



COMPORTAMENTO MORFOLÓGICO NO DELTA DO RIO MAGDALENA
(COLÔMBIA) DEVIDO ÀS VARIAÇÕES DA VAZÃO
EM ESCALA INTRA E INTERANUAL

Boris Daniel Ávila Rangel

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientador: Marcos Nicolas Gallo

Rio de Janeiro

Julho de 2021

COMPORTAMENTO MORFOLÓGICO NO DELTA DO RIO MAGDALENA
(COLÔMBIA) DEVIDO ÀS VARIAÇÕES DA VAZÃO
EM ESCALA INTRA E INTERANUAL

Boris Daniel Ávila Rangel

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Marcos Nicolas Gallo

Aprovada por: Prof. Marcos Nicolas Gallo

Prof^a. Susana Beatriz Vinzón

Prof^a. Josefa Varela Guerra

Prof. Oscar Enrique Coronado Hernández

Prof. Ricardo Nicolas Szupiany

RIO DE JANEIRO, RJ-BRASIL

JULHO DE 2021

Ávila, Boris Daniel

Comportamento morfológico no delta do rio Magdalena (Colômbia) devido às variações da vazão em escala intra e interanual / Boris Daniel Ávila Rangel – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2021.

XI, 127 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcos Nicolas Gallo

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 97-100.

1. Morfodinâmica. 2. ENSO. 3. Descarga fluvial. 4. Delta do rio Magdalena. 5. Modelagem 1D de Transporte de Sedimentos. I. Gallo, Marcos Nicolas. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

COMPORTAMENTO MORFOLÓGICO NO DELTA DO RIO MAGDALENA
(COLÔMBIA) DEVIDO ÀS VARIAÇÕES DA VAZÃO
EM ESCALA INTRA E INTERANUAL

Boris Daniel Ávila Rangel

Julho / 2021

Orientador: Marcos Nicolas Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

Esta tese apresenta uma análise hidrodinâmica e morfológica no delta do rio Magdalena (Colômbia) com base em medições de nível, vazão e dados de batimetrias. A análise hidrodinâmica mostrou que as variações de nível e vazão estão condicionadas pela ocorrência do ENSO, apresentando-se níveis e vazões altos durante sua fase La Niña e níveis e vazões baixas durante a fase El Niño. A análise morfológica mostrou que estatisticamente o delta apresentou condições morfológicas instáveis (2006-2012). Para a escala interanual se apresentam tendências de sedimentação em períodos com anomalias da vazão negativas ou durante El Niño e tendência de erosão em períodos com anomalias da vazão positivas ou durante La Niña. Na escala intranual se encontrou que para o período de baixas vazões (janeiro-abril) se apresentam maiores taxas de sedimentação, para o período de vazões intermediárias (maio-agosto) as taxas de sedimentação e erosão são equivalentes e no período de vazões altas (setembro-dezembro) as taxas de erosão são maiores. Os resultados obtidos foram verificados com a implementação de um modelo de transporte de sedimento 1-D (HEC-RAS) para avaliar a influência da maré, a geometria (condições dragadas e normais) e a influência da vazão, nas escalas intra e interanual. Se encontrou que a maré não é relevante nos processos morfológicos a diferença das variações da vazão. O modelo mostrou que as obras de dragagens favoreceram os processos de sedimentação.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

MORPHOLOGICAL BEHAVIOR OF THE MAGDALENA RIVER DELTA
(COLOMBIA) DUE TO INTRA AND INTERANNUAL VARIATIONS IN RIVER
DISCHARGE

