ADRIANA CAPELO RODRIGUES

CORRELAÇÃO ENTRE TAXA DE RECOMPOSIÇÃO DO FUNDO, PLUVIOMETRIA E MARÉ.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

São Paulo
2016

ADRIANA CAPELO RODRIGUES

CORRELAÇÃO ENTRE TAXA DE RECOMPOSIÇÃO DO FUNDO, PLUVIOMETRIA E MARÉ.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Obras Hidráulicas

Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Rodrigues, Adriana Capelo

Correlação entre taxa de recomposição do fundo, pluviometria e maré / A. C. Rodrigues -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
94 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Transporte de sedimentos 2.Hidráulica marítima 3.Portos marítimos 4.São Luis (MA) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

DEDICATÓRIA

À minha amada mãe *(in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Podalyro Amaral de Souza, pela confiança depositada e pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus pais e avós, pela educação recebida, pelo apoio nas horas difíceis, e principalmente pela dedicação e esforço para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha irmã, por estar ao meu lado e me lembrar sempre que é possível enfrentar os desafios da vida.

À Vale S/A, por permitir a utilização dos dados que tornaram este estudo possível.

Em especial, ao Moysés Gonsalez Tessler, por ser meu consultor, meu conselheiro, meu amigo e, sobretudo, uma inspiração ao longo da minha trajetória profissional até aqui.

À minha equipe de trabalho, que contribui sempre para o melhor ambiente de trabalho que eu poderia imaginar, além da paciência e colaboração ao longo da realização deste estudo, especialmente ao Lucas, ao Gustavo e à Priscila, que trabalharam diretamente no projeto a que este estudo está relacionado. Agradeço também ao Rafael e ao meu coordenador, José Carlos, pelo apoio e incentivo que me deram.

Aos meus amigos, que tiveram a paciência e a compreensão necessárias nos momentos de maior estresse, além do companheirismo e apoio durante todo o tempo, me impulsionando quando me faltou energia.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. ”

(Arthur Schopenhaur)

RESUMO

Este estudo teve por objetivo analisar as possíveis correlações entre as taxas de recomposição do fundo, pluviometria e marés para a região do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, Maranhão, Brasil. Foram analisados os dados de levantamentos batimétricos, pluviometria e marés, realizados na região do Terminal, além de dados de chuvas e vazões líquidas e sólidas provenientes do sistema fluvial da sub-bacia do rio Mearim, ligado ao estuário em que se localiza o Terminal. O período analisado compreende os anos de 2010 a 2013. Observou-se que há boa correlação entre vazões sólidas e líquidas no sistema fluvial, sendo que há variação sazonal de vazão líquida, relacionada aos períodos chuvoso e seco, com maiores vazões no período chuvoso. Foram observadas influências desta sazonalidade nas áreas de dragagem mais a sul no Terminal, com boa correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria. Em relação às marés, as influências foram melhor observadas nas áreas mais a norte, com boa correlação entre taxas de recomposição do fundo e marés nestas áreas. Os períodos com maiores intensidades de movimentação de fundo estão, de maneira geral, relacionados ao período de intensificação das chuvas e aos solstícios e equinócios, principalmente o equinócio de primavera. O método utilizado provou ser uma boa ferramenta de auxílio à previsão de movimentação e deposição de sedimentos.

Palavras-chave: Transporte de sedimentos. Hidráulica marítima. Portos marítimos. São Luis (MA).

ABSTRACT

The objective of this is study was to analyze possible correlations between bed recovery rates, rainfall and tides for Ponta da Madeira maritime terminal, located in Maranhão, Brazil. Bathymetries, rain and tidal data from the terminal area were analyzed, besides rain and river solid and liquid flow from Mearim river, which flows into the estuary. The data analyzed was collected from 2010 to 2013. There was good correlation between solid and liquid Mearim river flow, related directly to rainy and dry seasons. Seasonal influence was more important at dredging areas located at the terminal south region, which presented good relations between bed recovery rates and rain. North dredging areas bed recovery rates were more subjected to tidal variations. Generally, periods with high bed recovery rates were associated with rainy periods or either solstice and equinox, mainly in the spring. Such a methodology was considered to be successful as an auxiliary tool to predict bed behavior.

Keywords: Sediment Transport. Maritime Hydraulic. Maritime Ports. São Luis (MA).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Localização da Baía de São Marcos. Fonte: Google Earth, em 27/02/2014. 24
Figura 2.2 – Localização da Praia do Boqueirão. Fonte: Google Earth, em 28/02/2014. 25
Figura 3.1 – Áreas de dragagem utilizadas pela Vale até o ano de 2010. 32
Figura 3.2 – Áreas de dragagem utilizadas até meados de 2013. 33
Figura 3.3 – Áreas de dragagem utilizadas a partir de meados de 2013. 33
Figura 4.1 – Exemplo de boletim diário de operação utilizado até o ano 2011, com identificação dos ciclos e locais de dragagem e respectivos volumes dragados. 40
Figura 4.2 – Exemplo de boletim diário de operação utilizado a partir do ano 2012, com identificação dos volumes dragados diariamente em cada área. 41
Figura 4.3 – Localização das estações fluviométricas utilizadas. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015. 42
Figura 4.4 – Localização das estações fluviométricas com medição de concentração de sedimentos utilizadas. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015. 46
Figura 4.7 – Exemplo de planilha de pluviometria fornecida pela Vale. 49
Figura 4.6 – Localização da estação pluviométrica utilizada. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015. ...50
Figura 4.9 – Localização do marégrafo. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015. 52
Figura 6.1 – Superfícies de fundo referentes aos levantamentos batimétricos realizados em 14/06/2013 (Píer I e P3T), 21/06/2013 (Píer III Sul e Norte) e 28/06/2013 (D). Datum WGS-84 (UTM-Zona 23S) 59
Figura 6.2 – Superfícies de fundo referentes aos levantamentos batimétricos realizados em 09/07/2013 (Píer I e Píer III Sul e Norte) e 24/07/2013 (P3T e D). Datum WGS-84 (UTM-Zona 23S).....60
Figura 6.3 – Comparação de superfícies de fundo referentes a levantamentos realizados em junho e julho de 2013. Datum WGS-84 (UTM-Zona 23S).....60

Gráfico 4.1 – Vazão líquida média mensal medida na estação Bacabal. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 43
Gráfico 4.2 – Vazão líquida média mensal medida na estação Aratoí Grande. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 44
Gráfico 4.3 – Vazão líquida média mensal medida na estação Pindaré-Mirim. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 45
Gráfico 4.4 – Concentração de sedimentos e vazão medidos na estação Pedreiras II. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 47
Gráfico 4.5 – Concentração de sedimentos e vazão medidos na estação Aratoi-Grande. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 47
Gráfico 4.6 – Concentração de sedimentos e vazão medidos na estação Pindaré-Mirim. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 48

Gráfico 4.7 – Pluviometria medida na Estação Santa Vitória. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.....51
Gráfico 4.8 – Série temporal de medições de nível do mar registradas pelo marégrafo do TMPM. Nível de referência: DHN.....52
Gráfico 6.1 – Vazão Líquida média mensal na sub-bacia do rio Mearim.....64
Gráfico 6.2 – Vazão Líquida média anual na sub-bacia do rio Mearim. 64
Gráfico 6.3 – Média histórica e envoltória de máximos e mínimos da Vazão Líquida média mensal na sub-bacia do rio Mearim para o período entre janeiro de 1976 e dezembro de 2007. 65
Gráfico 6.4 – Vazões Sólidas e Líquidas estimadas para a sub-bacia do rio Mearim. 65
Gráfico 6.5 – Vazões Sólidas e Líquidas médias mensais para a sub-bacia do rio Mearim.....66
Gráfico 6.6 – Pluviometria e Vazão Líquida médias mensais históricas referentes ao período de janeiro de 1976 a dezembro de 2002 na sub-bacia do rio Mearim.....67
Gráfico 6.7 – Pluviometria média mensal para as regiões do Terminal e da sub-bacia do rio Mearim.68
Gráfico 6.8 – Amplitudes mínimas, médias e máximas ao longo do ano de 2012 no TMPM. 69
Gráfico 6.9 – Variação de amplitudes ao longo de cada mês do ano de 2012 no TMPM. 69
Gráfico 6.10 – Correlação entre vazão sólida e vazão líquida na sub-bacia do rio Mearim. 70
Gráfico 6.11 – Correlação entre vazão líquida e pluviometria medida no mês anterior a montante (Estação Santa Vitória) na sub-bacia do rio Mearim e no mesmo mês na estação localizada no Terminal.....71
Gráfico 6.12 – Taxas de recomposição do fundo nas áreas de dragagem, comparadas à pluviometria medida no Terminal.....72
Gráfico 6.13 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P1, considerando o período chuvoso. “P1 defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 73
Gráfico 6.14 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P1, considerando o período seco. “P1 defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 73
Gráfico 6.15 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3S, considerando o período chuvoso. “P3S defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 74
Gráfico 6.16 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3S, considerando o período seco. “P3S defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 74
Gráfico 6.17 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3N, considerando o período chuvoso. “P3N defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 75
Gráfico 6.18 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3N, considerando o período seco. “P3N defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 75

Gráfico 6.19 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área D, considerando o período chuvoso. “D defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 76
Gráfico 6.20 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área D, considerando o período seco. “D defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 76
Gráfico 6.21 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3T, considerando o período chuvoso. “P3T defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 77
Gráfico 6.22 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3T, considerando o período seco. “P3T defasado” considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa. 77
Gráfico 6.23 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P1....78
Gráfico 6.24 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P1....79
Gráfico 6.25 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P1....79
Gráfico 6.26 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P1....80
Gráfico 6.27 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P3S. 80
Gráfico 6.28 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P3S. 81
Gráfico 6.29 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P3S. 81
Gráfico 6.30 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P3S. 82
Gráfico 6.31 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P3N. 82
Gráfico 6.32 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P3N. 83
Gráfico 6.33 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P3N. 83
Gráfico 6.34 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P3N. 84
Gráfico 6.35 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área D. 84
Gráfico 6.36 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área D....85

Gráfico 6.37 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área D.....85
Gráfico 6.38 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área D.....86
Gráfico 6.39 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P3T. 86
Gráfico 6.40 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P3T.....87
Gráfico 6.41 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P3T.....87
Gráfico 6.42 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P3T.....88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coordenadas das áreas atuais de dragagem. Datum: WGS-84 (UTM-Zona 23S).....34
Tabela 4.1 – Datas das batimetrias realizadas na região do tardoz do Píer III 35
Tabela 4.2 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer I 36
Tabela 4.3 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer III Sul 37
Tabela 4.4 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer III Norte 38
Tabela 4.5 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer de rebocadores 39
Tabela 4.6 – Dados da Estação fluviométrica Bacabal. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 42
Tabela 4.7 – Dados da Estação fluviométrica Aratoí Grande. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 43
Tabela 4.8 – Dados da Estação fluviométrica Pindaré-Mirim. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 44
Tabela 4.9 – Dados da Estação fluviométrica Pedreiras II. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 46
Tabela 4.10 – Dados da Estação pluviométrica Santa Vitória. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015. 50
Tabela 6.1 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do berço de atracação do Píer I. Valores em (10-3m³/ (m².dia)). 61
Tabela 6.2 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do berço de atracação do Píer III Sul. Valores em (10^{-3}m³/ (m².dia)). 61
Tabela 6.3 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do berço de atracação do Píer III Norte. Valores em (10^{-3}m³/ (m².dia)). 62
Tabela 6.4 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do Píer de rebocadores (D) e do Tardoz do Píer III (P3T). Valores em (10^{-3}m³/ (m².dia)). 62
Tabela 6.5 – Quadro resumo dos valores de coeficiente de determinação R² para correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria medida no Terminal. 78
Tabela 7.2 – Quadro resumo dos valores de coeficiente de determinação R² para correlação entre taxas de recomposição do fundo e a maré medida no Terminal. 89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
TMPM	Terminal Marítimo de Ponta da Madeira
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21

1.1 Objetivos 23

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 24

2.1 Caracterização sedimentar da área submersa 26

2.2 Condições Atmosféricas 28

2.3 Características Hidrodinâmicas 29

3 HISTÓRICO DE DRAGAGEM NO TMPM 31

4 BASE DE DADOS 35

4.1 Levantamentos batimétricos 35

4.2 Dados de dragagem 39

4.3 Vazão Líquida 41

4.4 Sedimentos 45

4.5 Pluviometria 48

4.6 Marés 51

5 MÉTODOS UTILIZADOS 53

5.1 Taxas de recomposição do fundo 53

5.2 Aporte fluvial 54

5.3 Marés 55

5.4 Correlações 55

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 59

6.1 Taxas de recomposição do fundo 59

6.2 Aporte fluvial 63

6.3 Maré 68

6.4 Correlações 70

6.4.1 Sistema Fluvial 70

6.4.2 Marés 78

7 CONCLUSÕES 91

8 REFERÊNCIAS 93

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da dinâmica sedimentar é condição necessária ao bom funcionamento de um terminal portuário, principalmente onde a profundidade natural não atende os requisitos de atracação, pois permite um melhor planejamento das operações, tanto de atracação e desatracação, quanto de dragagens.

Nesses casos, a operação do terminal depende da manutenção das cotas dos berços de atracação, que devem atender requisitos de segurança, de acordo com o tamanho e tipo de navios que operam no terminal. Essa manutenção de cotas é feita através de dragagens e sua periodicidade é determinada de acordo com a dinâmica sedimentar do ambiente em questão.

O aporte de sedimentos pode variar conforme a sazonalidade de agentes naturais como descarga fluvial e variação de maré. Neste sentido, podem ser utilizados em uma análise de sedimentação: levantamentos batimétricos, informações sobre volumes dragados e dados de pluviometria e marés.

No caso deste trabalho, será estudada a dinâmica sedimentar da área do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), localizado na Baía de São Marcos, em São Luís – MA, de propriedade da empresa Vale S/A.

O TMPM é composto por quatro píeres, sendo dois deles (Píer I e Píer II) com capacidade para um navio cada, outro píer (Píer III) com capacidade para dois navios e outro (Píer IV) atualmente com capacidade para um navio e projeção de expansão para dois navios.

A Baía de São Marcos, como todo estuário submetido ao longo dos últimos milênios aos ciclos de subida (enchimento) e descida do nível marinho (ressecamento), apresenta como característica predominante uma dinâmica sedimentar com tendência ao desenvolvimento de processos de assoreamento de longo prazo.

De maneira geral, estuários são definidos como um corpo d’água costeiro semi-fechado que, por possuírem uma ligação livre com o mar aberto, são fortemente afetados pela ação das marés e caracterizados pela ocorrência de uma mistura da água marinha com a água doce oriunda das áreas terrestres, gerando um gradiente de salinidade.

A Baía de São Marcos pode potencialmente receber, exportar e/ou reter sedimentos provenientes de 3 (três) fontes, a saber:

- sedimentos provenientes das áreas continentais, próximas ou distantes, carreados para o complexo costeiro pelas drenagens que deságuam no estuário;
- sedimentos originários das formações geológicas do próprio entorno do estuário (praias, falésias, etc.);
- sedimentos carreados para o interior do estuário a partir das áreas marinhas contíguas.

Na caracterização do papel de cada uma destas fontes de aporte sedimentar e, principalmente, no entendimento dos mecanismos hidrodinâmicos de redistribuição dos sedimentos (assoreamento / erosão) no interior do estuário, induzidos por correntes geradas pela ação das marés, ondas, ventos, etc., se buscam as tendências evolutivas deste sistema costeiro.

Taxas de sedimentação de sedimentos finos (lamosos), ou mesmo de sedimentos arenosos, são importantes indicativos das tendências evolutivas de áreas abrigadas onde se pretendam implantar obras de engenharia portuária ou manter em equilíbrio dinâmico o ambiente à sua volta. Porém, em áreas costeiras onde ocorram intervenções antrópicas, os processos deposicionais são modificados com relação às suas velocidades (taxas) de desenvolvimento.

No decorrer dos processos de dragagem, o fundo alterado é recomposto ao longo do tempo, não apenas pelos processos naturais de sedimentação, mas também por ajustes nas formas modificadas do fundo, como os associados aos escorregamentos de massas em fase de estabilização de taludes construídos em áreas submersas.

Desta forma, em áreas de intervenção, os processos deposicionais associados a mecanismos de indução antrópica são referidos como “taxas de recomposição do fundo”, ou genericamente como “taxas de assoreamento”.

Nas áreas de influência dos Píeres I e III, um estudo baseado em procedimentos de modelagem numérica (Garcia, 2007), apresenta o mais amplo conjunto de informações acerca das taxas de recomposição do fundo, denominado pela autora de “taxas de assoreamento”.

As análises das taxas de assoreamento/erosão mostraram claramente que na região abrigada os maiores valores ocorrem no tardoz dos Píeres I e III, na área do nascedouro do assoreamento. (Garcia, 2007).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo central estudar a dinâmica sedimentar das proximidades do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, no Maranhão, analisando as tendências de taxas de recomposição do fundo calculadas para as áreas de dragagem dos Píeres I e III, pertencentes ao TMPM.

Trata-se de um estudo de caso direcionado às áreas de dragagem do TMPM, com o objetivo específico de analisar a influência da pluviometria e maré sobre as taxas de recomposição do fundo, estabelecendo uma correlação entre esses valores para o período entre os anos de 2010 e 2013.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Baía de São Marcos é delimitada a oeste pelo continente, a leste pela ilha de São Luís, e ao sul pela foz do rio Mearim, como mostra a Figura 2.1. Trata-se de um estuário, onde desaguam vários rios, como o Grajaú, o Mearim e o Pindaré.

Figura 2.1 – Localização da Baía de São Marcos. Fonte: Google Earth, em 27/02/2014.

As características geomorfológicas do entorno da Baía de São Marcos correspondem a diferentes feições e composições de sedimentos (MOCHEL; GUEIROS; ALCANTARA, 2004).

Durante a baixa-mar, o entorno da baía de São Marcos é caracterizado por uma grande e extensa planície de maré lamosa, constituída predominantemente por argila, silte e areia muito fina, rica em matéria orgânica. A fração argilosa é composta por minerais de argila (caulinita, ilita e montmorilonita), altamente saturada de água. (Tarouco, 1986)

Segundo Morais (1977), a praia do Boqueirão, que está localizada em São Luís entre a Ponta da Madeira e a Ponta da Espera, apresenta em sua maioria sedimentos “bem selecionados” a “muito bem selecionados”, com predominância de areia fina (2,5 a 3,0 ϕ), ocorrendo redistribuição de sedimentos ao longo dos bancos e canais. A Figura 2.2 apresenta a localização da praia do Boqueirão.

Figura 2.2 – Localização da Praia do Boqueirão. Fonte: Google Earth, em 28/02/2014.

Os sedimentos ao longo do prisma praial são constituídos essencialmente por areias quartzosas finas (0,177-0,128mm) a muito finas (0,88-0,062mm), muito bem selecionadas, muito pobres em fragmentos biogênicos, com assimetria dos grãos aproximadamente simétrica a positiva e curtose variando de leptocúrtica a mesocúrtica (SANTOS, 1989; TAROUCO e SANTOS, 1997).

Na franja costeira, as dunas atuais situam-se na zona contígua à linha máxima de preamar, ora desprovida de cobertura vegetal ora colonizada por vegetação de restinga. Estas formações quaternárias são constituídas predominantemente, na área de estudo, por areias finas a muito finas, o que proporciona o seu deslocamento sob efeito das correntes geradas por marés e ventos predominantes de NE, invadindo áreas de manguezais, casas e avenidas em suas proximidades.

As paleodunas situam-se mais afastadas da praia e se caracterizam por uma coloração amarelo alaranjada, fixadas por uma cobertura vegetal exuberante de estrato arbustivo e/ou arbóreo. Conforme Santos (1996), quanto à localização, essas dunas antigas estão estabelecidas em algumas áreas ao norte da ilha do Maranhão, sobre os tabuleiros costeiros, cuja altitude pode alcançar os 60m.

As falésias correspondem às maiores altitudes do litoral da Baía de São Marcos. Estas feições são formadas por sedimentos do Grupo Barreiras, ricos em óxido de ferro de coloração vermelho-amarelada e ocorrem descontinuamente.

No setor Leste da Baía de São Marcos, estas feições destacam-se na praia da Barra da Raposa, no Olho d'Água próximo à praia do Meio (Ponta Grossa) e no Farol de São Marcos com alturas inferiores a 30m. Já no setor oeste, atingem cerca de 55m de altura, desde a praia da Baronesa, no município de Alcântara até próximo à Baía de Cumã.

Afloramentos de concreções lateríticas ocorrem de forma espaçada, constituídos por Cangas Ferruginosas, em partes das praias do Meio, Caolho, Calhau e São Marcos, bem como ao entorno das ilhas existentes na Baía.

Na Baía de São Marcos, as feições regionalmente identificadas como tabuleiros são compostas por uma sequência areno-argilosa da Formação Barreiras e em algumas áreas, podem aflorar arenitos da Formação Itapecuru.

Os Tabuleiros Costeiros, característicos da ilha do Maranhão, ocorrem em trechos situados a leste e a oeste da citada baía, à retaguarda da Planície Costeira, apresentando geralmente coloração vermelho-amarelada a acastanhada e altitude inferior a 55m.

A geomorfologia do setor leste da Baía de São Marcos, especificamente o trecho que se estende da ilha do Curupu até a proximidade do Terminal da Vale, é caracterizada pela presença de praias arenosas, formadas por areia fina a muito fina de significativa extensão e baixa declividade. No restante do setor leste, assim como na totalidade da ilha dos Caranguejos e praticamente todo o lado oeste da referida baía, tem-se o predomínio da planície fluvio-marinha (planície de maré lamosa) com o domínio da vegetação de mangue.

2.1 Caracterização sedimentar da área submersa

A caracterização sedimentar do fundo atual da Baía de São Marcos apresenta recobrimento amostral e caracterização textural de fundo bastante restritos.

Os estudos básicos executados para a implantação do Terminal da Vale executado nos anos 1970, bem como os levantamentos posteriores realizados pelo Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (CTH-DAEE-USP), identificaram, nas

áreas próximas de implantação dos Terminais da Vale e do Porto de Itaqui, a ocorrência predominante de sedimentos de granulometria areia fina.

Nos estudos dos anos 1980 e 1990, observou-se que, nas áreas próximas ao berço de atracação do TMPM, a constituição básica era de areia fina com diâmetro médio de 0,15 a 0,25mm, aproximadamente. Já no tardoz dos berços, a granulometria é mais fina, com areia fina de d50 0,15mm até silte e argila nas áreas mais internas. Observou-se um aumento da granulometria a oeste da área de atracação, chegando a areia média e seixos, em alguns pontos.

Uma reavaliação destes dados realizada por Garcia (2007) conclui que o aumento do diâmetro dos sedimentos presentes na área interna, em relação aos sedimentos da externa, é resultado do processo de segregação provocado pela redução da capacidade de transporte das correntes que levam os sedimentos para o interior da área do TMPM. Provavelmente as áreas de ocorrência de material mais grosso são as que apresentam penetração mais intensa das correntes.

Estudos mais recentes realizados pela UMISAN (2011) indicaram para a área do futuro Píer IV a presença de sedimentos constituídos de granulometrias inferiores a 0,425mm, sendo em sua maioria menores que 0,075mm, concluindo que aquele segmento do fundo da Baía de São Marcos é composto majoritariamente por areia fina siltosa de coloração cinza clara.

Este estudo faz referência a levantamentos executados por BANDEIRA et.al. (2007) caracterizando o fundo da Baía de São Marcos como constituído de sedimentos arenosos. Porém, devido à alta concentração natural de sedimentos em suspensão (~600 mg/L), constituído sobretudo de silte e argilas (lamas), uma forte sedimentação ocorre nas regiões artificialmente alagadas e aprofundadas pela dragagem para estabelecimento do Porto.

Quanto aos materiais em suspensão na região do TMPM, a granulometria situa-se na faixa dos finos de silte e argila com pouca areia fina. As concentrações médias nas verticais na área do TMPM foram inferiores a 170mg/L, enquanto na área do Porto de Itaqui foram inferiores a 313mg/L.

Caracterização de fundo executada por Santos (2009), a partir da coleta e análise de 134 amostras no entorno do Porto de Itaqui e 60 pontos ao largo da ilha dos Caranguejos, identificou o predomínio de areia muito fina com contribuições de areia

média e fina. Nas áreas rasas junto à costa ou em áreas de sombra de barreiras naturais e das instalações portuárias e em bancos submersos, identificou a prevalência de sedimentos lamosos.

Levantamentos geofísicos (sonografia e sísmica rasa) realizados pela C&C Technologies (2011) identificaram áreas de fundo com afloramento rochoso nas proximidades do Píer I da Vale, constituído de sedimentos finos (lamosos e arenosos endurecidos por crostas limoníticas), correspondendo provavelmente ao nível de embasamento acústico presente ao longo de toda a área deste Píer. Nos estudos executados pela UMISAN (2011), situação similar foi observada em algumas áreas próximas ao futuro Píer IV.

2.2 Condições Atmosféricas

A temperatura do ar varia ao longo do ano entre 23°C e 31°C, situando-se normalmente em torno de 27°C.

A umidade relativa do ar é alta durante todo o ano, variando a média mensal entre 75% e 85%.

O relatório da UMISAN (2011) indica que na região do Porto de Itaqui, próximo ao TMPM, os valores de velocidade dos ventos são praticamente constantes durante todo o ano (3,0 a 4,1m/s), sendo mais intensos nos meses de outubro e novembro. Predominam os ventos dos quadrantes NE e E, com cerca de 55% das ocorrências. Aproximadamente 25% dos ventos correspondem à calmaria, especialmente ao longo do primeiro semestre.

Os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) correspondentes aos períodos chuvosos e secos indicam que a estação das chuvas vai de dezembro a maio, com pluviosidades mais elevadas nos meses de fevereiro, março e abril (350 a 550 mm), com cerca de 15 dias chuvosos por mês quando ocorrem aguaceiros. O período seco se localiza entre os meses de agosto e dezembro, com médias de chuvas mensais inferiores a 100mm/ano.

2.3 Características Hidrodinâmicas

“A Baía de São Marcos se caracteriza por uma hidrodinâmica regida pelo sistema de marés semi-diurnas (duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar com intervalos proporcionais de cerca de 6h), com amplitude média de 4,6m, podendo atingir 7,2m quando das grandes sizígias. Porém, em 75% do tempo, as amplitudes de maré são inferiores a 5,5m, (PORTOBRAS, 1988). Já as correntes, atingem velocidades superiores a 7,5 nós (DHN,1972) ” (UMISAN, 2011).

“Na Área Portuária do Maranhão, com exceção da região de recirculações, as correntes de maré têm caráter axial e alternativo quanto ao sentido, sendo praticamente sinusoidais ao longo da maré com relação à variação de intensidade. As velocidades máximas são obtidas em torno dos instantes de meia-maré e as menores velocidades nas estofas próximas à preamar e baixa-mar. ” (Garcia, 2007).

“Esta área tem como características básicas: complexa circulação de correntes de altas velocidades associadas às grandes variações de maré” (Garcia, 2007).

Com relação às velocidades e direções das correntes, em superfície e fundo, os estudos executados no período de dezembro de 1977 a março de 1978 pela Hidroconsult para as fases iniciais dos estudos realizados pelo CTH-DAEE-USP indicaram que, em condições de maré de sizígia e fase de maré vazante, a direção predominante foi N, com velocidade média de 1,65m/s e máxima de 2,20m/s. A velocidade máxima e a direção predominante são coincidentes.

Para condições de maré intermediária e fase de enchente, a direção predominante foi SE, com velocidade média de 1,06m/s e máxima de 2,0m/s. A direção registrada na condição de velocidade máxima coincidiu com a direção predominante.

Em condição de maré intermediária e fase de maré vazante, a direção predominante da corrente foi NNW, com velocidade média de 1,38m/s e máxima de 2,60m/s. A velocidade máxima está associada à direção predominante.

Em maré de quadratura e fase de maré enchente, a direção predominante foi SSE, com velocidade média de 1,09m/s e máxima de 1,90m/s. A velocidade máxima foi também obtida para a direção predominante.

Em quadratura e vazante, a direção predominante foi NNE, com velocidade média de 1,15m/s e máxima de 2,0m/s na direção predominante. Ainda em quadratura e maré enchente, a direção da corrente foi SSE, com velocidade média de 0,98m/s e máxima de 1,40m/s.

Finalmente, em condição de maré de sizígia e fase de enchente, a direção foi SE com velocidade média de 1,11m/s e máxima de 1,70m/s.

Estudos posteriores apresentam valores e direções de propagação similares às identificadas em 1977 /1978.

Desta forma, pode-se verificar que, para quase todos os casos, as intensidades das velocidades de vazante, médias e máximas, são superiores às observadas para condições de enchente.

Estas observações são comumente encontradas em estuários onde o aporte de água doce é significativo, principalmente em períodos de elevada pluviosidade.

Como os valores de intensidade de fluxo são compatíveis com os valores necessários para a remobilização sedimentar de fundo de sedimentos arenosos muito finos a finos e, nas velocidades máximas, a sedimentos de granulometria areia média (Suguio, 1980), os processos de remobilização sedimentar junto ao fundo são possíveis e perfeitamente explicados.

Desta forma, as feições de fundo, existentes ao longo de amplos segmentos da Baía de São Marcos, genericamente designadas como “ondas de fundo”, ou ondas de areia (sand waves), identificadas em diversos levantamentos batimétricos e sonográficos, apresentam direção geral NE /SW geradas a partir de correntes predominantes de vazante com direção geral NW / SE.

3 HISTÓRICO DE DRAGAGEM NO TMPM

Neste capítulo será apresentado um histórico de eventos relevantes para o estudo, referentes às mudanças relacionadas à dragagem realizada pela Vale S/A nos berços de atracação e proximidades durante o período dos levantamentos de campo utilizados.

No ano de 2002, foi definido um método de dragagem para a região dos Píeres I e III que consistia em concentrar os esforços no tardoz do Píer III e berço dos rebocadores e realizar dragagem de oportunidade nas áreas dos berços de atracação. Para tanto, foi recomendado que fossem dragados 600.000 m^3 anuais e que 60% deste volume fosse retirado do tardoz do Píer III - áreas C e D. Este método visava prevenir uma carga acentuada nas estruturas dos píeres e também minimizar a possível fonte de sedimentos para o berço de atracação.

Para obter-se melhor controle nas áreas a serem dragadas, criaram-se quatro áreas fictícias (A, B, C e D). Até maio de 2005 havia uma subdivisão de áreas de atuação da draga em função do posicionamento:

- Área A: localizada à frente do Píer I;
- Área B: localizada à frente do Píer III;
- Área C: plataforma estabelecida para dragagem preventiva que está localizada no tardoz do Píer III;
- Área D: localizada junto ao berço dos rebocadores.

Verificando-se que as áreas A e B apresentavam características de sedimentação diferentes ao longo de suas extensões, foram feitas novas subdivisões criando-se as áreas A1, A2, A3, A4, B1, B2 e B3. A Figura 3.1 representa as áreas de dragagem utilizadas até o ano de 2010.

