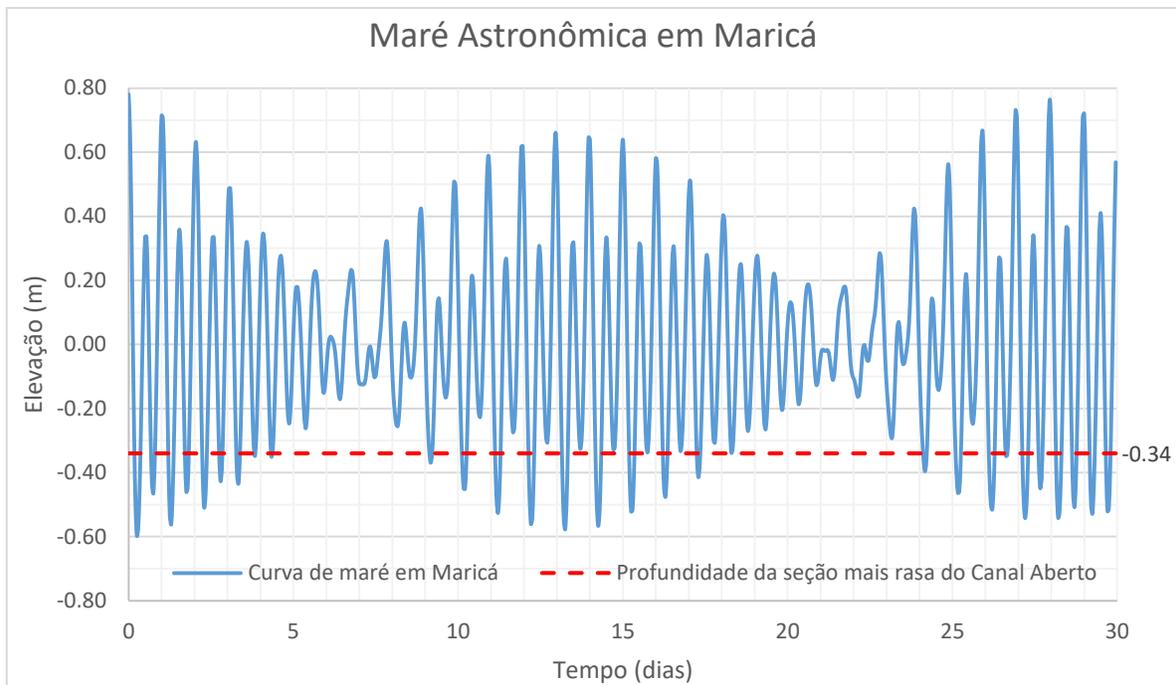


Figura 32: Curva de maré astronômica genérica de Maricá para um período mensal e profundidade mínima da seção transversal mais rasa do Canal da Barra aberto (elaboração própria).

A batimetria atualizada obtida e utilizada no trabalho encontra-se na Figura 33 a seguir, e na Figura 34, seguinte a esta, encontra-se a batimetria ampliada com foco na região do Canal da Barra aberto, com profundidade mínima de 0,34 m, e média de 0,5 m. As profundidades nas lagoas variam basicamente entre 0 m e 2 m. No Canal de ponta Negra, variam entre algo em torno de 1 m na saída da lagoa de Guarapina, a algo em torno de 2 m na saída para o mar. A Lagoa do Padre é a mais rasa do sistema.

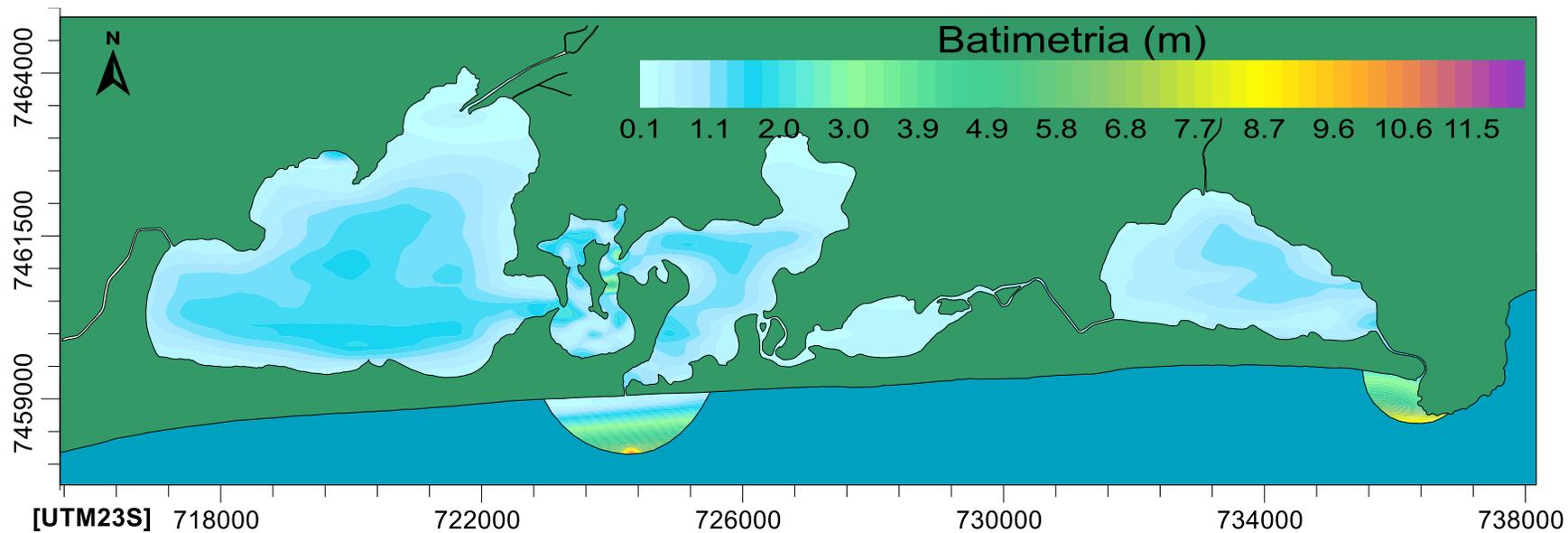


Figura 33: Domínio modelado do Sistema Lagunar de Maricá, contendo a batimetria produzida, quando o Canal da Barra se encontra aberto (elaboração própria).

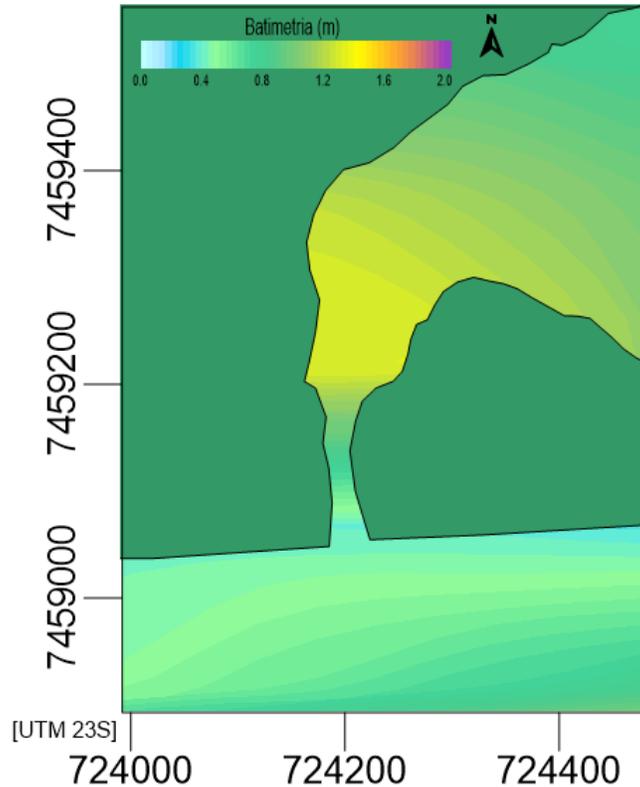


Figura 34: Domínio modelado na região do Canal da Barra de Maricá, contendo a batimetria produzida, quando o canal se encontra aberto (elaboração própria).

IV - 2.3. Dados de Entrada

Após a elaboração das malhas associadas com a batimetria, a próxima etapa da modelagem consiste na seleção dos dados de entrada necessários para as simulações de interesse. Um dos dados de maior importância para a elevação do nível lagunar é, sem dúvida, o hidrograma obtido pelo método HUT, pois esse fornece o regime de vazões ao longo do tempo que vai contribuir ao sistema lagunar.

As vazões estimadas pelo hidrograma foram divididas igualmente entre grupos de elementos específicos da malha, localizados próximos às desembocaduras dos rios contribuintes. Foram definidos grupos com maior número de elementos para áreas contendo nós que exercem pequenas contribuições, e grupos com menor número de elementos para cursos d'água que representam maiores contribuições, assim, enquanto maior a quantidade de nós de um grupo menor será a vazão contribuinte por nó. Além disso, em regiões de grande contribuição,

foram inseridos mais grupos que em regiões de menor contribuição, diferenciando assim, as descargas totais no sistema em cada região de interesse. Abaixo, pode-se visualizar através do mapa da malha na Figura 35, todos os grupos em vermelho, os quais contemplam os nós selecionados como contribuintes, ou seja, aqueles contendo vazões de entrada:

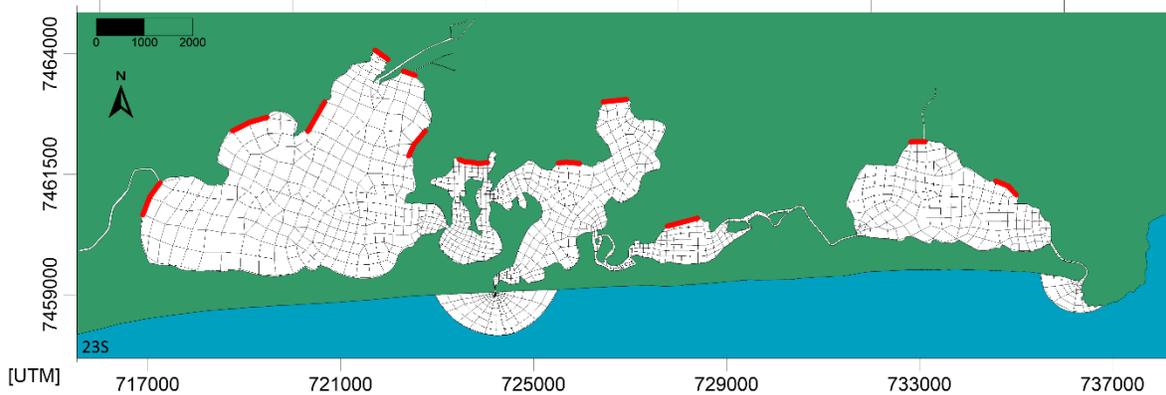


Figura 35: Imagem retirada do SisBaHiA® contendo todos os nós da malha elaborada, onde os grupos de nós que possuem vazões contribuintes encontram-se marcados de vermelho (elaboração própria).

Outro dado de entrada importante na dinâmica de cheia do sistema, e relacionado a especificação dos nós, consiste na adoção de um talude para todos aqueles nós de fronteira de terra. Dessa maneira, se torna possível o avanço das águas trazidas pela cheia para as margens das lagoas, provocando assim, o ganho de áreas alagadas proporcional ao aumento do nível lagunar. Por exemplo, um talude no valor de 1 nas margens das lagoas, limita o aumento do volume das águas a ocorrer somente no eixo vertical (aumento do nível), não possibilitando o alagamento, e gerando um aumento de nível muito maior do que o esperado em uma situação similar à estudada. O talude adotado no modelo, para os nós de fronteira de terra, foi o mesmo medido no Trabalho de Campo e já apresentado anteriormente na Figura 26, no valor de 0,005.

Os dados de entrada de maré também são de grande importância para a configuração do cenário ideal no modelo. O sistema lagunar se encontra a beira do mar e seu nível d'água e canais são naturalmente influenciados pelo regime de marés local. Assim, mesmo com as condições de assoreamento e degradação dos canais, a maré ainda rege a variação do nível

lagunar ao longo do tempo, por isso a importância da existência de canais de ligação entre o sistema lagunar e o mar no equilíbrio desse tipo de ecossistema.

A maré astronômica adotada nas simulações foi a medida em Maricá pela (Tetrattech, 2013) em 2012, como já mencionado anteriormente. A lista de constantes harmônicas contendo seus respectivos valores de período, amplitude e fase, já apresentada na Tabela 2, foi adicionada como parâmetro de fronteira aberta no modelo hidrodinâmico. Já a maré meteorológica, foi estimada a partir dos dados de nível do marégrafo Thalimedes no período de 31 de outubro de 2016 a 12 de maio de 2017, localizado na Ilha do Fundão, fornecidos pelo LDSC, e referenciados pelo NM local.

O cálculo dessa estimativa visou a obtenção de uma possível maré meteorológica positiva que caracterizasse uma situação de aumento de nível do mar para ser adicionada ao regime de maré local. Esse cálculo foi realizado pela seleção do nível médio móvel diário máximo nessa série semestral, considerando o valor da variação entre esse nível e o nível médio de toda a série analisada. Esse valor, que representa o acréscimo no nível do mar gerado por um possível evento meteorológico, foi estimado em 0,34 m como pode ser conferido na Figura 36 a seguir. A partir desse valor, essa informação foi adicionada ao modelo, nos nós de fronteira aberta, através de uma onda de maré começando, no instante do início do evento de chuva, em 0,34 m e variando até 0 m, com amplitude de 0,17 m, e período de 12 dias.

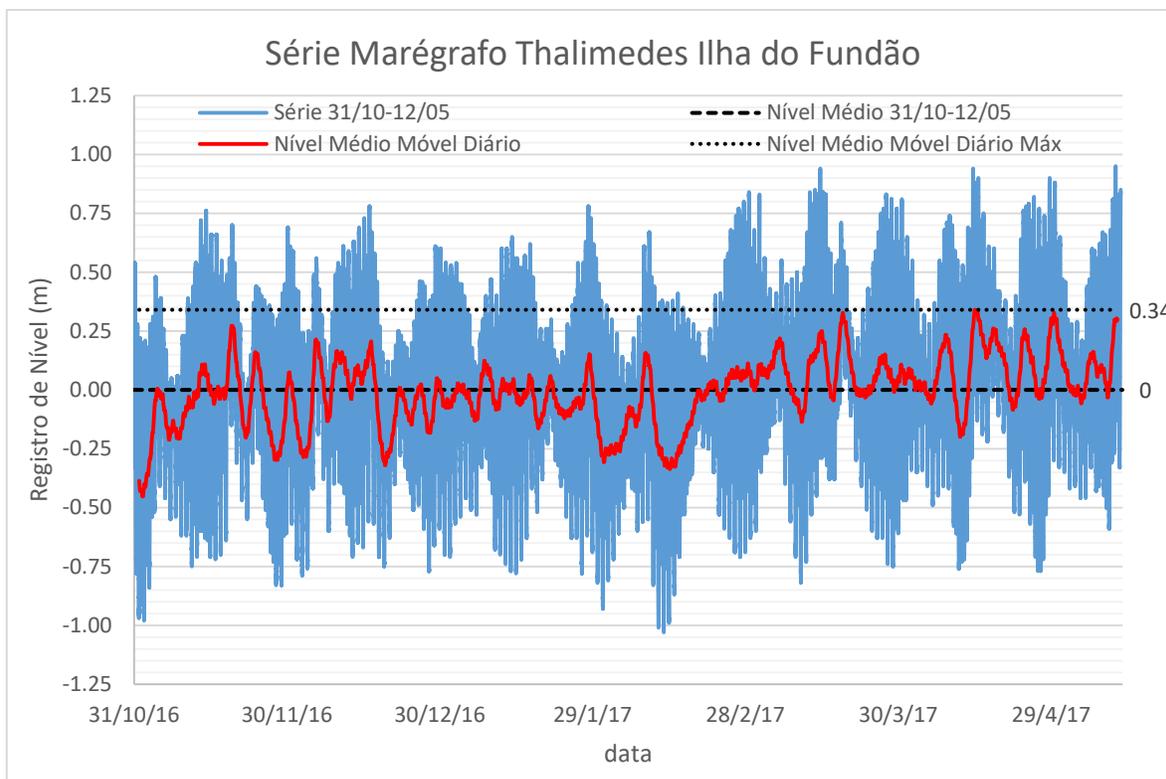


Figura 36: Gráfico do registro de nível (m) por tempo (data) do Marégrafo Thalimedes, contendo a variação obtida entre o Nível Médio da série completa e o Nível Médio Móvel Diário Máximo, representando assim uma maré meteorológica positiva (elaboração própria).

Finalmente, os dados de vento e chuva do ano de 2016 fornecidos pelo INMET (Inmet, 2017) para a Estação Automática A667 de Saquarema, também entraram nas simulações como variáveis meteorológicas no modelo hidrodinâmico. O volume precipitado na bacia hidrográfica foi representado na forma das vazões contribuintes, porém, a precipitação ocorrida na própria área do espelho d'água do sistema lagunar foi representada através de uma taxa de $21,5 \text{ mmh}^{-1}$. Esse valor foi calculado considerando a chuva de 258 mm, medida no dia 29 de fevereiro de 2016, ocorrendo por um período de 12 h, duração estimada por relatos dos moradores que presenciaram o evento e notícias sobre o mesmo. Os dados de vento, extraídos da medição horária do ano de 2016, se encontram representados pela rosa dos ventos da Figura 37 a seguir, contemplando suas direções, velocidades em ms^{-1} e frequências em %, nos dias 29 de fevereiro, 1 e 2 de março de 2016, como exemplo:

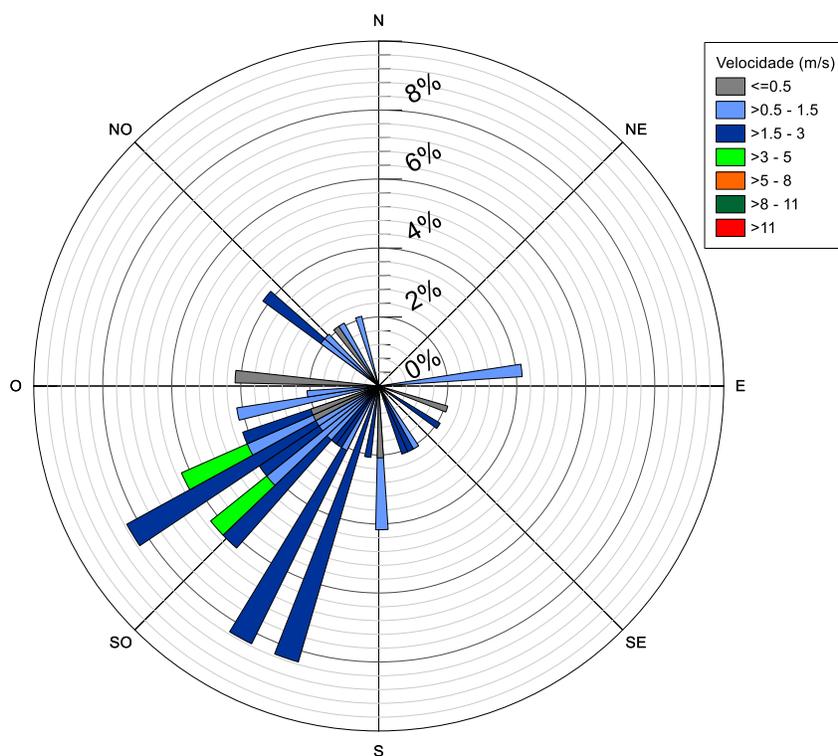


Figura 37: Rosa dos Ventos contendo direção, velocidade (ms^{-1}) e frequência (%) dos ventos entre os dias 29 de fevereiro e 2 de março de 2016, para a Estação Automática A667 – Saquarema (adaptado de (Inmet, 2017)).