Boris Daniel Ávila Rangel

July / 2021

Advisor: Marcos Nicolas Gallo

Department: Ocean Engineering

A hydrodynamic and morphological analysis was carried out in the delta of the Magdalena River (Colombia) based on records of level, flow and bathymetry measurements. The hydrodynamic analysis showed that the variations in level and flow are conditioned to the presence of the ENSO, with high levels and flows during La Niña and low levels and flows during El Niño. Morphological analysis showed that statistically the delta presented untestable morphological conditions (2006-2012). For the interannual scale, trends to sedimentation are presented in periods with negative flow anomalies or during El Niño and a tendency to erosion in periods with positive flow anomalies or during La Niña. In the intraannual scale, it was found that for the period of low flows (January-April) there are higher sedimentation rates, for the period of intermediate flows (May-August) the sedimentation and erosion rates are equivalent and in the period of high flows (September-December) erosion rates are higher. The obtained results were corroborated with the implementation of a 1-D sediment transport model in Hec-ras to evaluate the tidal influence, the geometry (dredged and normal conditions) and the flow influence at intra and interannual scale. It was found that the tide is not relevant in the morphological processes, unlike the flow variations. The model showed that the dredging works favor sedimentation.

ÍNDICE TEMÁTICO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 CAPITULO 1	6
2.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS	6
2.2 METODOLOGIA	11
2.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE NÍVEIS D'ÁGUA	15
2.3.1 <i>Sistema Lineal Invariante no Tempo (LIT) e coerência Wavelet</i>	16
2.3.2 <i>Prova de independência</i>	18
2.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS VAZÕES	20
2.5 RESULTADOS DAS ANÁLISES MORFOLÓGICAS	23
2.5.1 <i>Condições de estabilidade</i>	23
2.5.2 <i>Variabilidade morfológica do fundo em escala interanual</i>	33
2.5.3 <i>Variabilidade morfológica do fundo em escala intra anual</i>	36
2.5.4 <i>Influência das dragagens</i>	37
2.6 CONCLUSÕES	39
3 CAPITULO 2	41
3.1 O MODELO HEC-RAS	41
3.2 MODELAGEM DO DELTA EM HEC-RAS.....	46
3.2.1 <i>Componente geométrico</i>	46
3.2.2 <i>Componente hidrodinâmico</i>	52
3.2.3 <i>Componente da caracterização do sedimento</i>	55
3.3 CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	56
3.3.1 <i>Calibração e validação dos níveis</i>	56
3.3.2 <i>Validação da velocidade</i>	59
3.4 CALIBRAÇÃO MORFOLÓGICA.....	61
3.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	64
3.5.1 <i>Resultados para a Geometria idealizada</i>	65
3.5.2 <i>Resultados para a Geometria real</i>	69
3.5.3 <i>Cenário de geometria real e hidrograma médio com maré sintética mínima</i> ...76	
3.6 DISCUSSÃO - COMPARATIVO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	77
3.6.1 <i>Influência da geometria: Geometria idealizada com hidrograma médio VS. geometria real com hidrograma médio</i>	78

3.6.2	<i>Influência da vazão (escala interanual): Geometria real com vazão alta VS. geometria real com vazão média VS. geometria real com vazão baixa</i>	81
3.6.3	<i>Influência da vazão (escala intra anual): Geometria real com vazão média VS. geometria real com vazão constante</i>	84
3.6.4	<i>Influência da maré: Geometria real com vazão média com maré VS. geometria real com vazão média com maré sintética (M2)</i>	87
3.7	SITUAÇÃO ATUAL NO DELTA (JULHO 2021).....	89
3.8	CONCLUSÕES	91
4	CONCLUSÕES GERAIS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5	BIBLIOGRAFIA	97
6	ANEXOS	101
6.1	ANEXO 1 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS SETORES BATIMÉTRICOS	101
6.2	ANEXO 2 – PROVAS ANOVA NOS SETORES	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Localização do rio Magdalena na sua planície e seu delta com as estações Tebsa e Casa Pilotos	8
Figura 2.	Índice diário SOI 1993-2017 - Eventos ENSO registrados durante 1993-2017 em suas fases El Niño e La Niña	10
Figura 3.	Comparativo entre os índices mensais do ENSO: SOI, MEI e ONI durante 2006-2012	10
Figura 4.	Descrição esquemática dum sistema Lineal Invariante no Tempo LTI.....	11
Figura 5.	Curva de nível percentil 50 - estação Calamar (1967-2017).....	16
Figura 6.	Curva nível percentil 50 (Perc50) VS Níveis medidos 1993-2017 (Nível) - Estação Calamar	16
Figura 7.	Resposta ao impulso $h[n]$ calculada do sistema LTI.....	17
Figura 8.	Coerência Wavelet entre a resposta ao impulso e a série diária SOI 1993-2017	18
Figura 9.	(a) Níveis diários na estação Tebsa e Calamar com vazão média mensal medida (ADCP) no delta – período 2006-2012. (b) Vazão média mensal medida (ADCP) no delta e vazão obtida da regressão dos níveis na estação Tebsa com as vazões medidas (ADCP)	21