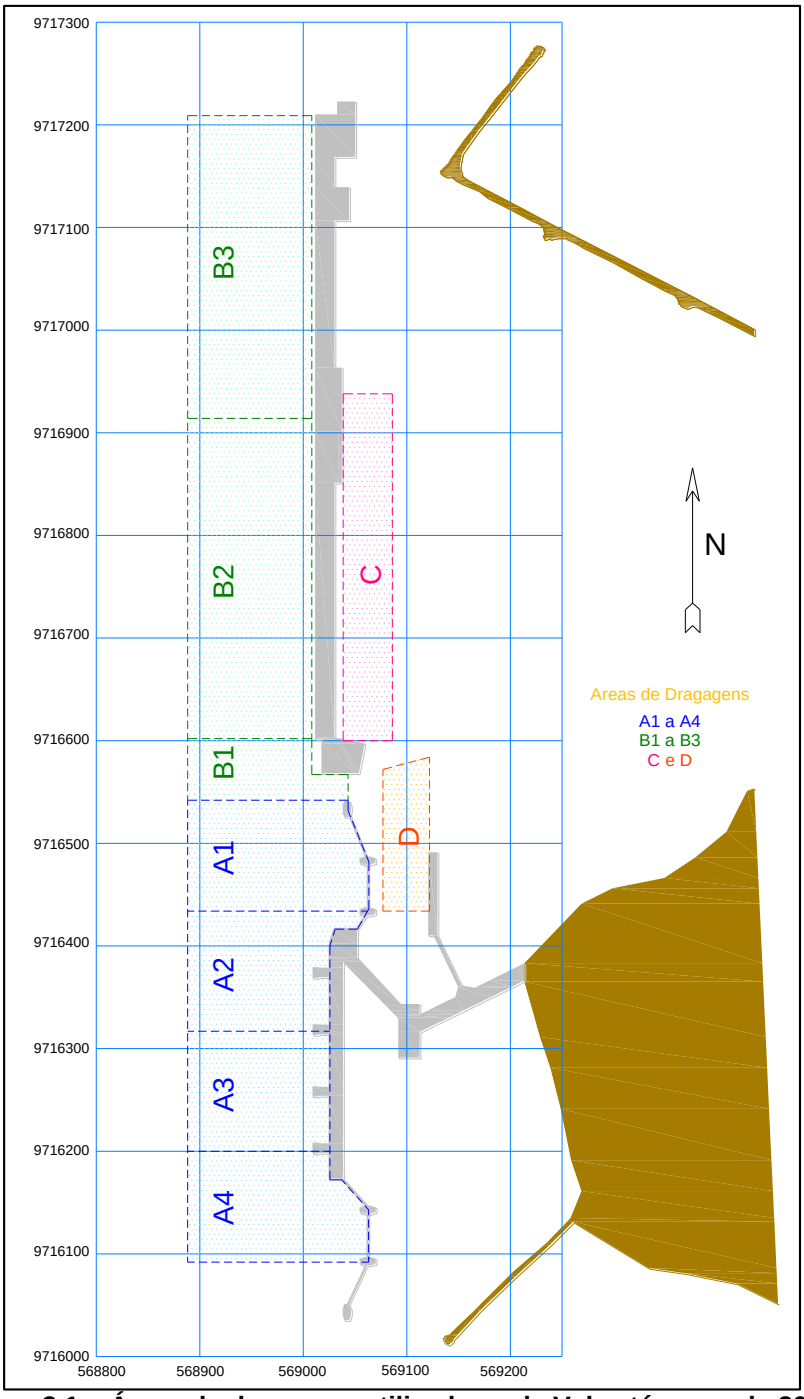


Figura 3.1 – Áreas de dragagem utilizadas pela Vale até o ano de 2010.

Em janeiro de 2011, após reuniões entre FCTH e Vale, foi decidido que a área A4 deveria ser aumentada para sul até o limite do dólfin 1. Foram estabelecidos também os limites das áreas C1 e C2, conforme apresentado na Figura 3.2.

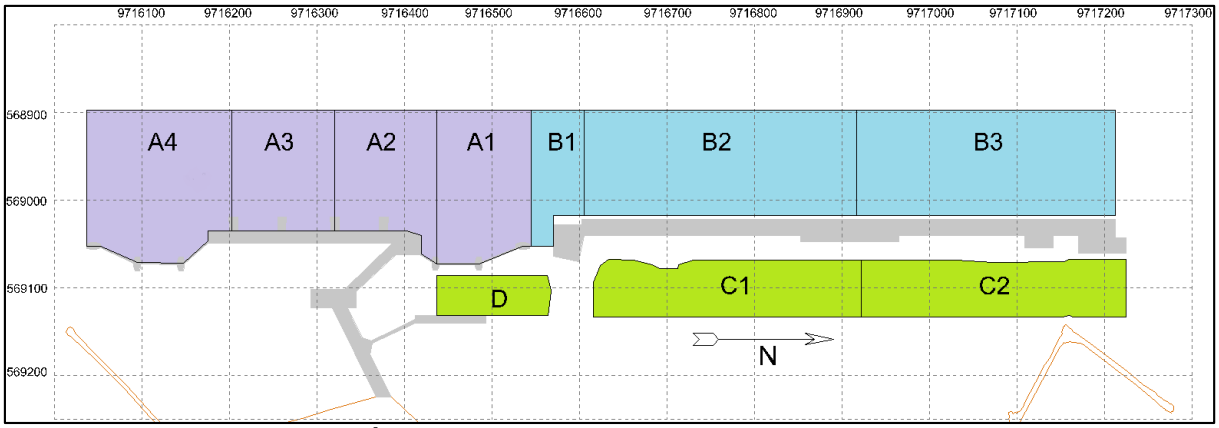


Figura 3.2 – Áreas de dragagem utilizadas até meados de 2013.

A partir do mês de junho de 2013, houve uma alteração na divisão de áreas para a região dos Píeres I e III, devido ao modo de disposição dos dados relativos aos volumes dragados. Esta alteração foi necessária em função da utilização de uma draga de maior porte que não teria produtividade nas áreas menores por causa de restrições de manobrabilidade. Foram também definidas áreas que correspondem a faixas à frente da linha de atracação de cada berço, com a finalidade de refinar o estudo, pois a dragagem é mais intensa nestas regiões. A Figura 3.3 representa a configuração das áreas juntamente com a profundidade mínima recomendada até o presente momento e a Tabela 3.1 relaciona as coordenadas de cada área.

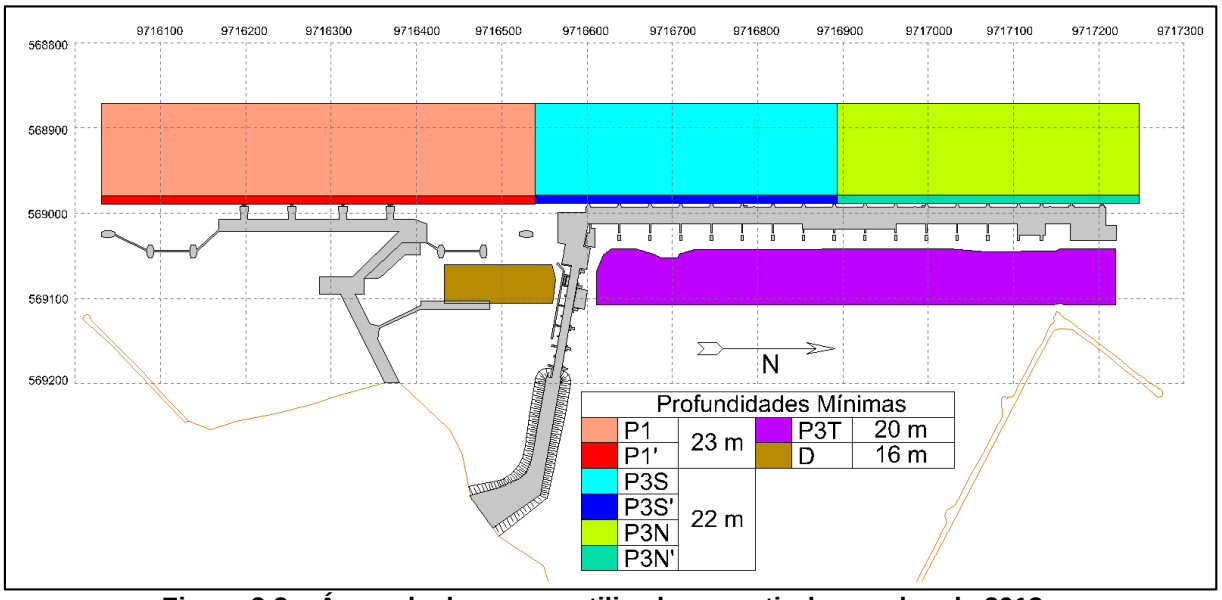


Figura 3.3 – Áreas de dragagem utilizadas a partir de meados de 2013.

Tabela 3.1 – Coordenadas das áreas atuais de dragagem. Datum: WGS-84 (UTM-Zona 23S)

		E	N		E	N		E	N
Píer I	P1	568990	9716539	P1'	568990	9716539	D	569105	9716560
		568990	9716030		568990	9716030		569078	9716563
		568871	9716030		568980	9716030		569060	9716558
		568871	9716539		568980	9716539		569060	9716432
								569105	9716432

		E	N		E	N		E	N	E	N
Píer III	P3S	568989	9716893	P3S'	568989	9716893	P3T	569107	9717220	569048	9716678
		568989	9716539		568989	9716539		569042	9717220	569042	9716657
		568871	9716539		568979	9716539		569042	9717155	569042	9716628
		568871	9716893		568979	9716893		569044	9717149	569048	9716619
								569045	9717068	569068	9716611
		E	N		E	N		569042	9717025	569107	9716611
	P3N	568989	9717247	P3N'	568989	9717247		569042	9716725	569107	9717147
		568989	9716893		568989	9716893		569048	9716708	569105	9717155
		568871	9716893		568979	9716893		569052	9716707	569107	9717158
		568871	9717247		568979	9717247		569052	9716688		

4 BASE DE DADOS

Este trabalho utiliza dados que podem ser separados em dois conjuntos, um fornecido pela Vale S/A e outro disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA). O conjunto de dados fornecidos pela Vale é composto por pluviometria na região do Terminal e levantamentos batimétricos e dados de dragagem realizados nos anos de 2009 a 2014 nas áreas de dragagem dos Píeres I e III, além de medições de maré do ano 2012. Os dados obtidos do site da ANA compreendem vazões líquidas, concentração de sedimentos em suspensão e chuvas na sub-bacia do rio Mearim.

4.1 Levantamentos batimétricos

As tabelas a seguir relacionam as datas em que foram realizados levantamentos batimétricos em cada área de dragagem entre os anos de 2009 a 2014.

Tabela 4.1 – Datas das batimetrias realizadas na região do tardoz do Píer III

Ano	***2009***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***
	24/nov	16/jun	13/jan	10/jan	22/jan	9/jan
		2/ago	21/fev	16/jan	6/fev	
		30/set	30/mar	24/jan	21/mar	
		1/dez	5/abr	13/fev	24/abr	
			26/mai	23/fev	30/mai	
			22/jun	28/mar	14/jun	
			21/jul	27/abr	24/jul	
Datas			24/ago	25/mai	28/ago	
			30/set	25/jun	26/set	
			31/out	19/jul	11/out	
			25/nov	27/ago	13/nov	
			30/dez	21/set	28/dez	
				24/out		
				8/nov		
				11/dez		

Tabela 4.2 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer I

Ano	***2009***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***
	9/dez	6/jan	14/jan	10/jan	10/jan	7/jan
		8/jan	17/jan	17/jan	27/jan	
		5/fev	19/jan	18/jan	1/fev	
		7/fev	8/fev	4/fev	5/fev	
		15/mar	22/fev	6/fev	7/fev	
		12/abr	23/fev	10/fev	16/fev	
		17/abr	16/mar	13/fev	26/fev	
		17/mai	1/abr	17/fev	4/mar	
		8/jul	3/abr	18/fev	15/mar	
		16/jul	5/abr	22/mar	19/mar	
		8/ago	9/abr	9/abr	20/mar	
		10/ago	16/abr	10/mai	21/mar	
		19/ago	4/mai	11/mai	3/abr	
		2/set	5/mai	1/jun	5/abr	
		3/set	7/mai	3/jun	6/abr	
		13/out	9/mai	3/jul	10/abr	
		14/out	23/mai	6/ago	16/abr	
		15/out	15/jun	7/ago	17/abr	
		3/nov	4/jul	5/set	18/abr	
		4/nov	11/jul	8/set	26/abr	
		5/nov	12/jul	1/out	3/mai	
		6/nov	9/ago	2/out	10/mai	
		9/nov	15/set	5/out	13/mai	
		6/dez	9/out	1/nov	15/mai	
Datas			16/nov	4/nov	24/mai	
			17/nov	5/nov	29/mai	
			16/dez	14/nov	6/jun	
			18/dez	3/dez	14/jun	
				6/dez	3/jul	
					6/jul	
					8/jul	
					9/jul	
					3/ago	
					7/ago	
					9/ago	
					17/ago	
					1/set	
					25/set	
					30/set	
					4/out	
					14/out	
					21/out	
					3/nov	
					4/nov	
					6/nov	
					13/nov	
					20/nov	
					6/dez	
					9/dez	

Tabela 4.3 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer III Sul

Ano	***2009***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***
	18/nov	5/mar	8/jan	9/jan	3/jan	8/jan
		9/jun	21/fev	13/jan	4/jan	
		13/set	11/abr	16/jan	5/jan	
		10/dez	14/abr	25/jan	19/jan	
			21/jul	23/fev	1/fev	
			9/ago	24/fev	5/fev	
			23/set	16/mar	7/fev	
			10/nov	20/mar	5/mar	
			27/dez	23/mar	8/mar	
				16/abr	16/mar	
				19/mai	11/abr	
				20/mai	17/abr	
				14/jun	25/abr	
				2/jul	28/abr	
				18/jul	30/abr	
				26/jul	3/mai	
				4/ago	17/mai	
Datas				13/set	11/jun	
				3/out	13/jun	
				8/out	21/jun	
				7/nov	9/jul	
				25/nov	14/ago	
				10/dez	17/ago	
					12/set	
					2/out	
					10/out	
					13/out	
					15/out	
					25/out	
					4/nov	
					11/nov	
					13/nov	
					27/nov	
					2/dez	
					26/dez	

Tabela 4.4 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer III Norte

Ano	***2009***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***
Datas	16/out	17/mar	3/jan	9/jan	4/jan	3/jan
		2/jul	21/mar	13/jan	5/jan	
		14/dez	20/abr	16/jan	5/jan	
			24/abr	1/fev	22/jan	
			1/mai	23/fev	28/jan	
			7/jun	24/fev	30/jan	
			11/jun	26/abr	1/fev	
			13/jun	3/mai	7/fev	
			27/jul	6/mai	7/fev	
			5/ago	2/jul	23/fev	
			6/set	4/ago	8/mar	
			24/out	28/ago	8/mar	
			18/nov	31/ago	21/mar	
			11/dez	28/set	14/abr	
				28/set	21/abr	
				15/out	21/abr	
				17/out	26/abr	
				17/out	28/abr	
				23/out	30/abr	
				22/nov	3/mai	
				26/nov	17/mai	
				14/dez	11/jun	
					13/jun	
					21/jun	
					9/jul	
					6/ago	
					17/ago	
					25/set	
					10/out	
					15/out	
					25/out	
					11/nov	
					14/nov	
					14/nov	
					18/nov	
					20/nov	
					27/nov	
					2/dez	

Tabela 4.5 – Datas das batimetrias realizadas na região do Píer de rebocadores

Ano	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***
Datas	21/dez	21/jan	25/jan	27/jan	14/jan
		5/abr	15/mar	26/fev	
		26/mai	26/abr	26/mar	
		22/jun	25/mai	26/abr	
		26/jul	23/jul	30/mai	
		22/ago	30/ago	28/jun	
		30/set	25/set	24/jul	
		31/out	31/out	29/ago	
		25/nov	30/nov	30/set	
		16/dez	27/dez	11/out	
				13/nov	
				28/dez	

4.2 Dados de dragagem

Para este estudo utilizam-se planilhas mensais em que são especificados os volumes dragados diariamente em cada área de estudo. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de boletim diário de operação utilizado até o ano 2011 e a Figura 4.2 corresponde à planilha mensal utilizada a partir do ano 2012.

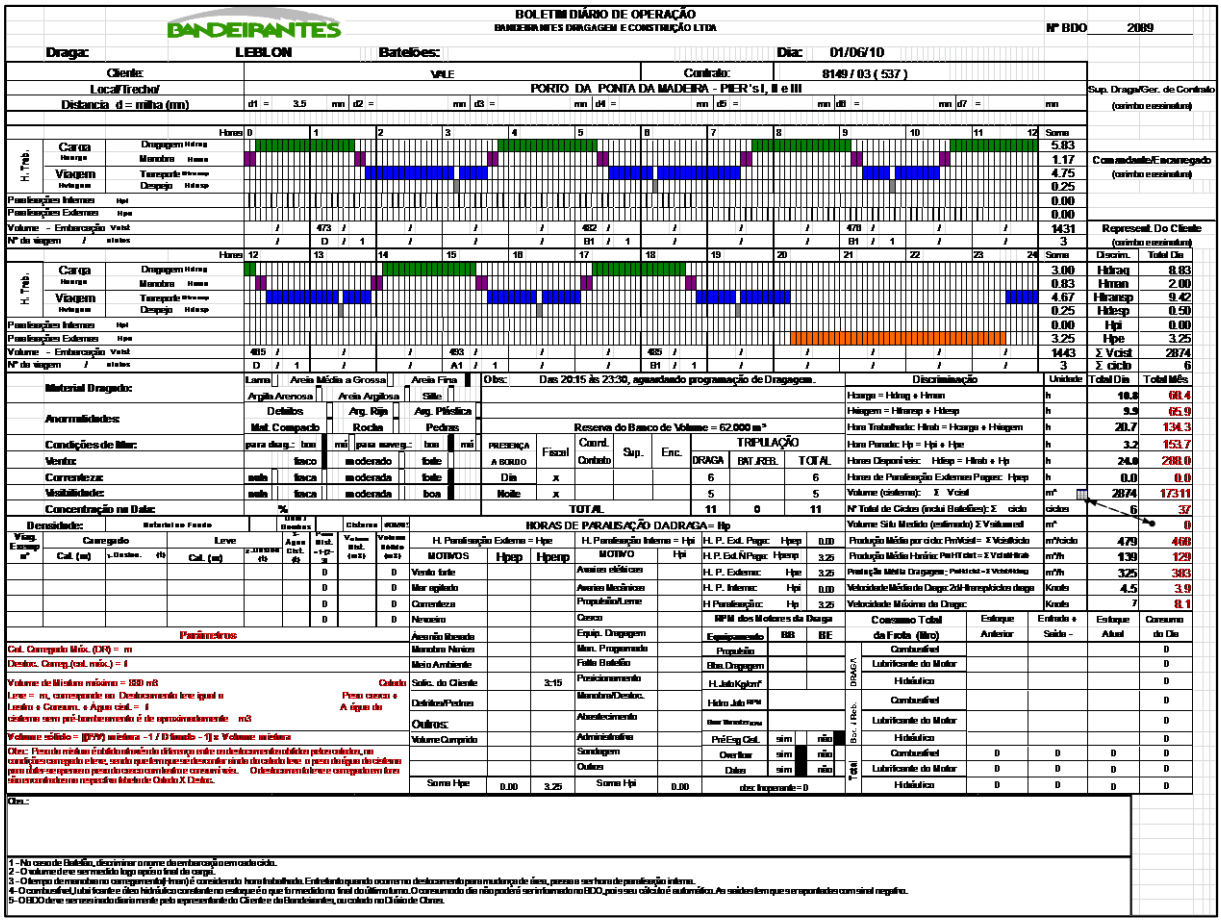


Figura 4.1 – Exemplo de boletim diário de operação utilizado até o ano 2011, com identificação dos ciclos e locais de dragagem e respectivos volumes dragados.

Volume por Área (m³)			junho/13			143,487										
Row Labels	PÍER I		INTERSEÇÃO PÍER I E PÍER III	PÍER III GERAL		PÍER III SUL		PÍER III NORTE		Píer III TARDOZ	REBOC.	PÍER IV				PÍER 2
	P1	P1'	P1+P3S	P3	P3'	P3S	P3S'	P3N	P3N'	P3T	D	P4S(B)	P4S(C)	P4S(E)	P4S(Ds)	P2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1,113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,809	0	0	0	0
4	0	2,123	2,156	0	0	1,082	0	0	0	0	0	1,792	0	0	0	0
5	0	2,914	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,987	0	0	0	0
6	0	2,210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,133	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,703	917	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1,159	698	0	0	5,042	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	573	2,538	0	0	1,616	2,154	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	3,228	1,748	0	0	1,016	0	0	0	0
11	0	0	0	6,072	0	0	0	1,190	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	7,442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	1,128	5,365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	1,143	1,113	3,022	0	1,092	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	1,242	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	648	0	892	0	0	1,169	0	1,001	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,185	1,979	0	2,129	0
20	0	0	0	0	0	1,067	0	0	0	0	0	1,921	0	0	0	0
21	0	0	0	1,724	0	2,308	0	0	0	0	0	2,990	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	3,158	0	0	0	3,148	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	2,125	0	0	0	0	0	0	5,447	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	2,874	0	0	0	815	2,032	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	1,062	0	3,131	0	0	0	0	0	0	767	0
28	0	0	0	0	0	0	1,047	0	0	1,918	0	758	1,123	0	2,141	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,077	0	1,154	1,624	0	1,484	0
30	0	0	0	0	0	0	0	4,843	0	0	0	1,226	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**0**	**9,503**	**5,639**	**23,625**	**0**	**8,736**	**1,047**	**19,645**	**5,445**	**5,585**	**0**	**35,253**	**21,487**	**0**	**7,522**	**0**

OBS.:

P1 = Volume dragados na caixa do Píer I "fora" da linha de atracação, ou seja, a mais de 10 metros das defensas;
P1' = Volume dragado na linha de atracação do Píer I, região a menos de 10 metros de distância das defensas;
Interseção Píer I e Píer III = Volume dragado especificamente entre os píeres 1 e 3 (na entrada do píer de rebocadores);
P3 = Volume dragados na caixa do Píer III geral (berços Norte e Sul livres) "fora" da linha de atracação, ou seja, a mais de 10 metros das defensas;
P3' = Volume dragado na linha de atracação do Píer III geral (berços Norte e Sul livres), região a menos de 10 metros de distância das defensas;
P3S = Volume dragados na caixa do Píer III Sul "fora" da linha de atracação, ou seja, a mais de 10 metros das defensas;
P3S' = Volume dragado na linha de atracação do Píer III Sul, região a menos de 10 metros de distância das defensas;
P3N = Volume dragados na caixa do Píer III Norte "fora" da linha de atracação, ou seja, a mais de 10 metros das defensas;
P3N' = Volume dragado na linha de atracação do Píer III Norte, região a menos de 10 metros de distância das defensas;

Figura 4.2 – Exemplo de boletim diário de operação utilizado a partir do ano 2012, com identificação dos volumes dragados diariamente em cada área.

4.3 Vazão Líquida

Para este estudo são utilizados dados referentes à última estação fluviométrica de jusante com medição de vazão líquida de cada um dos três principais rios da sub-bacia do Mearim, a saber, rios Mearim, Grajaú e Pindaré. Deste modo, utilizam-se as seguintes estações (Figura 4.3):

- Rio Mearim: Estação Bacabal
- Rio Grajaú: Estação Aratoí Grande
- Rio Pindaré: Estação Pindaré-Mirim

Figura 4.3 – Localização das estações fluviométricas utilizadas. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015.

Para a estação Bacabal, os dados consistidos disponibilizados compreendem o período entre setembro de 1975 e dezembro de 2007. A Tabela 4.6 apresenta os dados da estação e o Gráfico 4.1 apresenta as vazões líquidas médias mensais para o período entre janeiro de 1976 e dezembro de 2007.

Tabela 4.6 – Dados da Estação fluviométrica Bacabal. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Dados da Estação	
Código	33290000
Nome	BACABAL
Código Adicional	ANA
Bacia	ATLÂNTICO,TRECHO NORTE/NORDESTE (3)
Sub-bacia	RIOS MEARIM,ITAPECURU E OUTROS (33)
Rio	RIO MEARIM
Estado	MARANHÃO
Município	BACABAL
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-4:13:10
Longitude	-44:45:55
Altitude (m)	9
Área de Drenagem (km2)	25500

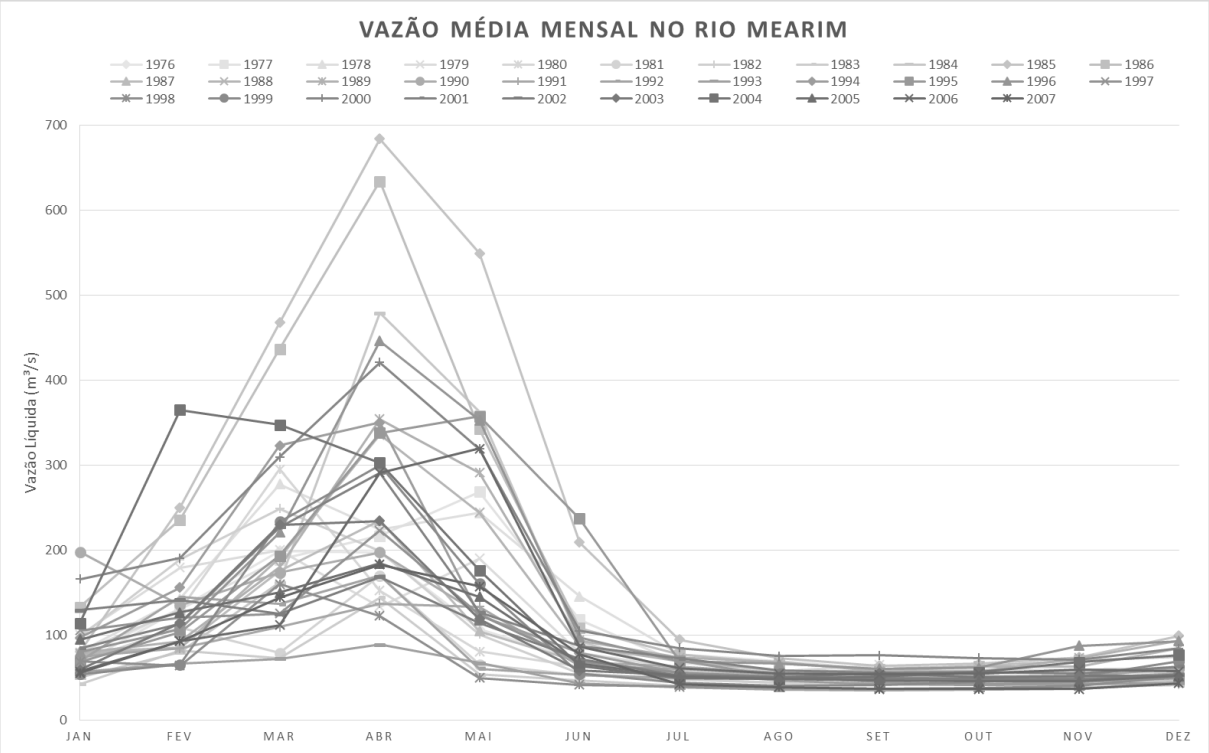


Gráfico 4.1 – Vazão líquida média mensal medida na estação Bacabal. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Para a estação Aratoí Grande, os dados consistidos disponibilizados compreendem o período entre fevereiro de 1970 e dezembro de 2007. A Tabela 4.7 apresenta os dados da estação e o Gráfico 4.2 apresenta as vazões líquidas médias mensais para o período entre janeiro de 1971 e dezembro de 2007.

Tabela 4.7 – Dados da Estação fluviométrica Aratoí Grande. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Dados da Estação	
Código	33380000
Nome	ARATOÍ GRANDE
Código Adicional	ANA
Bacia	ATLÂNTICO,TRECHO NORTE/NORDESTE (3)
Sub-bacia	RIOS MEARIM,ITAPECURU E OUTROS (33)
Rio	RIO GRAJAU
Estado	MARANHÃO
Município	VITÓRIA DO MEARIM
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-3:46:11
Longitude	-45:13:4
Altitude (m)	9
Área de Drenagem (km2)	20300

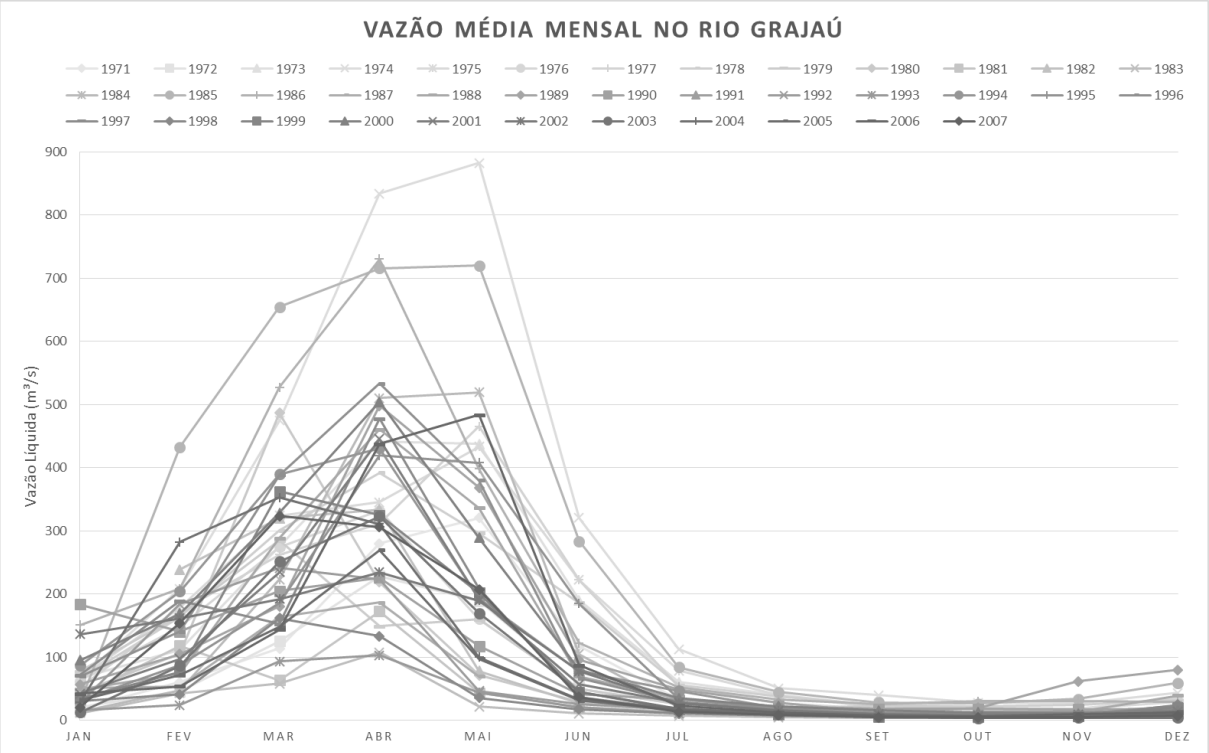


Gráfico 4.2 – Vazão líquida média mensal medida na estação Aratoí Grande. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Para a estação Pindaré-Mirim, os dados consistidos disponibilizados compreendem o período entre dezembro de 1971 e dezembro de 2007. A Tabela 4.8 apresenta os dados da estação e o Gráfico 4.3 apresenta as vazões líquidas médias mensais para o período entre janeiro de 1972 e dezembro de 2007.