IV - 2.4. Cenários Propostos

Uma análise comparativa de resultados, de forma simples e objetiva, depende dos cenários propostos para as simulações. Foram construídos 4 cenários de interesse para a modelagem, sendo 3 deles subdivididos em duas situações, logo um total de 7 possíveis conjunturas, todas levando em consideração o regime local de ventos e maré astronômica, além do talude estimado da margem da lagoa. Todas essas conjunturas foram analisadas, tendo como parâmetro de eficiência do extravasamento de cheia, a redução do nível lagunar do sistema ao longo do tempo, comparando-o com o nível de emergência estipulado pelo INEA para o sistema, esse no valor 60 cm acima do NM local. Esse nível, foi estimado visando a declaração de estado de emergência ao município em relação à ocorrência de alagamentos,

pois quando alcançado esse valor, a segurança da população está em risco, e por isso são permitidas ações emergenciais como abertura do Canal da Barra. Os cenários para análise são apresentados a seguir:

1. Cenário constituído visando a caracterização hidrodinâmica do sistema lagunar e a análise do efeito do regime de ventos e de maré nesse sistema, sem a interferência de chuva. Esse cenário foi subdividido em duas conjunturas: uma com o Canal da Barra fechado (1.1); e outra com o Canal da Barra aberto (1.2). Dessa maneira, pode-se interpretar a influência do canal no sistema em situações de seca. Essas duas conjunturas foram rodadas por 20 dias cada, para caracterizar um período de pelo menos meio ciclo lunar e suficientemente longo para uma melhor caracterização do sistema.
2. Reconstituição, a partir dos dados disponíveis, do evento de cheia ocorrido em 29 de fevereiro de 2016, considerando o hidrograma obtido pelo método HUT e a precipitação no espelho d'água do sistema lagunar. Nesse caso, o Canal da Barra encontra-se fechado para que seja atingido o mesmo nível lagunar atingido no evento real, e assim confirmar a confiabilidade dos dados de entrada e do modelo hidrodinâmico. Esse cenário foi rodado por um período de 15 dias, visando um período de pelo menos meio ciclo lunar.
3. Neste cenário, considera-se o evento de chuva extrema de 2016 através do hidrograma obtido pelo método HUT e da precipitação no espelho d'água do sistema lagunar. O Canal da Barra se encontra fechado até o pico da cheia do sistema, onde é atingido o nível máximo lagunar alcançado no evento de cheia de 2016, e logo em seguida, é aberto de forma emergencial. Assim, se torna possível a análise da eficácia do canal no controle de cheia do sistema, quando aberto após o evento de chuva. Esse cenário foi subdividido em duas conjunturas: uma extrema onde a abertura do canal ocorre na maré de sizígia com influência de maré meteorológica positiva (3.1), e outra suave onde a abertura do canal ocorre na maré de quadratura sem influência de maré meteorológica (3.2). Ambas rodadas por um período de 15 dias, visando

uma estabilização do nível lagunar após o evento de cheia e um período de pelo menos meio ciclo lunar.

4. Este cenário, assim como o anterior, considera o evento de chuva extrema de 2016 através do hidrograma obtido pelo método HUT e da precipitação no espelho d'água do sistema lagunar. Entretanto, de forma preventiva, o Canal da Barra se encontra aberto desde o início do evento de chuva, possibilitando assim a análise da eficácia do canal no controle de cheia do sistema, quando aberto durante todo o evento. Esse cenário também foi subdividido em duas conjunturas: uma extrema onde o evento de chuva ocorre na maré de sizígia com influência de maré meteorológica positiva (4.1); e outra suave onde o evento de chuva ocorre na maré de quadratura sem influência de maré meteorológica (4.2). Ambas rodadas por um período de 15 dias, visando uma estabilização do nível lagunar após o evento de cheia e um período de pelo menos meio ciclo lunar.

V - RESULTADOS

Buscando a melhor visualização e interpretação dos resultados obtidos a partir dos diferentes cenários, optou-se pela representação da variação do nível lagunar por mapas e gráficos que mostrem a evolução dessas variações de nível ao longo do tempo.

Para a apresentação dos resultados através dos mapas, foram selecionados instantes de tempo de interesse dependendo das peculiaridades de cada cenário. Esses intervalos foram escolhidos tendo em vista o tempo de duração do hidrograma ($t_{dh} = 32 \text{ hr}$), onde o nível d'água máximo do sistema é alcançado; a duração de uma fase lunar, que vai gerar as marés de sizígia ou quadratura em intervalos de aproximadamente 7 dias; os instantes de pico da maré de sizígia e da maré de quadratura, representados pela baixa-mar (nível mínimo) e preamar (nível máximo); e intervalos similares de tempo. Os instantes adotados para seus respectivos cenários encontram-se na Tabela 8:

Tabela 8: Instantes definidos como mais relevantes para a visualização da variação do nível d'água lagunar do sistema, através dos mapas gerados nas simulações (elaboração própria).

<i>Cenário</i>	<i>1. (1 e 2)</i>	<i>2.</i>	<i>3. (1 e 2)</i>	<i>4. (1 e 2)</i>
<i>Instante</i>	<i>129 (baixa-mar de quadratura)</i>	<i>1</i>	<i>32 (t_{dh})</i>	<i>32 (t_{dh})</i>
<i>(hr)</i>	<i>136 (preamar de quadratura)</i>	<i>32 (t_{dh})</i>	<i>168 (7 dias)</i>	<i>168 (7 dias)</i>
	<i>311 (preamar de sizígia)</i>	<i>-</i>	<i>360 (15 dias)</i>	<i>360 (15 dias)</i>
	<i>318 (baixa-mar de sizígia)</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>

Para a visualização dos resultados através de gráficos de nível (m) por tempo (h), foram definidas estações de interesse em todo o sistema lagunar. A princípio, os pontos de maior importância para o trabalho são: um próximo a região do centro da cidade de Maricá, localizado junto a margem nordeste da Lagoa de Maricá, onde são relatados mais casos de alagamentos e maiores níveis de cheia atingidos; e um outro na região do Canal da Barra, por ser, não só a o canal de interesse do trabalho, como também um bom parâmetro de troca entre o sistema lagunar e o mar, e que conseqüentemente sofre grande influência de ambos.

No cenário de caracterização hidrodinâmica lagunar, foram definidas mais 5 estações para uma melhor interpretação da variação de nível do sistema lagunar em geral. Logo, foram

escolhidas quatro estações centrais uma em cada uma das lagoas (Maricá, Barra, Padre e Guarapina), além de uma na saída do Canal de ponta Negra, exposta à maior variação de nível devido ao regime de maré local, totalizando assim 7 estações de interesse, junto com aquelas citadas anteriormente. As 7 estações são apresentadas na Figura 38 a seguir:



Figura 38: Mapa contendo as estações (nós da malha) do sistema definidas para análise do nível lagunar (elaboração própria).

V - 1. Caracterização Hidrodinâmica Lagunar – Sem Chuva

Neste cenário, criado com o intuito de caracterizar a hidrodinâmica lagunar em um período de seca, nas situações com o Canal da Barra fechado e aberto, os resultados são apresentados na forma de: mapas de nível, representando os instantes 129 h (baixa-mar de quadratura), 136 h (preamar de quadratura), 311 h (preamar de sizígia) e 318 h (baixa-mar de sizígia); e gráficos de variação horária do nível lagunar, ao longo de 20 dias, em cada uma das 7 estações distribuídas no sistema lagunar. Além disso, para a situação com o Canal da Barra aberto, são apresentados também: um mapa mostrando a influência do vento local na distribuição de nível no sistema no fim da vazante antes da baixa-mar de quadratura, instante 140 h; e mapas do canal ampliados, durante a preamar de sizígia, instante 311 h, e início da enchente logo após a baixa-mar de sizígia, instante 320 h, mostrando a distribuição de direção e sentido das velocidades de corrente no canal, além da variação de nível.

V - 1.1. Canal da Barra Fechado

Abaixo encontram-se os mapas de nível nos instantes 129 h, 136 h, 311 h e 319 h (Figura 39; Figura 40; Figura 41; Figura 42), respectivamente, considerando o Canal da Barra fechado:

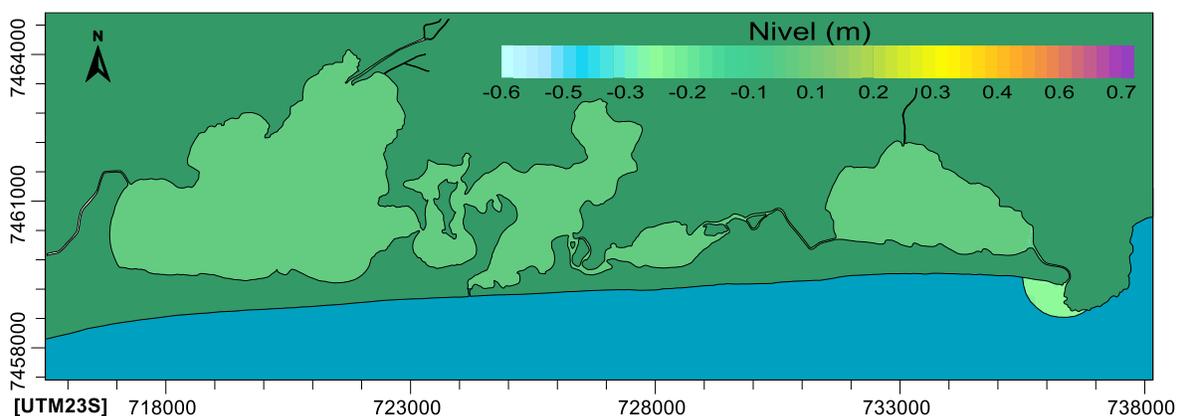


Figura 39: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 129$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).

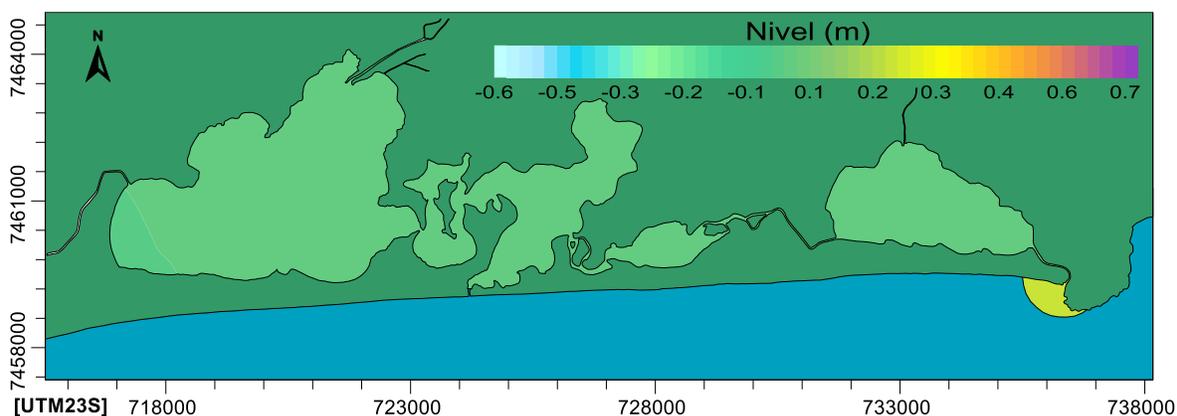


Figura 40: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 136$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).

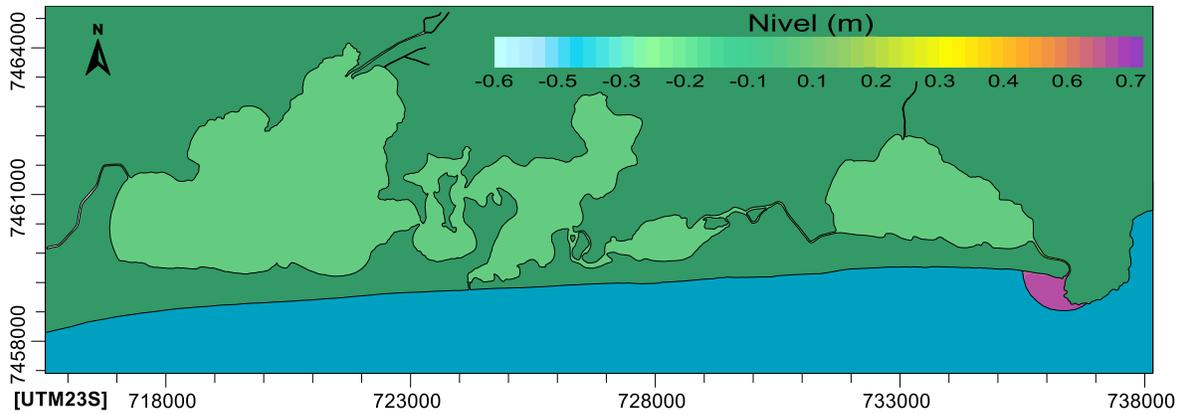


Figura 41: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 311$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).

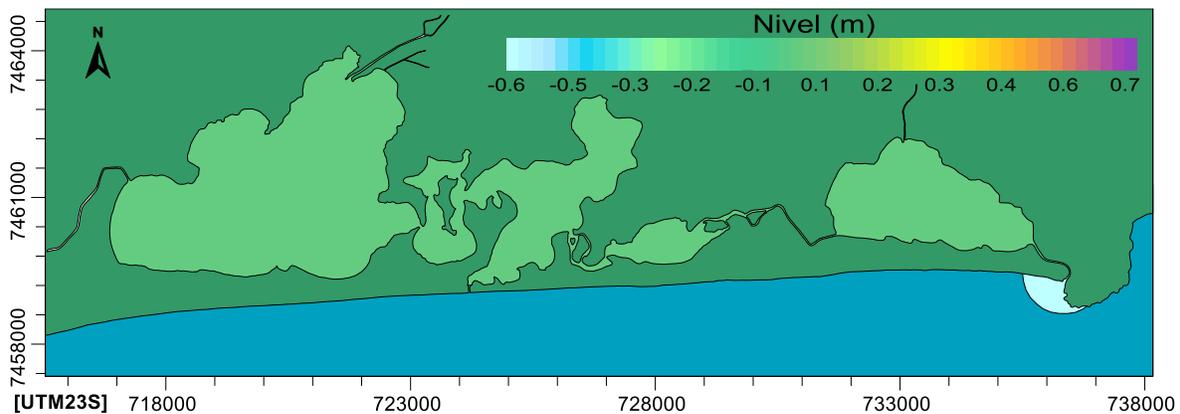


Figura 42: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 318$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir dos mapas, a influência do regime de marés na hidrodinâmica do sistema, o qual proporciona baixas variações de nível, devido principalmente à seção hidráulica limitada do Canal de Ponta Negra e aos estrangulamentos gerados pelos canais conectores entre as lagoas dentro do sistema. A seguir, é apresentado o gráfico de variação horária do nível lagunar, ao longo de 20 dias, nas 7 estações distribuídas no sistema lagunar (Figura 43), e o mesmo em escala de nível reduzida, esse desconsiderando a estação Canal de Ponta Negra (Figura 44):

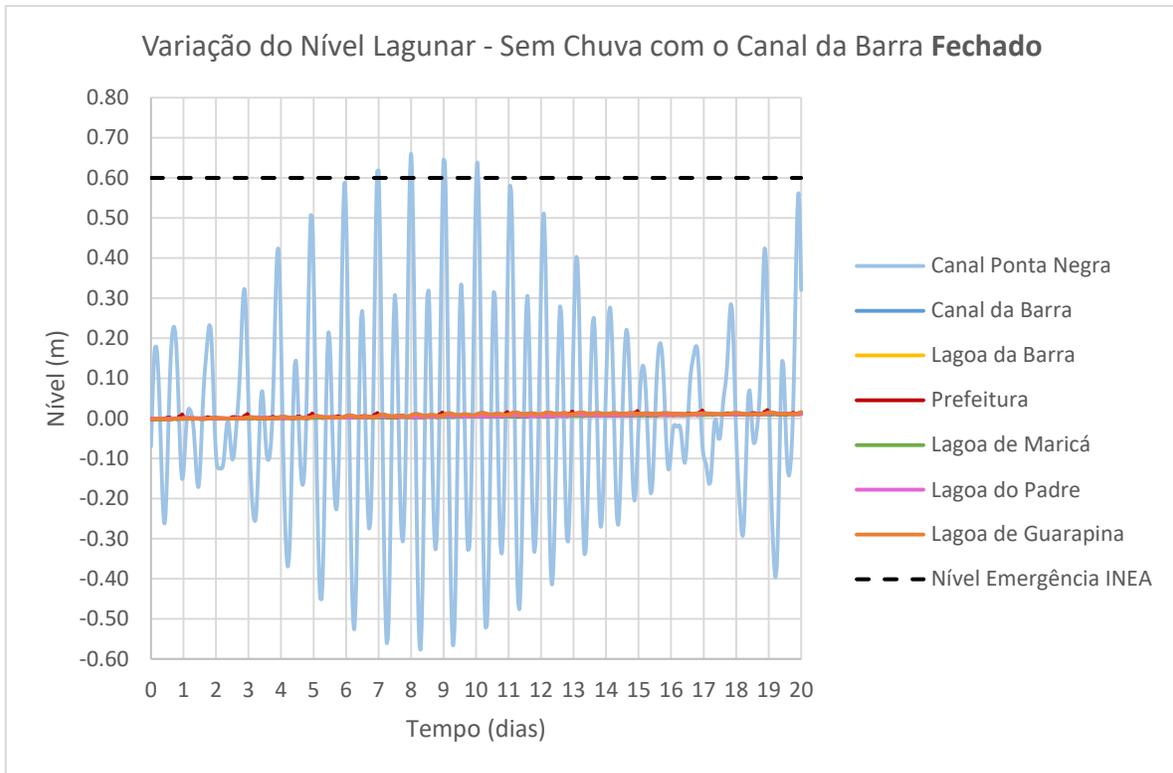


Figura 43: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as 7 estações definidas. Cenário sem chuva com o Canal da Barra fechado (elaboração própria).

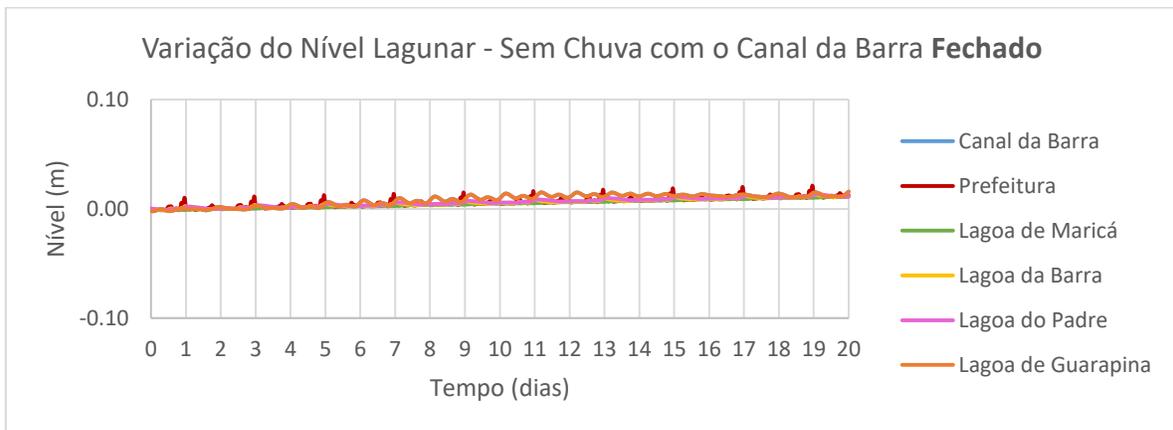


Figura 44: Gráfico da figura 43 em escala de nível reduzida desconsiderando a estação Canal Ponta Negra (elaboração própria).

Observa-se, a partir dos gráficos apresentados, que a variação de nível em períodos de seca, com o Canal da Barra fechado, é muito pequena, seja durante todo o ciclo de maré ou fase lunar, em torno de 1 a 2 cm em todas as estações localizadas dentro do sistema lagunar. A única estação que, de fato, sofre grande influência do regime de marés, é a localizada na boca do Canal de Ponta Negra, já fora do sistema lagunar.