Figura 10. Gráfico Box-Plot das vazões mensais no delta durante 2006-2012.....	22
Figura 11. Anomalia da vazão no delta com o índice SOI mensal e os eventos ENSO acontecidos durante 2006-2012	23
Figura 12. Delta do rio Magdalena com as zonas batimétricas (vermelho) e os setores (branco).....	24
Figura 13. Volumes mensais - setor 1	25
Figura 14. Volumes mensais - setor 2	26
Figura 15. Volumes mensais - setor 3	27
Figura 16. Volumes mensais - setor 4	28
Figura 17. Volumes mensais - setor 5	29
Figura 18. Volumes mensais - setor 6	30
Figura 19. Volumes mensais - setor 7	31
Figura 20. Volumes mensais - setor 8	32
Figura 21. Distribuição anual dos oito setores com os volumes gerados entre as batimetrias mensais e a batimetria de referência na cota -50 m.s.n.m.....	33
Figura 22. Variação do fundo por cada sector durante 2006-2012 com as máximas e mínimas vazões anuais.....	36
Figura 23. Curva de duração das profundidades do fundo em escala intra anual. As variabilidades do fundo em unidade de metros obtidas a partir das diferenças de volumem indicam erosão em caso de apresentar valores negativos e indicam sedimentações em caso de apresentar valores positivos.	37
Figura 24. Localização no delta do rio Magdalena do talvegue e secções transversais usadas em HEC-RAS.....	47
Figura 25. Perfis longitudinais pelo talvegue das geometrias usadas em HEC-RAS- Geometria real junho 2011 e geometria em forma de canal (idealizada)	48
Figura 26. Diferentes secções transversais da geometria real (junho 2011) obtida no HEC- RAS e o AutoCad Civil e secções da geometria idealizada em HEC-RAS	51
Figura 27. Larguras e profundidades das seções transversais ao longo do delta da geometria real e geometria em forma de canal	52
Figura 28. Série anual da previsão de maré obtida do IDEAM para o ano 2011 com intervalos cada 6 horas- Mar Caribe, setor Puerto Colômbia	53
Figura 29. Série de maré da componente M2 para a baía de Cartagena.....	53
Figura 30. Vazão medida no delta do rio Magdalena VS níveis do rio na estação Tebsa	54

Figura 31. Hidrogramas utilizados para as condições de contorno hidrodinâmicas	55
Figura 32. Curva granulométrica de uma amostra de sedimento tomada no delta do rio Magdalena (km-8).....	55
Figura 33. Calibração de níveis do modelo HEC-RAS – período junho 2011-junho 2012, para a abscissa km-19,9	58
Figura 34. Validação de níveis no modelo HEC-RAS – período junho 2006-junho 2007, para a abscissa km-19,9	58
Figura 35. Comparativo das velocidades simuladas (HEC-RAS) com as medidas (ADCP), para: (a) setembro 2011, (b) janeiro 2012, (c) maio 2012	60
Figura 36. Comparativo do perfil inicial (junho de 2011), o perfil final medido (junho de 2012) e o perfil ao final de um ano de simulação (10×10^6 ton/ano). Também é mostrado o perfil final simulado para a carga de sedimento de 144×10^6 ton/ano, apresentando excesso de sedimentação.	62
Figura 37. Comparativo das diferenças de profundidade por abscissa entre os perfis longitudinais inicial e final (simulado e real)	64
Figura 38. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria idealizada com vazão constante. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais	66
Figura 39. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria idealizada com hidrograma médio. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais.....	68
Figura 40. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com vazão constante. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais.....	70
Figura 41. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma médio. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais	71
Figura 42. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o	