Tabela 4.8 – Dados da Estação fluviométrica Pindaré-Mirim. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Dados da Estação	
Código	33190000
Nome	PINDARÉ-MIRIM
Código Adicional	ANA
Bacia	ATLÂNTICO,TRECHO NORTE/NORDESTE (3)
Sub-bacia	RIOS MEARIM,ITAPECURU E OUTROS (33)
Rio	RIO PINDARÉ
Estado	MARANHÃO
Município	PINDARÉ-MIRIM
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-3:39:40
Longitude	-45:27:30
Altitude (m)	4
Área de Drenagem (km2)	35400

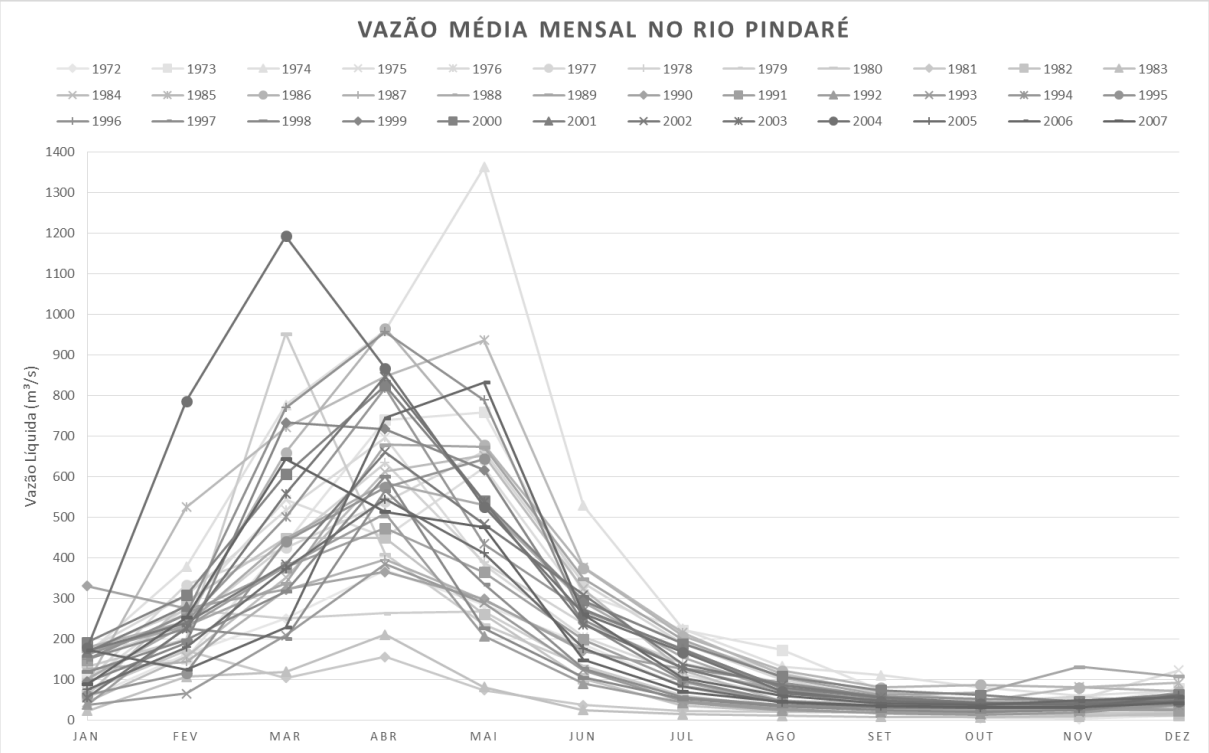


Gráfico 4.3 – Vazão líquida média mensal medida na estação Pindaré-Mirim. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

4.4 Sedimentos

Para este estudo são utilizados dados referentes à última estação fluviométrica de jusante com medição de concentração de sedimentos em suspensão de cada um dos três principais rios da sub-bacia do Mearim, a saber, rios Mearim, Grajaú e Pindaré. Deste modo, utilizam-se as seguintes estações (Figura 4.4):

- Rio Mearim: Estação Pedreiras II
- Rio Grajaú: Estação Aratoí Grande
- Rio Pindaré: Estação Pindaré-Mirim

Figura 4.4 – Localização das estações fluviométricas com medição de concentração de sedimentos utilizadas. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015.

Para a estação Pedreiras II, os dados disponibilizados compreendem o período entre fevereiro de 1982 e outubro de 2014. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os dados da estação e o Gráfico 4.4 apresenta as concentrações de sedimentos e vazões líquidas medidos no período.

Tabela 4.9 – Dados da Estação fluviométrica Pedreiras II. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Dados da Estação	
Código	33281000
Nome	PEDREIRAS II
Código Adicional	ANA
Bacia	ATLÂNTICO,TRECHO NORTE/NORDESTE (3)
Sub-bacia	RIOS MEARIM,ITAPECURU E OUTROS (33)
Rio	RIO MEARIM
Estado	MARANHÃO
Município	PEDREIRAS
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-4:34:12
Longitude	-44:36:18
Altitude (m)	58
Área de Drenagem (km2)	24000

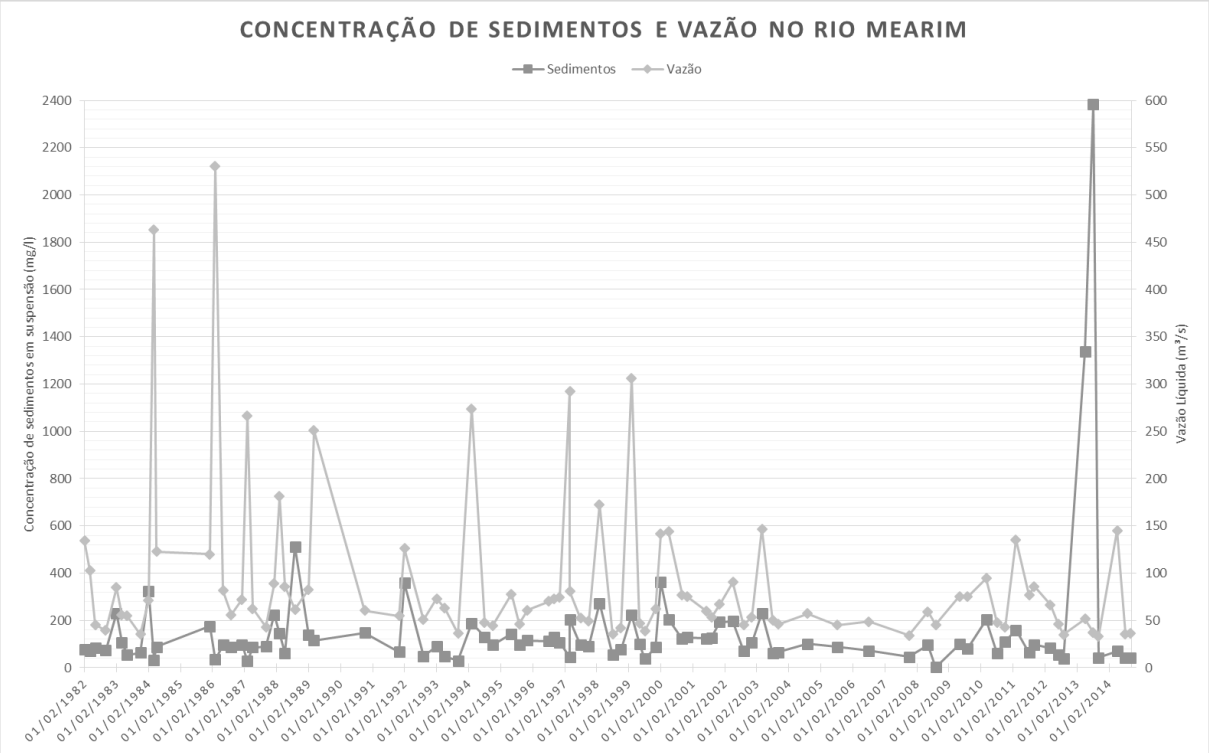


Gráfico 4.4 – Concentração de sedimentos e vazão medidos na estação Pedreiras II. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Para a estação Aratoí Grande, os dados disponibilizados compreendem o período entre março de 1993 e novembro de 2014. O Gráfico 4.5 apresenta as concentrações de sedimentos e vazões líquidas medidos no período.

Gráfico 4.5 – Concentração de sedimentos e vazão medidos na estação Aratoi-Grande. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Para a estação Pindaré-Mirim, os dados disponibilizados compreendem o período entre dezembro de 1992 e novembro de 2014. O Gráfico 4.6 apresenta as concentrações de sedimentos e vazões líquidas medidos no período.

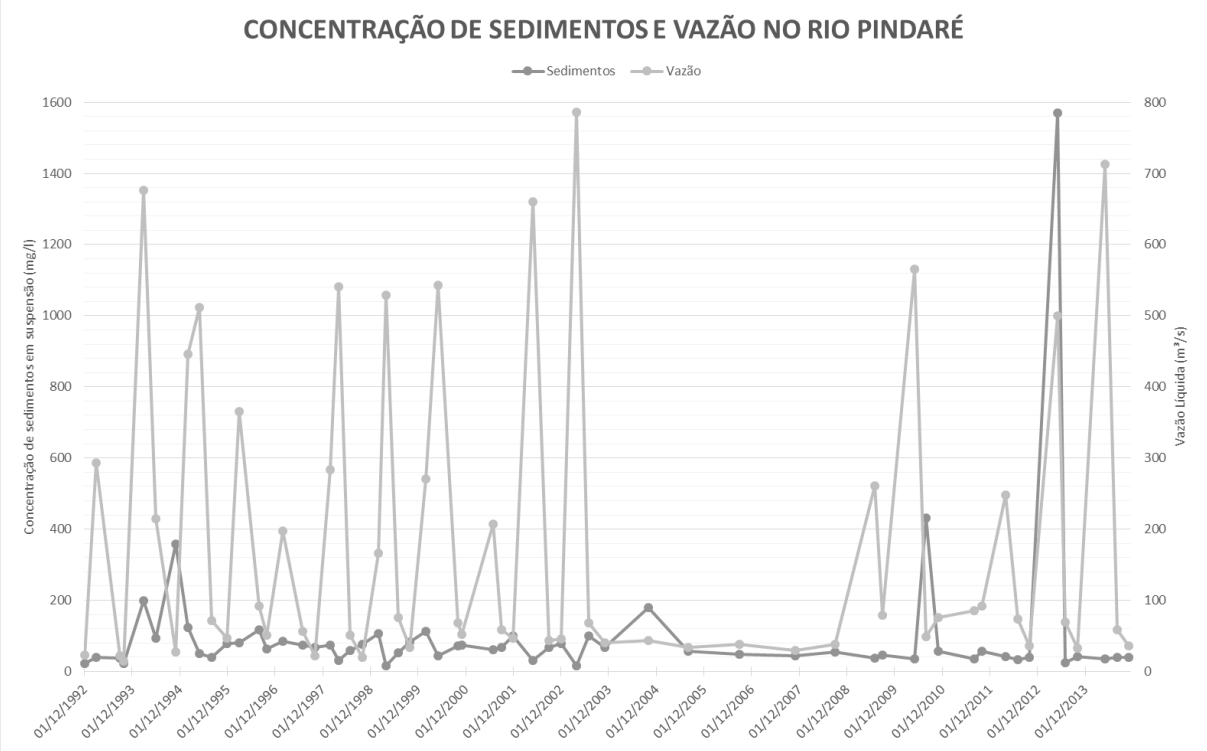


Gráfico 4.6 – Concentração de sedimentos e vazão medidos na estação Pindaré-Mirim. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

4.5 Pluviometria

O equipamento utilizado para a medição de pluviometria fornecida pela Vale localiza-se no próprio Terminal Portuário e este estudo utiliza medições realizadas no período entre os anos de 2009 e 2014. A Figura 4.5 apresenta um exemplo de planilha mensal de pluviometria.

VALE

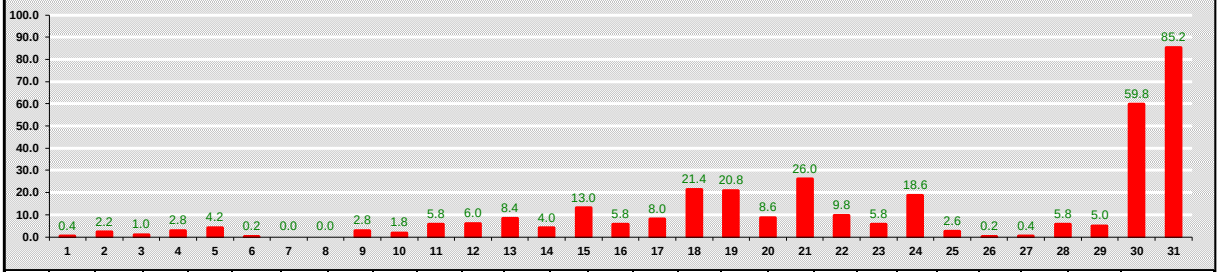
DEPARTAMENTO DE OPERAÇÃO DE LOGÍSTICA NORTE - DILN
GAMAG - Gerência de Meio Ambiente
MEIO AMBIENTE

Local da Estação: Ponta da Madeira
Latitude: 2º33´22"
Município: São Luís
Identificação do Intrumento: Sensor

Mês: Março
Longitude: 44º21´33"
Estado: Maranhão

Ano: 2013
Altitude: 9,40m
Modelo: 370 - MET ONE

PLUVIOMETRIA REFERENTE A MARÇO



Dias	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	TOTAL DIA
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2
3	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
4	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	0.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.4	1.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	2.8
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.8	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.8
11	0.0	2.0	1.8	0.0	0.0	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.2	0.0	2.0	1.6	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	6.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	7.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4
14	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0
15	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	1.4	7.6	0.0						0.0	0.0	13.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
17	0.0	0.0	0.8		0.2	0.0	0.0	0.0	0.0						0.0	2.8	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0
18	0.0	0.2	0.4						0.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	7.6	4.2	2.2	1.4	0.0	0.0	2.4	0.8	21.4
19			2.2	0.8	0.0	0.0	1.4	0.6	1.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3.6	1.8	0.2	1.2	0.2	5.6	20.8
20	3.4	0.8	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	6.6	0.0	0.4	0.2	0.0	0.8	6.8	9.2	0.2	0.0	0.4	26.0
22	1.0	0.0	3.0	0.8	4.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8
23	0.0	0.0	0.0	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	0.0	1.2	1.6	5.8
24	0.2	2.0	0.0	0.4	0.8	0.0	3.2	1.4	3.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2	2.0	0.0	0.0	3.8	18.6
25	0.4	0.2	1.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
28	0.0	0.0	1.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.6	1.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	5.0
30	0.0	0.0	0.6	16.8	0.6	6.6	0.0	0.0	0.6	0.0	16.2	3.8	0.8	0.4	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	0.6	1.6	3.6	59.8
31	0.2	0.0	1.8	0.8	1.8	13.2	59.6	2.4	0.0	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.2
																								TOTAL	336.4

Valores Mensais

Número de Dias de Chuva:	0	Máxima:	85.2	Total (mm):	336.4

* Problemas com o equipamento

Figura 4.5 – Exemplo de planilha de pluviometria fornecida pela Vale.

Também são utilizados os dados de pluviometria medidos em uma estação a montante das estações de medições de vazão utilizadas neste estudo. A estação escolhida foi a Santa Vitória, por fornecer dados consistidos referentes ao mesmo período das vazões obtidas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os dados da estação e o Gráfico 4.7 apresenta a pluviometria mensal medida no período entre janeiro de 1976 e dezembro de 2002.

Tabela 4.10 – Dados da Estação pluviométrica Santa Vitória. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

Dados da Estação	
Código	00444008
Nome	SANTA VITÓRIA
Código Adicional	ANA
Bacia	ATLÂNTICO,TRECHO NORTE/NORDESTE (3)
Sub-bacia	RIOS MEARIM,ITAPECURU E OUTROS (33)
Rio	-
Estado	MARANHÃO
Município	BARRA DO CORDA
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-5:6:5
Longitude	-44:57:39
Altitude (m)	82
Área de Drenagem (km2)	-

Figura 4.6 – Localização da estação pluviométrica utilizada. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015.

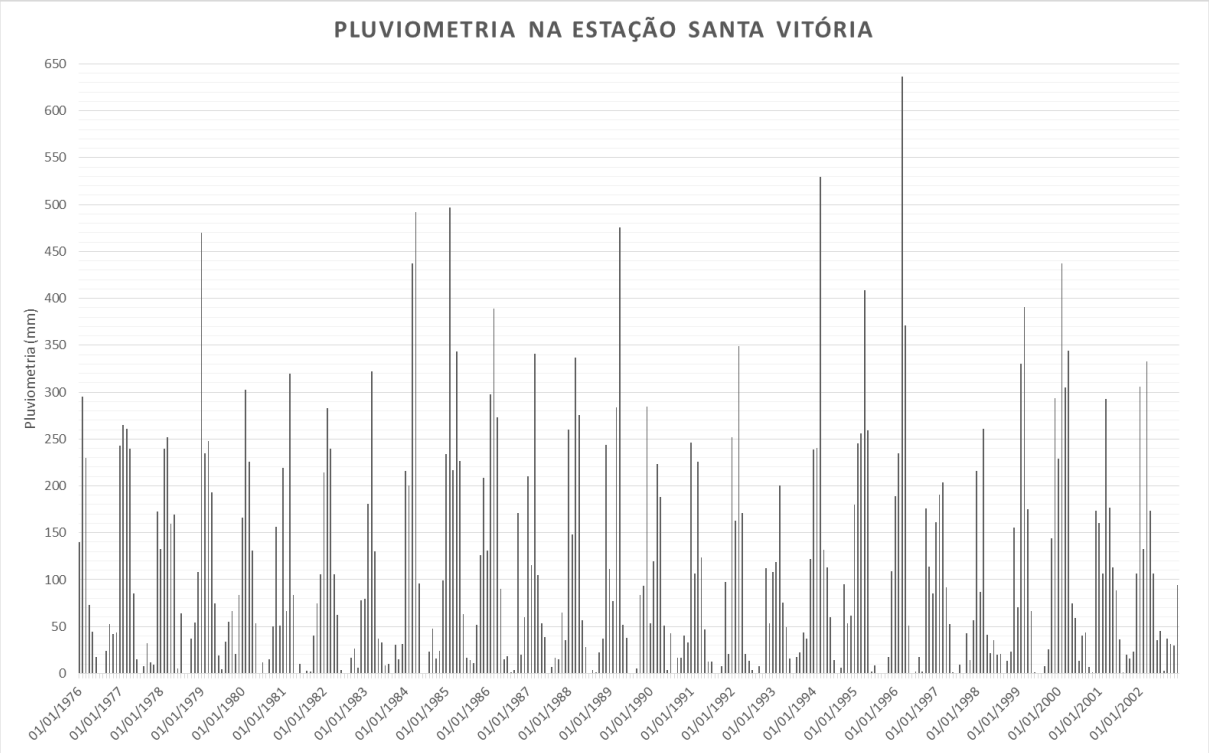


Gráfico 4.7 – Pluviometria medida na Estação Santa Vitória. Fonte: Portal Hidroweb, ANA, em 21/04/2015.

4.6 Marés

A localização do marégrafo cujos dados são utilizados neste estudo é apresentada na Figura 4.7 e a série temporal medida por este equipamento pode ser observada no Gráfico 4.8.

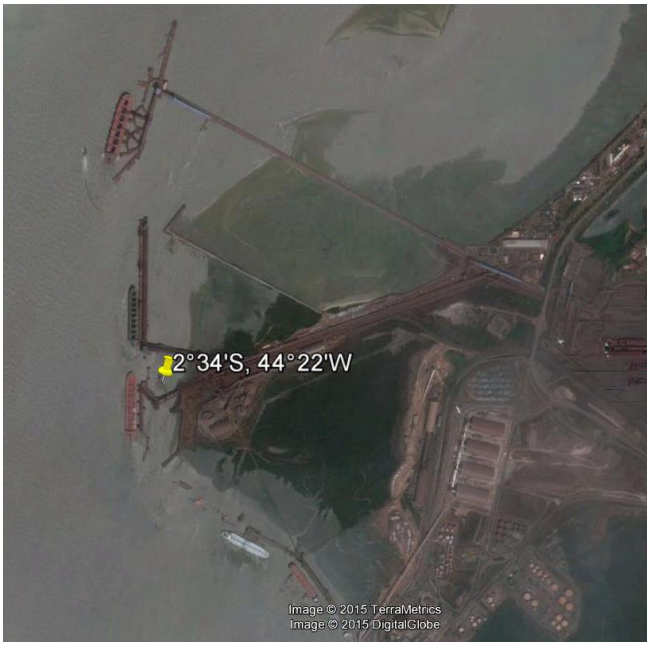


Figura 4.7 – Localização do marégrafo. Fonte: Google Earth, em 03/06/2015.

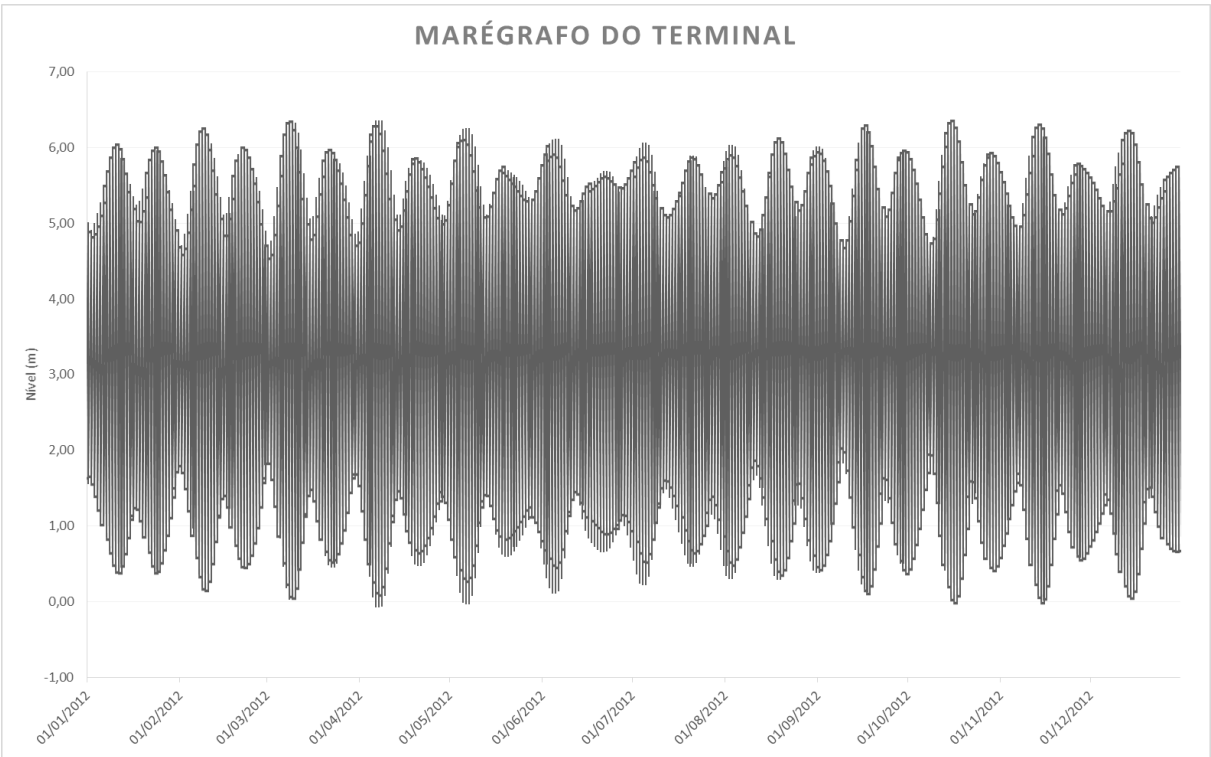


Gráfico 4.8 – Série temporal de medições de nível do mar registradas pelo marégrafo do TMPM. Nível de referência: DHN.

5 MÉTODOS UTILIZADOS

Um estudo de evolução do fundo pode ser realizado por meio de comparação entre superfícies de fundo obtidas a partir de levantamentos batimétricos realizados em datas distintas. Esta comparação pode ser qualitativa, que corresponde à comparação visual de movimentações ocorridas, ou quantitativa, calculando-se a taxa de recomposição do fundo para o período entre essas batimetrias, que pode ser comparada estatisticamente com a pluviometria mensal medida e com os dados de marés, a fim de se obter uma possível correlação entre os dados.

Para tanto, os itens a seguir descrevem os métodos utilizados para o tratamento e análise de cada conjunto de dados.

5.1 Taxas de recomposição do fundo

Na análise das taxas de recomposição dos fundos, executada a partir da análise comparativa dos levantamentos batimétricos e as informações de volume dragado, optou-se por calcular os valores a partir de uma uniformização para todas as áreas e todos os dados batimétricos, independentemente dos períodos de tempo decorridos entre dois levantamentos subsequentes. Desta forma, os dados fornecidos em $m^3/(m^2.dia)$ possibilitam uma análise comparativa entre taxas, independentemente das particularidades decorrentes de cada levantamento batimétrico, servindo de indicativo da ocorrência de áreas com maiores e menores taxas deposicionais, em distintos períodos ao longo do ano.

O cálculo das taxas de recomposição do fundo pode ser realizado por meio das seguintes fórmulas:

$$volume = Vol_{bat} + Vol_{drag}$$

$$taxa = \frac{volume}{área \times tempo}$$

Onde:

- ✓ Vol_{bat} (m^3): volume de diferença entre duas batimetrias consecutivas delimitado pelo polígono da área de interesse, calculado através do software AutoCAD Civil 3D 2011.
- ✓ Vol_{drag} (m^3): volume dragado dentro do polígono da área de interesse no período entre as duas batimetrias consecutivas.
- ✓ Área (m^2): área do polígono que delimita a área de interesse.
- ✓ Tempo (dias): número de dias entre as duas batimetrias consecutivas.

Em virtude das várias alterações na configuração das áreas de dragagem realizadas ao longo do período de estudo, não seria adequado comparar taxas entre períodos com áreas diferentes, por poder se tratar de comportamentos ambientais distintos. Para que se tenha uma uniformização da base comparativa, este estudo utiliza a configuração atual como referência. Sendo assim, os volumes de dragagem para cálculo de taxas em períodos com configuração de áreas diferente da atual correspondem a proporções de volumes dragados na área correspondente, com base nos volumes efetivamente dragados nas áreas originais do período em questão.

Após o cálculo das taxas para todos os períodos entre levantamentos batimétricos, calcula-se a média mensal de recomposição do fundo para cada área.

5.2 Aporte fluvial

A fim de estimar a vazão líquida que deságua no estuário proveniente dos rios da sub-bacia do Mearim, utilizam-se os valores de vazão líquida mensal média medidos nas três estações fluviométricas escolhidas.

Para cada mês ao longo do período em comum às três estações (janeiro de 1976 a dezembro de 2007) calcula-se a soma das três vazões líquidas, de modo que se obtenha a estimativa de vazão total daquele período.

Com base nestas vazões totais mensais, calcula-se a média histórica, além das vazões mínima e máxima para cada mês. Também são estimadas as vazões médias anuais para cada ano compreendido no período especificado.

Com base nas medições de concentração de sedimentos e vazão realizadas nas estações escolhidas, calcula-se a vazão sólida, em t/dia para cada medição realizada, multiplicando-se a vazão líquida (m^3/s) pela concentração de sedimentos em suspensão (mg/l), observando-se as devidas conversões de unidades.

Empregando-se o mesmo método de estimativa de vazões utilizado para determinar a vazão líquida, estima-se também a vazão sólida transportada pela sub-bacia do rio Mearim. São considerados nesta estimativa apenas os meses em que houve medição de concentração de sedimentos nas três estações analisadas, de modo a obter valores mais realistas do aporte fluvial de sedimentos no estuário.

Utilizando-se medições de pluviometria realizadas na estação de montante da sub-bacia, calculam-se, ainda, as médias mensais históricas para o período de 1976 a 2007. Também são calculadas as médias de pluviometria medida no Terminal para o período de levantamentos de campo disponibilizados (2010 a 2013).

5.3 Marés

A fim de comparar as tendências de variações das taxas de recomposição do fundo em relação ao comportamento das marés na região do Terminal, calculam-se as amplitudes mínimas, médias e máximas ao longo de cada mês do ano de 2012, para o qual foram disponibilizadas as medições do marégrafo utilizado pela Vale.

Para identificar os períodos de solstícios e equinócios, calcula-se a diferença entre as amplitudes mínima e máxima para cada mês, de modo que se obtenha as variações máximas mensais de amplitudes de maré.

5.4 Correlações

Por se tratar de uma região estuarina, a área do Terminal sofre a influência tanto das marés quanto do sistema fluvial, podendo resultar em alterações nas taxas de recomposição do fundo correlacionadas a estas variáveis.

As taxas de recomposição do fundo podem ser traduzidas como a variabilidade temporal da camada de sedimentos depositados no fundo. Sendo assim, é necessário

avaliar a disponibilidade de sedimentos para a região. Para tanto, avalia-se, primeiramente, o aporte de sedimentos no estuário proveniente dos rios interligados ao mesmo.

Assim, calcula-se a correlação entre vazão mensal sólida e líquida na sub-bacia, utilizando, separadamente, as estimativas de vazões sólidas transportadas pela sub-bacia e suas médias mensais.

Para conferir maior confiabilidade às análises realizadas com base nos resultados deste estudo, considera-se ainda a correlação entre a vazão líquida da sub-bacia e a pluviometria medida no Terminal.

Para a correlação entre as taxas de recomposição do fundo e a pluviometria, calculam-se as taxas médias de cada mês para cada área ao longo do período analisado. Entretanto, devem ser feitas algumas considerações iniciais:

- A pluviometria utilizada é a que apresenta a melhor correlação com os dados de vazão líquida, que, por sua vez, devem estar correlacionados à vazão sólida;
- As áreas P1', P3S' e P3N' correspondem à base do talude em cada berço de atracação e, portanto, não se mostram adequadas para este tipo de comparação. Nestas áreas, o comportamento das taxas é influenciado pela acomodação dos taludes. Embora ocorra variação ao longo do ano, esta não apresenta um comportamento sazonal. Portanto, neste estudo não serão utilizadas estas áreas neste tipo de correlação;
- Há poucos levantamentos batimétricos ao longo do ano de 2010 nas áreas dos berços do Píer III (P3S e P3N), comparativamente aos anos seguintes. Desta forma, é mais adequado calcular a média mensal entre os anos de 2011 e 2013, para que se observe de fato a sazonalidade da região;
- As áreas D e P3T também não apresentam regularidade de levantamentos batimétricos em 2010. Além disto, houve mudança significativa nos procedimentos de dragagem nestas áreas, que até 2011 eram dragadas frequentemente, o que não ocorre desde 2012. A partir de 2012, a área D não foi dragada e a área P3T recebeu dragagens menos frequentes e menos intensas que o período anterior. Deste modo, opta-se por utilizar a média dos anos de 2012 e 2013 para estas áreas;

- Em abril de 2013, houve deslizamento de talude na região do Píer de rebocadores do Píer I (área D). Isto faz com que a taxa de recomposição do fundo deste mês específico não seja adequada para a análise de correlação com a pluviometria por não corresponder ao comportamento normal da área e, portanto, não será utilizada para o cálculo da média do mês de abril referente à área D.