V - 1.2. Canal da Barra Aberto

Abaixo encontram-se os mapas de nível nos instantes 129 h, 136 h, 311 h e 318 h (Figura 45; Figura 46; Figura 47; Figura 48) respectivamente, considerando o Canal da Barra aberto:

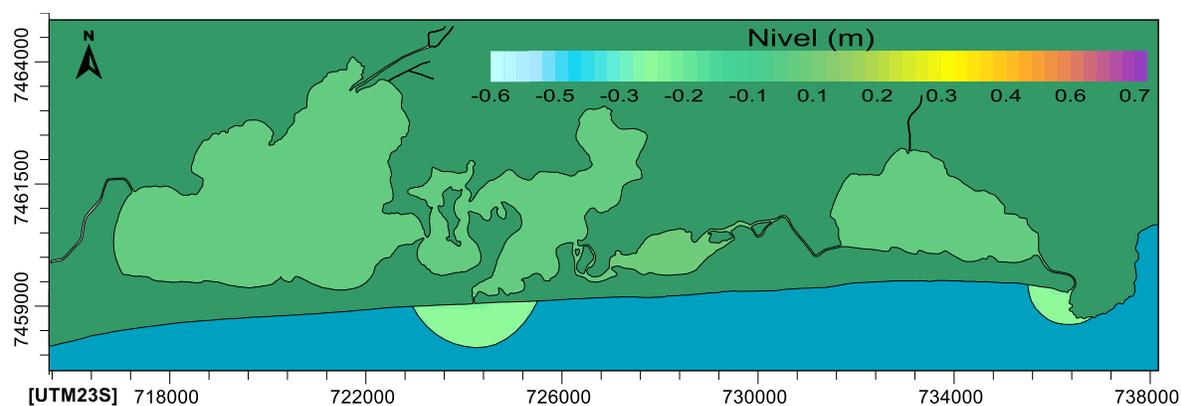


Figura 45: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 129$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

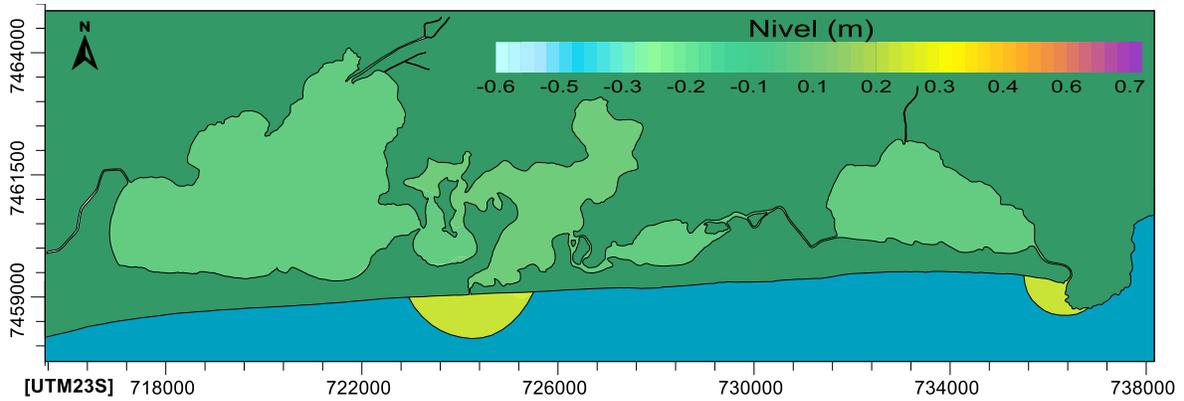


Figura 46: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 136$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de quadratura. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

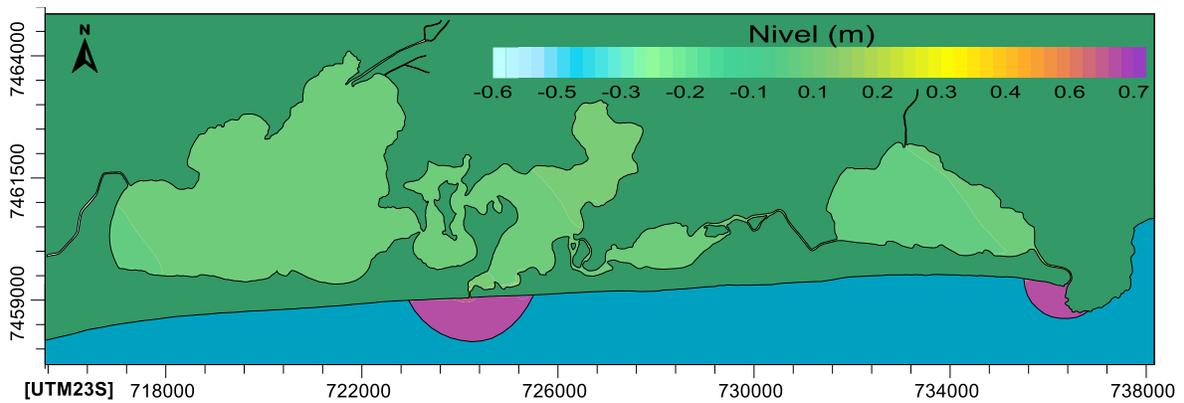


Figura 47: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 311$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

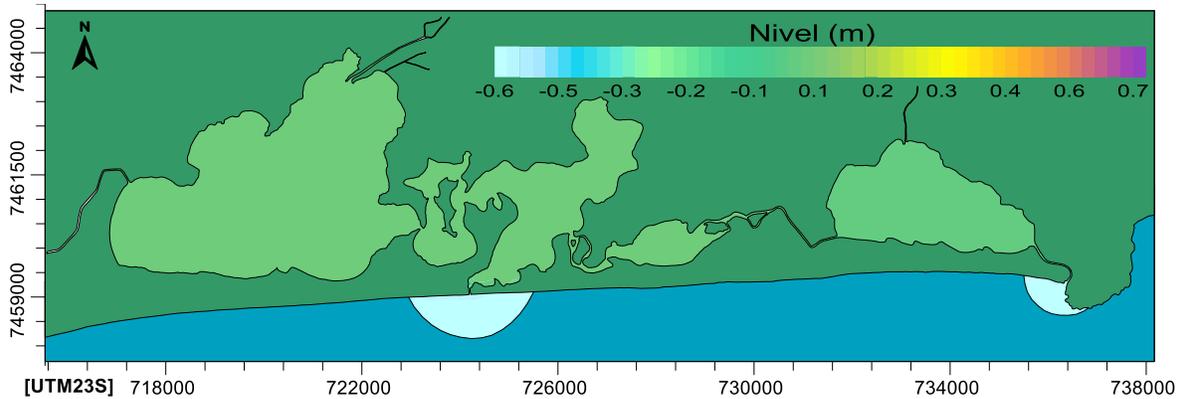


Figura 48: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 318$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na baixa-mar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir dos mapas, que a abertura do Canal da Barra ainda não exerce grande influência nas variações de nível entre as lagoas do sistema, devido, principalmente, a pequena seção hidráulica do Canal da Barra se comparada a dimensão do sistema lagunar. Abaixo, é apresentado o mapa de distribuição de nível no sistema influenciado pelo vento local e canais da Barra e Ponta Negra (Figura 49):

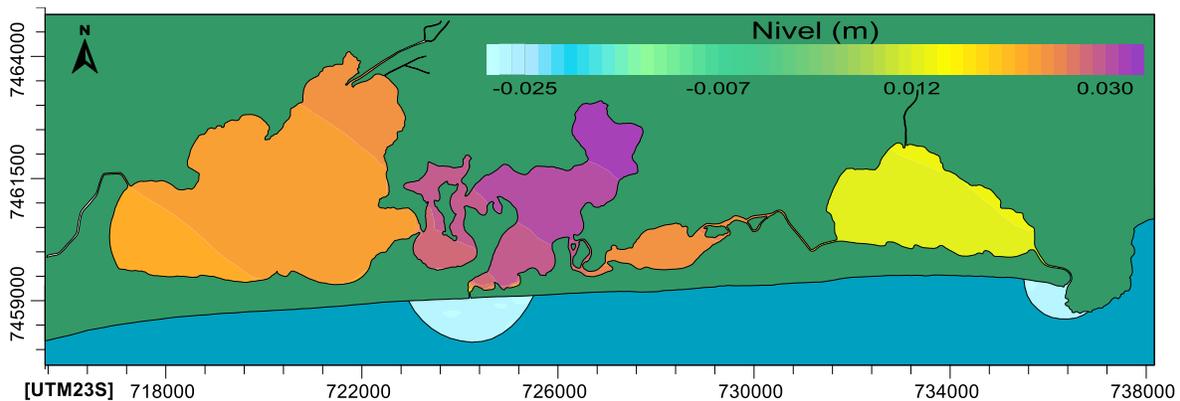


Figura 49: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 140$ h, no fim da vazante antes da baixa-mar de quadratura, representando a influência do vento local. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

Observa-se a partir do mapa anterior, que o vento local, predominantemente sudoeste em situações de frente fria, empilha as águas nas margens nordeste do sistema, gerando uma

pequena sobre-elevação, em torno de alguns milímetros, no sentido de sudoeste para nordeste. Também se nota, um melhor extravasamento de água na Lagoa de Guarapina, por possuir o Canal de Ponta Negra, que promove ligação direta com o mar. No instante considerado no mapa, $t = 140$ h, a maré se encontra vazando, logo o Canal da Barra, por ter uma pequena seção hidráulica se comparado ao Canal de Ponta Negra, escoar mais lentamente o aumento de nível gerado pela preamar, fazendo com que o nível lagunar na Lagoa da Barra ainda esteja alguns milímetros acima do nível das outras lagoas do sistema. Abaixo, são caracterizadas, através de mapas ampliados do Canal da Barra, as distribuições de direção e sentido da velocidade de corrente e nível lagunar nas situações de preamar e de início de enchente, respectivamente (Figura 50; Figura 51):

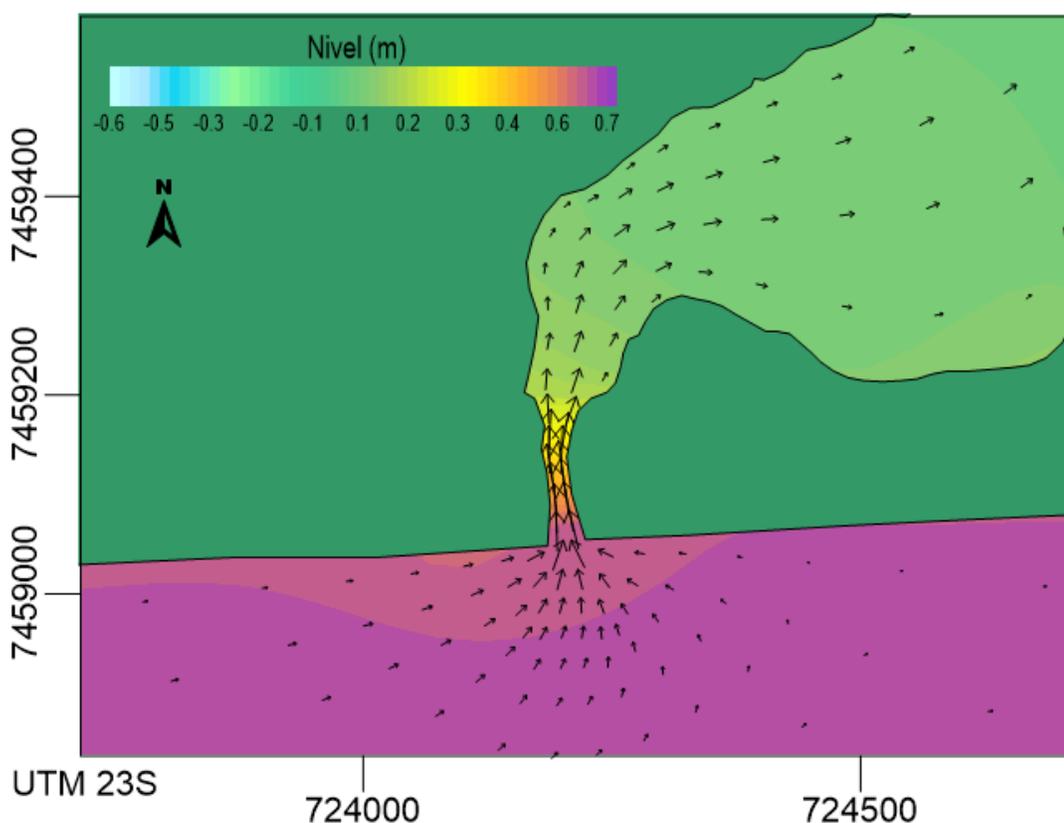


Figura 50: Mapa de nível d'água e direção e sentido da velocidade de corrente do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 311$ h, representando o comportamento hidrodinâmico na preamar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

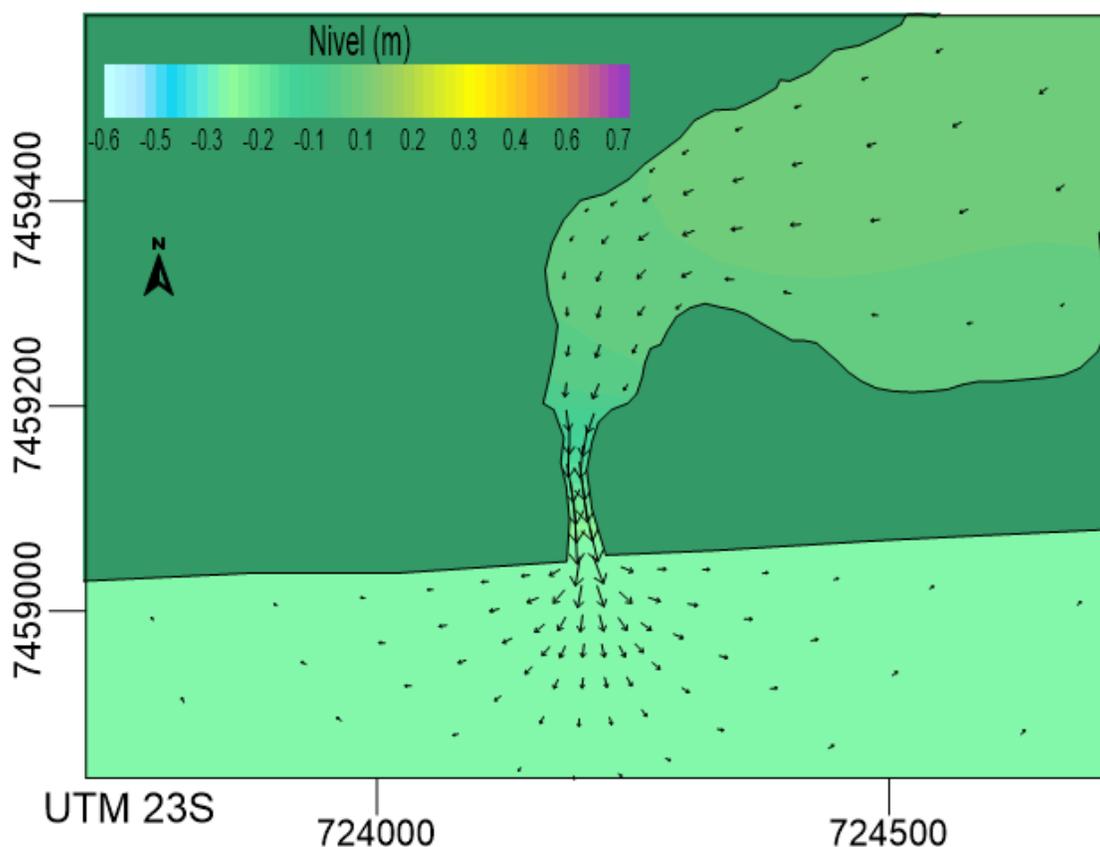


Figura 51: Mapa de nível d'água e direção e sentido da velocidade de corrente do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 320$ h, representando o comportamento hidrodinâmico no início da enchente logo após a baixa-mar de sizígia. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (Elaboração própria).

Observa-se que, na preamar de sizígia, o nível d'água no mar se mantém consideravelmente maior que na lagoa gerando correntes do mar para a lagoa. Já no início da enchente, logo após a baixa-mar de sizígia, acontece o inverso, as correntes fluem da lagoa para o mar, pois o nível lagunar ainda se encontra alguns centímetros acima do nível do mar. Isso se deve ao fato da pequena seção hidráulica do canal amortecer e limitar bastante a influência da maré, e assim impedir essa de transferir toda sua oscilação de nível ao sistema. Porém, alguma oscilação é transferida devido a diferença de carga hidráulica envolvida, e isso pode ser evidenciado pelas correntes no canal na preamar no sentido norte e as correntes no canal na baixa-mar no sentido sul.

A seguir, é apresentado o gráfico de variação horária do nível lagunar, ao longo de 20 dias, nas 7 estações distribuídas no sistema lagunar (Figura 52), e o mesmo em escala de nível reduzida, esse desconsiderando a estação Canal de Ponta Negra (Figura 53):

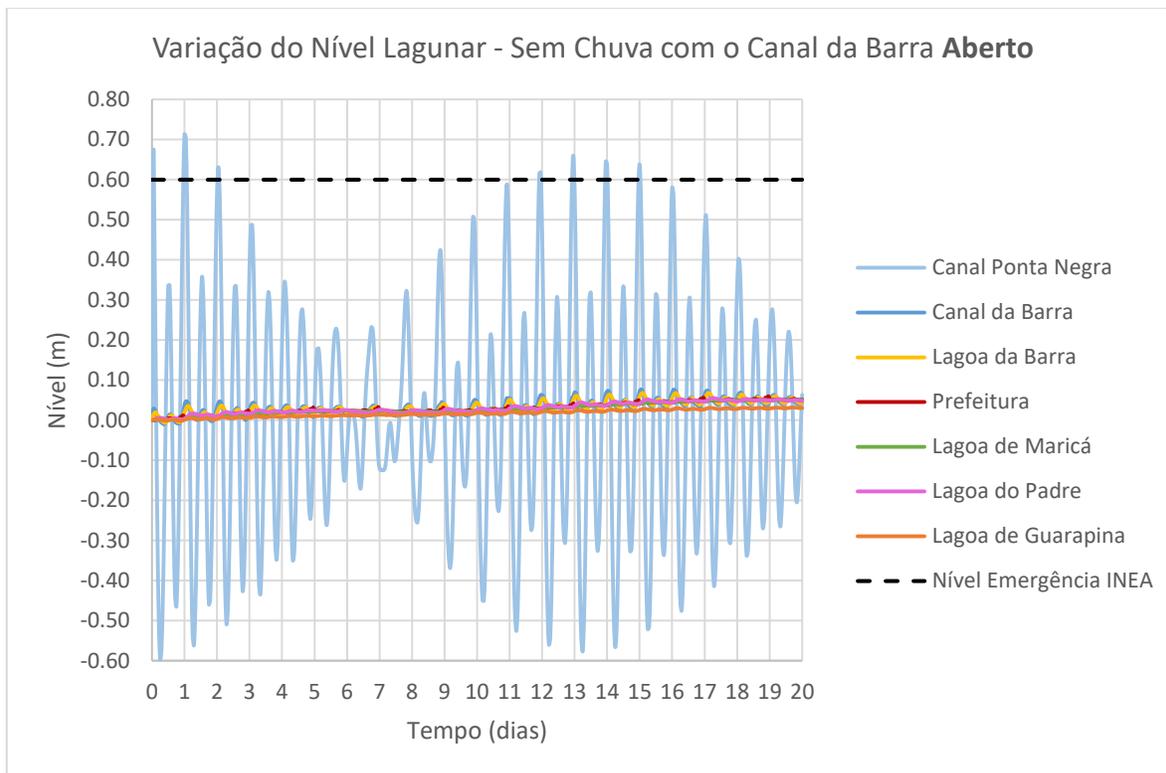


Figura 52: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as 7 estações definidas. Cenário sem chuva com o Canal da Barra aberto (elaboração própria).