cenário de geometria real com hidrograma alto. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais.....	73
Figura 43. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma baixo. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais	75
Figura 44. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma médio com maré sintética. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais	77
Figura 45. Comparativo dos perfis final e inicial pelo talvegue para o hidrograma médio (a) geometria idealizada (b) geometria real	79
Figura 46. Diferenças de profundidade VS largura do delta com os setores batimétricos para o comparativo entre a geometria idealizada e a geometria real usando o hidrograma médio	80
Figura 47. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal com setores batimétricos para geometria idealizada com hidrograma médio e geometria real com hidrograma médio	80
Figura 48. Comparativo dos perfis pelo talvegue com geometria real para os hidrogramas alto, médio e baixo.....	81
Figura 49. Diferenças de profundidade VS largura do delta para o comparativo entre os hidrogramas baixo, médio e alto usando a geometria real.....	82
Figura 50. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal para a geometria real com os hidrogramas alto, médio e baixo	83
Figura 51. Curva de frequência das vazões diárias para os hidrogramas alto, médio e baixo	84
Figura 52. Comparativo dos perfis pelo talvegue de geometria real com hidrograma médio e vazão constante	84
Figura 53. Diferenças de profundidade VS largura do delta para o comparativo entre hidrograma médio e vazão constante usando a geometria real.....	85
Figura 54. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal de geometria real com hidrograma médio e vazão constante	86
Figura 55. Comparativo das diferenças de profundidade ao longo do ano em três períodos: 30 dezembro, 30 abril e 30 de agosto	87

Figura 56. Comparativo dos perfis pelo talvegue da geometria real com hidrograma médio com maré e hidrograma médio com maré sintética	88
Figura 57. Diferenças de profundidade VS largura do delta usando a geometria real para o comparativo entre hidrograma médio com maré e maré sintética	88
Figura 58. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal (valores positivos: sedimentação, valores negativos: erosão) da geometria real usando hidrograma médio com maré e hidrograma médio com maré sintética.....	89
Figura 59. Vazão medida (ADCP) no delta VS níveis do rio na estação Calamar	90
Figura 60. Curva de frequência excedida das vazões diárias a partir dos níveis da estação Calamar no período 2013-2021	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Tabela ANOVA	15
Tabela 2. Tabela de contingencia da prova chi-quadrada	19
Tabela 3. Listagem das batimetrias mensais por zona.....	25
Tabela 4. Volumes mensais setor 1	25
Tabela 5. Volumes mensais setor 2	26
Tabela 6. Volumes mensais setor 3	26
Tabela 7. Volumes mensais setor 4	27
Tabela 8. Volumes mensais setor 5	28
Tabela 9. Volumes mensais setor 6	29
Tabela 10. Volumes mensais setor 7	30
Tabela 11. Volumes mensais setor 8	31
Tabela 12. Variações no fundo (m) anual nos setores dentro do delta.....	34
Tabela 13. Comparativo das seções transversais para a geometria em forma de canal e geometria real	51
Tabela 14. Valores n de Manning usado nas simulações de calibração e seu coeficiente de determinação	57
Tabela 15. Condição de contorno para uma carga de sedimento de 10Mton/ano.....	63
Tabela 16. Resumo dos resultados das simulações	78

1 INTRODUÇÃO

Os estuários e deltas apresentam condições favoráveis para a localização de infraestruturas portuárias, no entanto, esses ambientes são suscetíveis a processos de sedimentação natural, que reduzem o calado do estuário e restringem o trânsito de navios de carga. Além disso, os estuários e deltas com altas taxas de sedimentação requerem de dragagem frequentes para manter as condições de navegabilidade, incrementando os custos operativos aos portos. Os deltas se definem como uma protuberância sedimentaria da linha de costa formada quando um rio entra no oceano e fornece de sedimentos mais rapidamente do que pode ser redistribuído por processos basais (Elliot, 1986; Kennish, 2016). Os deltas podem ser classificados de acordo ao fator hidrodinâmico dominante, sendo influenciados pela maré, vazão fluvial ou as ondas (Kennish, 2016). Esta implicação nestes sistemas requer que seja necessário de uma caracterização robusta das condições hidrodinâmicas, com o fim de compreender os processos morfológicos atuantes e para mitigar os impactos negativos associados à sedimentação.