Para observar com maior clareza a sazonalidade da região, os meses do ano foram divididos em dois períodos com características distintas. O primeiro é caracterizado como período chuvoso e corresponde aos meses de janeiro a junho e o segundo é caracterizado como o período seco e corresponde aos meses de julho a dezembro. A correlação nestes dois períodos foi analisada separadamente.

Para a avaliação da correlação entre as taxas de recomposição do fundo e as amplitudes de maré, foram utilizados os seguintes parâmetros de comparação:

- Variação máxima de amplitude de maré ao longo do mês: Por evidenciar períodos de solstícios e equinócios, serve para analisar a influência destes no transporte de sedimentos local.
- Amplitude máxima ao longo do mês: Utilizada para indicar tendência predominante local de maiores movimentações de fundo em períodos de sizígias, nos quais ocorrem maiores variações de velocidade, podendo resultar em maior capacidade de transporte de sedimentos.
- Amplitude mínima ao longo do mês: Indica tendência predominante local de maiores movimentações de fundo em períodos de quadraturas. Estes períodos, por serem caracterizados por menores velocidades e suas variações, podem resultar em capacidade reduzida de transporte de sedimentos e, por consequência, maiores deposições em algumas regiões.
- Amplitude média ao longo do mês: Corresponde a um parâmetro com reduzida variação ao longo do ano, podendo indicar áreas com tendências de movimentação de sedimentos mais homogêneas.

Como as medições do marégrafo estão compreendidas entre janeiro e dezembro de 2012, a comparação de taxas será realizada para este mesmo período. A fim de

observar comportamentos e tendências diferentes ao longo do ano, foram analisados períodos menores separadamente, que correspondem às quatro estações do ano:

- Verão: meses de dezembro a março
- Outono: meses de março a junho
- Inverno: meses de junho a setembro
- Primavera: meses de setembro a dezembro

Para evitar incompatibilidades com o tipo de cálculo de linha de tendência, foram utilizadas taxas absolutas de recomposição do fundo, sem distinção entre perda e ganho de sedimentos. Desta forma, a correlação foi realizada em termos de intensidades de movimentação do fundo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos no estudo com base nos métodos determinados.

6.1 Taxas de recomposição do fundo

A partir dos arquivos em formato “XYZ”, foram criadas superfícies do fundo para cada levantamento batimétrico utilizando-se o software AutoCAD Civil 3D 2011. A Figura 6.1 e a Figura 6.2 exemplificam superfícies criadas a partir de levantamentos realizados respectivamente em junho e julho de 2013.

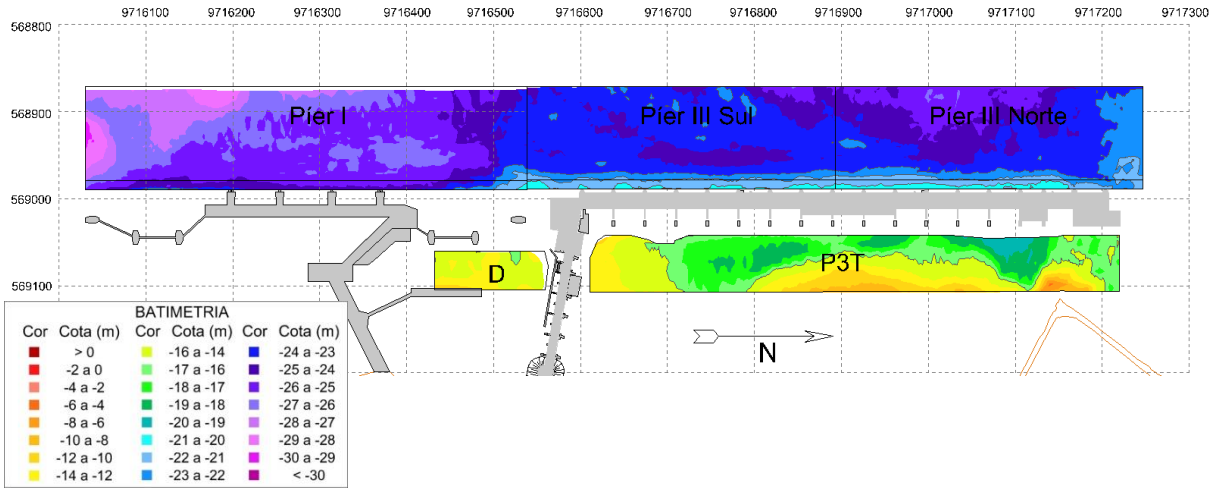


Figura 6.1 – Superfícies de fundo referentes aos levantamentos batimétricos realizados em 14/06/2013 (Píer I e P3T), 21/06/2013 (Píer III Sul e Norte) e 28/06/2013 (D). Datum WGS-84 (UTM-Zona 23S)

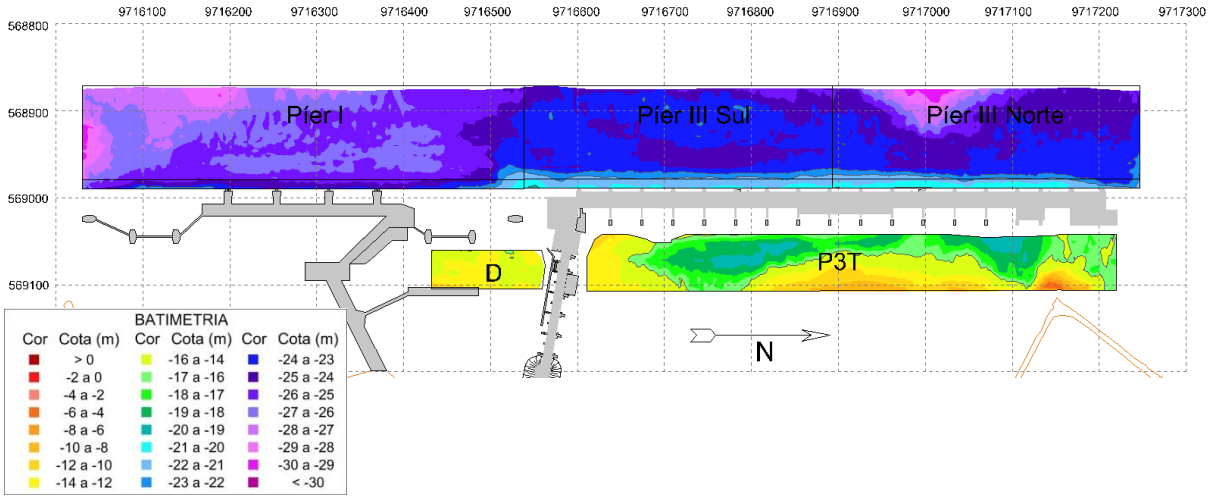


Figura 6.2 – Superfícies de fundo referentes aos levantamentos batimétricos realizados em 09/07/2013 (Píer I e Píer III Sul e Norte) e 24/07/2013 (P3T e D). Datum WGS-84 (UTM-Zona 23S)

Utilizando-se o mesmo software, foram calculados os volumes de diferenças entre batimetrias para cada par de levantamentos consecutivos ao longo do período de estudo. A Figura 6.3 ilustra um exemplo de comparação batimétrica entre batimetrias consecutivas.

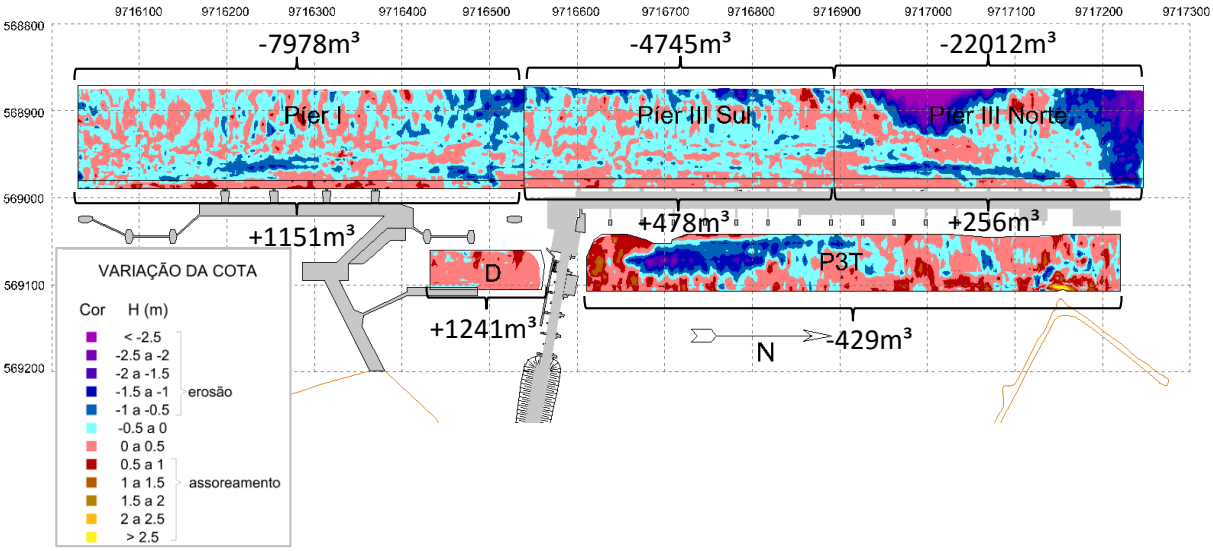


Figura 6.3 – Comparação de superfícies de fundo referentes a levantamentos realizados em junho e julho de 2013. Datum WGS-84 (UTM-Zona 23S)

Após o cálculo dos volumes entre batimetrias para todos os pares de levantamentos consecutivos dentro do período de estudo, foi possível calcular as taxas de recomposição do fundo para cada área em cada período, considerando também os volumes dragados entre batimetrias conforme método proposto. As tabelas abaixo apresentam as médias mensais dessas taxas para cada área de interesse.

Tabela 6.1 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do berço de atracação do Píer I. Valores em (10-3m³/ (m².dia)).

Área P1					Área P1'				
Ano	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***Ano***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***
Jan	10.8	21.2	11.6	17.9	***Jan***	21.0	6.0	20.3	16.5
Fev	17.3	13.5	29.1	17.7	***Fev***	7.5	7.2	10.1	21.7
Mar	14.0	13.6	9.7	13.8	***Mar***	10.1	23.7	6.7	27.8
Abr	5.8	6.8	5.9	18.4	***Abr***	27.7	1.9	14.2	1.1
Mai	5.1	23.9	11.3	-8.8	***Mai***	-5.0	32.4	18.0	47.7
Jun	5.1	4.9	3.8	-0.9	***Jun***	-4.2	0.0	12.5	57.6
Jul	5.4	4.6	14.8	3.7	***Jul***	4.7	3.7	11.1	67.3
Ago	-5.5	0.8	5.5	7.3	***Ago***	2.7	3.1	-3.9	51.6
Set	-4.1	8.9	8.7	-2.6	***Set***	9.0	8.6	13.0	28.3
Out	11.8	12.1	16.1	10.3	***Out***	4.6	12.4	5.6	23.0
Nov	17.0	8.7	14.2	10.8	***Nov***	1.2	13.2	17.3	35.1
Dez	13.9	6.2	4.0	2.4	***Dez***	9.8	6.7	5.1	67.2

Tabela 6.2 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do berço de atracação do Píer III Sul. Valores em (10^{-3}m³/ (m².dia)).

Área P3S					Área P3S'				
Ano	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***Ano***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***
Jan	5.9	8.2	-3.7	22.6	***Jan***	90.6	14.8	47.3	29.3
Fev	5.9	3.6	18.4	20.6	***Fev***	90.6	32.8	-5.8	16.2
Mar	19.3	16.5	36.7	9.2	***Mar***	77.5	91.8	0.3	-10.4
Abr	21.9	24.3	16.6	17.0	***Abr***	75.0	76.0	17.9	3.0
Mai	21.9	13.9	6.5	-9.6	***Mai***	75.0	79.2	4.4	8.4
Jun	2.8	13.9	13.1	2.6	***Jun***	47.2	79.2	34.3	20.6
Jul	-5.4	-6.9	17.5	-2.3	***Jul***	35.3	54.5	19.5	71.5
Ago	-5.4	7.7	18.1	16.7	***Ago***	35.3	6.9	9.7	88.4
Set	6.3	28.8	18.0	8.2	***Set***	43.2	23.1	10.9	32.6
Out	15.2	9.0	12.5	-0.4	***Out***	49.2	19.3	28.3	164.0
Nov	15.2	3.7	14.2	19.5	***Nov***	49.2	-5.1	11.8	115.3
Dez	27.8	4.0	12.2	4.5	***Dez***	29.0	-1.5	12.6	112.2

Tabela 6.3 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do berço de atracação do Píer III Norte. Valores em ($10^{-3}m^3/(m^2.dia)$).

Área P3N					Área P3N'				
Ano	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***Ano***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***
Jan	-2.1	-2.0	-1.4	10.8	***Jan***	-0.1	5.0	-12.3	-0.9
Fev	-2.1	0.7	28.6	27.6	***Fev***	-0.1	7.0	13.2	17.3
Mar	-4.0	5.7	22.7	12.9	***Mar***	-1.5	11.4	19.1	-13.9
Abr	-6.4	2.7	19.3	18.2	***Abr***	-3.2	-9.3	18.8	-6.7
Mai	-6.4	27.7	2.6	6.4	***Mai***	-3.2	11.6	14.8	51.9
Jun	-6.4	14.7	5.8	17.9	***Jun***	-3.2	10.9	9.8	43.4
Jul	1.8	10.5	19.5	13.2	***Jul***	-0.9	9.8	16.3	-6.9
Ago	2.4	16.0	16.5	17.2	***Ago***	-0.8	10.5	19.7	32.5
Set	2.4	9.7	-15.2	11.1	***Set***	-0.8	7.7	-4.5	56.4
Out	2.4	9.1	14.3	11.5	***Out***	-0.8	7.8	15.9	82.3
Nov	2.4	13.3	15.6	15.7	***Nov***	-0.8	19.0	25.8	118.3
Dez	-14.3	-29.6	17.8	18.7	***Dez***	-7.7	-7.6	13.3	39.7

Tabela 6.4 – Médias mensais de taxas de recomposição do fundo para as áreas do Píer de rebocadores (D) e do Tardoz do Píer III (P3T). Valores em ($10^{-3}m^3/(m^2.dia)$).

Área D					Área P3T				
Ano	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***Ano***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***
Jan	-	0.9	12.3	3.4	***Jan***	9.2	13.4	2.9	5.2
Fev	-	9.2	7.7	14.2	***Fev***	9.2	17.3	2.4	10.0
Mar	-	9.2	9.9	-3.4	***Mar***	9.2	26.7	11.9	5.3
Abr	-	12.2	10.5	-30.5	***Abr***	9.2	6.9	4.6	-2.1
Mai	-	13.2	2.3	6.6	***Mai***	9.2	7.5	8.4	3.3
Jun	-	35.5	9.5	1.6	***Jun***	15.7	9.1	-2.0	-4.2
Jul	-	72.1	7.2	9.2	***Jul***	23.1	21.7	10.3	6.2
Ago	-	24.6	1.0	12.0	***Ago***	27.2	17.4	4.7	5.4
Set	-	21.4	9.0	1.1	***Set***	27.4	9.0	-4.2	8.1
Out	-	32.6	7.4	5.9	***Out***	23.0	10.9	9.9	7.7
Nov	-	48.9	10.1	9.2	***Nov***	23.0	26.0	-1.2	2.7
Dez	-3.0	6.6	1.9	4.5	***Dez***	12.6	4.2	1.0	1.3

Quanto às taxas médias de recomposição do fundo no período considerado, para a área do Píer I, são observados valores da ordem de 10 a 20 mm/dia durante os meses de janeiro a abril. No período de maio a dezembro, estes valores são da ordem de até 10 mm/dia, com exceção dos meses de outubro e novembro, quando há um aumento das taxas, atingindo aproximadamente 13 mm/dia. Este aumento está relacionado com o equinócio de primavera, como mostra a correlação entre taxas de recomposição do fundo e marés neste período.

Para a área P3S, onde se observou comportamento mais homogêneo ao longo do ano, estas taxas variam entre cerca de 15 a 20 mm/dia nos meses de fevereiro a abril,

agosto, setembro e novembro. Nos demais meses, estes valores são da ordem de até 10 mm/dia.

A área P3N apresenta taxas de recomposição do fundo que oscilam de maneira geral entre cerca de 10 e 20 mm/dia, com picos nos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro, apresentando defasagem de aproximadamente dois meses entre taxas máximas e solstícios/equinócios.

Estes valores de taxas para as áreas de tardoz (D e P3T) variam de maneira geral entre 5 e 10 mm/dia. A área D apresenta seus maiores valores entre os meses de janeiro a abril, correspondentes ao período chuvoso, além dos meses de julho (próximo a solstício) e novembro (próximo a equinócio). A área P3T apresenta seus valores máximos nos meses de março, julho e outubro, próximos a solstícios/equinócios.

Estas taxas médias mensais de recomposição do fundo obtidas servem como base de comparação para as correlações que são objeto deste estudo, tanto em relação às marés quanto ao sistema fluvial.

6.2 Aporte fluvial

O Gráfico 6.1 apresenta as vazões líquidas médias mensais e o Gráfico 6.2 apresenta as vazões líquidas médias anuais estimadas pelo método proposto, utilizando o período entre janeiro de 1976 e dezembro de 2007.

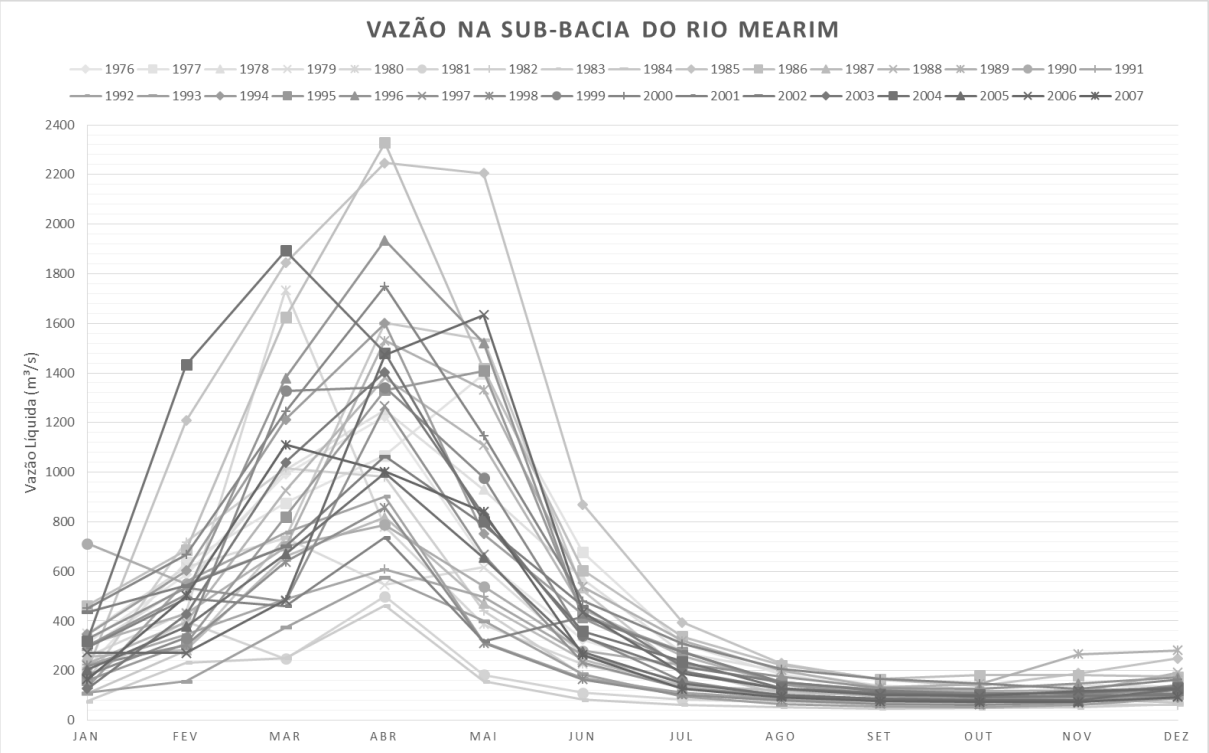


Gráfico 6.1 – Vazão Líquida média mensal na sub-bacia do rio Mearim.

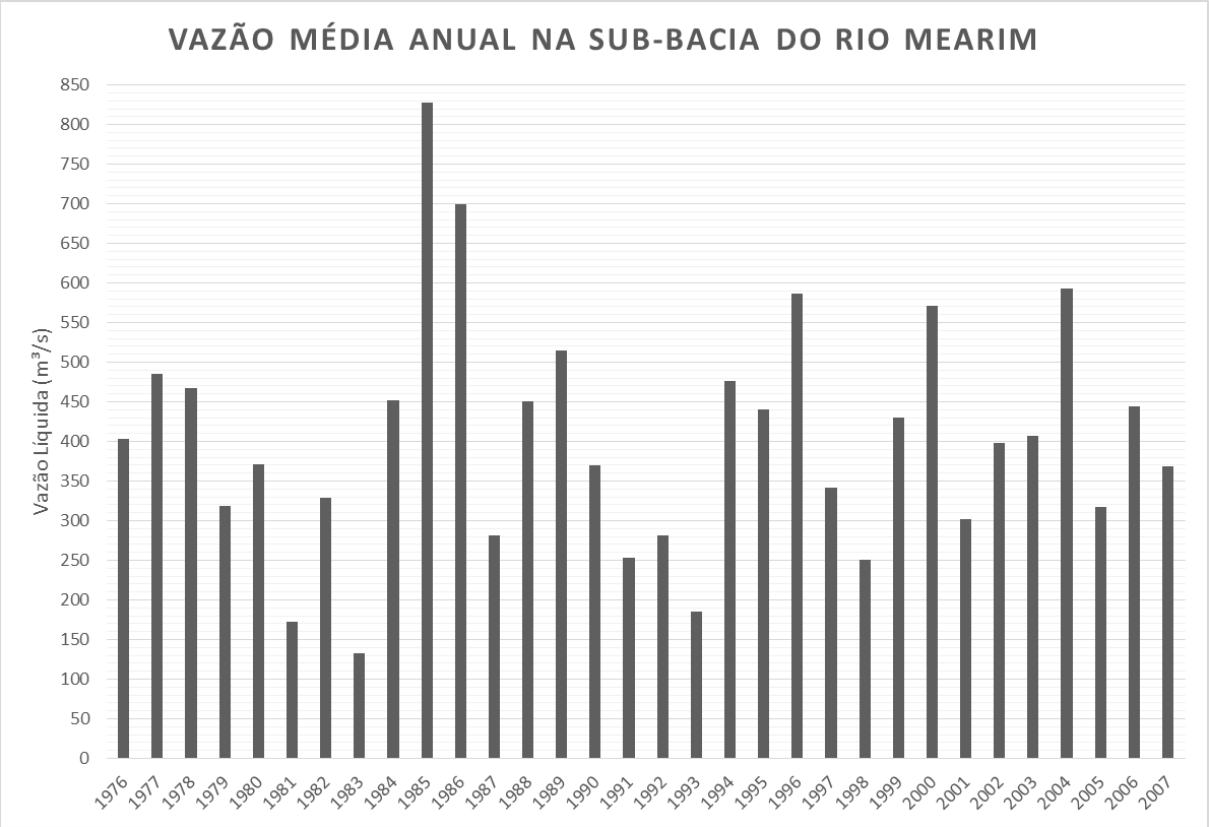


Gráfico 6.2 – Vazão Líquida média anual na sub-bacia do rio Mearim.

Observa-se que a vazão média anual, assim como a pluviometria anual acumulada, sofre variações plurianuais, com valores de pico a cada aproximadamente 4 anos. Deve-se atentar para esta oscilação ao utilizar essas relações para previsões futuras.

Com base nestes dados, o Gráfico 6.3 apresenta a média mensal histórica calculada, além dos valores médios mensais mínimos e máximos de vazões líquidas para o mesmo período.

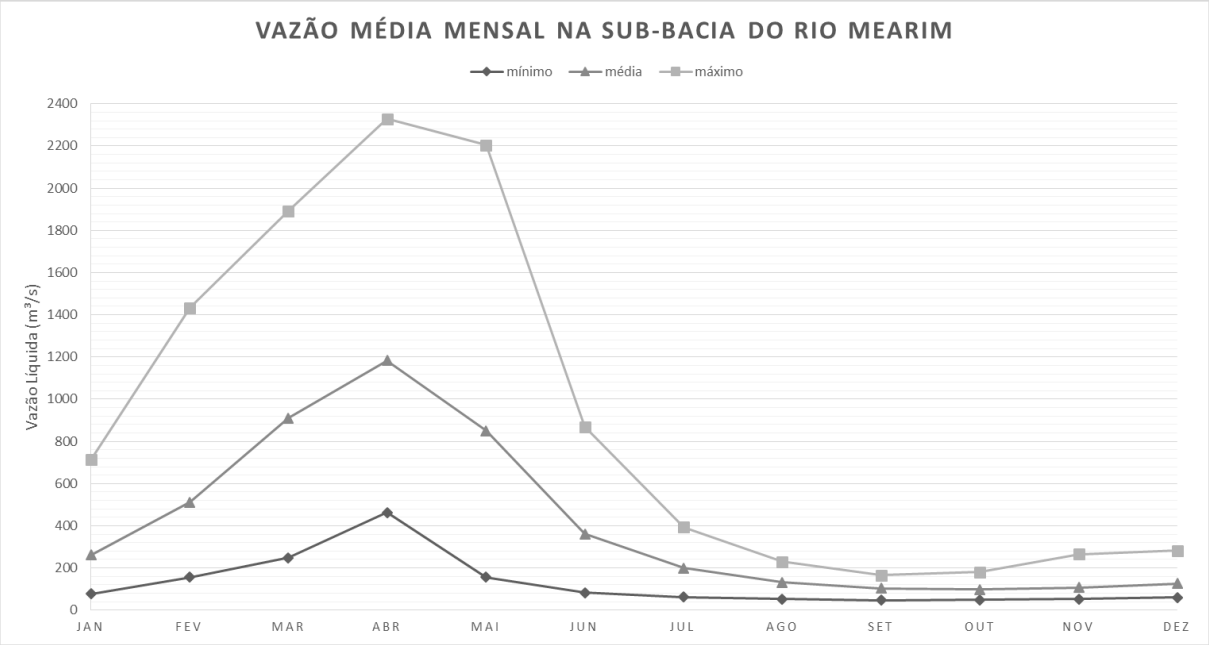


Gráfico 6.3 – Média histórica e envoltória de máximos e mínimos da Vazão Líquida média mensal na sub-bacia do rio Mearim para o período entre janeiro de 1976 e dezembro de 2007.

O Gráfico 6.4 apresenta a comparação entre as vazões sólidas e líquidas obtidas para o período de novembro de 1994 a agosto de 2014.

Gráfico 6.4 – Vazões Sólidas e Líquidas estimadas para a sub-bacia do rio Mearim.

O Gráfico 6.5 apresenta as médias mensais destes valores de vazões, considerando-se o período apresentado. Não há medições realizadas no mesmo mês para as três estações para os meses de janeiro, fevereiro, março e junho dentro do período analisado e, portanto, não são apresentadas médias mensais para estes meses.

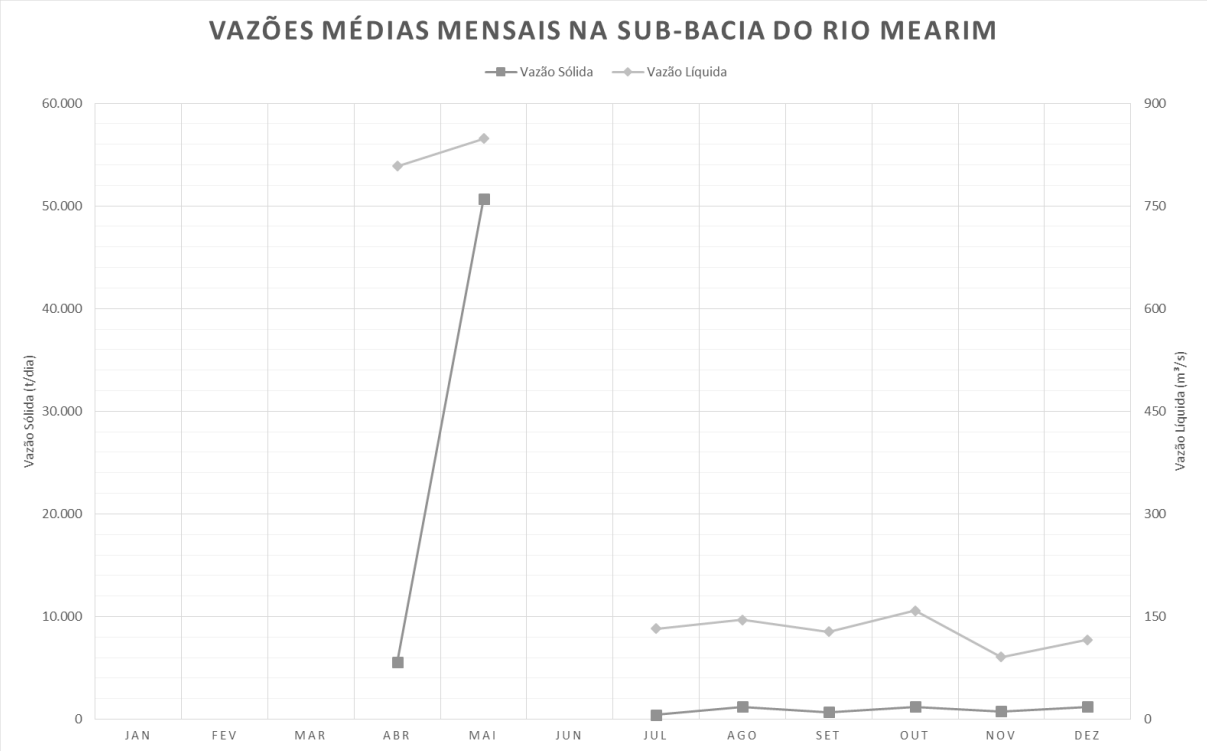


Gráfico 6.5 – Vazões Sólidas e Líquidas médias mensais para a sub-bacia do rio Mearim.