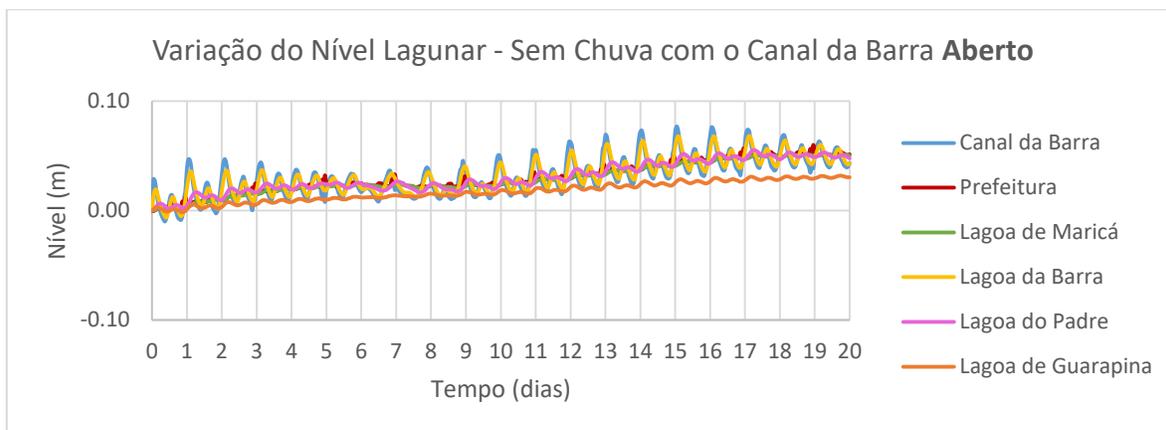


Figura 53: Gráfico da figura 52 em escala de nível reduzida desconsiderando a estação Canal Ponta Negra (elaboração própria).

Observa-se, a partir dos gráficos apresentados, que a variação de nível em períodos de seca, com o Canal da Barra aberto, ainda é muito pequena seja durante todo o ciclo de maré ou fase lunar, não ultrapassando 10 cm em todas as estações localizadas dentro do sistema lagunar. Porém, proporciona um menor atraso nas variações de nível, em relação ao mar, e menor amortecimento, se comparada a situação com o Canal da Barra fechado. Essa variação é aproximadamente dez vezes maior que a variação de nível atingida com o canal fechado, demonstrando uma maior influência do regime de marés quando o Canal da Barra é aberto. Entretanto, assim como na situação sem o Canal da Barra, a única estação que, de fato, sofre grande influência do regime de marés, é a localizada na boca do Canal de Ponta Negra, já fora do sistema lagunar.

V - 2. Reconstituição do Evento de Cheia de 29 de fevereiro de 2016

Abaixo estão representados os mapas de nível d'água nos instantes $t = 1$ h e $t = 32$ h, a partir do início da chuva (Figura 54; Figura 55), seguidos do gráfico de variação do nível lagunar a cada hora, ao longo das 36 h após o início da chuva, contendo também o hidrograma de projeto (Figura 56), contemplando assim o nível lagunar máximo atingido e o comportamento das vazões contribuintes ao longo do tempo. Todos esses, para o cenário de reconstituição mais próxima do evento de cheia ocorrido em 29 de fevereiro de 2016.

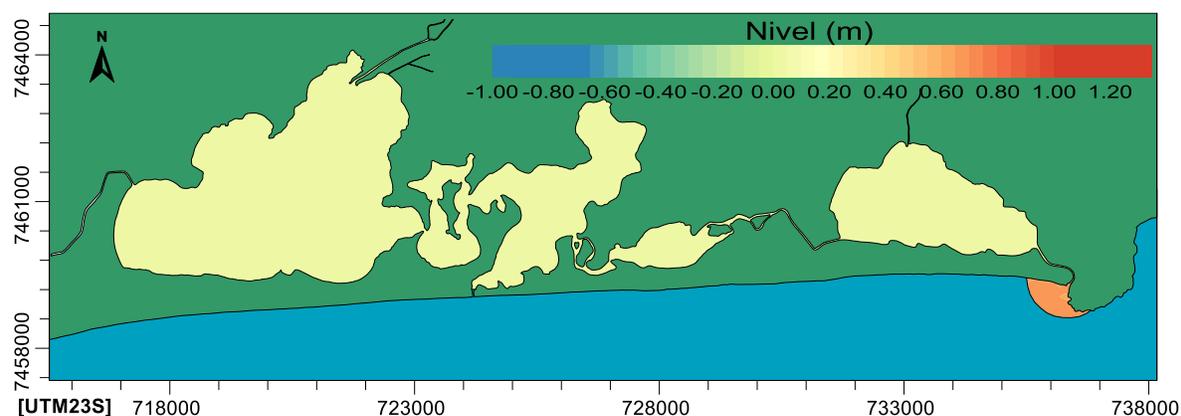


Figura 54: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 1$ h, após o início da chuva. Cenário da chuva de 29/02/2016 (elaboração própria).

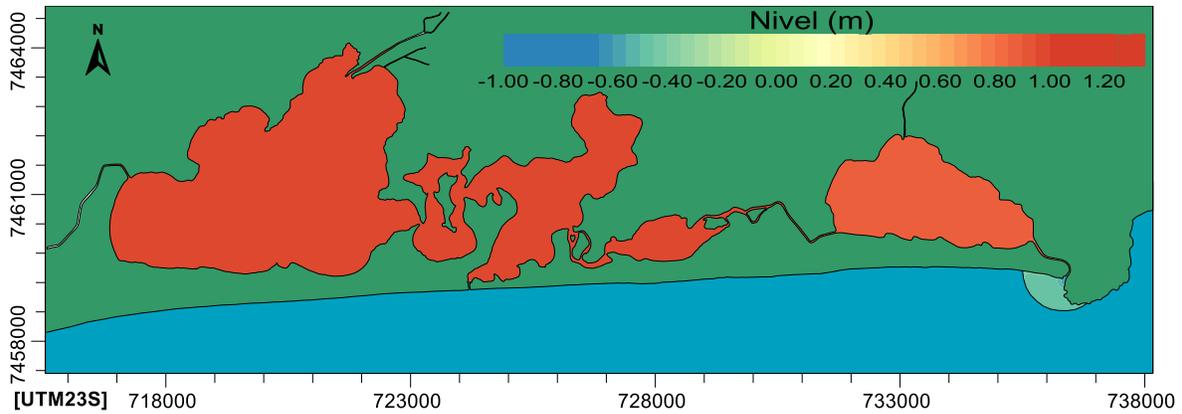


Figura 55: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h, após o início da chuva. Cenário da chuva de 29/02/2016 (elaboração própria).

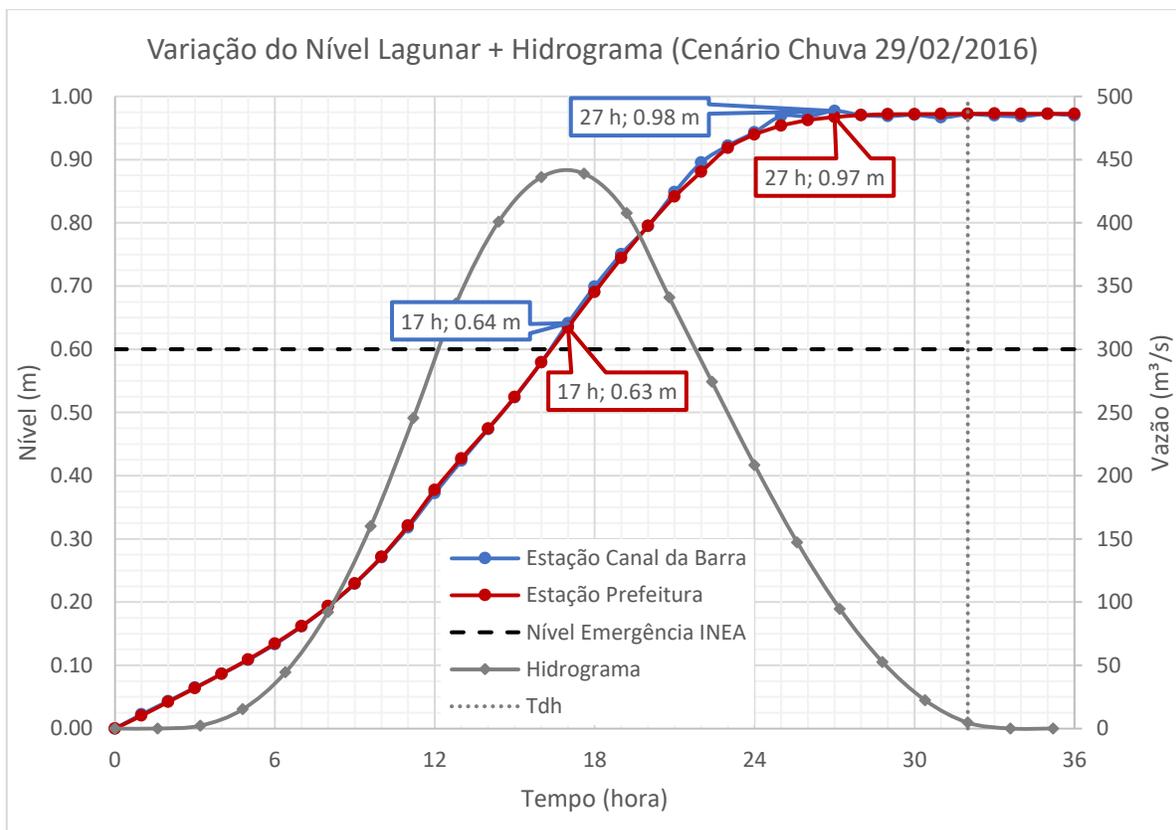


Figura 56: Gráfico de variação do nível lagunar (m) por tempo (h), para as estações Canal da Barra e Prefeitura, sobreposto ao hidrograma das vazões contribuintes (m^3s^{-1}) ao longo do tempo (h). Cenário da chuva de 29/02/2016 (elaboração própria).

A partir dos mapas apresentados, nota-se que tanto no instante inicial da chuva quanto no instante de pico de cheia, a distribuição do nível lagunar no sistema ocorre de forma homogênea. Porém, na Lagoa de Guarapina, esse nível se encontra poucos centímetros mais baixo que nas outras lagoas do sistema devido ao escoamento facilitado pelo Canal de Ponta Negra. Observa-se também, uma diferença de nível entre os dois instantes apresentados nos mapas de aproximadamente 1 m.

Pode-se observar, a partir do gráfico apresentado, que o nível lagunar de emergência, estipulado pelo INEA em 60 cm acima do NM de Maricá, foi atingido no modelo após, aproximadamente, 17 h do início da chuva em ambas as estações Canal da Barra e Prefeitura. Após 27 h, foi atingido na simulação, o nível máximo lagunar pretendido para o modelo, esse no valor de 0,98 m no Canal da Barra e 0,97 m na Prefeitura. Os valores obtidos, se encontraram dentro do esperado, considerando os relatos e notícias do evento de cheia ocorrido em 2016 em que foi atingido um aumento de nível em torno de 1 m na região próxima à prefeitura, e considerando também, o cálculo em campo, onde foi estimado, a partir das marcas do alagamento de 2016, um aumento de nível de 0,93 m na região do Canal da Barra. Além disso, o nível máximo lagunar alcançado, correspondendo ao pico da cheia do sistema, coincide com o tempo de duração do hidrograma (Tdh), como planejado. Esses resultados foram considerados satisfatórios para confirmar a confiabilidade dos dados de entrada estimados e utilizados no modelo hidrodinâmico, e assim, dar prosseguimento a análise do nível lagunar nos diferentes cenários propostos.

V - 3. Canal da Barra Aberto Após o Pico de Cheia do Evento de Chuva

Neste cenário, elaborado para analisar a influência do Canal da Barra se aberto de forma emergencial depois do evento de chuva ocorrido em 29 de fevereiro de 2016, nas situações em que a chuva se inicia na maré de sizígia e na maré de quadratura, os resultados são apresentados na forma de: mapas de nível, representando os instantes 32 h (pico de cheia do sistema), 168 h (7 dias) e 360 h (15 dias); e gráficos de variação horária do nível lagunar, ao longo de 15 dias, nas 2 estações no sistema lagunar de maior interesse para o trabalho, essas Canal da Barra e Prefeitura.

V - 3.1. Maré de Sizígia + Maré Meteorológica

Abaixo encontram-se os mapas de nível, em que a chuva se inicia na maré de sizígia considerando ainda uma maré meteorológica positiva, nos instantes 32 h, 7 dias e 15 dias, respectivamente (Figura 57; Figura 58; Figura 59):

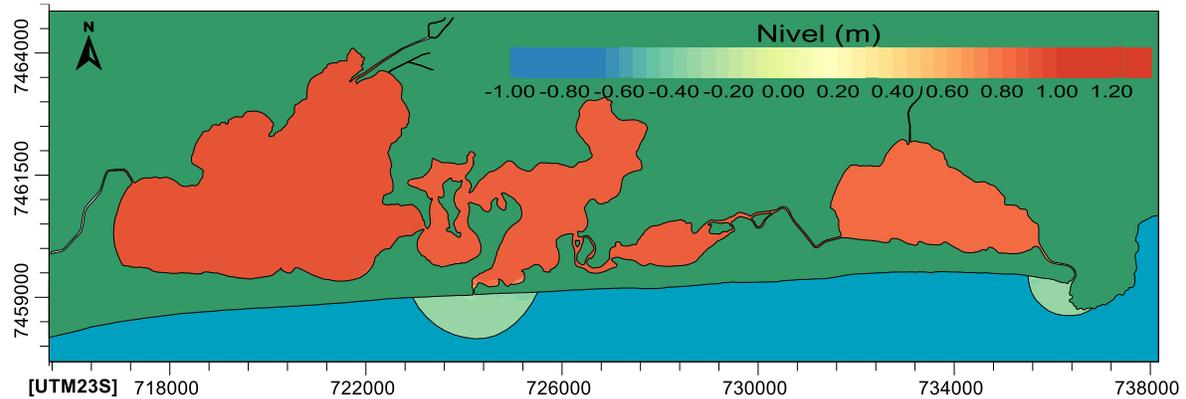


Figura 57: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

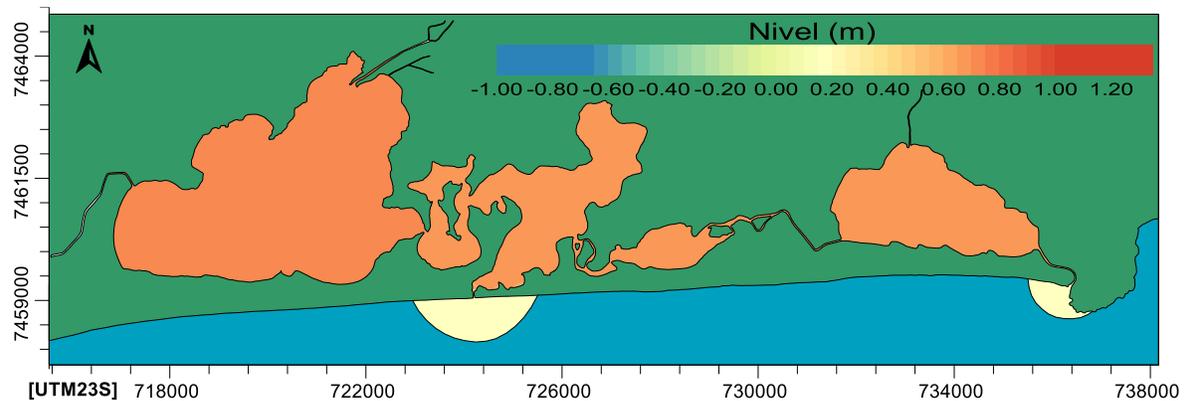


Figura 58: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

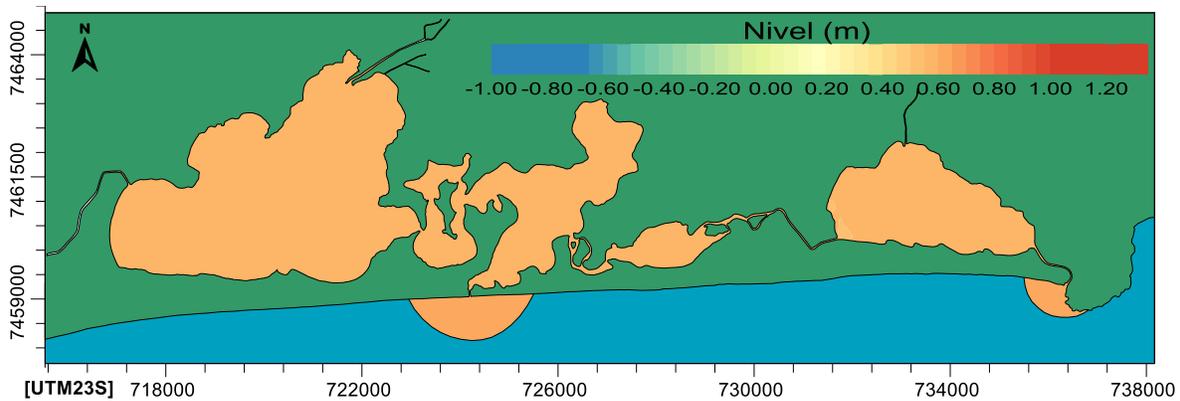


Figura 59: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

A partir dos mapas apresentados, nota-se que nos três instantes analisados, a distribuição do nível lagunar no sistema evolui de forma bastante homogênea. Apenas no instante de pico da cheia (Figura 57), a Lagoa de Guarapina apresenta um nível um pouco menor que o restante do sistema, isso devido muito provavelmente ao extravasamento pelo Canal de Ponta Negra. A evolução do nível lagunar, nesses 15 dias, pode ser melhor analisada pelo gráfico de variação horária do nível lagunar, apenas nas estações de interesse, essas Canal da Barra e Prefeitura, apresentado a seguir (Figura 60):

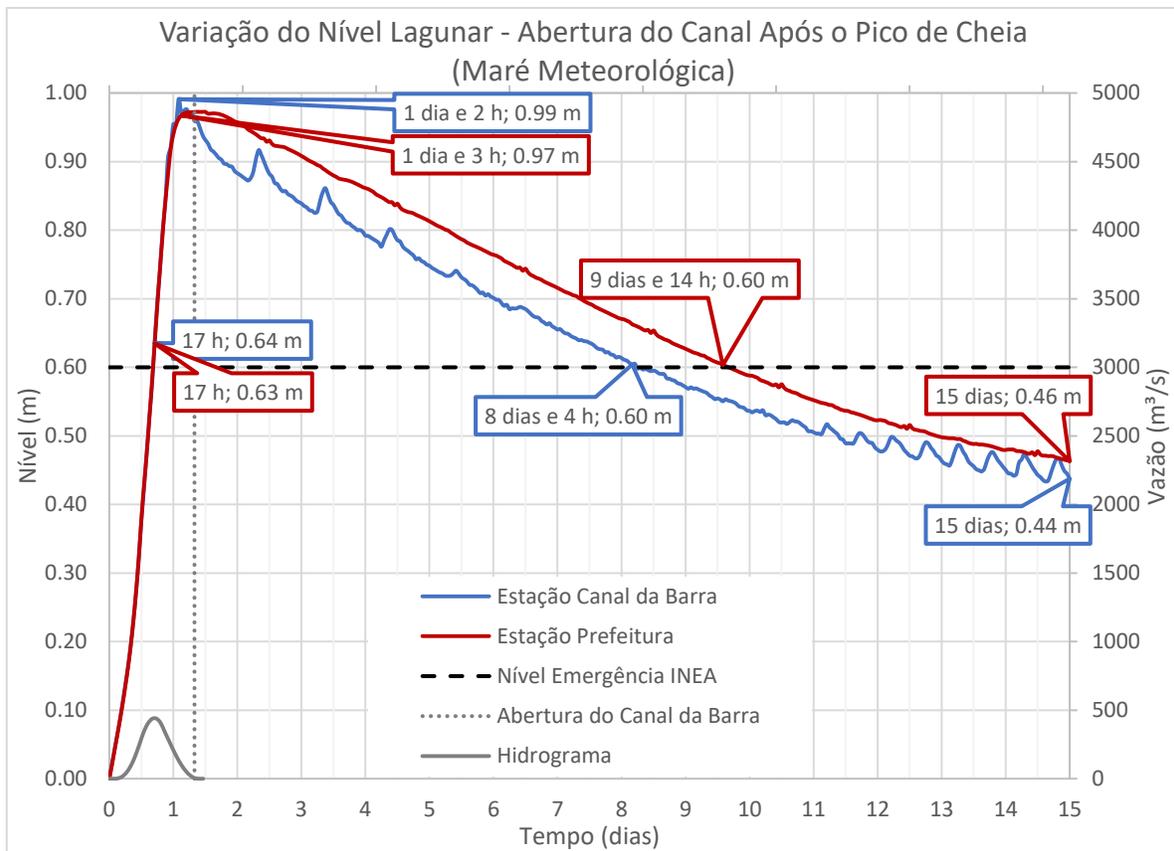


Figura 60: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura, sobreposto ao hidrograma das vazões contribuintes (m^3s^{-1}). Cenário de abertura do Canal da Barra após o pico de cheia do sistema, sendo iniciado na maré de sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir do gráfico apresentado, que o nível lagunar de emergência, foi atingido nesta simulação após, aproximadamente, 17 h do início da chuva em ambas as estações Canal da Barra e Prefeitura. Após 1 dia e 2 h, foi atingido o nível máximo lagunar desse modelo no Canal da Barra, esse no valor de 0,99 m; e após 1 dia e 3 h no valor 0,97 m na Prefeitura. Já o tempo necessário, após o início da chuva, para que o nível lagunar saísse do estado de emergência, foi de 8 dias e 4 h no Canal da Barra, e 9 dias e 14 h na Prefeitura; e finalmente, após 15 dias, o nível lagunar alcançado nas respectivas estações foi de 0,44 m e 0,46 m.