Os deltas podem apresentar processos de erosão ou sedimentação em diferentes escalas temporais, gerados por fatores naturais ou antropogênicos que definem diferentes condições morfológicas e sedimentológicas nos rios (Passalacqua, 2017; Jiang et al., 2017). Por exemplo, no delta do rio Amarelo (China) se observou que durante o período 1977-2005 se apresentou uma diminuição do aporte de sedimentos ao mar devido às mudanças climáticas (precipitação e incremento da temperatura do ar) e intensas intervenções humanas (Jiang et al., 2017). No delta do rio Mississippi (Estados Unidos) tem-se apresentado alterações significativas no seu leito associado às obras hidráulicas que foram construídas para manter as condições de navegabilidade no canal principal, apresentando-se também diminuição da carga de sedimentos pela construção de barragens em sua bacia (Harmar et al., 2005; Maloney et al., 2018). Baseando-se em análises de longo prazo no delta do rio Ródano (França), Sabatier et al. (2006) encontraram que o delta apresenta uma diminuição na carga de sedimentos acompanhado de processos erosivos, como resultado de uma diminuição da quantidade de sedimentos aportados pelo rio, reflorestação da bacia, a construção de barragens e dragagens. Com base em cartas batimétricas e de imagens de satélite, Allison (1998) mostrou que o delta do rio Ganges-Brahmaputra (Bangladesh) apresenta acréscimo significativo devido ao transporte de sedimentos procedentes do rio e tendência à erosão no litoral da zona oeste do delta, que

recebe mínimas cargas de sedimentos, e também pelo aumento do nível do mar, somado a processos oceanográficos, exacerbados pela subsidência regional. Uma análise semelhante mostra que a morfologia no delta do rio Pearl (China) tem apresentado alteração durante os últimos 40 anos, devido à construção de barragens e outros fatores antropogênicos, diminuindo a carga de sedimentos e prevendo-se um aumento da erosão no delta durante as próximas décadas. (Wu et al., 2016).

Na Colômbia, o rio Magdalena é o principal sistema fluvial e sobre seu delta¹ se localizam diferentes terminais portuários na sua margem esquerda, desde a abcissa km-8 até a abcissa km-22, onde se encontra o porto de Barranquilla, sendo este um dos principais portos do país. Ao longo de seu delta têm sido realizadas várias alterações significativas ao longo de seu leito, motivadas para melhorar a navegação ao porto. As obras hidráulicas iniciaram no ano de 1936 com a construção do “Guia Corrente Ocidental” entre o Km-0 e o Km-5; em 1966 se construiu o “Dique Interior de Contração” com o objetivo de reduzir a largura da embocadura entre Km-0 e Km-2,5; em 1994 se construiu o “Dique Direcional” com o objetivo de fechar a Ilha 1972 onde se apresentava uma forte erosão sobre a margem direita no Km-13; entre 2006 e 2008 se construíram 5 espigões (E-6: Km-0,5, E-3: Km-9, E-2: Km-10, E-1: Km-11 e K-0: Km-12) e o “Dique Guia” para aumentar o calado até 12 m.

Desde o início destas obras foi gerado um impacto considerável sobre as áreas marinhas adjacentes apresentando-se a desapareção de ilhas, sendo a Ilha Verde a mais significativa, e uma marcada erosão sobre as praias. Em 1972 foi criado o Laboratório de Ensayos Hidráulicos Las Flores (LEHF) para realizar estudos e monitoramento do delta através do modelo físico dos primeiros 30 km do delta e do setor marinho de 10 km de raio da foz. Em 1985 foram iniciados estudos para estabilizar o canal de acesso ao porto de Barranquilla nos setores de Siape e a ilha 1972 dentro do delta. Estes estudos receberam apoio da Delft Hydraulics (Holanda) e da consultora Royal Haskoning, período no qual se deu início ao uso de modelos matemáticos para o estudo do delta.