O Gráfico 6.6 apresenta a comparação entre as médias mensais históricas de pluviometria e as vazões líquidas médias históricas mensais para o mesmo período.

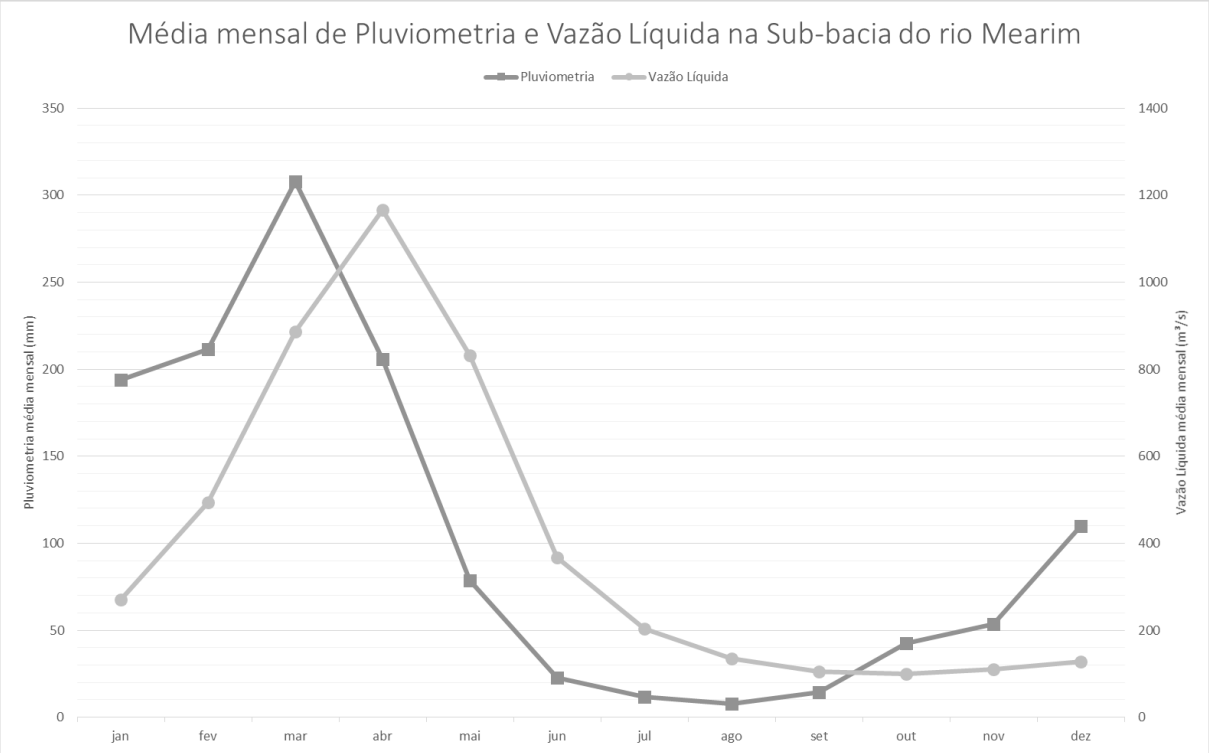


Gráfico 6.6 – Pluviometria e Vazão Líquida médias mensais históricas referentes ao período de janeiro de 1976 a dezembro de 2002 na sub-bacia do rio Mearim.

A fim de analisar se seria possível utilizar os dados de pluviometria do Terminal como parâmetro substituto da pluviometria na sub-bacia ao estimar vazões líquidas e sólidas, as médias mensais das medições das duas estações foram comparadas e os resultados são apresentados no Gráfico 6.7.

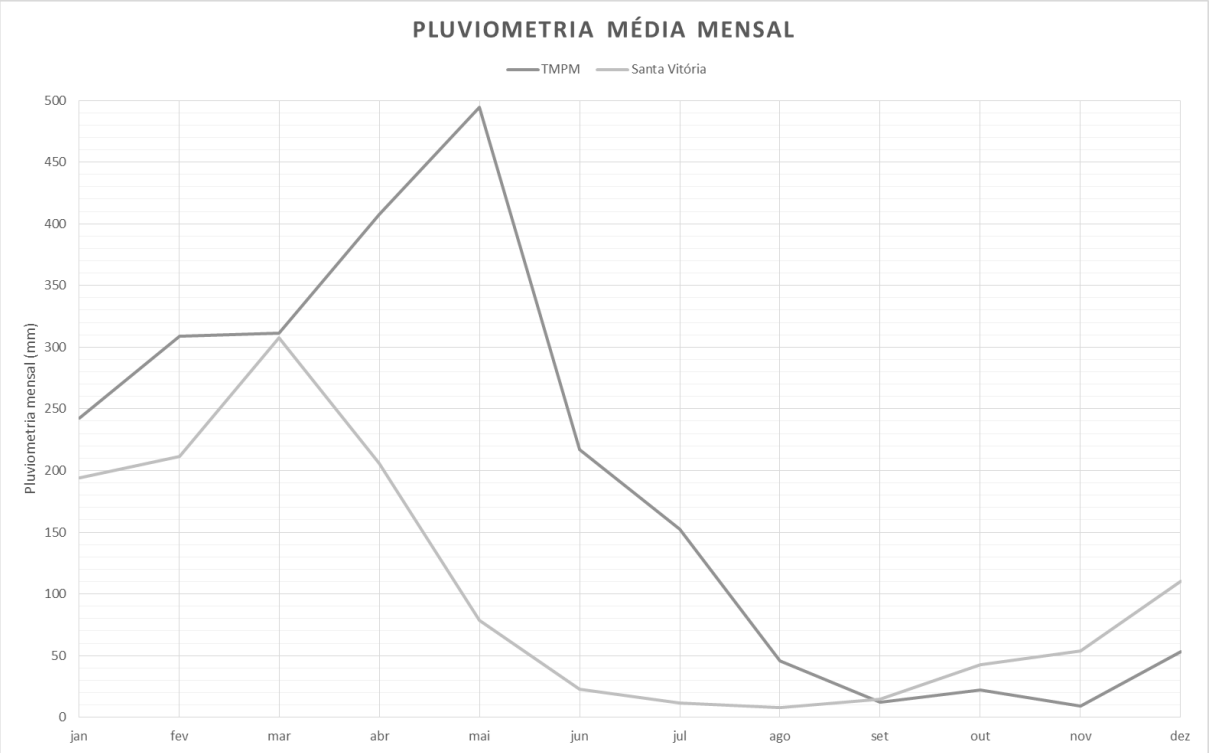


Gráfico 6.7 – Pluviometria média mensal para as regiões do Terminal e da sub-bacia do rio Mearim.

6.3 Maré

Os valores obtidos de amplitudes mínimas médias e máximas para cada mês estão apresentados no Gráfico 6.8. O Gráfico 6.9 apresenta as variações entre amplitudes máximas e mínimas para cada mês, evidenciando os períodos de sizígias equinociais, correspondentes a março e setembro/outubro.

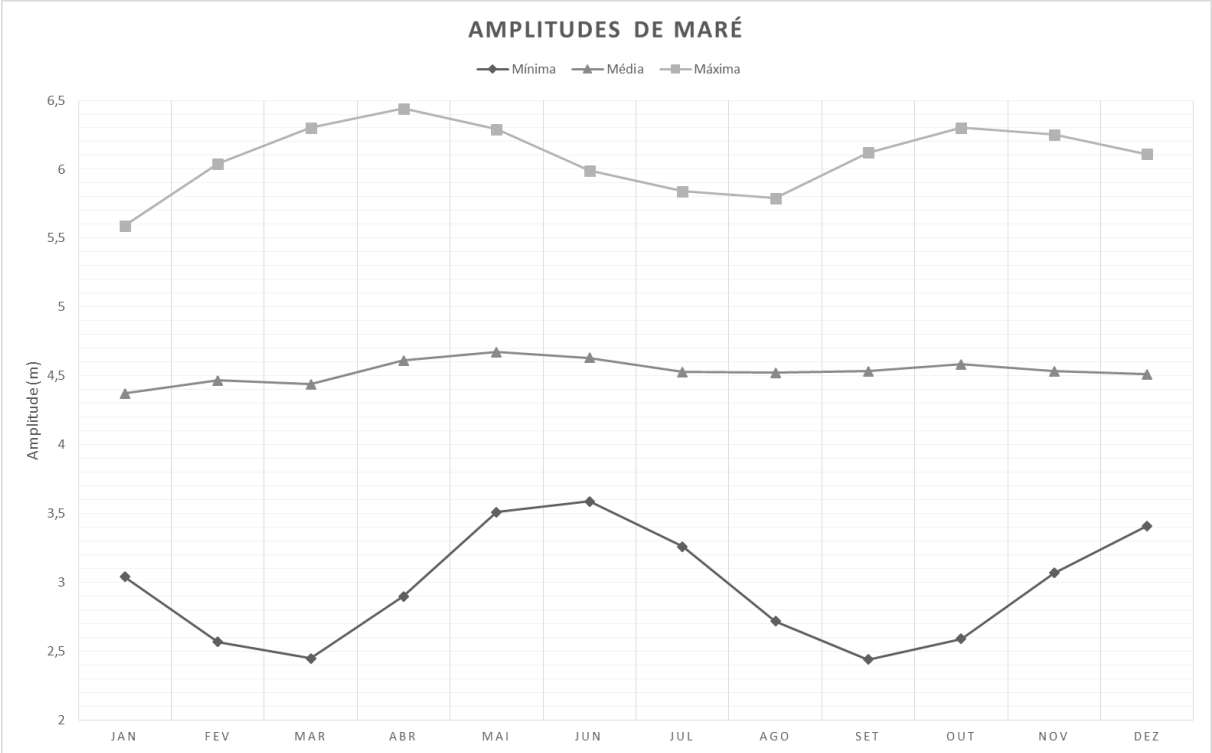


Gráfico 6.8 – Amplitudes mínimas, médias e máximas ao longo do ano de 2012 no TMPM.

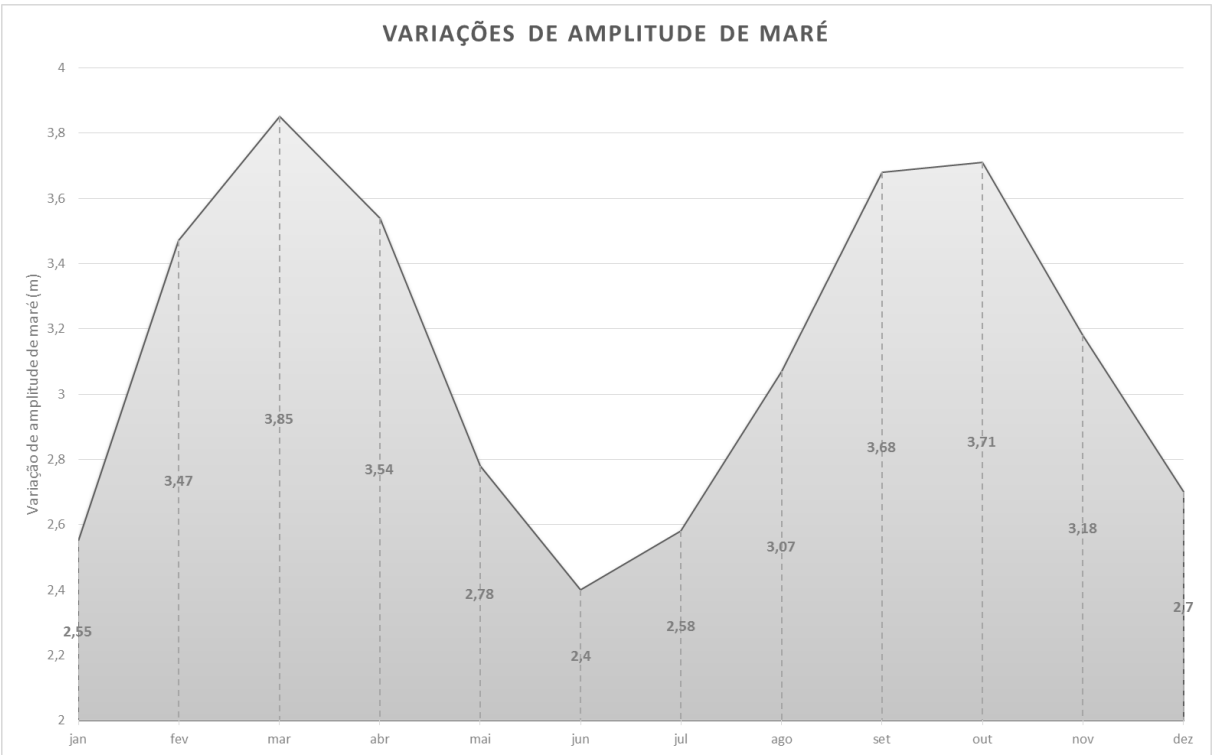


Gráfico 6.9 – Variação de amplitudes ao longo de cada mês do ano de 2012 no TMPM.

6.4 Correlações

Os itens a seguir tratarão separadamente das correlações entre as taxas de recomposição do fundo e cada um dos dois principais sistemas envolvidos.

6.4.1 Sistema Fluvial

O Gráfico 6.10 correlaciona as vazões sólida e líquida estimadas para a sub-bacia do rio Mearim, considerando tanto a série temporal destes valores quanto a média dos mesmos para cada mês do ano.

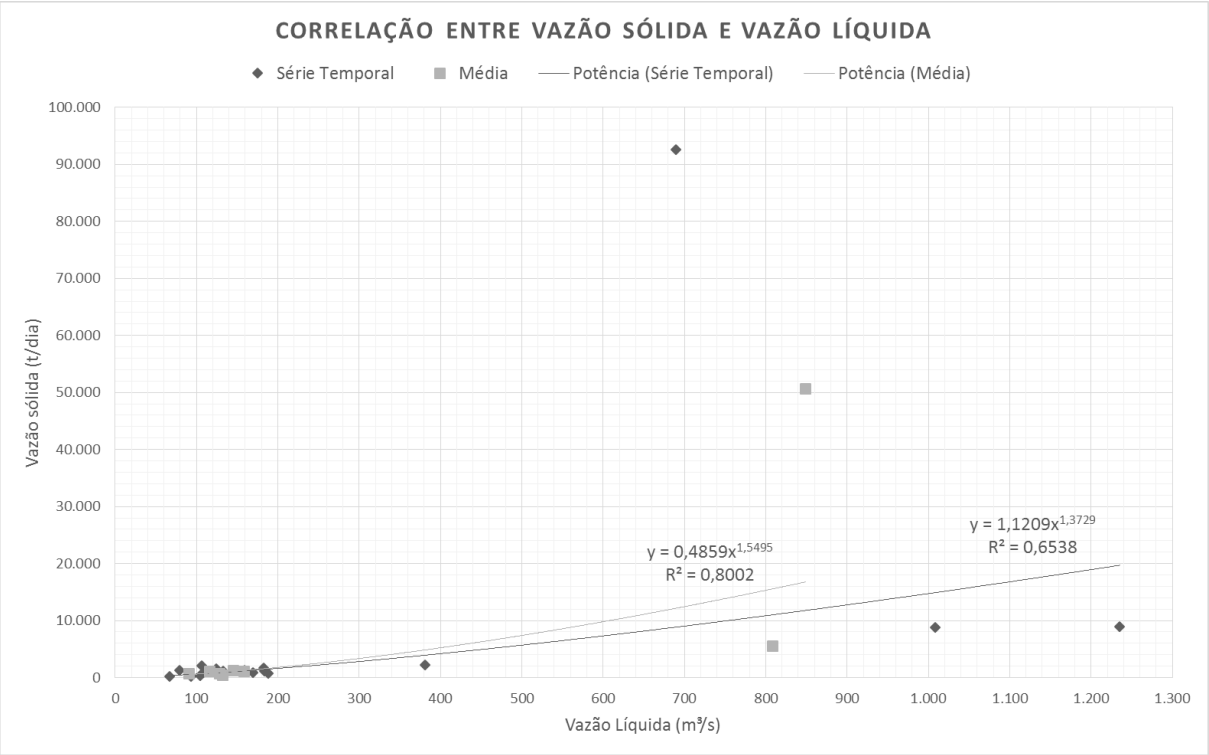


Gráfico 6.10 – Correlação entre vazão sólida e vazão líquida na sub-bacia do rio Mearim.

As vazões sólidas e líquidas médias mensais estimadas para a sub-bacia do rio Mearim apresentam boa correlação entre si (R^2=0,80), indicando que as estações fluviométricas escolhidas e o método proposto constituem um bom parâmetro para o cálculo do aporte sólido proveniente do sistema fluvial em questão.

Por sua vez, a vazão líquida que deságua no estuário proveniente dos rios da sub-bacia do rio Mearim apresenta boa correlação com as chuvas nesta mesma sub-bacia, porém com cerca de 1 mês de defasagem da vazão em relação à pluviometria

(R^2=0,92), como pode ser observado no Gráfico 6.6. Não se observa esta defasagem quando se compara a vazão líquida com a pluviometria no Terminal, que também apresenta boa correlação (R^2=0,99). Isto torna possível a utilização da pluviometria medida no Terminal como parâmetro substituto da vazão líquida para a estimativa de vazão sólida da sub-bacia do rio Mearim.

O Gráfico 6.11 apresenta a correlação entre a vazão líquida média mensal estimada que deságua no estuário e a pluviometria média medida no mês anterior na estação a montante na sub-bacia e no mesmo mês no Terminal.

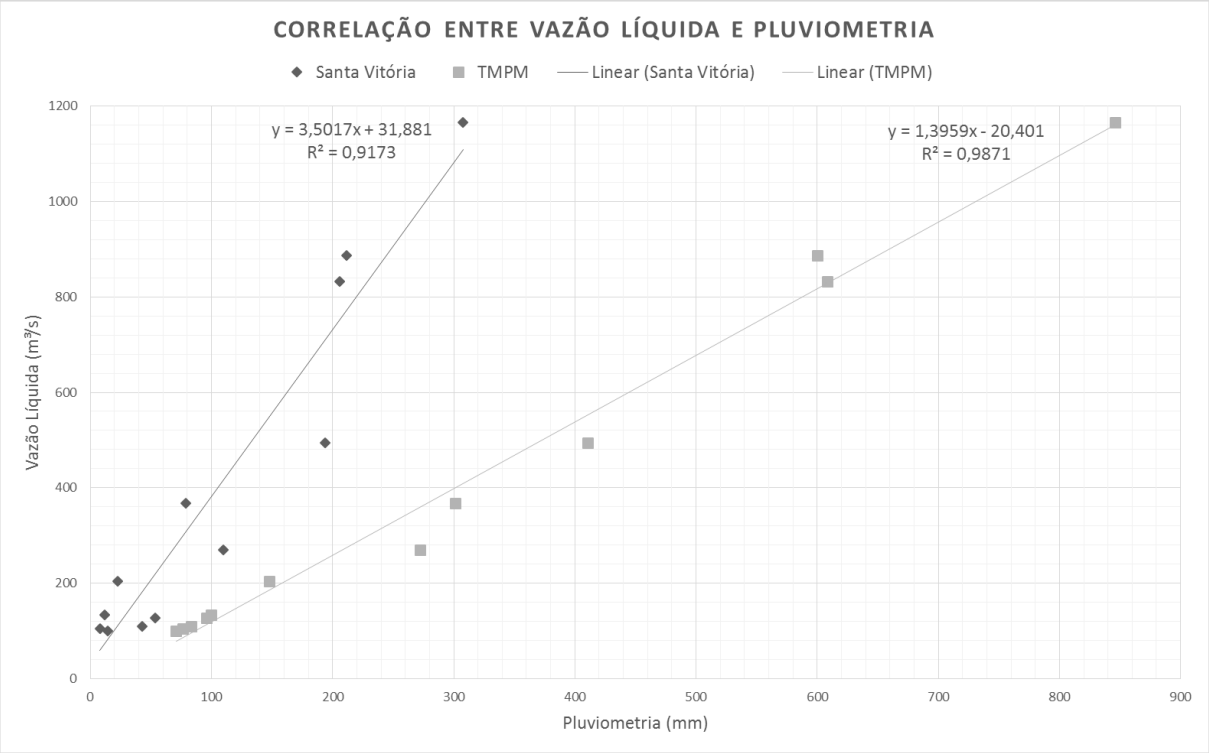


Gráfico 6.11 – Correlação entre vazão líquida e pluviometria medida no mês anterior a montante (Estação Santa Vitória) na sub-bacia do rio Mearim e no mesmo mês na estação localizada no Terminal.

Observa-se excelente correlação linear entre a pluviometria medida no Terminal e a vazão líquida de entrada no estuário. Deste modo, conclui-se que esta pluviometria é um bom parâmetro para a estimativa do comportamento da vazão da sub-bacia do Mearim e, portanto, pode ser utilizada para analisar a influência do sistema fluvial nas taxas de recomposição do fundo.

O Gráfico 6.12 apresenta as taxas médias mensais calculadas para cada área, comparadas à pluviometria mensal medida no Terminal.

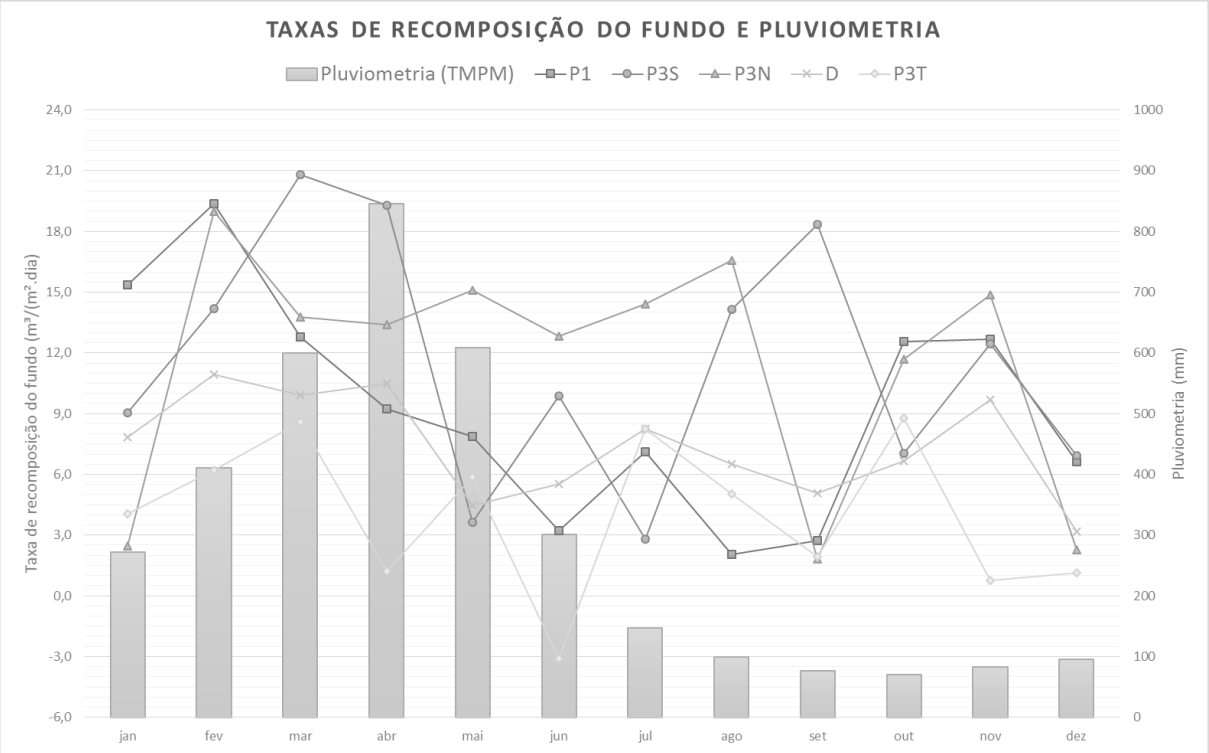


Gráfico 6.12 – Taxas de recomposição do fundo nas áreas de dragagem, comparadas à pluviometria medida no Terminal.

Para a área P1, a correlação para o período chuvoso é apresentada no Gráfico 6.13 e para o período seco no Gráfico 6.14. Também foram analisadas as correlações considerando uma defasagem nas taxas em relação à pluviometria. Assim, as taxas do período entre janeiro e junho foram correlacionadas com a pluviometria do período entre novembro e abril, que corresponde aos meses em que se observa intensificação das chuvas. Da mesma forma, as taxas do período de julho a dezembro foram correlacionadas com a pluviometria do período de maio a outubro, em que ocorre diminuição de chuvas.

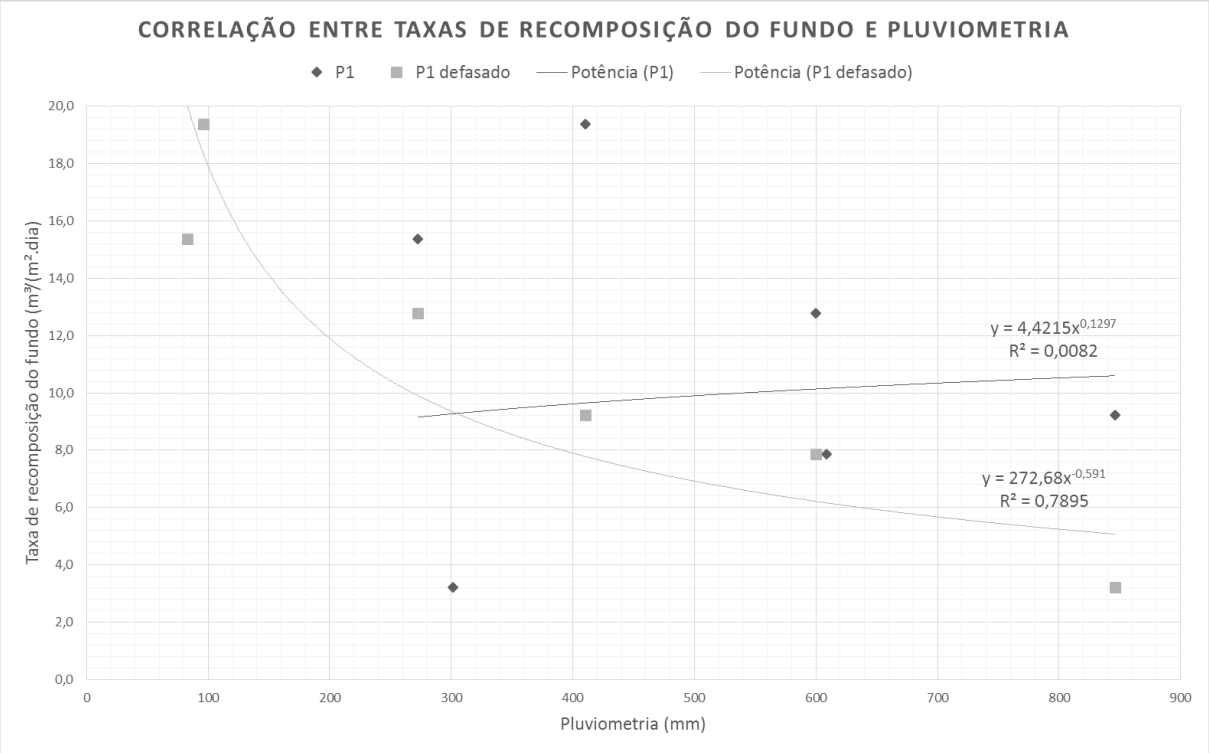


Gráfico 6.13 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P1, considerando o período chuvoso. "P1 defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

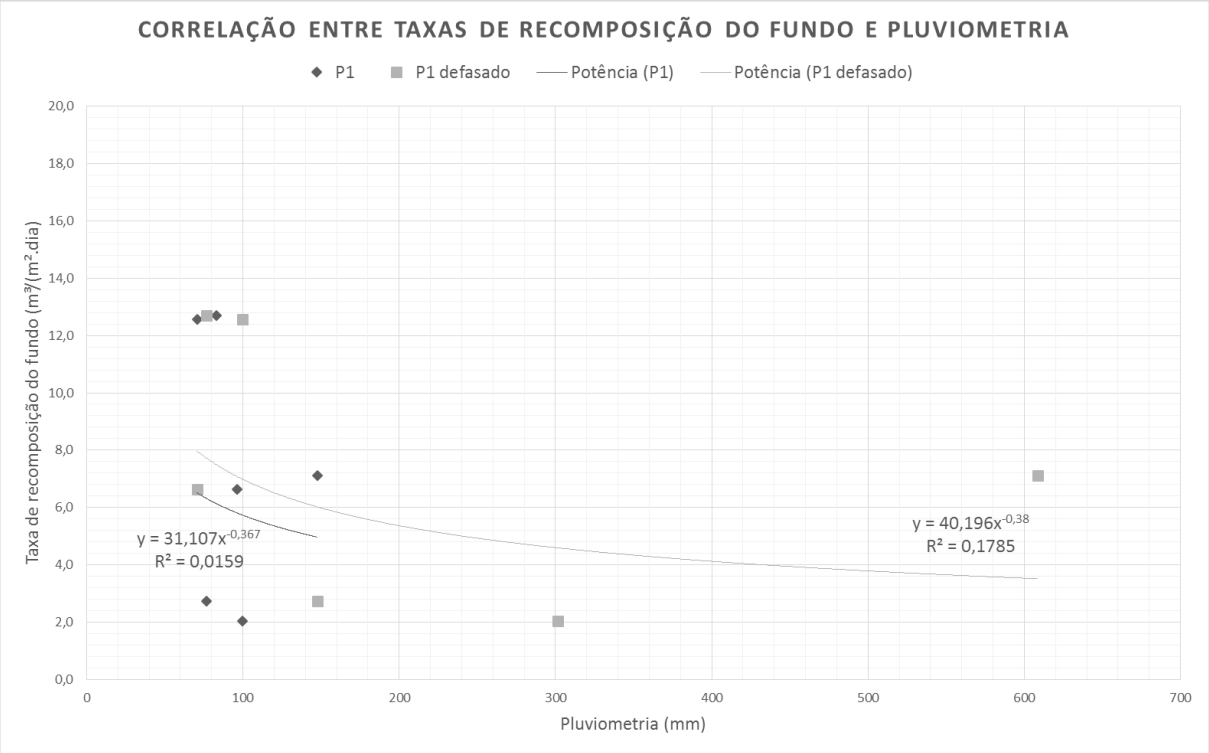


Gráfico 6.14 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P1, considerando o período seco. "P1 defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

Os resultados desta mesma análise para a área P3S são apresentados no Gráfico 6.15 (período chuvoso) e no Gráfico 6.16 (período seco).