V - 3.2. Maré de Quadratura

Abaixo encontram-se os mapas de nível, em que a chuva se inicia na maré de quadratura, nos instantes 32 h, 7 dias e 15 dias, respectivamente (Figura 61; Figura 62; Figura 63):

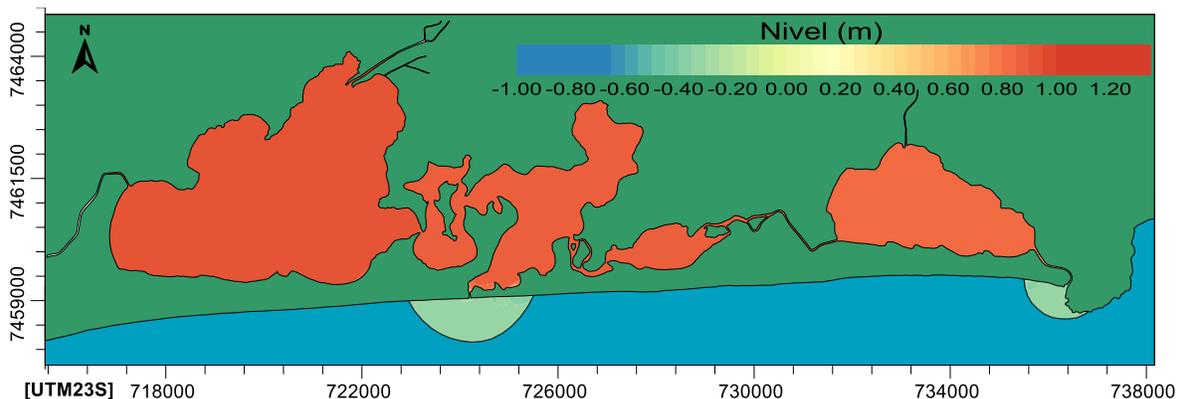


Figura 61: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a quadratura (elaboração própria).

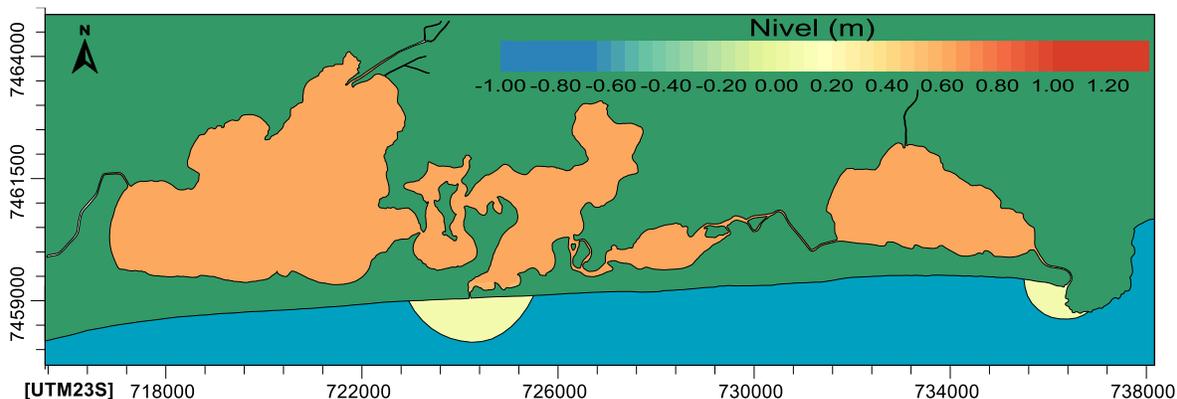


Figura 62: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a quadratura (elaboração própria).

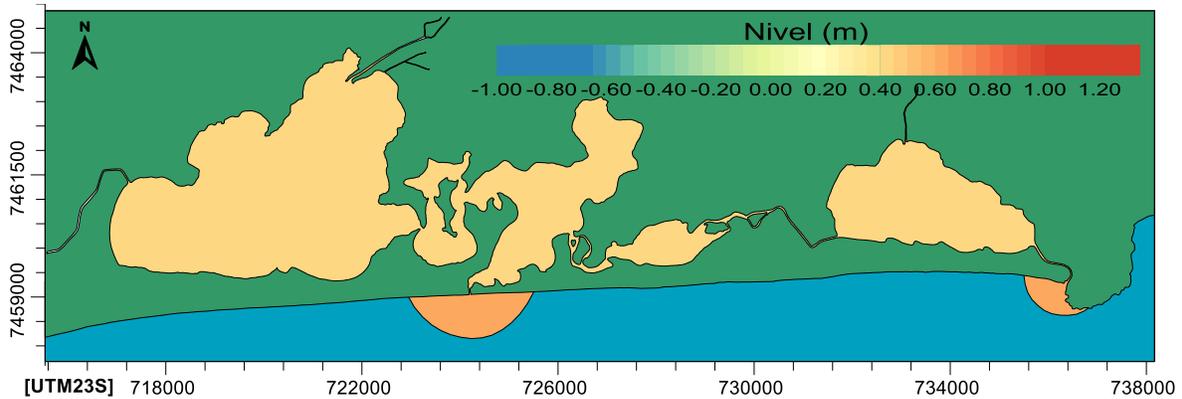


Figura 63: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto após o pico de cheia, durante a quadratura (elaboração própria).

A partir dos mapas apresentados, nota-se que, nos três instantes analisados, a distribuição do nível lagunar no sistema ainda evolui de forma bastante homogênea. Entretanto, pode-se observar ao longo dos instantes mostrados que, em relação a simulação na sizígia com a maré meteorológica positiva, a velocidade de extravasamento da cheia na quadratura é maior, ou seja, as maiores variações de nível proporcionadas pela sizígia e o aumento do NM proporcionado pela influência meteorológica, limitam o escoamento das águas do sistema lagunar para o mar. A evolução do nível lagunar, nesses 15 dias, pode ser melhor analisada pelo gráfico de variação horária do nível lagunar, apenas nas estações de interesse, essas Canal da Barra e Prefeitura, apresentado abaixo (Figura 64):

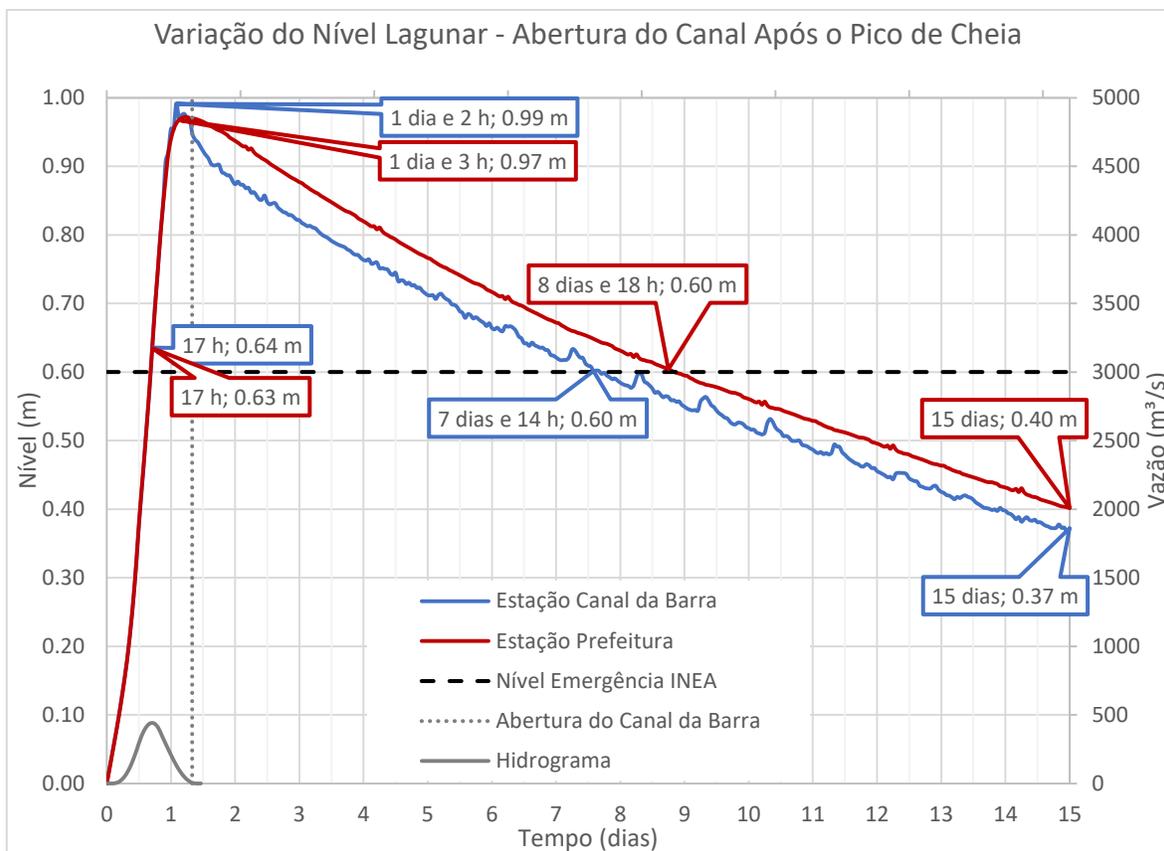


Figura 64: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura, sobreposto ao hidrograma das vazões contribuintes (m^3s^{-1}). Cenário de abertura do Canal da Barra após o pico de cheia do sistema, sendo iniciado na maré de quadratura (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir do gráfico apresentado, que o nível lagunar de emergência, foi atingido nesta simulação após, aproximadamente, 17 h do início da chuva em ambas as estações Canal da Barra e Prefeitura. Após 1 dia e 2 h, foi atingido o nível máximo lagunar desse modelo no Canal da Barra, esse no valor de 0,99 m; e após 1 dia e 3 h no valor 0,97 m na Prefeitura. Tais resultados, já haviam sido obtidos anteriormente na situação de sizígia pois, até então, o Canal da Barra se encontrava fechado nos dois casos, sendo exercida pouca influência de maré. O tempo necessário, após o início da chuva, para que o nível lagunar saísse do estado de emergência foi de 7 dias e 14 h no Canal da Barra e 8 dias e 18 h na Prefeitura; e finalmente, após 15 dias, o nível lagunar alcançado nas respectivas estações foi de 0,37 m e 0,40 m.

V - 4. Canal da Barra Aberto Antes do Evento de Chuva

Neste cenário, elaborado para analisar a influência do Canal da Barra se aberto de forma permanente durante o evento de chuva ocorrido em 29 de fevereiro de 2016, nas situações em que a chuva se inicia na maré de sizígia e na maré de quadratura, os resultados são apresentados, assim como no cenário 3, na forma de: mapas de nível, representando os instantes 32 h (pico de cheia do sistema), 168 h (7 dias) e 360 h (15 dias); e gráficos de variação horária do nível lagunar, ao longo de 15 dias, nas 2 estações no sistema lagunar de maior interesse para o trabalho, essas Canal da Barra e Prefeitura.

V - 4.1. Maré de Sizígia + Maré Meteorológica

Abaixo encontram-se os mapas de nível, em que a chuva se inicia na maré de sizígia considerando ainda uma maré meteorológica positiva, nos instantes 32 h, 7 dias e 15 dias, respectivamente (Figura 65; Figura 66; Figura 67):

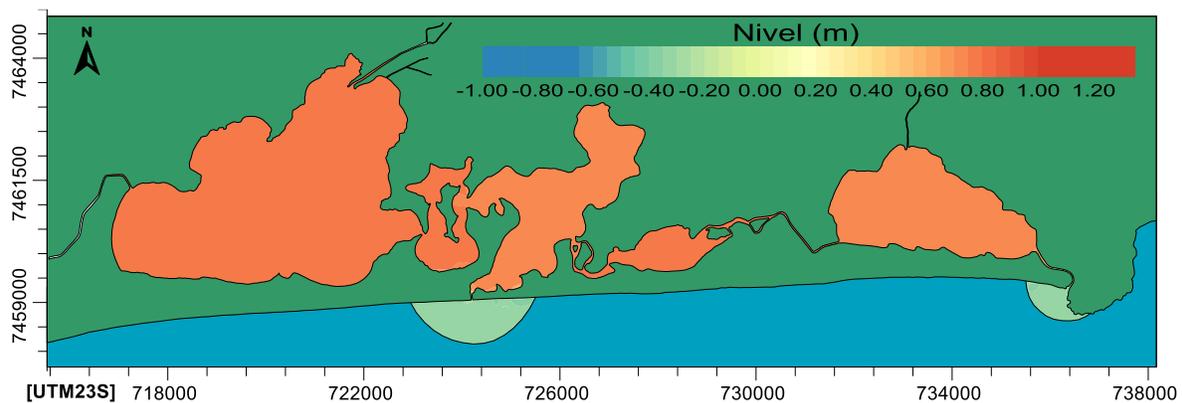


Figura 65: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

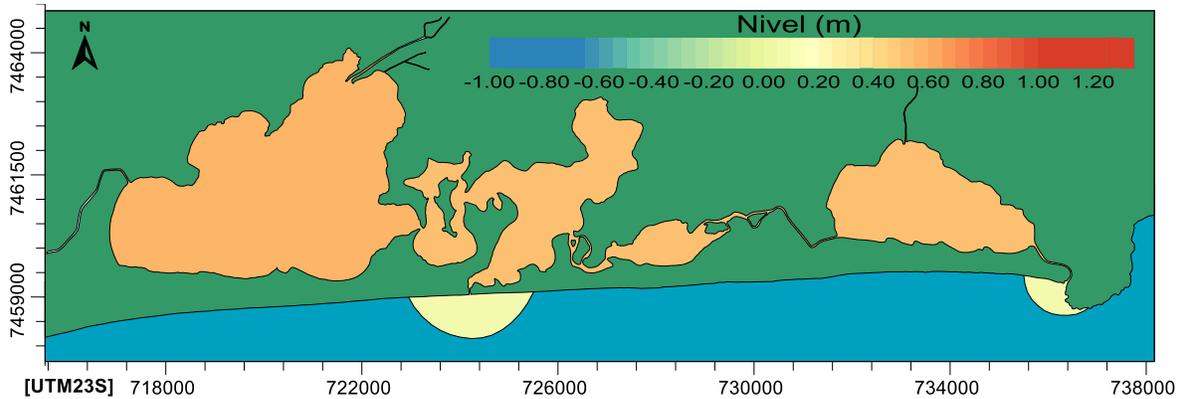


Figura 66: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

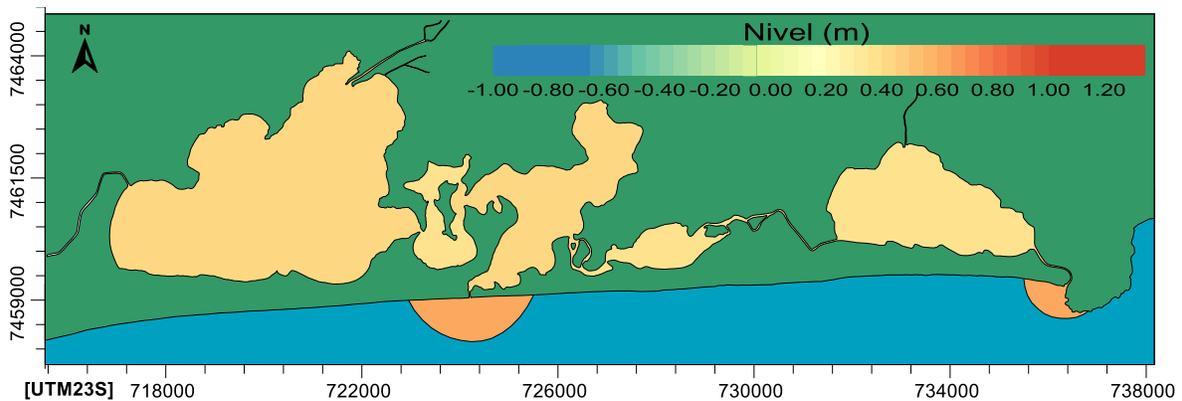


Figura 67: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

A partir dos mapas apresentados, nota-se que, nos três instantes analisados, a distribuição do nível lagunar no sistema evolui de forma bastante homogênea, assim como nas situações do cenário anterior. A evolução do nível lagunar, nesses 15 dias, pode ser melhor analisada pelo gráfico de variação horária do nível lagunar, apenas nas estações de interesse, essas Canal da Barra e Prefeitura, apresentado abaixo (Figura 68):

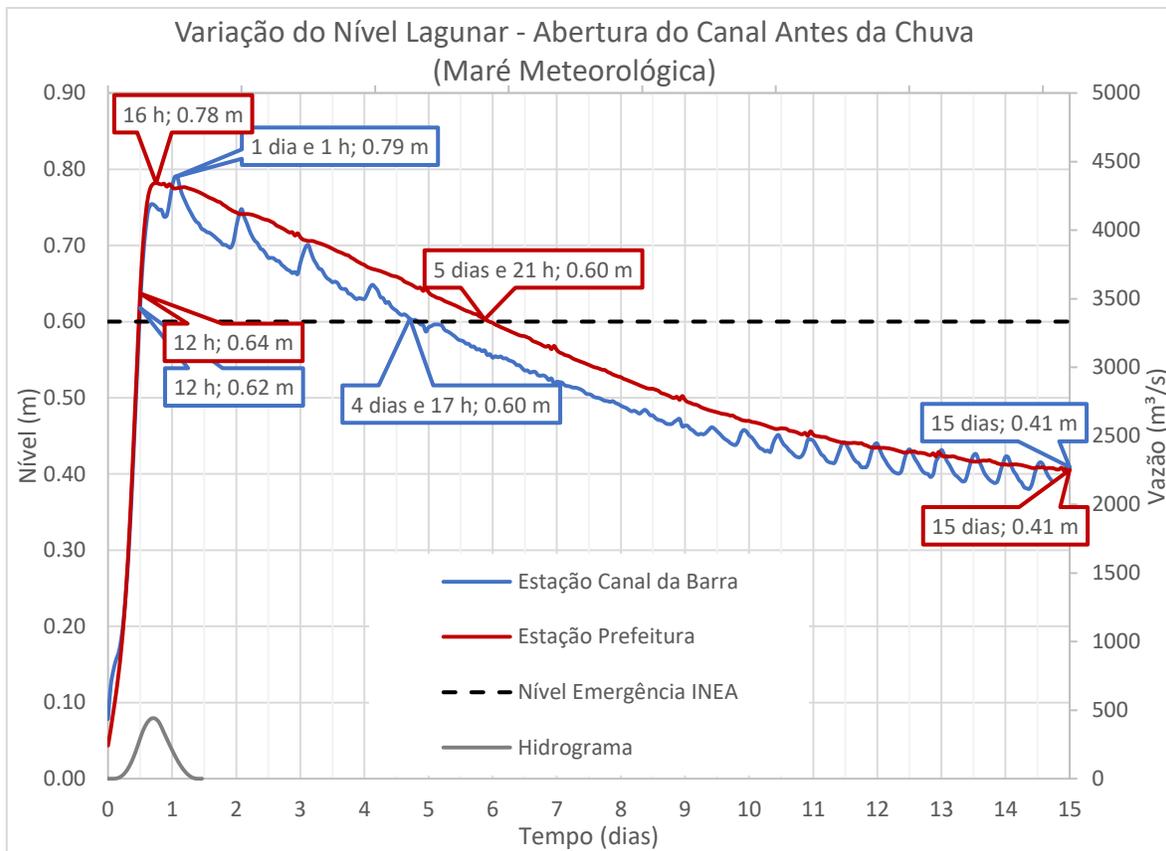


Figura 68: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura, sobreposto ao hidrograma das vazões contribuintes (m^3s^{-1}). Cenário de abertura do Canal da Barra antes da Chuva de 29/02/2016, sendo iniciado na maré de sizígia com maré meteorológica positiva (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir do gráfico apresentado, que o nível lagunar de emergência, foi atingido nesta simulação, após, aproximadamente, 12 h do início da chuva, em ambas as estações Canal da Barra e Prefeitura. Após 1 dia e 1 h foi atingido o nível máximo lagunar desse modelo no Canal da Barra, no valor de 0,79 m; e após 16 h na Prefeitura, no valor de 0,78 m. O tempo necessário, após o início da chuva, para que o nível lagunar saísse do estado de emergência foi de 4 dias e 17 h no Canal da Barra, e 5 dias e 21 h na Prefeitura; e finalmente, após 15 dias, o nível lagunar alcançado em ambas as estações foi de 0,41 m.