Em 1991 foi criada a Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena-Cormagdalena, responsável pela operação do LEHF. No ano 2000 se iniciaram estudos apoiados pela Royal Haskoning com o objetivo de aumentar o calado no canal de acesso

¹ Nesta tese se refere como delta ao canal fluvial ou distributário localizado dentro do delta ativo na zona inferior do delta, compreendida entre sua foz e o limite da influência da maré

até uma profundidade de 12 m, iniciando-se em 2004 a construção de vários guias-correntes dentro do delta e dragados capitais. Em 2015 o LEHF finalizou as atividades e o monitoramento do delta passou a ser realizado pela Direção Marítima Geral (Dimar).

A situação atual do canal de acesso ao porto de Barranquilla é instável, apresentando períodos com continuas sedimentações que acontecem de forma recorrente durante os últimos tempos, reduzindo-se seu calado navegável e precisando-se de recorrentes dragados de emergência para manter operativo o porto (El Herald, 2020, “Calado autorizado para el Puerto de Barranquilla cayó a 8,3 metros”) (El Tiempo, 2017, “Sedimentación dificulta entrada a Puerto de Barranquilla”). Estes dragados não conseguem atingir o calado ótimo de projeto de 12 m, apresentando-se na atualidade um calado de 9 m e precisando-se em muitas ocasiões do desvio de navios para portos vizinhos, impactando negativamente a competitividade do porto e a econômica de Barranquilla.

Em relação as condições hidrológicas, estudos prévios discutiram a relação entre oscilações climáticas, tais como o ENSO (El Niño-Oscilação Sul) sobre a variabilidade dos padrões de chuva e níveis de água na bacia do rio Magdalena (Poveda et al., 2001; Poveda, 2004, Gutierrez e Dracup, 2001; Restrepo e Kjerve, 2012). O ENSO é uma oscilação periódica climática de escala global apresentada pela anomalia da circulação de Walker no Oceano Pacífico Equatorial. Esta circulação está relacionada à interação oceano-atmosfera e regula a temperatura superficial do mar e a pressão do ar no oceano Pacífico Equatorial, assim como os padrões de precipitação sobre os trópicos. Quando os ventos alísios circulam para oeste apresentam alterações na sua intensidade, e se desenvolvem as duas fases características do ENSO: El Niño e La Niña. Para a fase El Niño, os ventos apresentam enfraquecimento gerando condições anômalas na direção leste, afetando a temperatura no oceano e a distribuição das chuvas, e nesta fase se altera a termoclina presente nas costas de Sul América em que o oceano apresenta temperaturas mais mornas em contraste das frias temperaturas habituais dessa zona. Para a fase La Niña, os ventos alísios são mais fortes do normal, afetando a temperatura do oceano e a distribuição das chuvas de forma contrária à fase El Niño.

O ENSO é caracterizado por afetar os regimes de precipitação e vazão da bacia do rio Magdalena em escala interanual (Poveda et al., 2001). Além disso, a análise espectral evidenciou que o ENSO é uma das principais forçantes climáticas que dominam a variabilidade das condições hidrológicas nos rios que descarregam ao mar do Caribe

(Restrepo et al., 2012). A bacia do rio Magdalena apresenta reduções nos padrões de precipitação durante El Niño e aumento nas condições de chuva durante La Niña, respectivamente (Poveda, 2004). Segundo Poveda et al. (2001), o fenômeno ENSO e os regimes de vazão apresentam uma maior correlação durante os meses de dezembro até fevereiro. Embora a influência do ENSO na hidrodinâmica do rio Magdalena e seu delta seja bem conhecida, se desconhece os efeitos sobre a morfologia do rio e o delta em diferentes escalas de tempo. Na escala interanual, o delta apresenta variações da vazão e nível de forma marcada e estável, apresentando-se três períodos bem definidos referentes à magnitude das vazões, acontecendo um período de vazões baixas entre janeiro-abril, um período de vazões médias entre maio-agosto e um período de vazões altas entre setembro-dezembro.