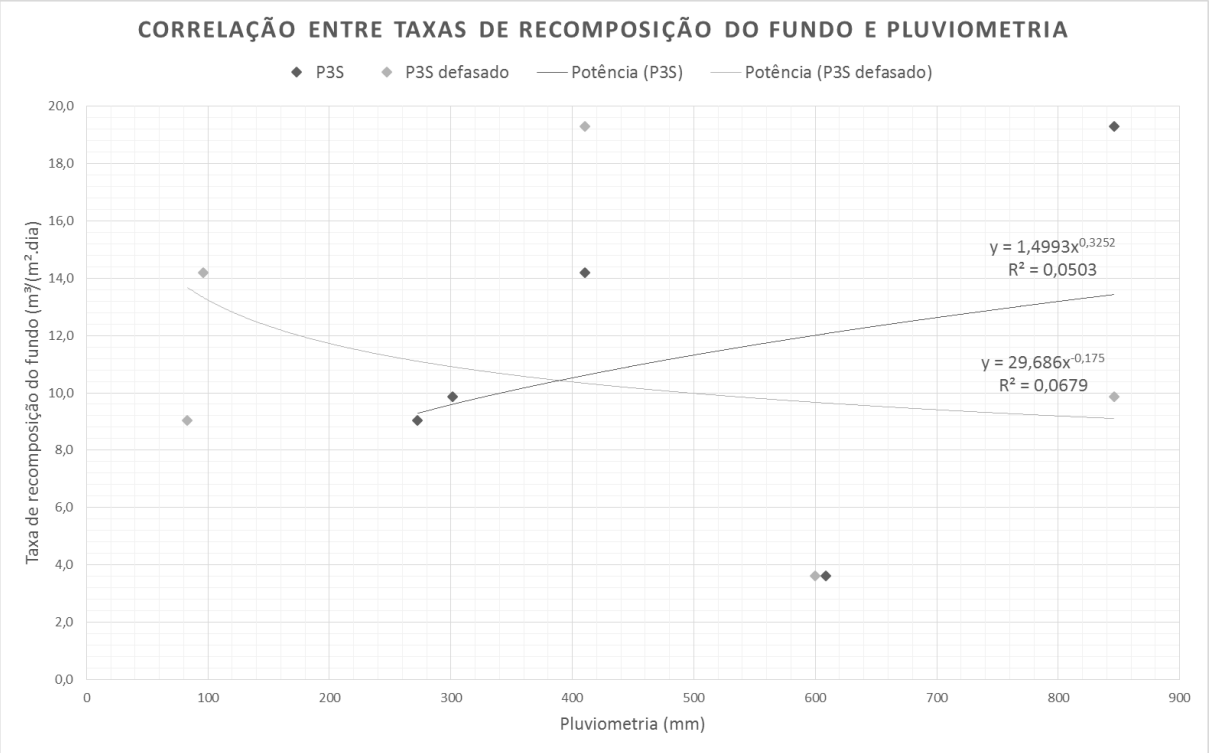


Gráfico 6.15 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3S, considerando o período chuvoso. "P3S defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

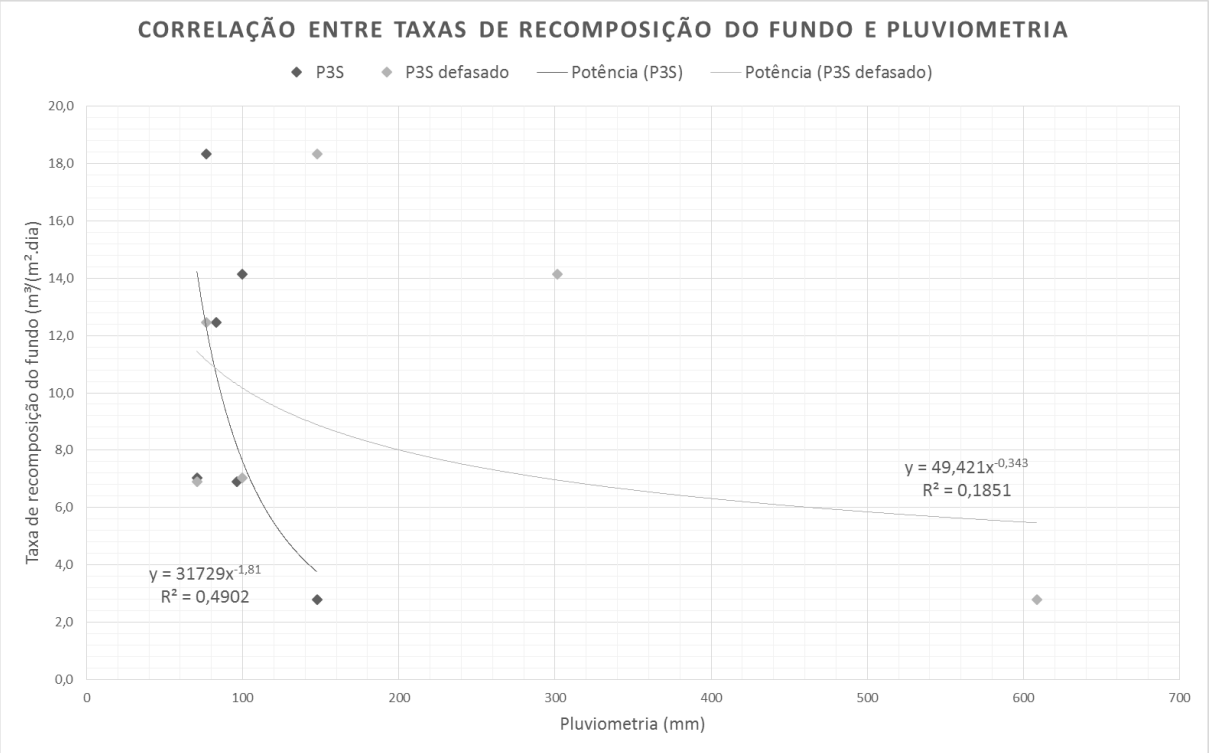


Gráfico 6.16 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3S, considerando o período seco. "P3S defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

Para a área P3N, estes resultados são apresentados no Gráfico 6.17 (período chuvoso) e no Gráfico 6.18 (período seco).

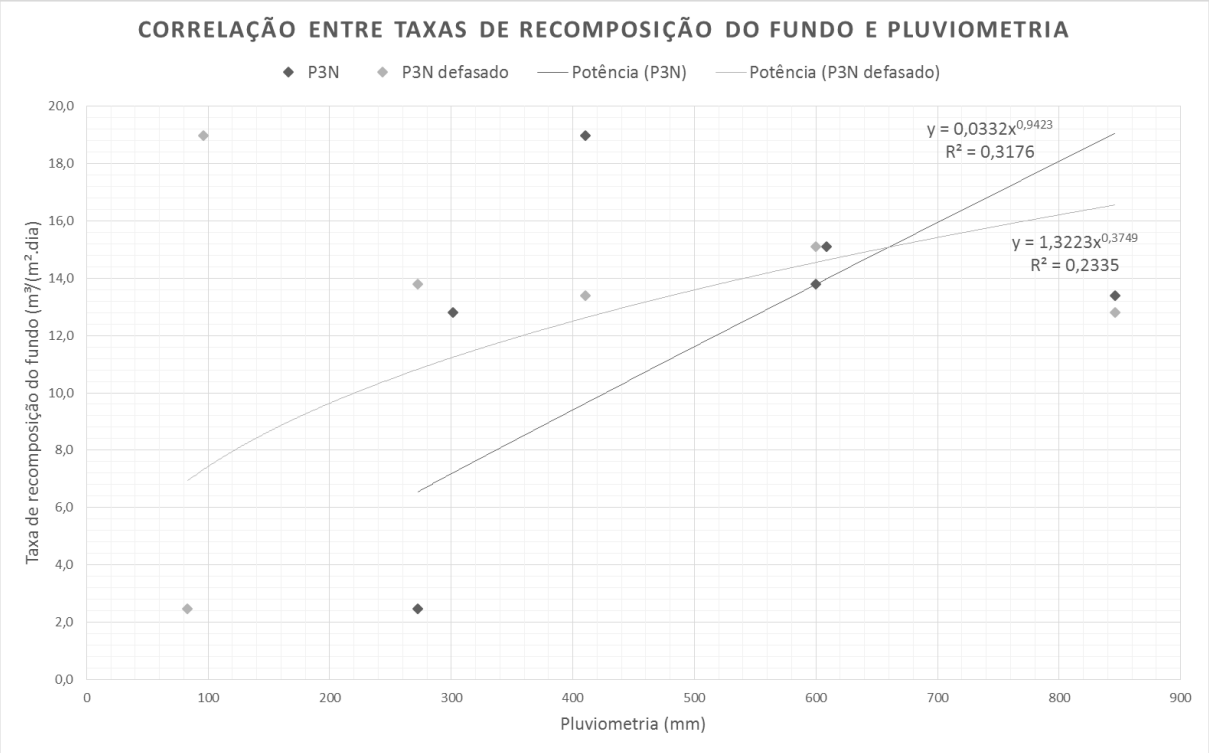


Gráfico 6.17 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3N, considerando o período chuvoso. "P3N defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

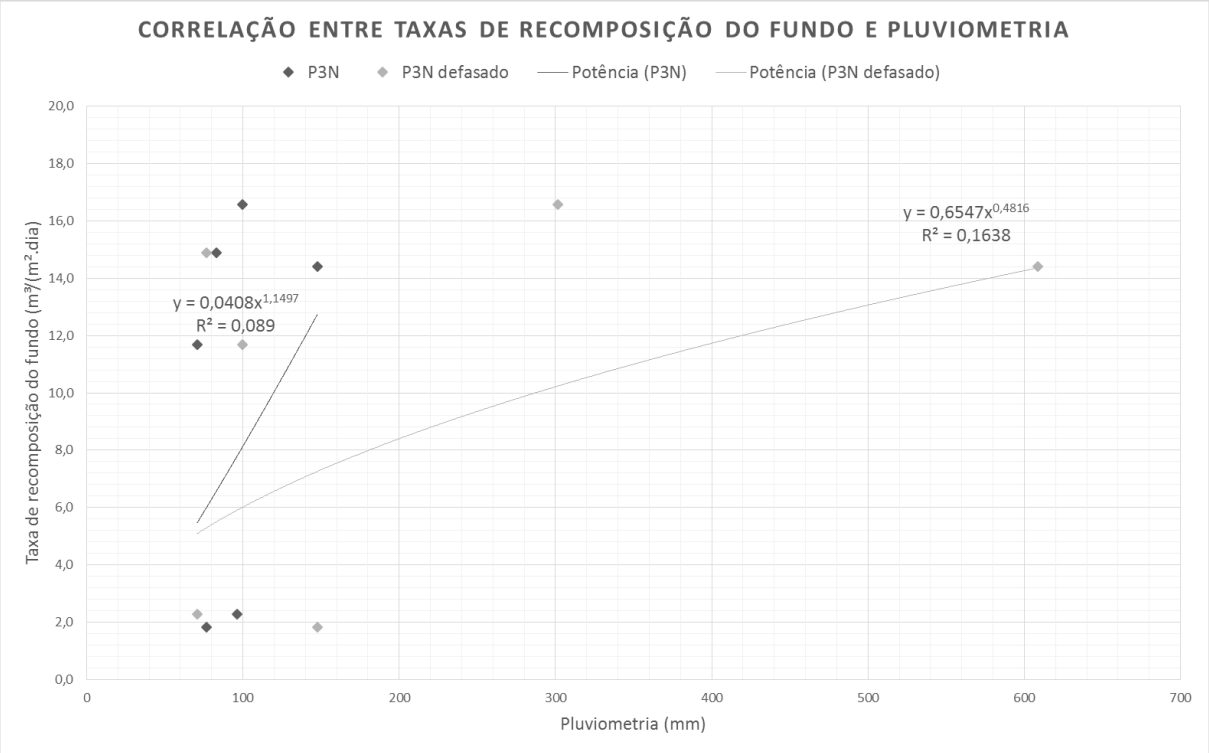


Gráfico 6.18 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3N, considerando o período seco. "P3N defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

Para a área D, estes resultados são apresentados no Gráfico 6.19 (período chuvoso) e no Gráfico 6.20 (período seco).

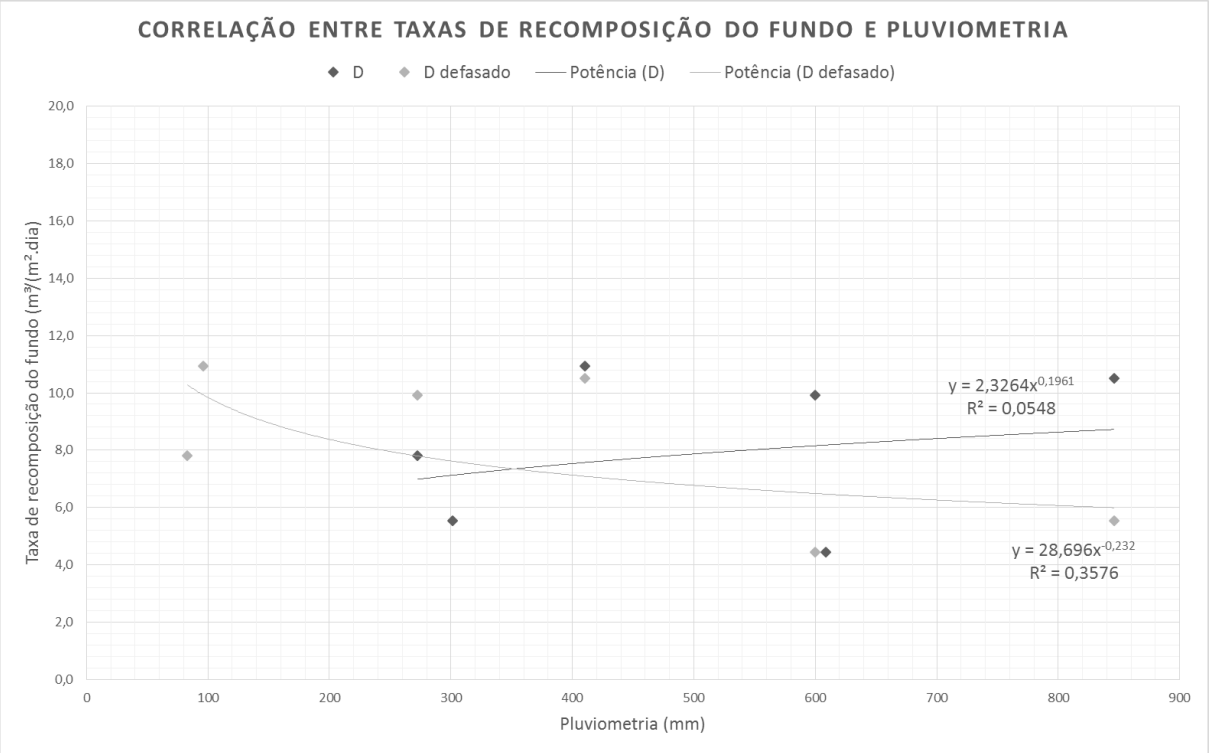


Gráfico 6.19 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área D, considerando o período chuvoso. "D defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

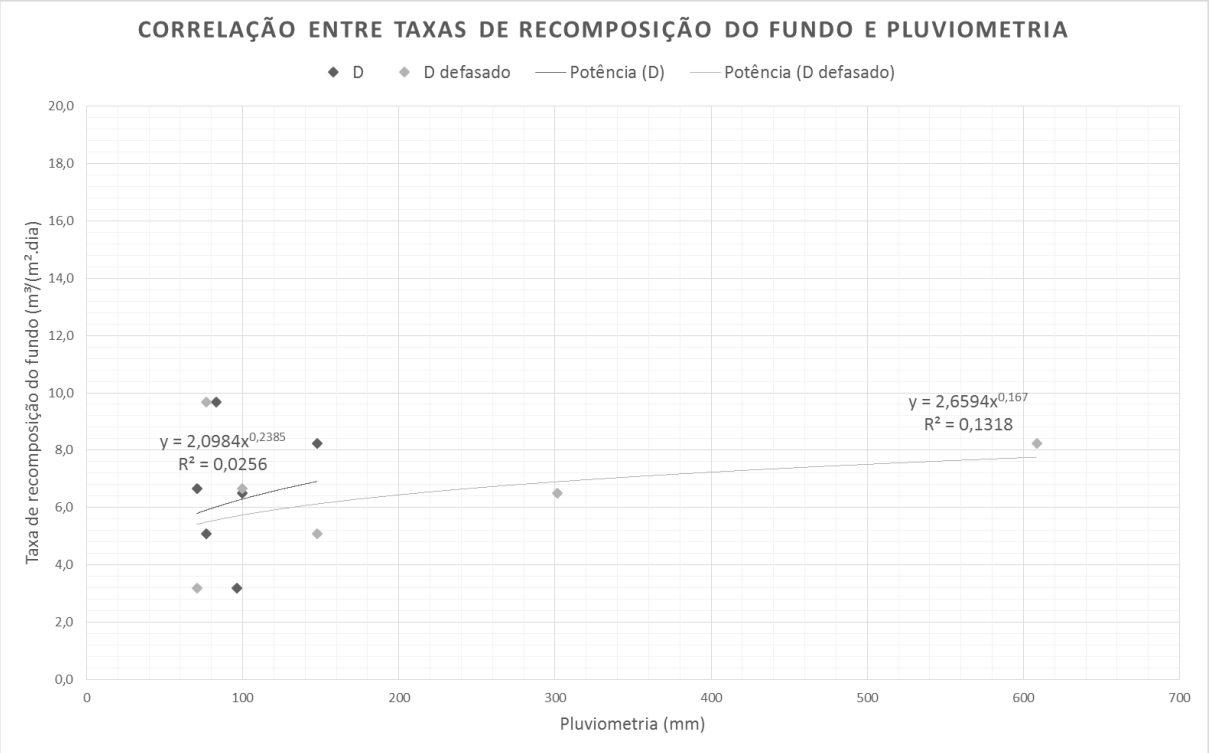


Gráfico 6.20 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área D, considerando o período seco. "D defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

Por fim, os resultados para a área P3T são apresentados no Gráfico 6.21 (período chuvoso) e no Gráfico 6.22 (período seco). A taxa referente a junho foi descartada

desta análise por se tratar de valor negativo e impedir o cálculo da linha de tendência do tipo potência.

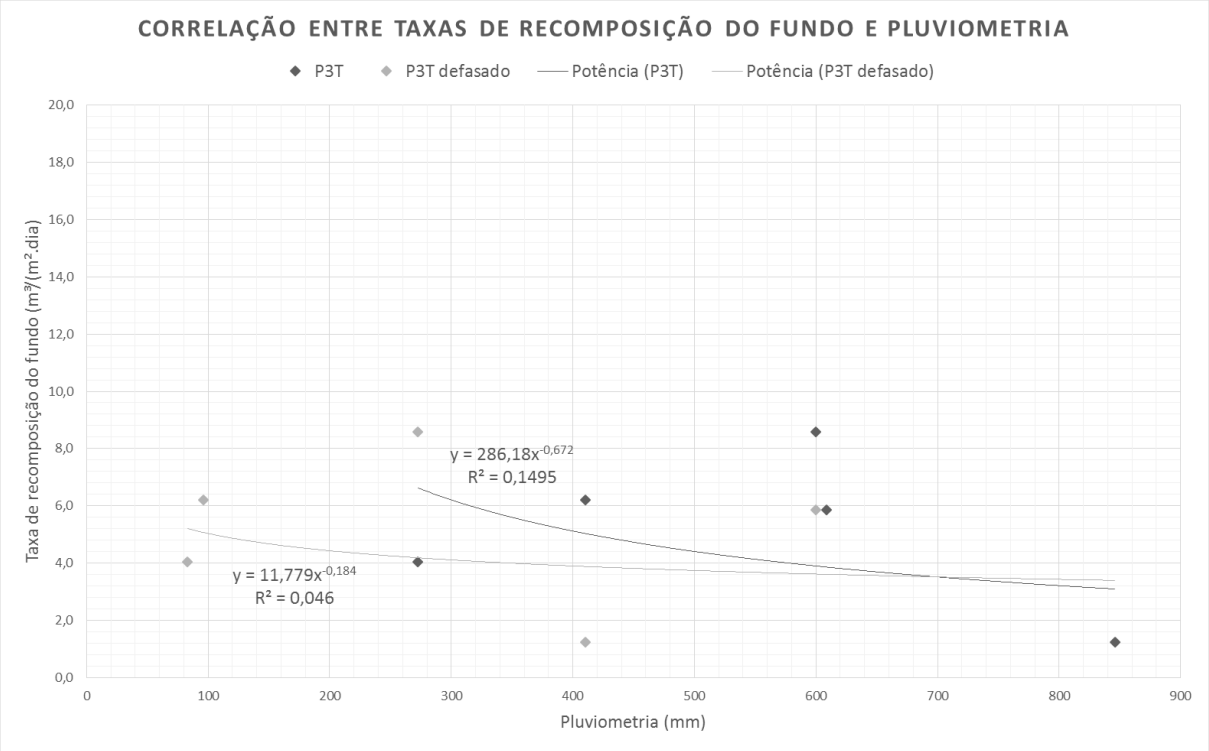


Gráfico 6.21 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3T, considerando o período chuvoso. "P3T defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

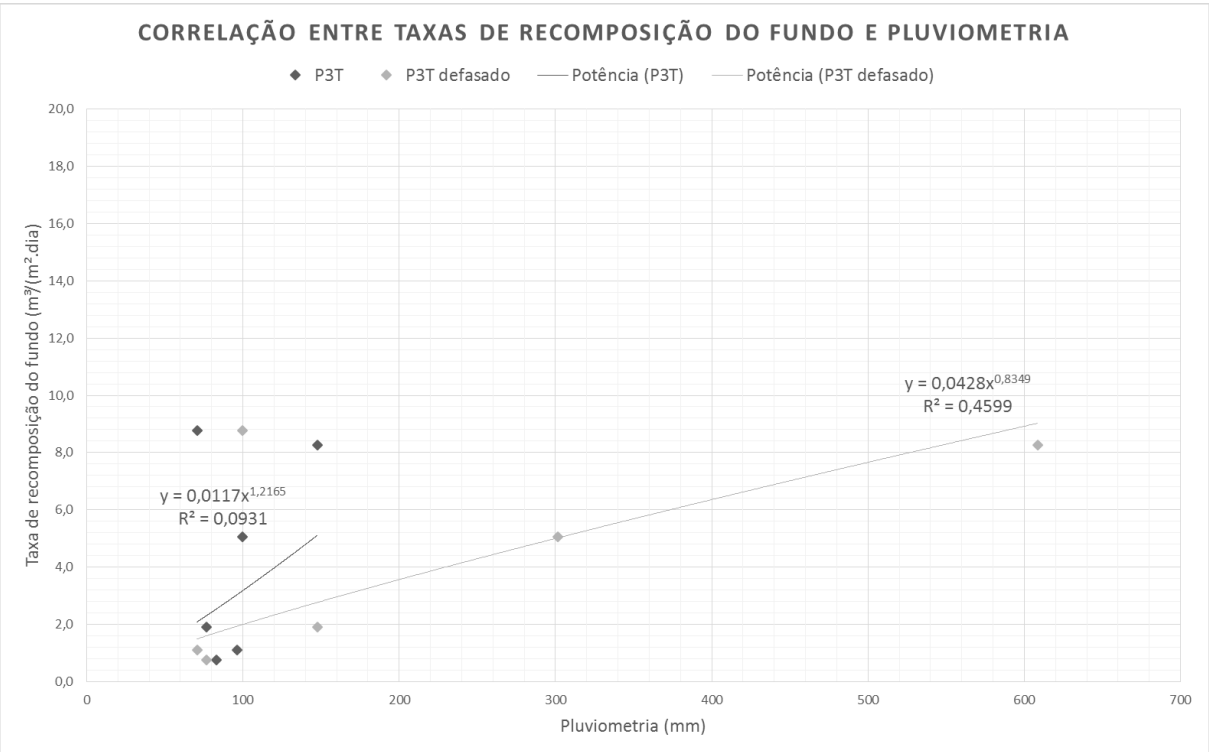


Gráfico 6.22 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria para a área P3T, considerando o período seco. "P3T defasado" considera defasagem de dois meses entre pluviometria e taxa.

Quanto às correlações entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria, os valores obtidos não foram satisfatórios, com exceção do período chuvoso com defasagem de dois meses para a área P1, como mostra a Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Quadro resumo dos valores de coeficiente de determinação R² para correlação entre taxas de recomposição do fundo e pluviometria medida no Terminal.

Defasagem	0		2 meses	
Período	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
P1	0,0082	0,0159	***0,7895***	0,1785
P3S	0,0503	0,4902	0,0679	0,1851
P3N	0,3176	0,089	0,2335	0,1638
D	0,0548	0,0256	0,3576	0,1318
P3T	0,1495	0,0931	0,046	0,4599

6.4.2 Marés

Os resultados de correlação entre amplitude de maré e taxa de recomposição do fundo para a área P1 podem ser observados no Gráfico 6.23 (Variação máxima mensal), no Gráfico 6.24 (amplitude máxima mensal), no Gráfico 6.25 (amplitude mínima mensal) e no Gráfico 6.26 (amplitude média mensal).

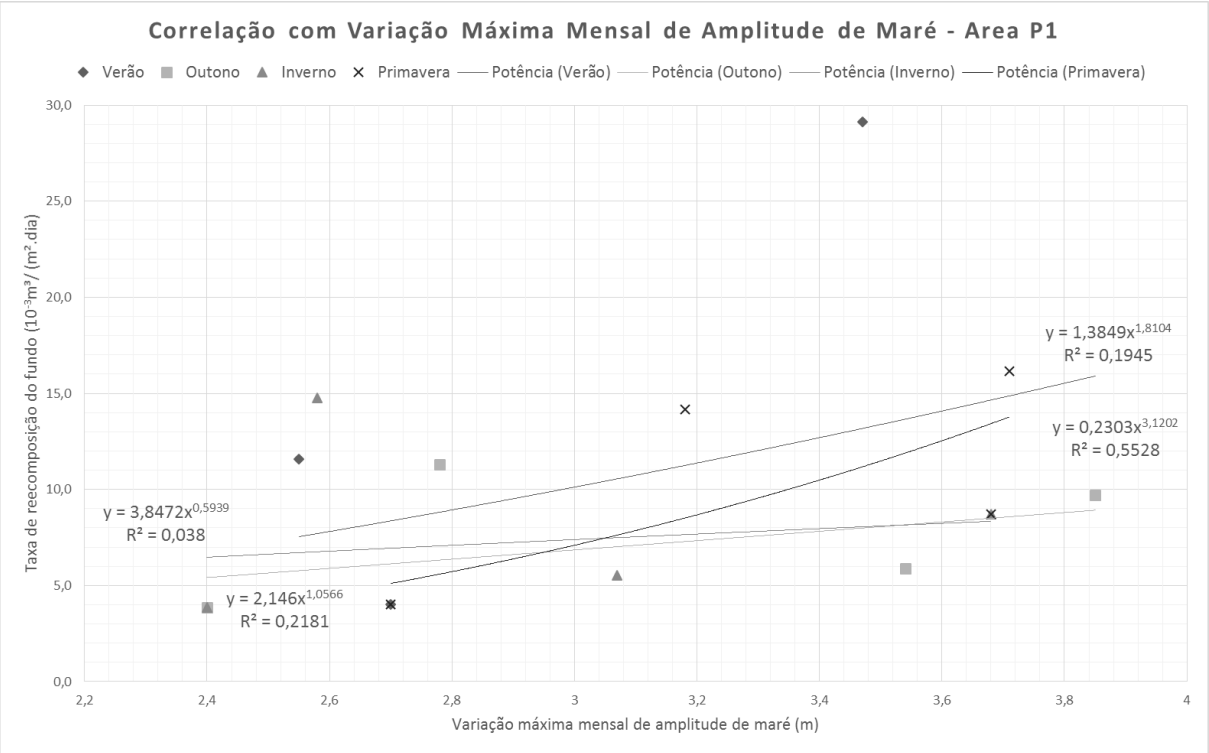


Gráfico 6.23 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P1.

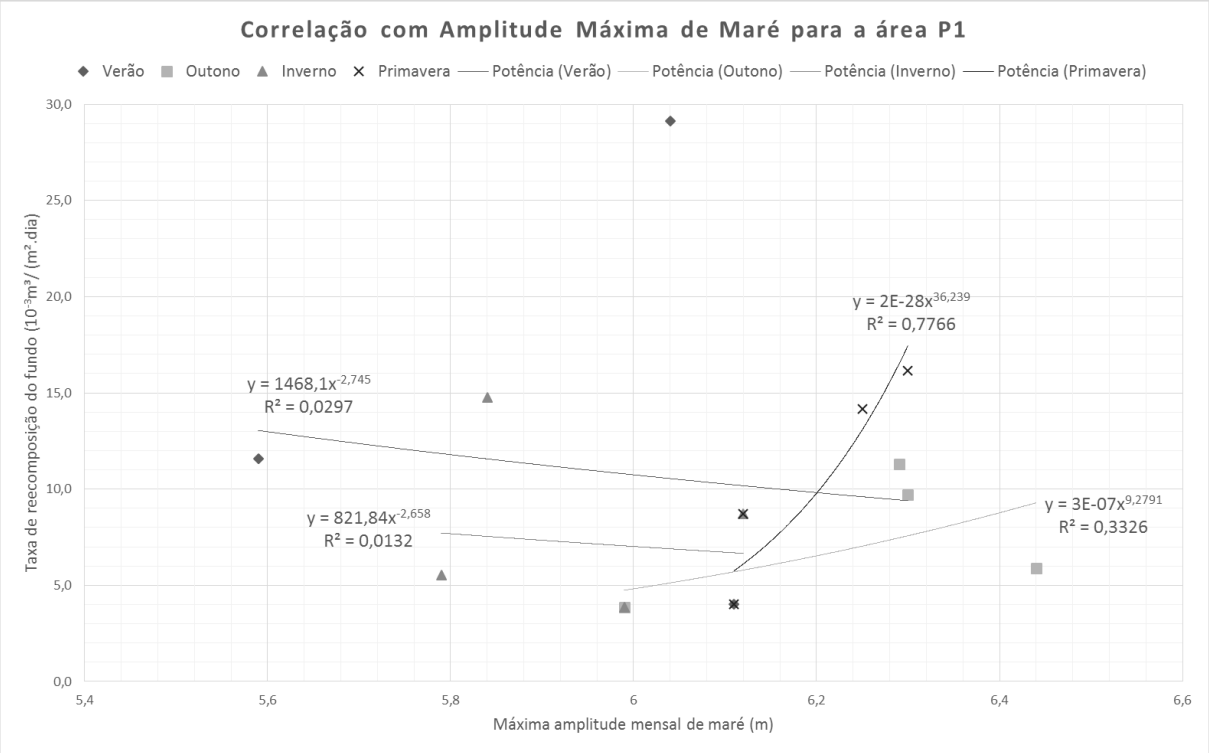


Gráfico 6.24 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P1.