V - 4.2. Maré de Quadratura

Abaixo encontram-se os mapas de nível, em que a chuva se inicia na maré de quadratura, nos instantes 32 h, 7 dias e 15 dias, respectivamente (Figura 69; Figura 70; Figura 71):

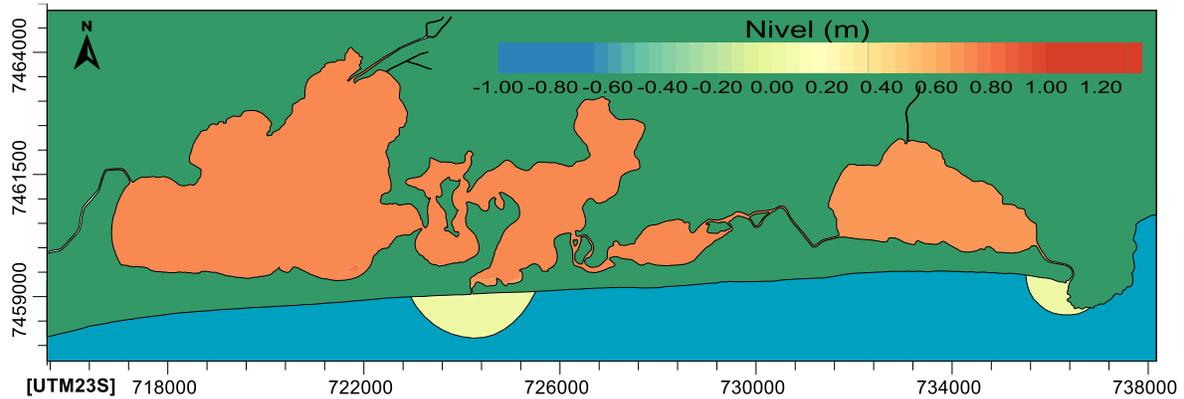


Figura 69: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 32$ h (pico de cheia), após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a quadratura (elaboração própria).

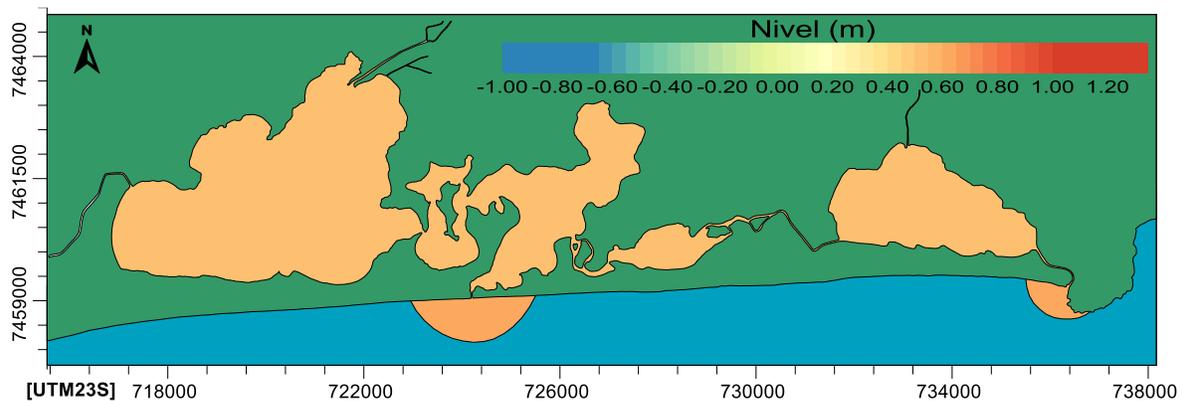


Figura 70: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 7$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a quadratura (elaboração própria).

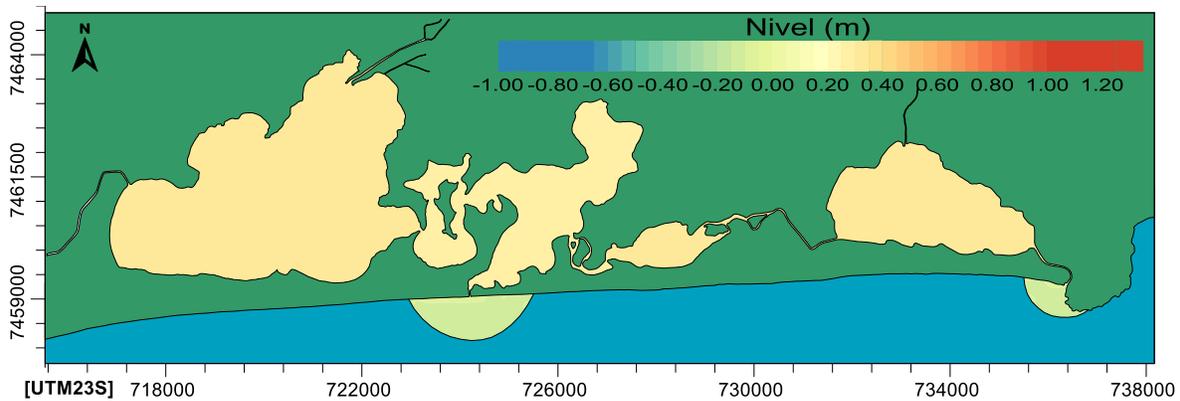


Figura 71: Mapa de nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá no instante $t = 15$ dias, após o início da chuva, caso o Canal da Barra seja aberto antes do início da chuva, durante a quadratura (elaboração própria).

A partir dos mapas apresentados, nota-se que nos três instantes analisados, a distribuição do nível lagunar no sistema continua a evoluir de forma bastante homogênea, como em todas as situações anteriores. Porém, observa-se que a velocidade de extravasamento da cheia no cenário 4 é menor que no cenário 3, devido a menor carga hidráulica envolvida no pico de cheia. A evolução do nível lagunar, nesses 15 dias, pode ser melhor analisada pelo gráfico de variação horária do nível lagunar, apenas nas estações de interesse, essas Canal da Barra e Prefeitura, apresentado abaixo (Figura 72):

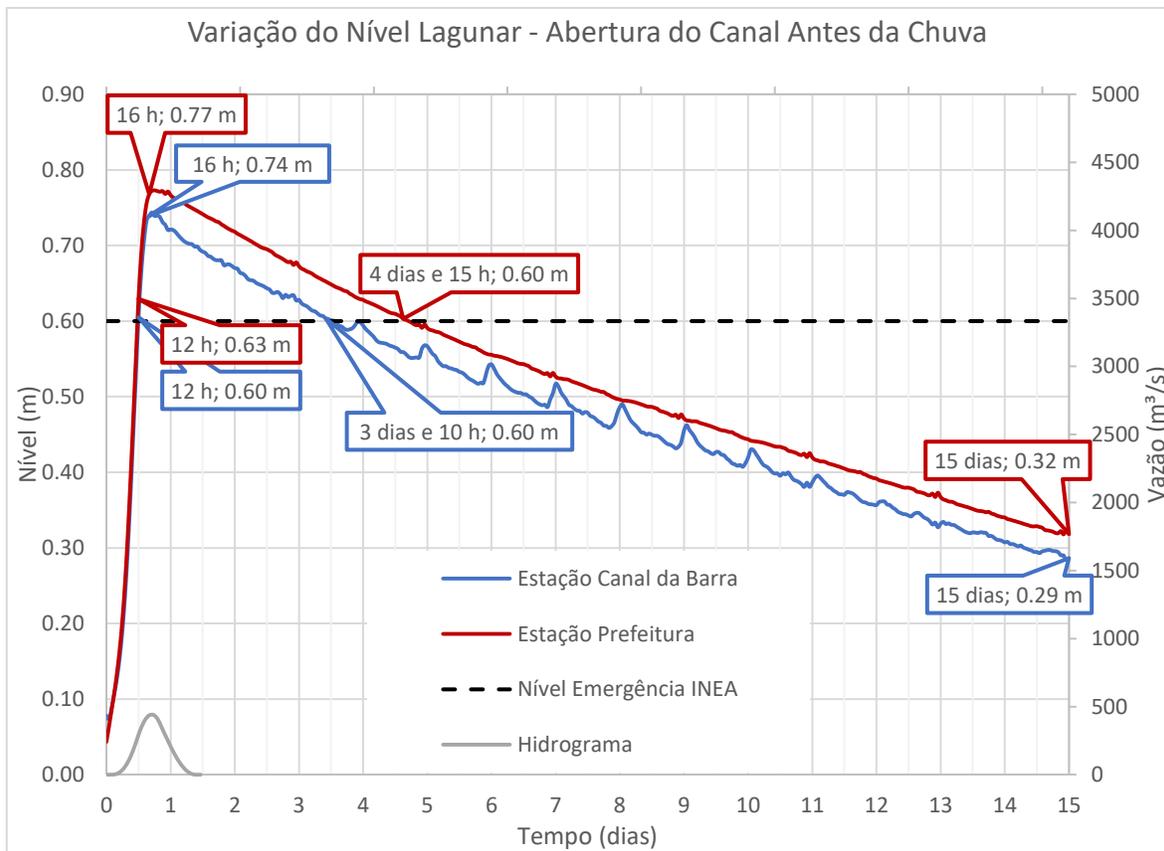


Figura 72: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para as estações Canal da Barra e Prefeitura, sobreposto ao hidrograma das vazões contribuintes (m^3s^{-1}). Cenário de abertura do Canal da Barra antes da Chuva de 29/02/2016, sendo iniciado na maré de quadratura (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir do gráfico apresentado, que o nível lagunar de emergência, foi atingido nesta simulação, após, aproximadamente, 12 h do início da chuva em ambas as estações Canal da Barra e Prefeitura. Após 16 h, foi atingido o nível máximo lagunar desse modelo, esse no valor de 0,74 m no Canal da Barra e 0,77 m na Prefeitura. O tempo necessário, após o início da chuva, para que o nível lagunar saísse do estado de emergência foi de 3 dias e 10 h no Canal da Barra e 4 dias e 15 h na Prefeitura; e finalmente, após 15 dias, o nível lagunar alcançado nas estações foi de 0,29 m e 0,32m, respectivamente.

VI - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo como base todos os resultados gerados pelas simulações nos diferentes cenários propostos, se torna possível uma análise comparativa entre os mesmos, quantificando e qualificando a influência do Canal da Barra. Conseqüentemente, se podem definir as situações mais e menos favoráveis ao controle de cheias do Sistema Lagunar de Maricá.

VI - 1. Comparação de Cenários

A comparação entre os cenários foi realizada para cada estação de maior interesse, essas as estações Canal da Barra e Prefeitura. Dessa forma, pôde-se avaliar melhor as diferenças na variação de nível em uma estação específica ao longo do tempo. Essa avaliação se deu através de gráficos das séries de nível produzidas, para o período de 15 dias após o início da chuva, nas quatro situações modeladas nos dois principais cenários, sendo esses o cenário 3, onde o Canal da Barra é aberto após a chuva, e o cenário 4, onde o Canal da Barra é aberto antes da chuva, e ainda na situação modelada para o cenário 2, onde o Canal da Barra se mantém fechado ao longo dos 15 dias. Tendo em vista que a comparação dos cenários foi realizada a longo prazo, foi desconsiderado o melhor horário de abertura do canal entre preamares e baixa-mares. Apesar da oscilação de nível do mar ao longo de um ciclo de maré com predominância semi-diurna, o nível lagunar está bem acima do nível do mar no momento da abertura e, além disso, o extravasamento da cheia pelo canal é um processo bastante lento. Abaixo são apresentados os gráficos de nível comparativos da estação Canal da Barra e Prefeitura, respectivamente (Figura 73; Figura 74):

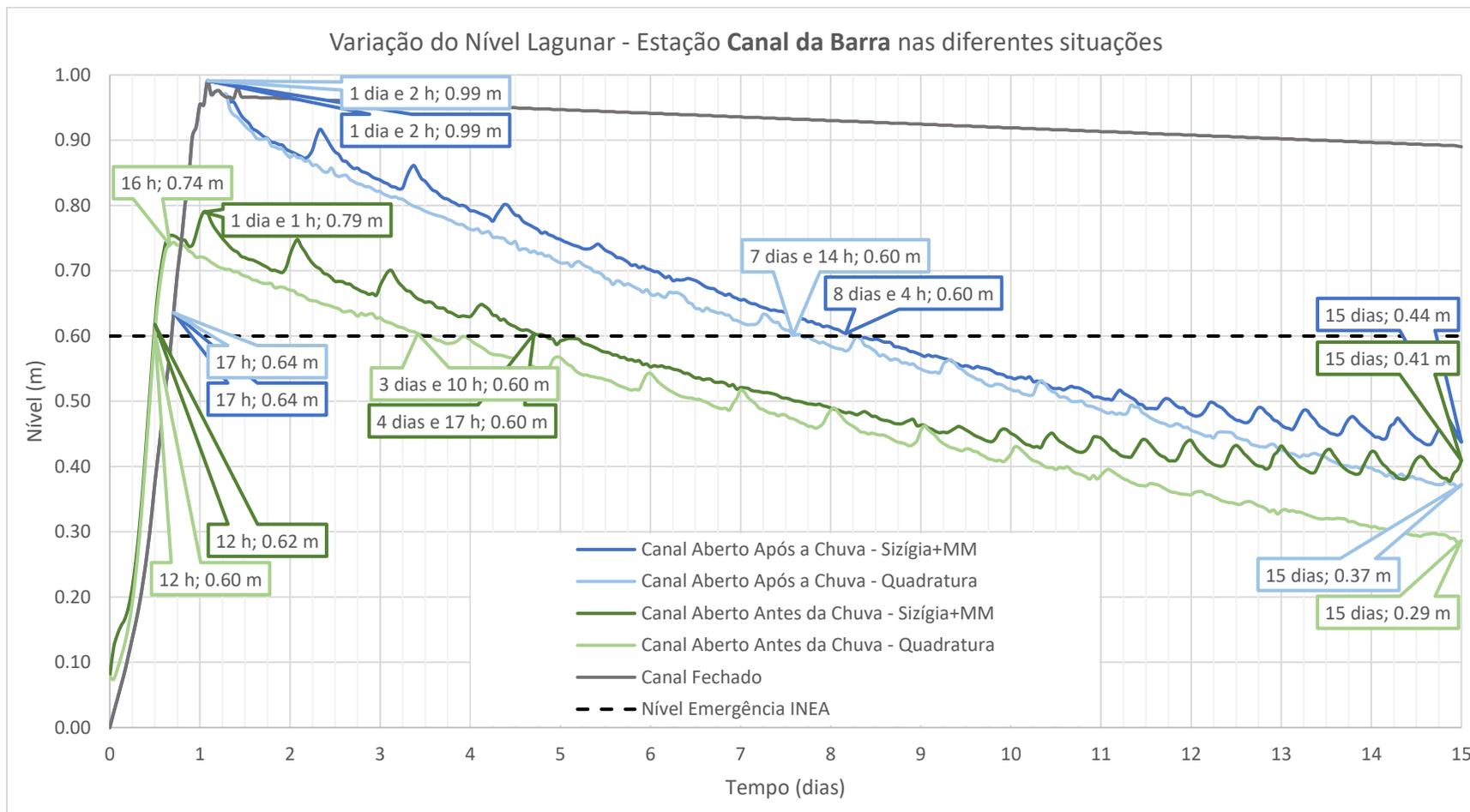


Figura 73: Gráfico comparativo de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para a estação Canal da Barra nas conjunturas 2; 3.1; 3.2; 4.1 e 4.2 (elaboração própria).

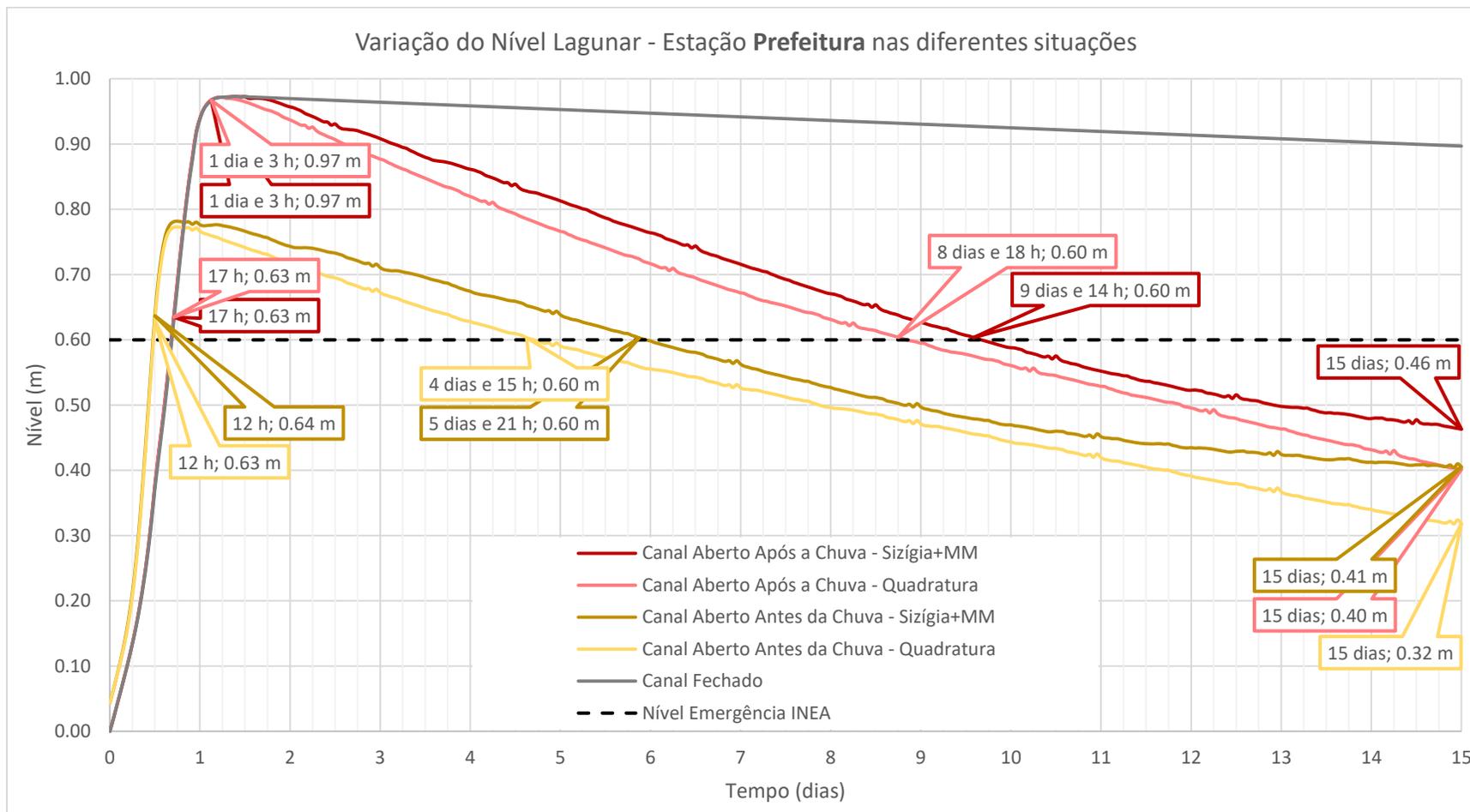


Figura 74: Gráfico comparativo de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias) para a estação Prefeitura nas conjunturas 2; 3.1; 3.2; 4.1 e 4.2 (elaboração própria).

Particularmente, a situação exposta no cenário 2 seria, de fato, a menos aceitável para o controle da cheia do sistema, pois a redução do nível lagunar não ultrapassa 10 cm, em ambas as estações, fazendo com que o nível se mantenha muito acima do nível de alerta ao longo de todo o período analisado. Verificando as outras quatro situações, o padrão da variação de nível nas duas estações, Canal da Barra e Prefeitura, diferem em alguns pontos, porém seguem a mesma tendência quanto às diferentes conjunturas. As diferenças observadas entre as duas estações são, principalmente:

- ✓ Maior influência do ciclo de maré na região do Canal da Barra, por estar localizada mais próxima ao mar, facilmente observada pela variação de níveis entre as preamares e baixa-mares e entre as marés de sizígia e quadratura;
- ✓ Valores máximos de nível lagunar, atingidos no pico da cheia no Canal da Barra, são maiores cerca de 2 cm, em relação à Prefeitura, devido a maior exposição aos efeitos de elevação de maré astronômica e meteorológica, além da enorme carga de vazão recebida de grande parte do sistema em situações de chuva;
- ✓ Maior rapidez na redução do nível no Canal da Barra, devido a maior facilidade locacional de extravasamento para o mar nessa região, em comparação com a região da Prefeitura. Essa última região, além de apresentar maiores dificuldades para a drenagem de alagamentos, também se limita aos canais assoreados e estrangulamentos que restringem o escoamento das águas para o mar;
- ✓ Saída mais rápida da situação de emergência no canal da Barra (1 dia a menos que na Prefeitura), caracterizada pelo nível de 60 cm acima do NM. Isso, devido à redução mais veloz do nível lagunar no Canal da Barra, mesmo ambas as estações atingindo o nível de emergência, aproximadamente, no mesmo instante, e a estação Canal da Barra atingir níveis máximos ainda maiores;
- ✓ Alcance de níveis lagunares até 3 cm menores no Canal da Barra se comparado à Prefeitura, após o período de 15 dias, devido a maior velocidade de escoamento e maior proximidade com o mar na região do Canal da Barra, assim como maior

influência da maré nessa região, fazendo com que seu nível entre em equilíbrio com o nível do mar mais facilmente.

Já os padrões mais representativos, observados em ambas as estações, quanto as peculiaridades de cada cenário são:

- ✓ Quando o Canal da Barra é aberto após o pico de cheia do evento de chuva, a rapidez no aumento de nível do sistema até o pico de cheia é menor, porém são alcançados valores de nível máximos maiores 20 cm, aproximadamente, que na situação onde o canal é aberto antes da chuva. Já, a rapidez na redução do nível após o pico de cheia, quando o canal é aberto após esse pico, se torna maior do que aquela atingida quando o canal é aberto antes da chuva. Assim, para a abertura após o pico de cheia, o nível de emergência é atingido, pela primeira vez, em torno de 5 h depois da situação de abertura antes da chuva. Entretanto, o mesmo demora cerca 4 dias a mais, se comparado à quando o canal é aberto antes da chuva, para sair da zona de emergência. Após 15 dias, a diferença entre os níveis nas duas situações de abertura do canal cai de 20 cm, no pico de cheia do sistema, para algo entre 3 a 8 cm.
- ✓ As variações entre a maré de sizígia e a maré de quadratura, nos instantes de abertura do canal, são mais amenas que as variações entre as situações antes e após a chuva. Porém, a principal observação é o fato da variação do nível lagunar reduzir mais lentamente na sizígia do que na quadratura. Consequentemente, se mantém uma pequena diferença, de alguns centímetros, no nível entre as duas situações de maré, sendo que essa diferença tende a aumentar durante o período de sizígia e tende a diminuir durante o período de quadratura. Assim, essa diferença entre as marés de sizígia e quadratura, gera uma permanência do nível lagunar na zona de emergência, de 1 dia a mais quando a abertura do canal é realizada na maré de sizígia com influência meteorológica positiva, se comparada à quando a abertura do canal é realizada na maré de quadratura, mesmo, em ambas as situações, a entrada na zona de emergência ocorrendo no mesmo instante. Isso acontece, devido ao acréscimo na elevação do nível do mar produzido pela maré meteorológica e pelas maiores

oscilações de nível, entre as preamares e baixa-mares, geradas pela maré astronômica de sizígia.

A partir dessa análise comparativa, pode-se concluir que a situação mais eficiente para o Canal da Barra no controle de cheias do Sistema Lagunar de Maricá, foi a conjuntura apresentada em 4.2, onde o Canal da Barra é aberto antes da chuva durante a maré de quadratura. Essa, além de atingir os menores níveis de pico de cheia, tem seu nível lagunar acima do nível de emergência, aproximadamente, metade do tempo em que se mantém no cenário em que o canal é aberto após o pico de cheia do evento de chuva. E, não só seu nível lagunar é o menor após os 15 dias de simulação, como também se mantém o menor ao longo de todo esse período simulado.

VI - 2. Canais de Profundidade Alternativa

A partir da configuração do cenário 4, definido entre os cenários propostos como melhor limitante do nível lagunar a partir da abertura do Canal da Barra para uma necessidade de controle de cheia, foram analisados canais permanentes com profundidades alternativas ao até então analisado, com o objetivo de alcançar uma profundidade ótima que resulte no menor nível lagunar máximo possível. Ainda, levando em consideração o evento de chuva extrema de 2016, e uma situação de abertura em uma maré de sizígia com influência meteorológica positiva, visando uma situação que acarretaria em um maior aumento do nível lagunar.

A profundidade limitante do Canal da Barra proposto até o momento foi de 0,34 m, como já citado anteriormente. Já os canais propostos, alternativos a esse, tiveram suas profundidades médias definidas em 1 m e 2 m, respectivamente. Logo, foram simulados modelos hidrodinâmicos para ambos os canais alternativos nas mesmas condições que na conjuntura 4.1, sendo a atualização da batimetria do canal para as novas profundidades a única modificação. Os resultados de variação de nível ao longo do tempo das simulações para o Canal da Barra de 1 m (Figura 75) e 2 m (Figura 76) de profundidade, respectivamente, são apresentados nos gráficos a seguir:

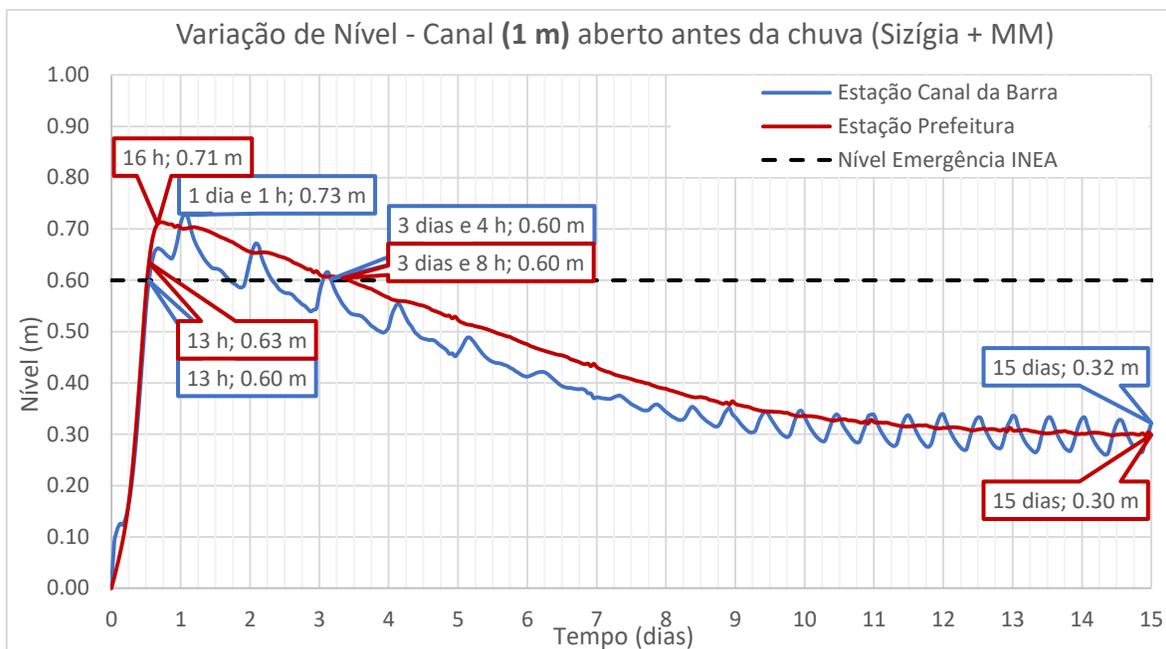


Figura 75: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para as estações Canal da Barra e Prefeitura, considerando o Canal da Barra com 1 m de profundidade, aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria).

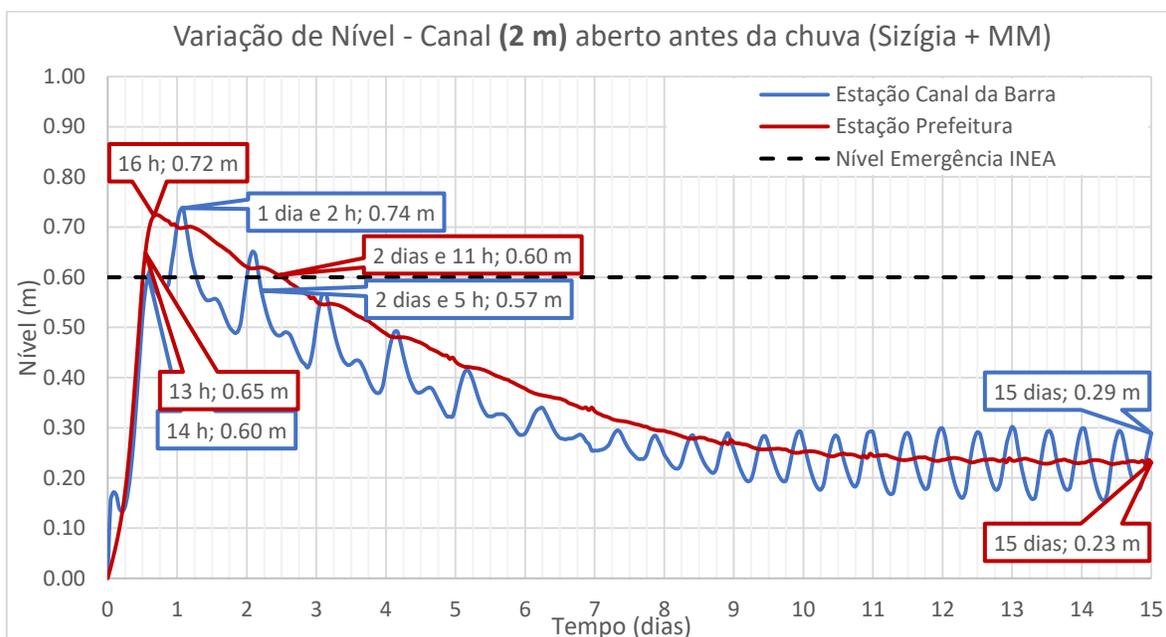


Figura 76: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para as estações Canal da Barra e Prefeitura, considerando o Canal da Barra com 2 m de profundidade, aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria).

Pode-se observar, a partir dos gráficos apresentados, que o nível lagunar de emergência, foi atingido nessas simulações após, aproximadamente, 13 h do início da chuva, em ambas as estações e canais propostos, com exceção da estação Canal da Barra no canal de 2 m de profundidade, em que esse tempo foi de 14 h. Após 16 h, foi atingido o nível máximo lagunar na Prefeitura nos canais de 1 m e 2 m de profundidade, nos valores de 0,71 m e 0,72 m, respectivamente. Enquanto, no Canal da Barra, os níveis máximos alcançados foram de 0,73 m, após 1 dia e 1 h, e 0,74 m, após 1 dia e 2 h, nos canais de 1 m e 2 m de profundidade, respectivamente.

O tempo necessário, após o início da chuva, para o nível lagunar sair do estado de emergência no canal de 1 m de profundidade foi de 3 dias e 4 h, no Canal da Barra, e 3 dias e 8 h na Prefeitura; enquanto esse tempo, no canal de 2 m de profundidade, foi de 2 dias e 5 h, no Canal da Barra, e 2 dias e 11 h, na Prefeitura. E finalmente, após 15 dias, o nível lagunar alcançado no canal de 1 m de profundidade foi de 0,32 m, no Canal da Barra, e 0,30 m, na Prefeitura; enquanto esse nível no canal de 2 m de profundidade foi de 0,29 m, no Canal da Barra, e 0,23 m, na Prefeitura.

Para uma comparação mais apurada entre os canais alternativos propostos, e também o canal definido para as análises anteriores, foram elaborados gráficos contendo a variação do nível lagunar ao longo do tempo para cada estação de maior interesse. Esses gráficos, comparando as simulações com diferentes profundidades de canal para a estação Canal da Barra (Figura 77) e Prefeitura (Figura 78) são apresentados a seguir:

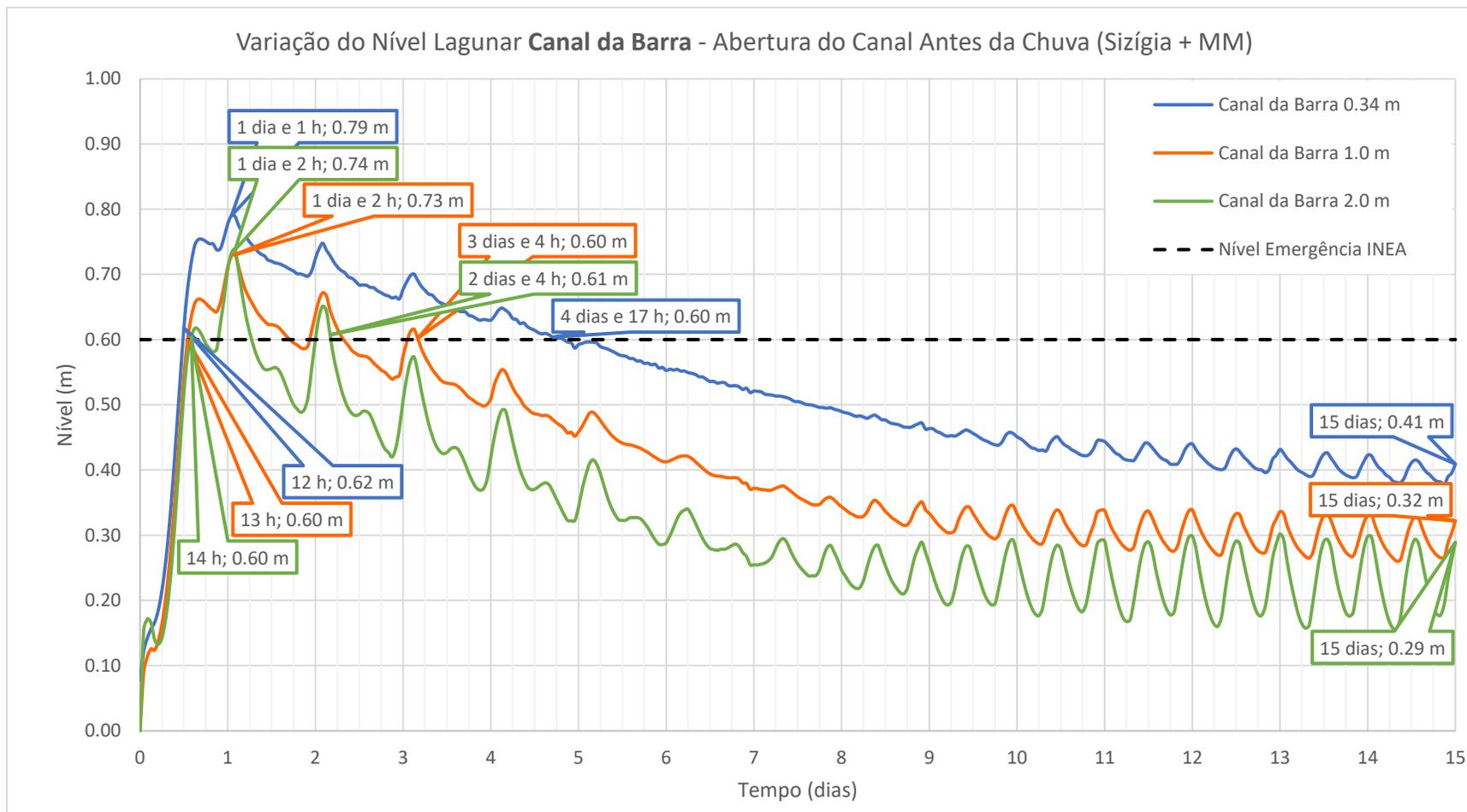


Figura 77: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para a estação Canal da Barra, comparando as profundidades propostas para o Canal da Barra, esse aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria).

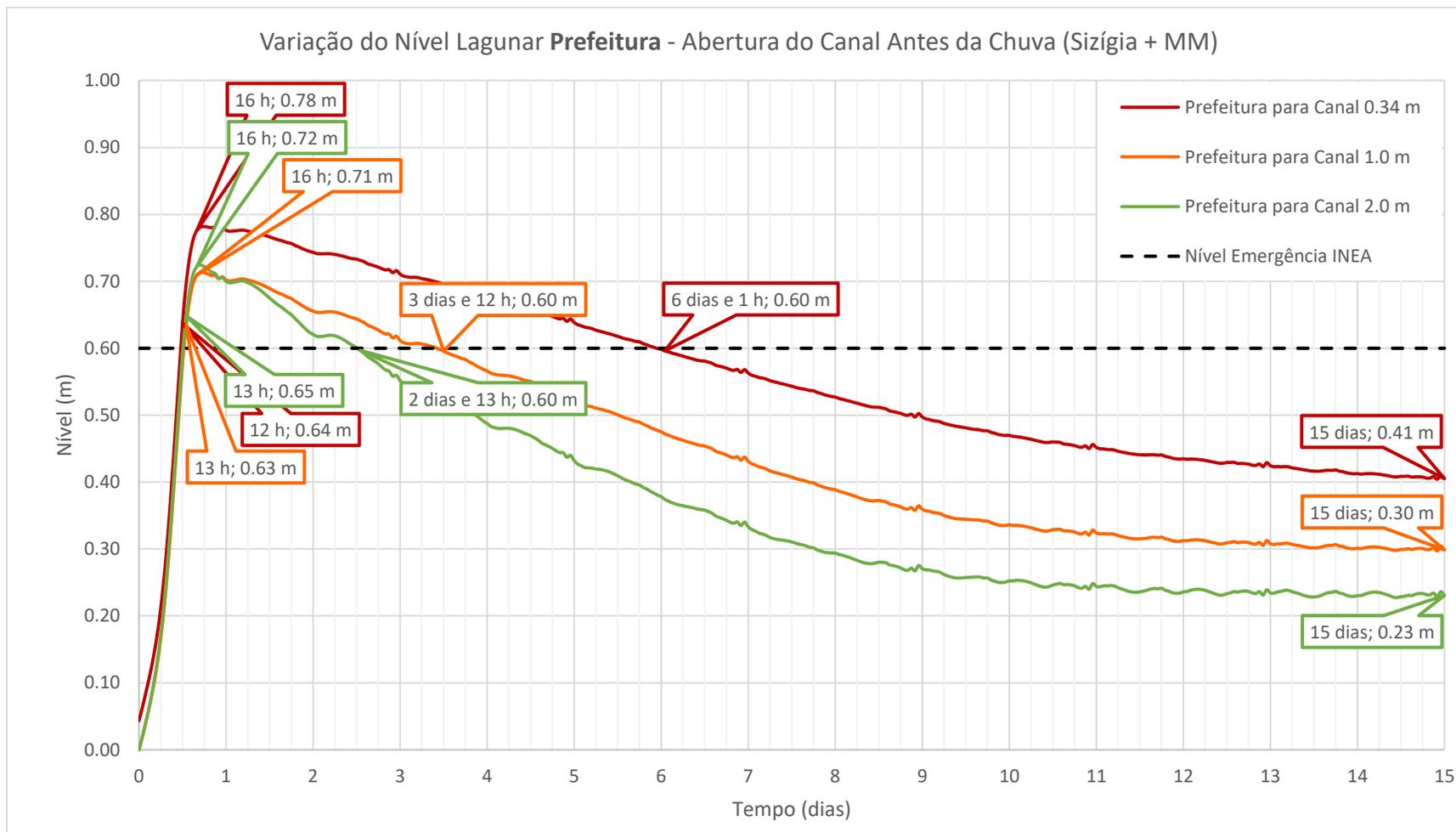


Figura 78: Gráfico de variação do nível lagunar (m) ao longo do tempo (dias), para a estação Canal da Barra, comparando as profundidades propostas para o Canal da Barra, esse aberto antes da chuva na maré de sizígia com influência meteorológica positiva (elaboração própria).