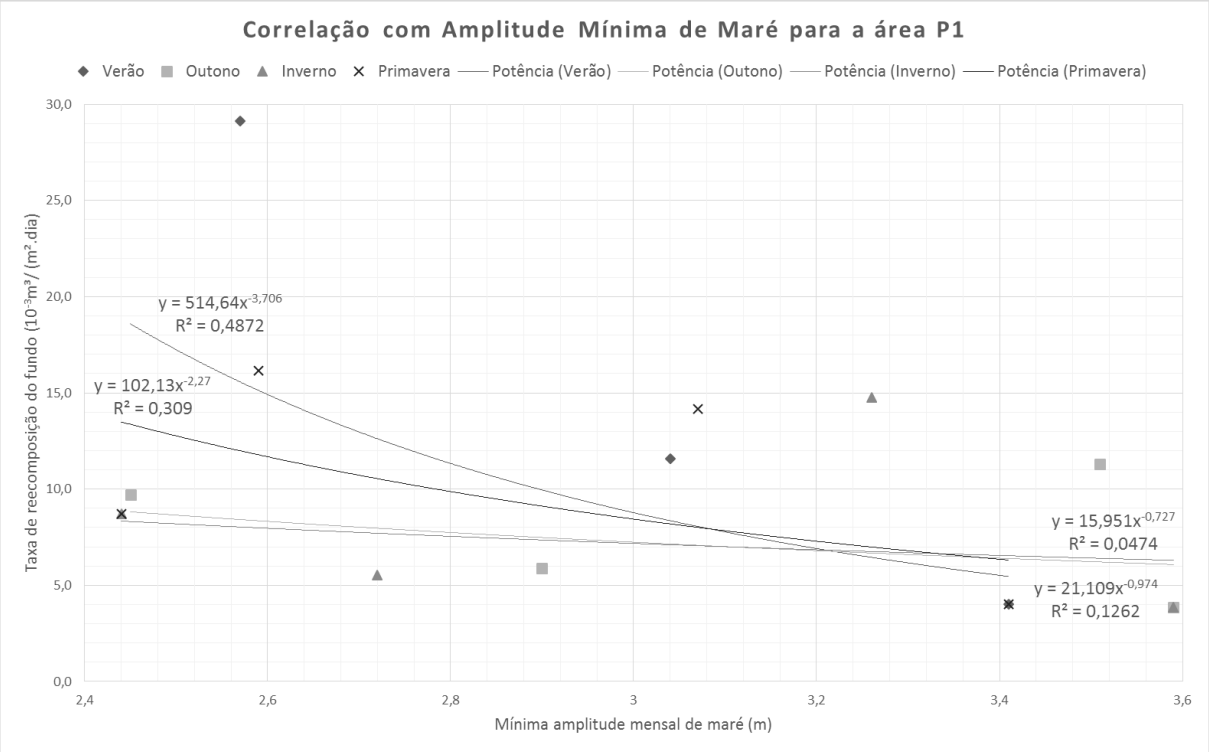


Gráfico 6.25 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P1.

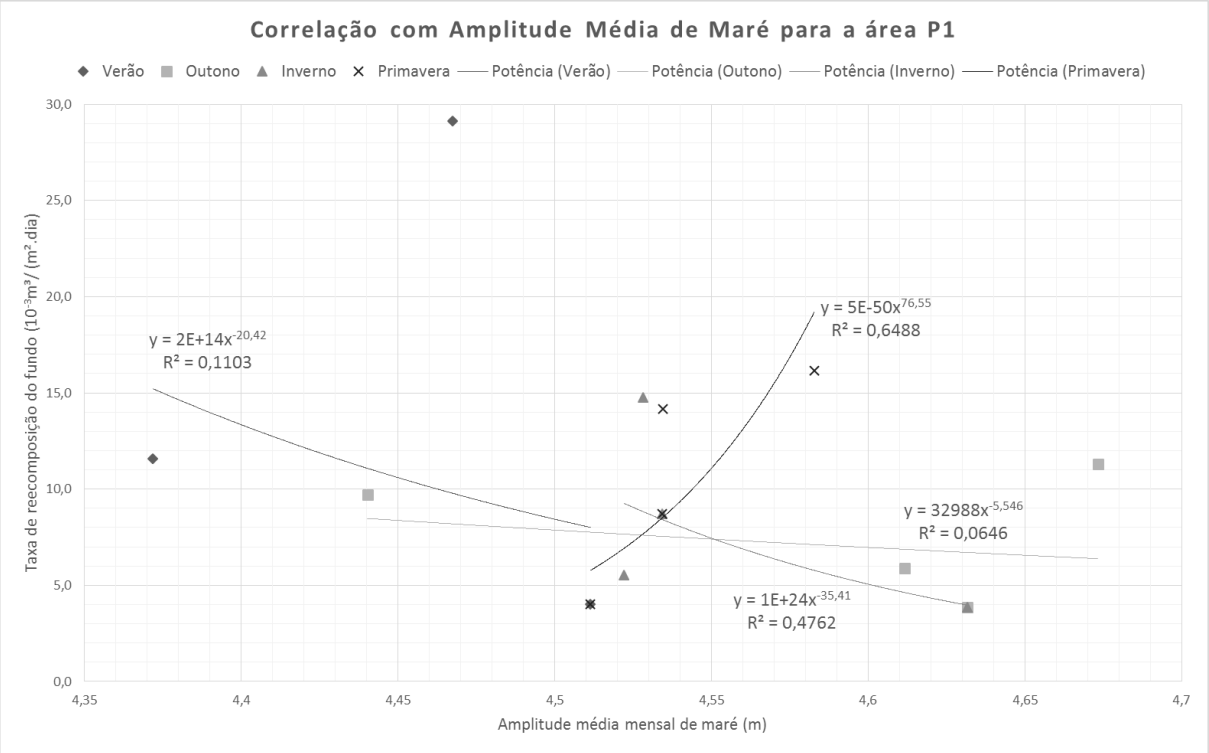


Gráfico 6.26 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P1.

Para a área P3S, os resultados podem ser observados no Gráfico 6.27 (Variação máxima mensal), no Gráfico 6.28 (amplitude máxima mensal), no Gráfico 6.29 (amplitude mínima mensal) e no Gráfico 6.30 (amplitude média mensal).

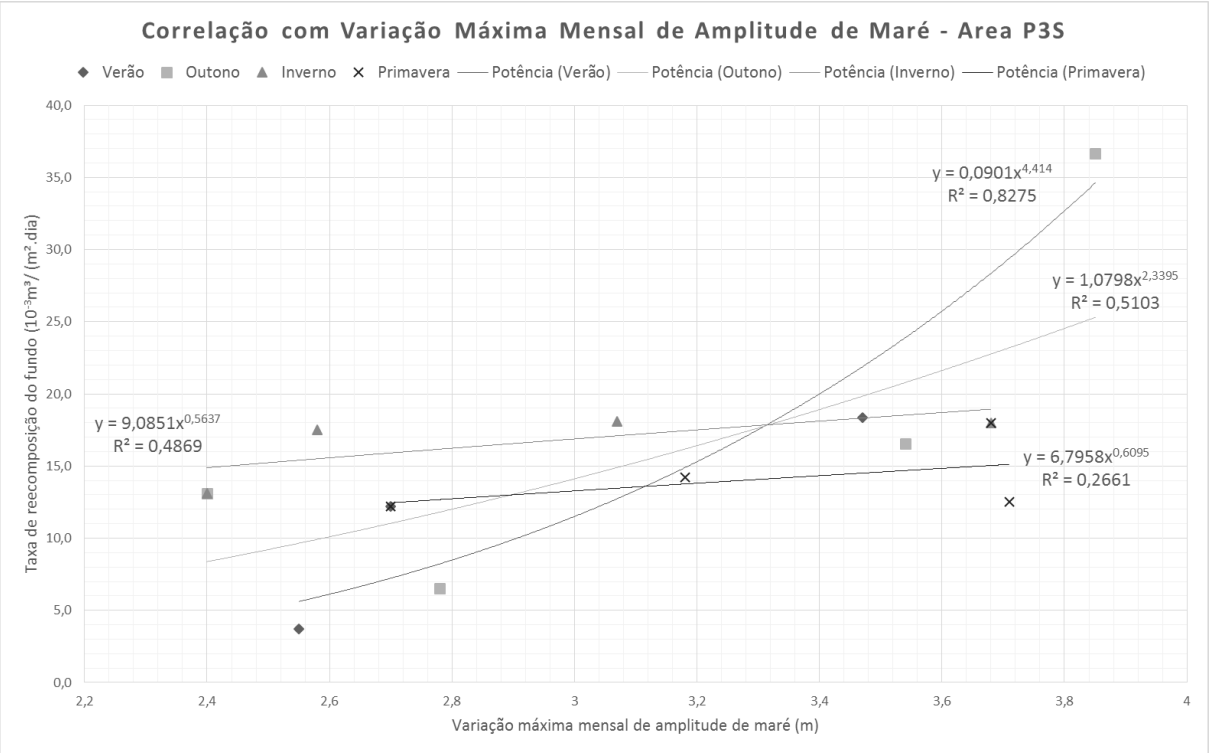


Gráfico 6.27 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P3S.

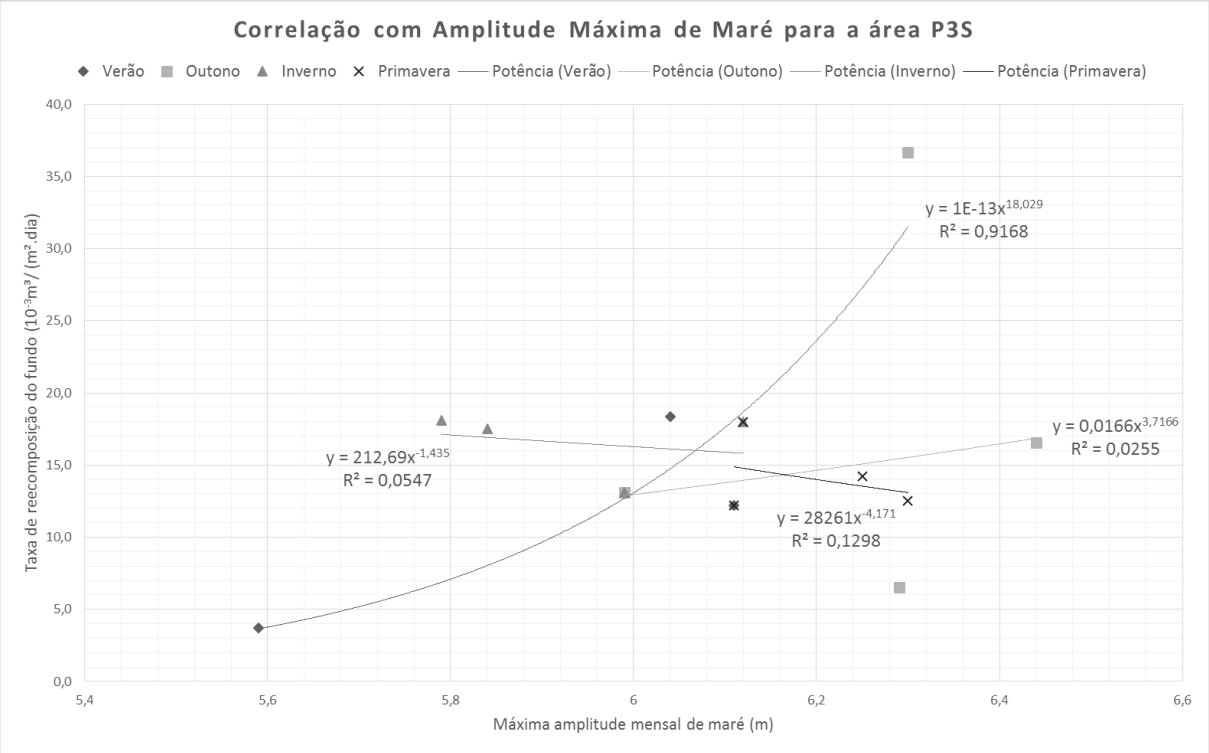


Gráfico 6.28 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P3S.

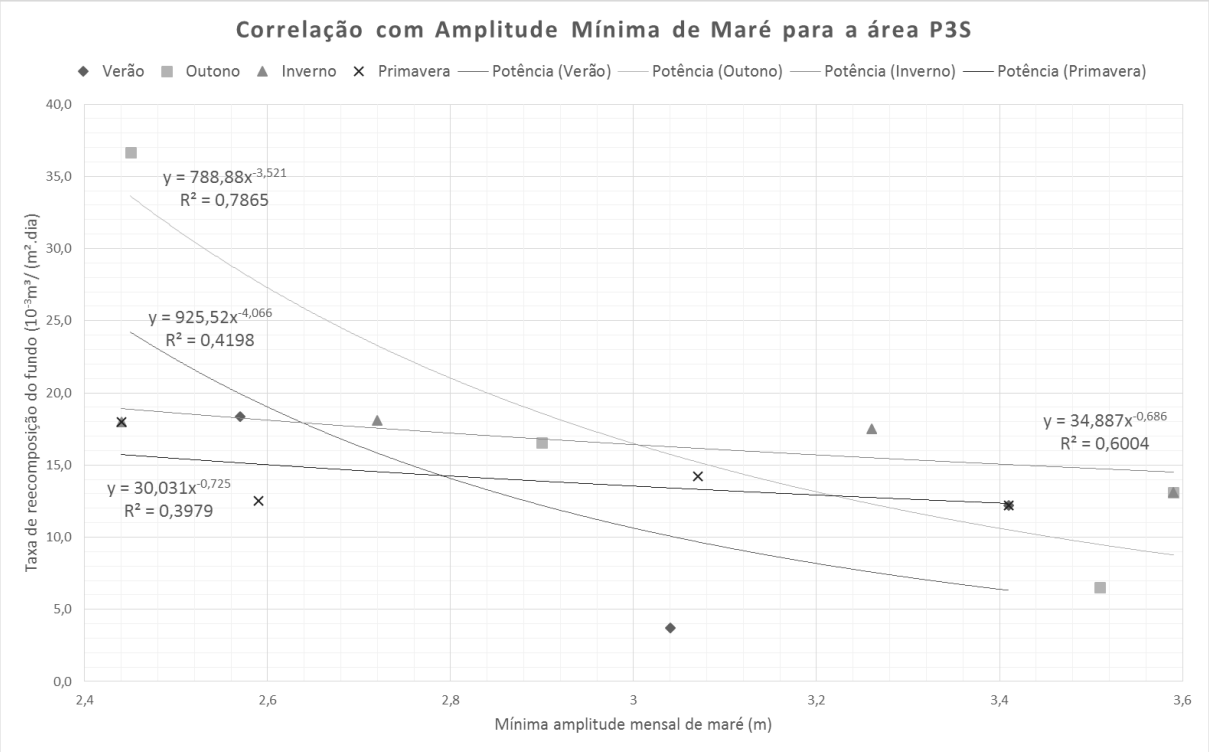


Gráfico 6.29 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P3S.

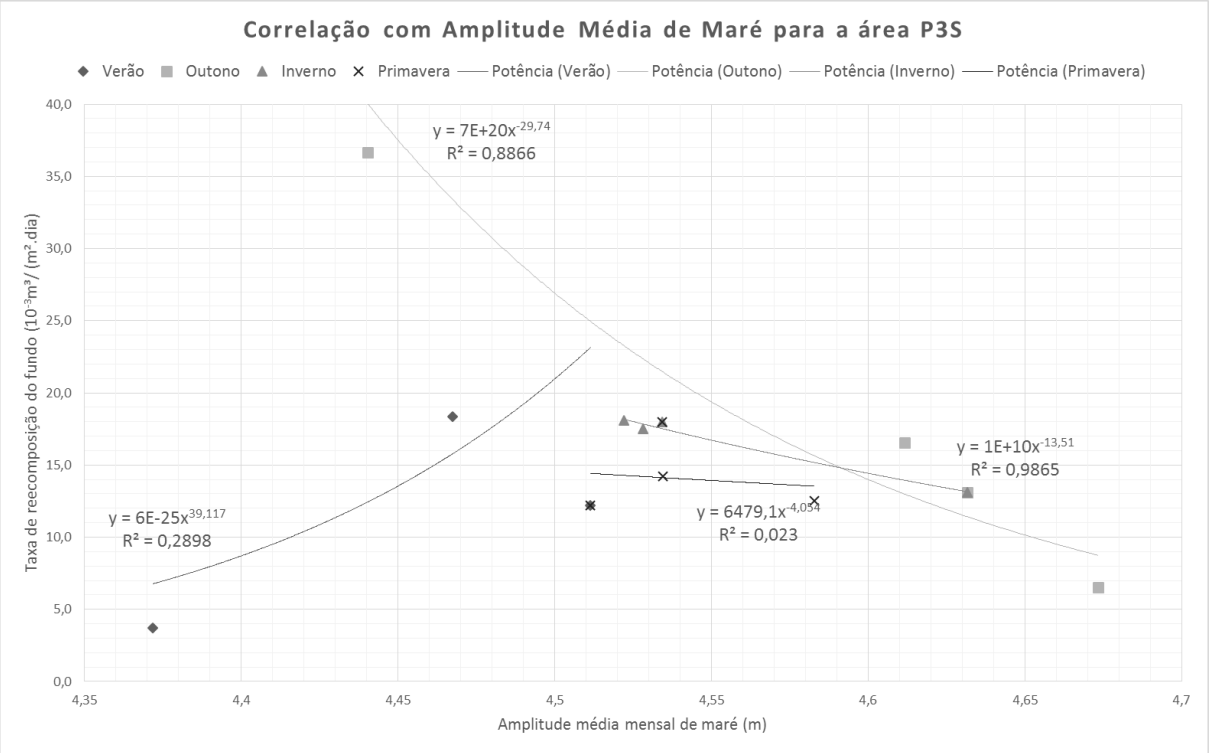


Gráfico 6.30 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P3S.

Para a área P3N, os resultados podem ser observados no Gráfico 6.31 (Variação máxima mensal), no Gráfico 6.32 (amplitude máxima mensal), no Gráfico 6.33 (amplitude mínima mensal) e no Gráfico 6.34 (amplitude média mensal).

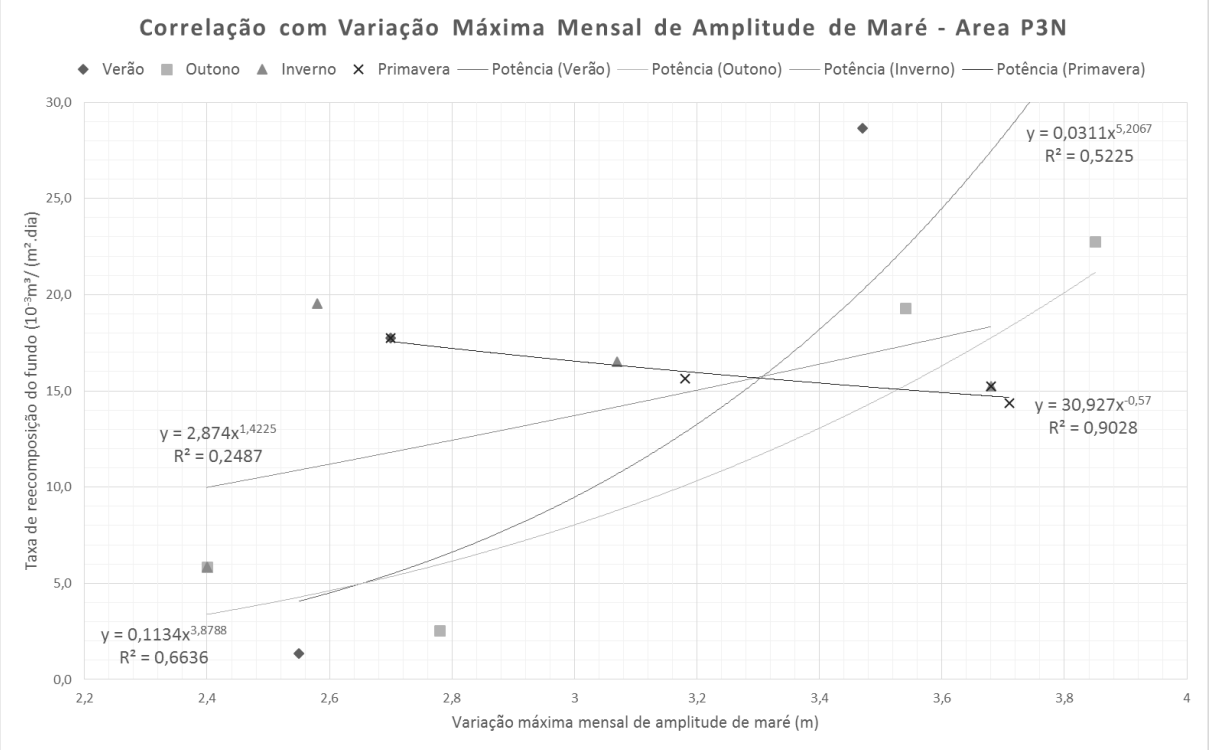


Gráfico 6.31 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P3N.

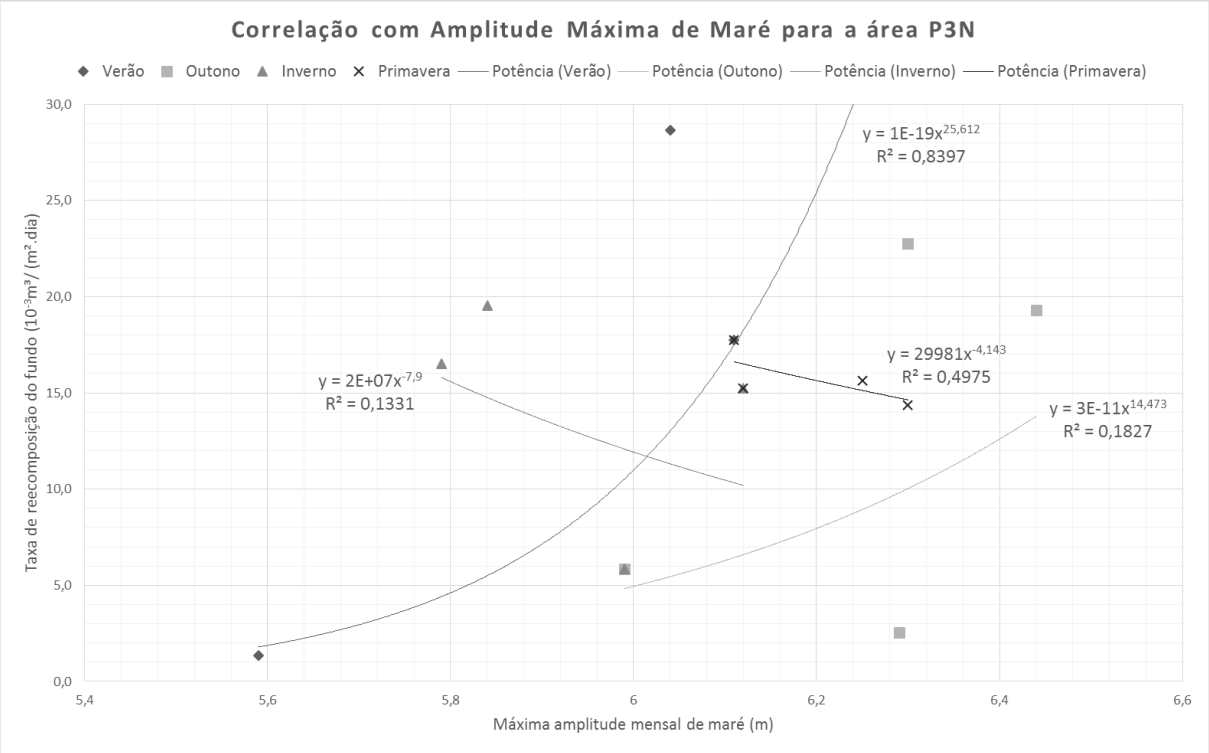


Gráfico 6.32 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P3N.

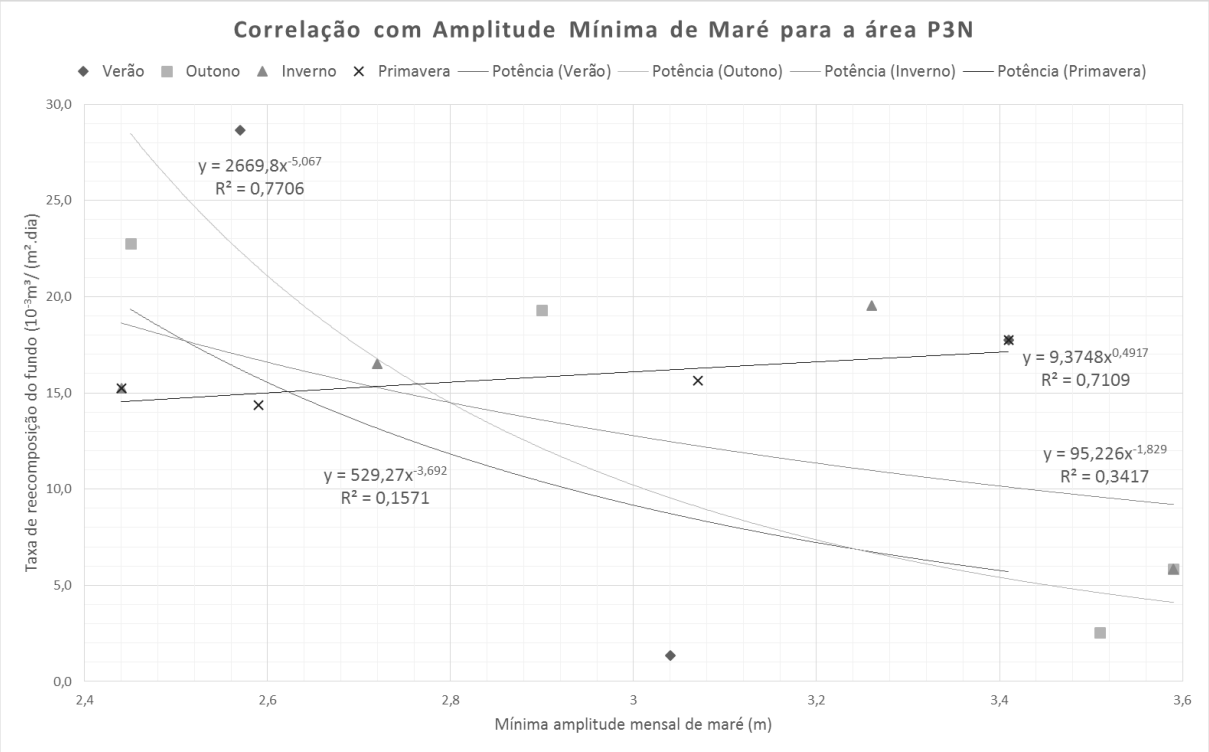


Gráfico 6.33 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P3N.

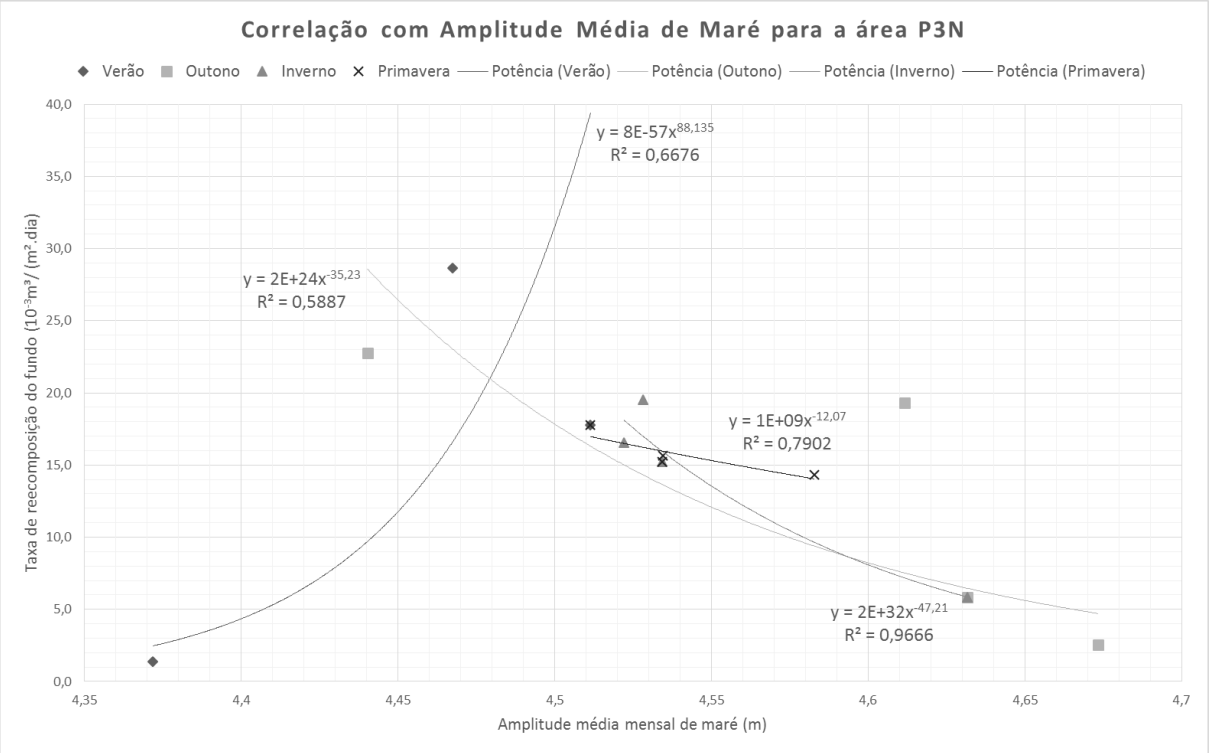


Gráfico 6.34 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P3N.

Para a área D, os resultados podem ser observados no Gráfico 6.35 (Variação máxima mensal), no Gráfico 6.36 (amplitude máxima mensal), no Gráfico 6.37 (amplitude mínima mensal) e no Gráfico 6.38 (amplitude média mensal).

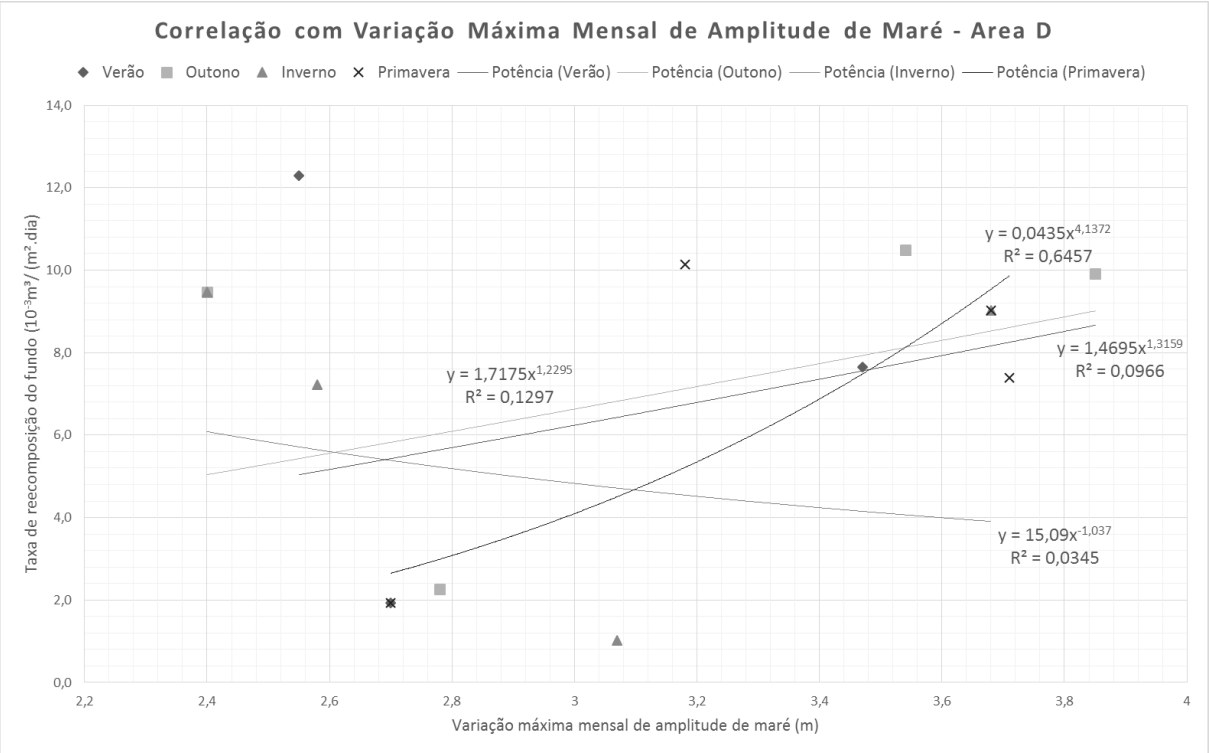


Gráfico 6.35 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área D.