A partir dos gráficos acima, pode-se observar, claramente, que, quanto maior a profundidade do canal, maior a influência da maré nos níveis dentro do sistema lagunar. Essa influência é observada tanto nas marés de sizígia quanto nas marés de quadratura, principalmente, no Canal da Barra. Além disso, quanto maior a profundidade, mais rápida é a redução do nível lagunar, quando esse se encontra acima do nível de emergência, porém, após deixado o nível de emergência, essa taxa de redução passa a independe da profundidade, e ter praticamente o mesmo valor em qualquer uma das profundidades propostas, fazendo com que a diferença de nível entre dois dos canais alternativos propostos seja quase que constante. Outro fato interessante, é a contínua queda nessa taxa de redução de nível ao longo do tempo, tendendo até mesmo a zero, proporcionando uma consequente estabilização dos níveis lagunares após 15 dias, os quais entram em equilíbrio com o nível do mar, considerando o efeito positivo da onda de maré meteorológica com período de 12 dias.

Já em relação ao nível máximo lagunar atingido, entre os canais de profundidades 0,34 m e 1 m, a redução desse nível foi considerável, cerca de 10 cm. Entretanto, entre os canais de profundidades 1 m e 2 m, esse aumento na profundidade já não exerceu grande diferença para o controle do nível d'água, ou seja, ao invés de reduzir ainda mais o nível máximo lagunar atingido, como no caso citado anteriormente, ainda o aumentou em 1 cm, tanto no Canal da Barra quanto na Prefeitura. Isso se deu, muito provavelmente, a maior exposição do sistema às variações de nível de maré astronômica e meteorológica, a um limite de escoamento geral do sistema devido aos vários estrangulamentos e canais conectores assoreados, ou mesmo a velocidades de corrente máximas limitantes no Canal da Barra que são incapazes de compensar às vazões contribuintes ao sistema, entre diversos outros fatores possíveis.

Quanto ao tempo necessário para que o nível lagunar saia do quadro de emergência, do canal de 0,34 m para o canal de 1 m de profundidade, ocorreu uma considerável redução desse tempo, algo entre 32% e 42%. Já do canal de 1 m para o canal de 2 m de profundidade, essa redução foi bem menor, cerca de 27% e 32%. Logo, quanto ao período em que o nível lagunar se encontra acima do limite de emergência, o canal de 2 m de profundidade se mostrou ainda um pouco mais eficiente, aproximadamente 1 dia; porém, em relação ao nível máximo lagunar alcançado, o canal de 1 m de profundidade demonstrou maior eficiência, 1 cm a

menos, apesar de sua profundidade média ser a metade daquela do canal de 2 m de profundidade.

VII - CONSIDERAÇÕES FINAIS

VII - 1. Conclusões

Em tempos passados, antes da urbanização da região e das obras hidráulicas de canais artificiais, o Sistema Lagunar de Maricá funcionava em regime de cheias. Isto é, não contava com canais permanentes de maré, logo o nível lagunar costumava ficar em torno de 1 m acima do NM local. Os canais de cheia se formavam naturalmente ao longo dos cordões arenosos costeiros mais susceptíveis ao escoamento, e assim o nível lagunar se aproximava ao NM local, promovendo assim, troca entre o sistema e o mar até o ponto em que esses canais se fechavam naturalmente, sendo reabertos somente na próxima cheia.

Atualmente, não só uma grande quantidade de pessoas habita as margens do Sistema Lagunar, como também existem áreas comerciais, industriais, rurais e urbanizadas em geral, em praticamente toda a região ao redor do sistema. Logo, tendo em vista as baixas altitudes da região, não é interessante que o sistema funcione em regime de cheias como no passado, pondo em risco a infraestrutura urbana e a segurança da população. Nos dias de hoje, apesar do sistema lagunar funcionar em regime de marés devido aos canais artificiais de Ponta Negra e da Costa, esses se encontram assoreados e não promovem o extravasamento de água necessário para o sistema em épocas de cheia.

Uma alternativa, seria proporcionar ao sistema um regime de marés eficiente, através de canais permanentes ou semipermanentes seguramente projetados, e dessa maneira, o nível lagunar não atingiria valores tão altos, pois estaria em equilíbrio com o regime de marés local. Apesar do nível do mar variar consideravelmente, essa variação seria amortecida e atrasada dentro do sistema lagunar, principalmente devido às limitações de escoamento dentro do mesmo, fazendo com que o nível lagunar variasse mais suavemente, proporcionando, assim, uma possível maior segurança para a cidade.

Além da possibilidade de redução do nível lagunar em casos de cheia, canais permanentes também aumentam a troca entre o sistema lagunar e o mar, essa essencial para a manutenção da vida nas lagoas, proporcionando maior renovação da água do sistema e melhorando a qualidade da água do mesmo. Essa troca, entretanto, não se recomenda que seja muito intensa

para não impactar negativamente a hidrodinâmica lagunar e biodiversidade do sistema. Vale observar, que limitar essa troca também previne a influência exagerada do regime de marés no sistema, o que acarretaria em maiores oscilações de nível, de velocidades de corrente, de salinidade e maior erosão e transporte de sedimentos. Logo, a seção hidráulica de um canal permanente, deve ser cautelosamente calculada para que o mesmo tenha eficácia máxima no controle de cheias e no equilíbrio do sistema, como um todo.

Este trabalho, se propôs a analisar a eficácia do Canal da Barra no nível d'água do Sistema Lagunar de Maricá, tendo em vista o controle de cheia do sistema em um evento extremo de chuva como o do dia 29 de fevereiro 2016, a partir de diferentes cenários de abertura artificial, considerando a batimetria local e influência da maré, chuva e vento. Essa análise, se tornou possível, principalmente, devido ao auxílio do Trabalho de Campo realizado, esse essencial para a coleta de dados confiáveis, e modelagem computacional através do software SisBaHiA®, essa essencial na geração de resultados úteis a partir desses dados.

Os resultados obtidos nos modelos do cenário 1, definiram as características hidrodinâmicas do sistema lagunar de interesse para o trabalho, assim como verificaram a influência da batimetria, regime de marés e vento locais. Já os resultados gerados no modelo do cenário 2 validaram a confiabilidade dos dados de entrada e do modelo hidrodinâmico ambiental, atingindo os valores de nível lagunar esperados. E, finalmente, os cenários de chuva extrema 3 e 4, trouxeram resultados bastante significativos para as diferentes situações propostas de abertura do Canal da Barra, e possibilitaram uma análise concreta da eficácia do canal, na redução de nível e na rapidez dessa redução, para escolha da melhor conjuntura.

A conjuntura mais favorável escolhida foi a 4.2, propondo a abertura do canal antes do início do evento de chuva durante a maré de quadratura, por atingir os menores níveis de pico de cheia e manter o nível dentro da zona de emergência pelo menor tempo, além de seu nível ter o menor valor durante todo o tempo analisado. E, a partir dessa constatação, foi analisada a profundidade ideal para esse canal, através de alterações na batimetria produzida. Foram estipulados canais de 1 m e 2 m de profundidade, os quais foram comparados com o canal até então estudado de profundidade limitante de 0,34 m.

Os canais alternativos propostos se mostraram bastante eficientes na redução do nível máximo atingido com a cheia, alcançaram uma redução de aproximadamente 10 cm se comparados ao canal de 0,34 m de profundidade na mesma situação. Seus níveis máximos atingidos foram cerca de apenas 10 cm acima do nível de emergência (60 cm acima do NM local) e se mantiveram nessa situação por, aproximadamente, metade do tempo se comparados ao canal de 0,34 m de profundidade. Em relação aos dois novos canais propostos, esses tiveram, aproximadamente, a mesma eficiência quanto à redução do nível máximo, apresentando uma diferença de apenas 1 cm, favorável ao canal de 1 m de profundidade. Porém, o canal de 2 m de profundidade, se mostrou mais eficiente na redução do nível lagunar ao longo do tempo, tendo em vista que o canal sai, aproximadamente, 1 dia antes do quadro de emergência estipulado pelo INEA, se comparado ao canal de 1 m de profundidade.

Tendo em vista todas as informações fornecidas, a partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se que para o controle de cheia (redução do nível d'água) do Sistema Lagunar de Maricá, em uma situação de chuva extrema, o Canal da Barra se mostra um importante instrumento se: aberto artificialmente antes do início do evento de chuva, ou mesmo de forma permanente; e tendo uma seção transversal ótima, onde se atinja o menor nível lagunar possível e a maior rapidez na redução desse nível, atentando para os fatores limitantes do escoamento e os possíveis impactos ambientais envolvidos.

VII - 2. Recomendações

Durante o processo de elaboração do presente trabalho, foram observados alguns pontos que poderiam ser estudados mais a fundo ou considerados em um próximo trabalho com um tema similar ou seguindo a mesma linha. Esses pontos envolvem desde conceitos de hidráulica e hidrodinâmica a fundamentos de hidrologia.

Tendo em vista a eficácia de um canal no controle de cheias de um sistema lagunar, um estudo mais aprofundado de estabilidade seria fortemente recomendado. Quando projetado um canal em um sistema lagunar costeiro, é de grande importância uma avaliação da sua estabilidade hidro-sedimentológica, ou seja, uma análise mais refinada quanto aos fatores hidráulicos como velocidades de corrente e cargas de volume d'água, e também quanto aos fatores sedimentológicos como morfologia do canal e transporte de sedimentos.

Outra importante consideração, seria uma análise mais detalhada, não só da profundidade, mas de uma seção transversal ideal, assim como de toda a geometria do canal. Uma sugestão, seria o amplo estudo da região onde se localiza todo o sistema lagunar para a escolha dos pontos mais apropriados para a abertura de canais artificiais de controle de cheias. Foi observado neste trabalho que, algumas lagoas do sistema, além de assoreadas e degradadas, não se comunicam bem com o restante do sistema, devido, principalmente, a canais conectores e ligantes com o mar bastante obstruídos. Por isso, além da possibilidade de dragagem dos canais internos ao sistema, seria interessante a possibilidade de abertura de outros canais de troca com o mar para, não só facilitar o escoamento das águas da chuva, como também propiciar melhora nos aspectos biogeoquímicos do sistema, trazendo assim benefícios à comunidade pesqueira local.

Em relação a área da hidrologia, recomenda-se um estudo de risco associado às variáveis hidrológicas locais com intuito de determinar a lamina d'água de chuva necessária para gerar uma elevação de nível de emergência, 60 cm por exemplo, valor estipulado como alerta pelo INEA. Nessa análise, além do fornecimento de uma previsão de nível, poderia ser feito um estudo probabilístico com tempos de recorrência de cada pluviometria, a fim de gerar um padrão do regime de chuvas local. Tais resultados seriam de extrema importância para a definição da possibilidade de haver um canal permanente, semipermanente ou aberto apenas em situações de previsão de grande pluviometria.

Outra sugestão de estudo, seria uma análise de risco ambiental, contemplando as áreas da ecologia, segurança e saúde humana, quanto a variação do nível lagunar no sistema, principalmente, em relação a sua elevação acentuada. Avaliar assim, os impactos envolvidos no aumento do nível lagunar, e se, a elevação estipulada pelo INEA de 60 cm acima do NM local, de fato representa um quadro emergencial para a cidade e devido a quais justificativas práticas essa elevação se insere nesse quadro. Também se sugere, a estimativa de níveis lagunares ideais para o sistema, considerando tanto os fatores ecossistêmicos quanto os fatores de segurança para a cidade e sua população.

VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUAS, R. Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana. **Rio de Janeiro: Subsecretaria de gestão de bacias hidrográficas—Rio Águas, Secretaria Municipal de Obras, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro**, 2010.

AMARAL, K. J. D. **ESTUÁRIO DO RIO MACAÉ: MODELAGEM COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS**. 2003. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ANA. Hidroweb. 2017. Disponível em: < hidroweb.ana.gov.br >.

BARBOSA, A. M.; FILL, H. D. Modelo de previsão de vazão baseado no hidrograma unitário. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 165-174, 2001.

BARBOZA, A. P. **ESTUDO HIDROLÓGICO DE VAZÕES MÁXIMAS NA BACIA DO RIO MACAÉ**. 2014. Universidade Federal do Rio de Janeiro

BARROSO, L. V. et al. Geoprocessamento aplicado aos sistemas lagunares de Niterói, Maricá e Saquarema, Região Costeira Leste-Fluminense (RJ). **Anais X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil**, p. 21-26, 2001.

CALIXTO, R. J. **Estabilidade hidráulico-sedimentológica de embocaduras de canais de maré: o caso da Lagoa Rodrigo de Freitas, RJ**. 1990. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

CARVALHO JUNIOR, M. M. **Metodologia para Determinação das Áreas de Preservação Permanente das Margens de Cursos D'água: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Piabanha**. 2013. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CEDAE. **BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UBATIBA, SILVADO – MARICÁ**. 2013

CLIMATE-DATA. Dados Climáticos. 2017. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/location/3999/> >.

COSTA, E. D. S., A. E SEABRA, V. **Uso de Mapa Geomorfológico para Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra no Município de Maricá – RJ. XI SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia**. BRASILEIRA, U.-U. D. G. Maringá, Paraná, Brasil 2016.

CRUZ, A. C. **Análise de Intervenções no Sistema Lagunar de Maricá-RJ com Auxílio de Modelagem Hidrodinâmica Ambiental**. 2010. Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.

CRUZ, C. B. M.; CARVALHO, W. Impactos Ambientais No Sistema Lagunar Maricá-Guarapina. **Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 1996.

DA SILVA, A. L. C.; DA SILVA, M. A. M.; DOS SANTOS, C. L. Comportamento morfológico e sedimentar da praia de Itaipuaçu (Maricá, RJ) nas últimas três décadas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 87-97, 2008. ISSN 0375-7536.

DE PAULA OLIVEIRA, M. L. **ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA DO SISTEMA LAGUNAR DE SAQUAREMA FRENTE ÀS PROJEÇÕES DE AUMENTO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR**. 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro

DHN. Previsões de Marés. 2017. Disponível em: < <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/index.htm> >.

DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. 2005

FARIAS JUNIOR, J.; BOTELHO, R. Análise Comparativa do Tempo de Concentração: Um Estudo de Caso na Bacia do rio Cônego, Município de Nova Friburgo/RJ. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011.

FONSECA, N. G. **Análises de Circulação Hidrodinâmica e de Transporte de Sal em um Estuário Hipersalino: Lagoa de Araruama –RJ**. 2009. Programa de Engenharia Oceânica – Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

GLOBO, G.-P. D. N. D. **Canal em Maricá não é aberto e água da chuva continua em condomínio** 2016a.

_____. **Prefeito Quaqué manda abrir canais em Maricá e critica Inea** 2016b.

GLOBO, R. O. **Maricá decreta estado de emergência após chuvas** 2010.

HORA, A.; MASSERA, M.; PORTO, M. Bacias hidrográficas e rios fluminenses. síntese informativa por macrorregião ambiental. **Rio de Janeiro: Semads/GTAZ**, 2001.

IBAMA. **Aspectos Ambientais e atividade de Pesca em Lagoas Costeiras Fluminenses** 2000

IBGE. Maricá. 2017. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/rj/marica/panorama> >.

INEA. **Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra da Tiririca.** 2015

INMET. Dados Meteorológicos. 2017. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/> >.

LEISECAMARICÁ, R. **Três anos da tragédia das chuvas em Maricá** 2013.

LIMA, L. **Estudos de hidrodinâmica ambiental e mudanças na qualidade das águas da lagoa Rodrigo de Freitas após ligação com o mar via dutos afogados, Rio de Janeiro—RJ.** 2010. MSc thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

LINS-DE-BARROS, F. Contribuição metodológica para análise local da vulnerabilidade costeira e riscos associados: estudo de caso da Região dos Lagos, Rio de Janeiro. **Doctor thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, v. 297, 2010.

MARICÁ, R. L. S. **Prefeitura monta gabinete de crise para monitorar chuvas em Maricá** 2016.

MARICÁ, R. S. P. D. **Chuvas: Maricá em estado de alerta** 2017.

MARICÁINFO, R. **Maricá: Prefeitura abre e fecha canal da barra** 2016.

MELLO, M. A. V., C. M. **Saneamento do Brasil: Seus Efeitos sobre a Pesca Artesanal e o Manejo dos Ecossistemas da Lagoa Feia e da Lagoa de Maricá.** Rio de Janeiro. S.D.

MORAIS, A. **Análise de Alternativas Hidrodinâmicas para o Sistema Lagunar da Baixada de Jacarepaguá.** 2007. Programa de Engenharia Oceânica – Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, COPPE/UFRJ

OLIVEIRA, J. F. B., E. **A Poluição por Efluentes Domésticos nas Praias Oceânicas da Cidade do Rio de Janeiro: a Participação das Ondas e dos Ventos no Comprometimento da Balneabilidade.** XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal de Viçosa 2009.

OLIVEIRA, L. D. et al. Observações biogeográficas e hidrobiológicas sobre a Lagoa de Maricá. **Mem. Inst. Oswaldo Cruz**, v. 53, n. 2, p. 3, 1955.

PETROBRAS. **Relatório de Impacto Ambiental de Sísmica: Pesquisa Sísmica Marítima 4D nas Áreas de Pampo/Badejo/Linguado, Marimbá/Piraúna, Ativo Norte e Viola – Bacia de Campos.** 2009

PFAFSTETTER, O. Chuvas intensas no Brasil; relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos. In: (Ed.). **Chuvas intensas no Brasil; relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos:** DNOS, 1982.

PINTO, A. Um Modelo Numérico Para Análise da Estabilidade Hidráulica-Sedimentológica de Canais de Maré. **Rio de Janeiro,** 1999.

R7, R. **Prefeitura de Maricá decreta estado de emergência** 2010.

ROSMAN, P. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos,** v. 3, n. 1, 1997.

_____. **Obras no Sistema Lagunar de Maricá, RJ-Sobre Níveis da Água no Sistema Lagunar, e Dimensionamento das Obras de Enrocamento.** Relatório COPPETEC-ET-170352, 10/98. COPPE/UFRJ. 1998

_____. Referência técnica do SisBAHIA, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. **Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia,** 2013.

ROSMAN, P. C. **Estudos de Hidrodinâmica Ambiental para Desenvolvimentos na APA do Sistema Lagunar de Maricá.** Rio de Janeiro. 2007

ROSMAN, P. C. C. **Modelagem da Lagoa de Araruama, RJ – Relatório Final.** Rio de Janeiro. 2002

ROSMAN, P. C. C. **Aspectos Morfológicos de Rios e Estabilidade de Canais de Maré.** Rio de Janeiro. 2012

SAMPAIO, M. Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas d'Água da Baía de Guanabara–RJ. **Rio de Janeiro,** v. 213, 2003.

SANTOS, L. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos. 2010. 173 f.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SEABRA, V.; SILVA, F. O uso do sensoriamento remoto para análise da evolução das manchas urbanas no município de Maricá entre os anos de 1975. 1990 e 2008. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba**, p. 6426-6433, 2011.

SIGAÚQUE, P. **Avaliação Hidro-sedimentológica no canal de Itajurú-lagoa de Araruama-RJ, devido a sobrelevação do nível médio do mar por mudança climática.** 2013. Dissertação de M. Sc., Departamento de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

SILVA, R. A. G. **ANÁLISE DA VIABILIDADE HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA DE UM CANAL DE MARÉ PROJETADO NO OESTE DA LAGOA DE ARARUAMA-RJ.** 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro

SOLOS, E. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, 2013.

TETRATECH. **Suporte Técnico para Elaboração do EIA/RIMA para Construção dos Terminais Ponta Negra.** São Paulo. 2013

TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.