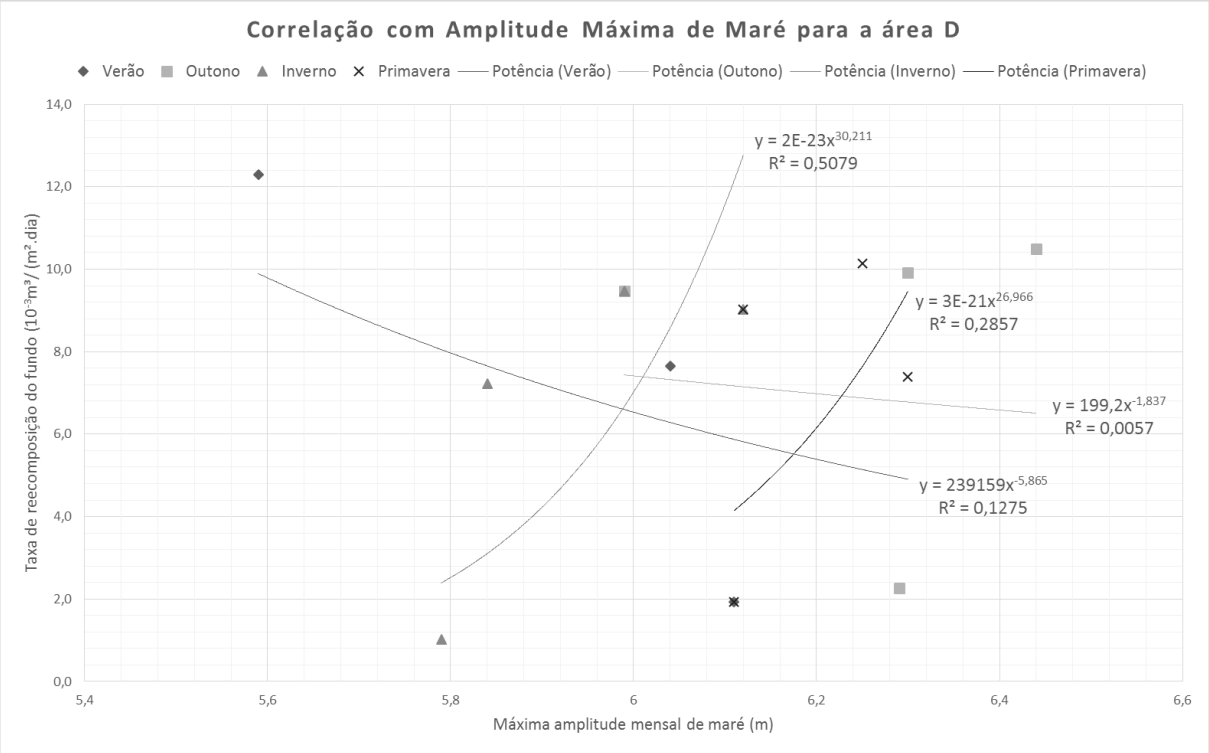


Gráfico 6.36 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área D.

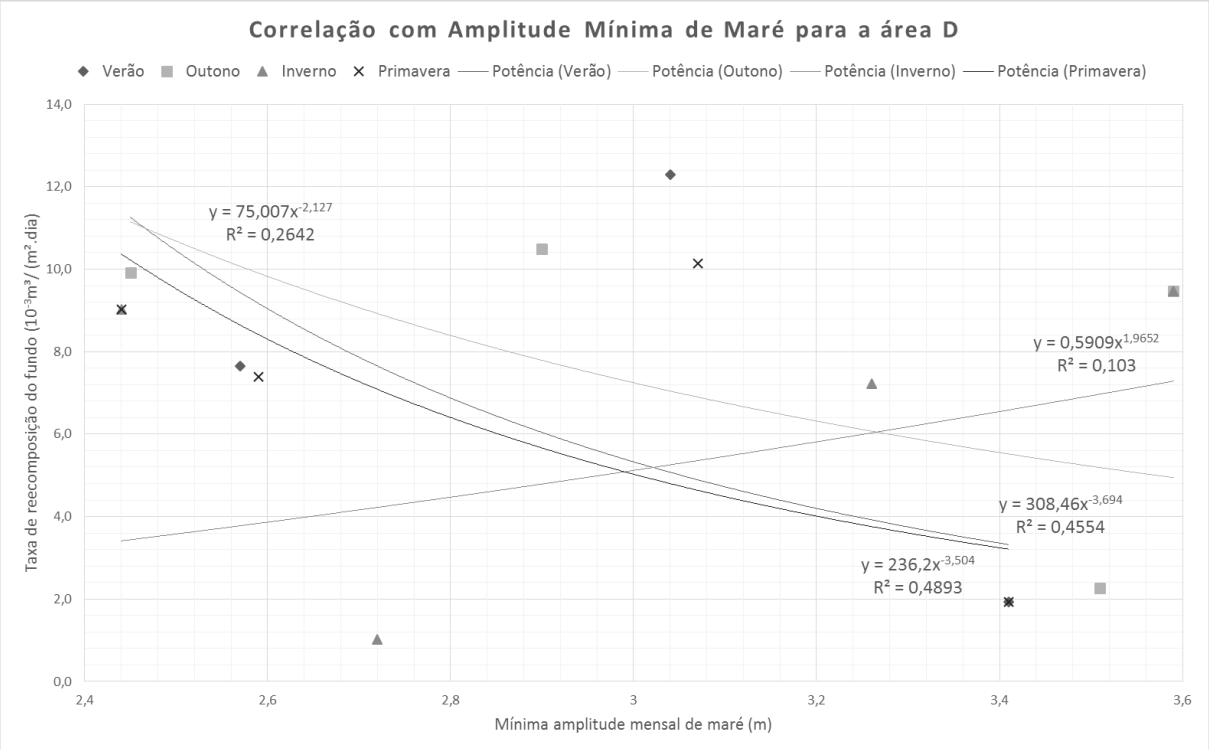


Gráfico 6.37 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área D.

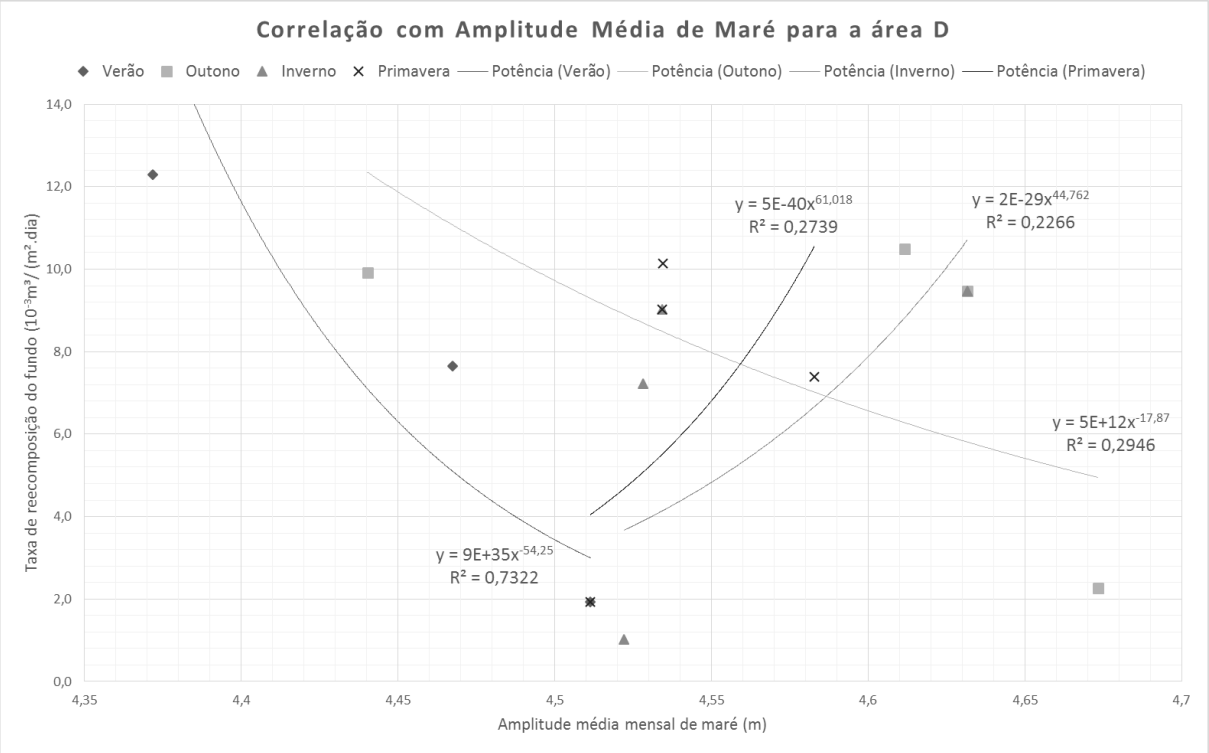


Gráfico 6.38 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área D.

Por fim, os resultados para a área P3T podem ser observados no Gráfico 6.39 (Variação máxima mensal), no Gráfico 6.40 (amplitude máxima mensal), no Gráfico 6.41 (amplitude mínima mensal) e no Gráfico 6.42 (amplitude média mensal).

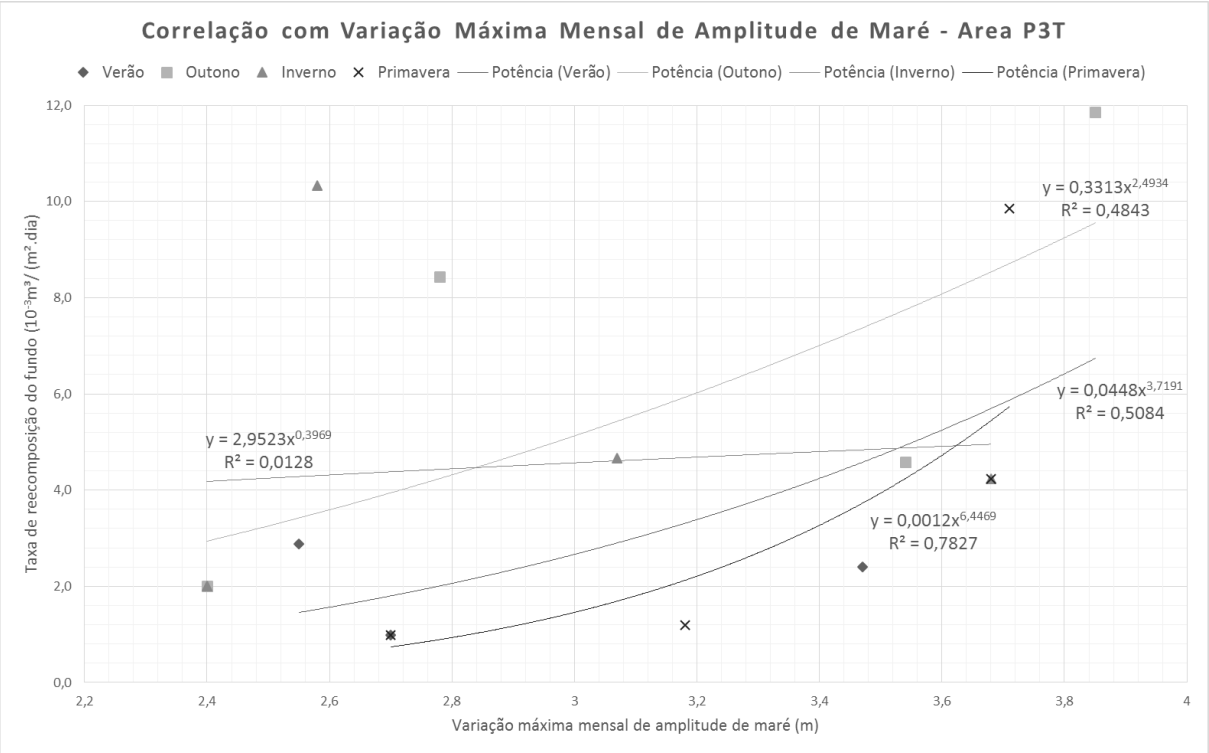


Gráfico 6.39 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e variação máxima de amplitude de maré para a área P3T.

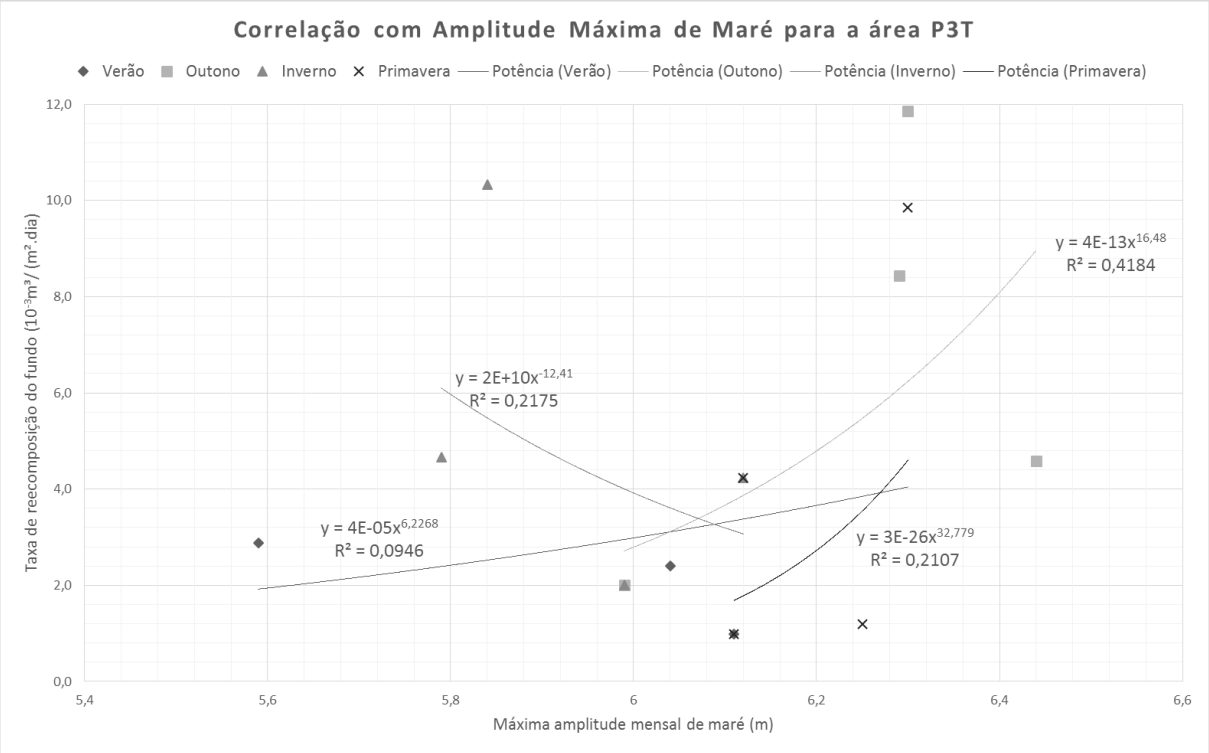


Gráfico 6.40 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude máxima de maré para a área P3T.

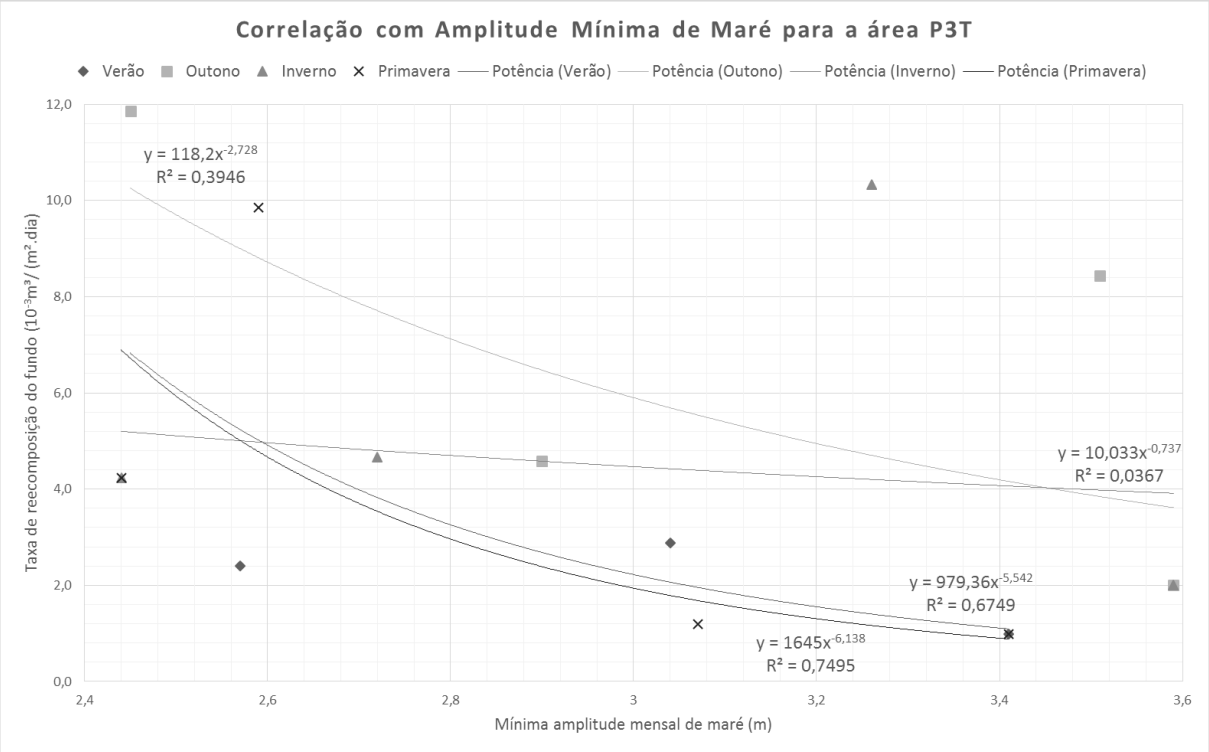


Gráfico 6.41 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude mínima de maré para a área P3T.

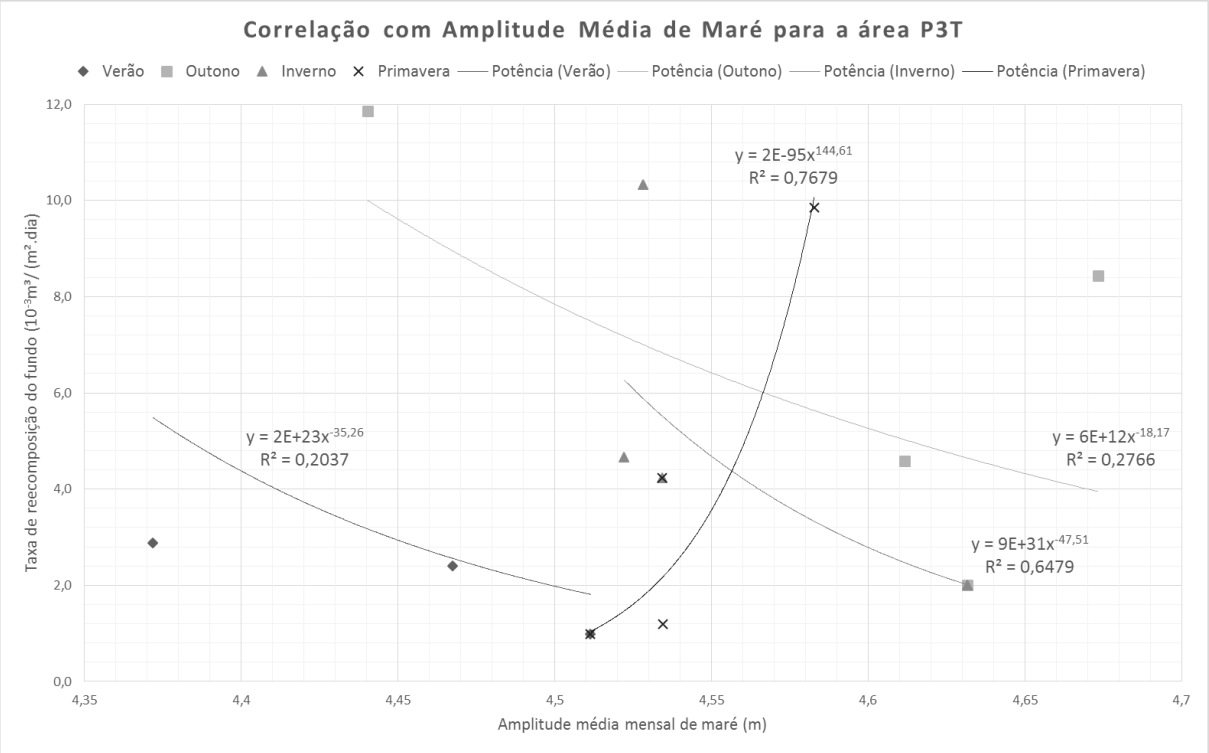


Gráfico 6.42 – Correlação entre taxas de recomposição do fundo e amplitude média de maré para a área P3T.

Já a correlação entre taxas de recomposição do fundo e maré apresentou valores satisfatórios a excelentes na maioria dos períodos para praticamente todas as áreas, como mostra a Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Quadro resumo dos valores de coeficiente de determinação R² para correlação entre taxas de recomposição do fundo e a maré medida no Terminal.

		Variação máxima de Amplitudes	*Amplitude Máxima*	*Amplitude Mínima*	*Amplitude Média*
P1	***Verão***	0,1945	0,0297	**0,4872**	0,1103
	Outono	0,2181	**0,3326**	0,1262	0,0646
	Inverno	0,038	0,0132	0,0474	**0,4762**
	Primavera	0,5528	**0,7766**	0,309	0,6488
P3S	***Verão***	0,8275	**0,9168**	0,4198	0,2898
	Outono	0,5103	0,0255	0,7865	**0,8866**
	Inverno	0,4869	0,0547	0,6004	**0,9865**
	Primavera	0,2661	0,1298	**0,3979**	0,023
P3N	***Verão***	0,5225	**0,8397**	0,1571	0,6676
	Outono	0,6636	0,1827	**0,7706**	0,5887
	Inverno	0,2487	0,1331	0,3417	**0,9666**
	Primavera	**0,9028**	0,4975	0,7109	0,7902
D	***Verão***	0,0966	0,1275	0,4554	**0,7322**
	Outono	0,1297	0,0057	0,2642	**0,2946**
	Inverno	0,0345	**0,5079**	0,103	0,2266
	Primavera	**0,6457**	0,2857	0,4893	0,2739
P3T	***Verão***	0,5084	0,0946	**0,6749**	0,2037
	Outono	**0,4843**	0,4184	0,3946	0,2766
	Inverno	0,0128	0,2175	0,0367	**0,6479**
	Primavera	**0,7827**	0,2107	0,7495	0,7679

De maneira geral, a área do berço de atracação do Píer I (P1) apresenta influência maior do sistema fluvial durante o período chuvoso (janeiro a junho), enquanto o período seco é caracterizado por maior influência do regime de marés, principalmente entre os meses de setembro e dezembro. Pode ser observada a maior influência das marés de sizígia durante este último período.

Para as áreas dos berços de atracação do Píer III (P3S e P3N), é o regime de marés que exerce influência na recomposição do fundo ao longo de todo o ano, com exceção do período entre setembro e dezembro na área P3S, que não apresenta boa correlação nem com as marés e nem com as chuvas. A área P3S apresenta um comportamento mais homogêneo na maior parte do ano.

As áreas de tardoz (D e P3T) também apresentam melhor correlação com as marés. No entanto, esta correlação não é tão intensa nestas áreas quanto nos berços do Píer III, principalmente no período entre março e junho, que não resulta em valores satisfatórios para estas áreas.

Nota-se ainda que as áreas P3N e P3T são as que sofrem maior influência do equinócio de primavera, seguidas pelas áreas D e P1.

7 CONCLUSÕES

Ferramentas de auxílio à previsão de movimentação e deposição de sedimentos são muito úteis, principalmente em casos em que há a necessidade de dimensionar operações de dragagens, ou até mesmo para avaliar impactos resultantes da implantação de obras costeiras.

Ressalta-se ainda que uma das premissas adotadas neste estudo foi a de conferir praticidade na aplicação do método, de modo que as medições de campo realizadas pelo próprio Terminal resultassem em indicação de tendências de movimentação do fundo para um planejamento otimizado de dragagens na região do TMPM. Este tipo de aplicação prática confere a devida importância aos estudos científicos sobre a região ao aliar a ciência às necessidades do mercado, incentivando o desenvolvimento científico e tecnológico.

O estudo de caso a que este trabalho se dedica é um exemplo de análise morfológica de uma região portuária onde a dragagem se faz necessária para a adequada operação do Terminal. Assim, o conhecimento do comportamento morfológico da região é determinante para a elaboração de um eficiente plano de dragagem de manutenção.

Os resultados obtidos apresentam coerência em relação à localização das áreas, de modo que, de sul para norte, observa-se uma transição entre maior influência do sistema fluvial (P1) e maior influência do regime de marés (P3N). A área P3S apresenta ainda um comportamento mediano, servindo como área de transição.

As regiões de tardoz (D e P3T), por encontrarem-se abrigadas, são as que apresentam menores influências destes sistemas, embora a dominância seja notadamente do regime de marés.

A simplificação adotada neste estudo está relacionada principalmente aos valores utilizados. A contribuição fluvial considerada compreende apenas as vazões líquidas e sólidas medidas em três estações localizadas nos três rios principais que deságuam no estuário. Existem outras contribuições que não foram consideradas, como a contribuição de outros rios ou até mesmo o carreamento de sedimentos nas margens do estuário devido à drenagem continental ou a movimentação de sedimentos nas praias da região devido ao transporte litorâneo.

Deve-se considerar ainda que ocorrem dragagens frequentes na região analisada, além da presença e movimentação constante de navios. Estes também são fatores que não foram considerados neste método e podem exercer influência significativa na variação de taxas de recomposição do fundo.

Mesmo considerando as limitações envolvidas, o método utilizado neste estudo pode ser caracterizado como uma boa ferramenta para auxiliar a previsão de dragagens na região. Entretanto, por se tratar de ferramenta simplificada, deve ser considerada como indicativo de tendência e não como valores absolutos de transporte de sedimentos. As previsões com base nesta ferramenta devem ser realizadas com cautela devido à complexidade do sistema estuarino.

Estudos futuros podem ainda detalhar este método de previsão, conferindo maior precisão às previsões associadas a esta ferramenta com as seguintes análises sugeridas:

- Utilização de modelo numérico hidrodinâmico e de transporte de sedimentos;
- Influência nas taxas de recomposição do fundo relacionadas a períodos com e sem dragagem;
- Correlação entre medições em campo de velocidade de corrente e taxas de recomposição do fundo;
- Contribuição de vazão de outros rios que desaguam no estuário.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Base de dados de vazão, chuva e sedimentos. Portal HidroWeb. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/> Data de acesso: 21/04/2015.

BANDEIRA, Jefferson Vianna; SALIM, Lécio Hanas; AUN, Pedro Edmundo. O Uso de técnicas nucleares na otimização de dragagem e nos estudos de seus impactos ambientais. In: Boldrini, Eliane Beê (Org.), et al. Dragagens portuárias no Brasil: licenciamento e monitoramento ambiental. Antonina: SEMA/PR, 2007. 312 p.

C & C TECHNOLOGIES. Relatório Terminal Ponta da Madeira. Investigação indireta no berço de atracação do Píer I. 2011. 60p.

GARCIA, P.D. Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à Área Portuária do Maranhão. São Paulo, 2007. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 258p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Base de dados. Disponível em: < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> Data de acesso: 15/04/2013.

MOCHEL, F. R.; GUEIROS, B.; ALCANTARA, E. H. Caracterização geoambiental para a avaliação da sensibilidade a derrames de óelo na Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil. In: III Workshop Técnico-Científico Projeto Petrorisco. Rede 05/01, CTPETRO/FINEP/CNPq, 2004, Belém. Anais do III Workshop Técnico-Científico Projeto Petrorisco. Rede 05/01, CTPETRO/FINEP/CNPq. Natal: UFRN, 2004.

MORAIS, J.O. Evolução sedimentar da área adjacente ao porto de Itaqui, Estado do Maranhão, Brasil. Arquivo Ciências Marinhas, 17(2): 143 – 151. Dezembro 1977. Fortaleza, Ceará.

PORTOBRAS. Parecer técnico quanto aos aspectos hidráulicos/sedimentológicos referentes as alternativas de solução para implantação do píer petroleiro do porto comercial do Itaqui, v. 1, p. 51, jul.1988.

SANTOS, J.H.S. Introdução ao estudo geomorfológico e sedimentológico da praia de Ponta d'Areia – São Luís –MA. São Luís: UFMA, 63p. 1989.

SANTOS, J.H.S. Análise por geoprocessamento da ocupação na franja costeira ao norte da cidade de São Luís-MA**.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1996.149p. Dissertação de Mestrado.

SANTOS, J.D.P.C.M. Morfologia de fundo e sedimentologia da baia de São Marcos-MA: implicações hidrodinâmicas e ecológicas. Belém, 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. 65p.

SUGUIO, K. Rochas Sedimentares: Propriedades, Gênese e Importância Econômica. São Paulo, SP: Editoras Edgard Blucher – EDUSP, 1980. 500p.

TAROUCO, J.E.F. Geoquímica no levantamento bio ecológico da área de influência da Indústria de Alumínio ALUMAR. Relatório Anual. 1986. LABOHIDRO/UFMA.

TAROUCO, J.E.F. & SANTOS, J.A.S. Morfodinâmica da Praia do Araçagi. Paço do Lumiar-MA. I Fórum latino Americano de Geografia Física Aplicada, anais. Volume I, Curitiba – Paraná, 1997. 474p.

UMISAN. Serviços de apoio à navegação e engenharia, Ltda. Relatório final dos levantamentos hidrodinâmicos, geofísicos e sedimentológicos no terminal marítimo de Ponta da Madeira. VALE S.A. 2011. 126p.