Assim, o objetivo principal desta tese foi avaliar as respostas morfológicas do delta do rio Magdalena em diferentes escalas de tempo, principalmente inter e intranual. Algumas perguntas norteiam os objetivos específicos desta tese:

- (1) Como são as condições morfológicas atuais do delta do Rio Magdalena?
- (2) Quais são as forçantes principais que determinam as tendências de erosão e sedimentação nas diferentes escalas temporais?
- (3) Podem ser observadas respostas morfológicas devidas às dragagens?

Para responder a estas perguntas foram caracterizadas as condições hidrodinâmicas e morfológicas do delta do rio Magdalena com base numa análise de dados, e implementação de um modelo hidrodinâmico com transporte de sedimentos e evolução morfológica 1-D, que permitiu avaliar as repostas para diferentes cenários propostos. Este estudo pretende ajudar em compreender os principais processos hidrodinâmicos e morfológicos em deltas, usando como caso de estudo o delta do rio Magdalena, visando compreender estes ambientes e ajudar a mitigar os problemas associados à sedimentação que afetam os portos.

O presente estudo está dividido em dois capítulos. O primeiro capítulo mostra todos os dados disponíveis no delta do rio Magdalena e as análises hidrodinâmicas e morfológicas com base em uma análise espectral e estatística usando dados de nível, vazão e batimetrias realizadas durante o período 2006-2012. Os resultados obtidos foram publicados na revista: *Journal of South American Earth Sciences*, com o título: *Morphological behavior of the Magdalena River delta (Colombia) due to intra and interannual variations in river*

dishcharge. O segundo capítulo compreende a implementação do modelo numérico 1D no software Hec-Ras na região do delta, configurado e calibrado a partir dos dados medidos, e a análise dos resultados de diferentes cenários hidrodinâmicos simulados que permitiram a comprovação e validação dos resultados obtidos no primeiro capítulo.

2 CAPÍTULO 1

2.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS

Este estudo foi desenvolvido sobre o delta e a planície de inundação do rio Magdalena, em Colômbia (Figura 1). O rio é o principal sistema fluvial do país, apresentando uma extensão de 1.615 km e uma área da sua bacia de 266.500 km², a qual abrange um 23% do território da Colômbia. O rio apresenta um fluxo de sedimentos de 144x10⁶ ton/ano e uma vazão média em seu delta de 7100 m³/s, sendo este um dos rios com maior descarga de sedimento a nível mundial (Restrepo et al, 2015). O rio Magdalena nasce no Páramo de las Papas na cordilheira central dos Andes e desemboca no mar Caribe em Bocas de Ceniza. A atividade econômica na bacia do rio Magdalena tem uma alta importância para o país, representando 86% do produto interno bruto. A planície se localiza sobre a região do Baixo Magdalena, onde ao rio se juntam seus principais rios tributários (rio Cauca e rio San Jorge).

O rio apresenta uma suave declividade, com diversas lagunas em ambas margens e com alta presença de meandros (Prins, 1973). O rio apresenta um único canal principal desde 30 km a jusante de Magangué até sua foz (Bocas de Ceniza), sem variação significativa na sua vazão ao longo do trecho, só com a diferença do Canal del Dique onde se bifurca aproximadamente um 8% (Alvarado et al., 2008). Na zona marinha próxima a sua embocadura, a maré é mista diurna com amplitudes que oscilam entre 0,2 até 0,6 m. As ondas podem atingir os 5 m de altura durante os meses de janeiro até março com a presença dos ventos alísios e frentes frias (Ortiz et al., 2013).

O regime de precipitação na bacia do Magdalena está controlado pela oscilação meridional da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), apresentando-se um regime bimodal com duas temporadas chuvosas, sendo a primeira entre maio e junho e a segunda e mais forte entre setembro e novembro.

No setor do delta do rio Magdalena, o transporte em suspensão consiste em carga de lavado, silte e argilas (fração de sedimentos menores a 65 micras), e areias. O transporte de arrasto está constituído por areias com um diâmetro característico D50 de 225 micras (Alvarado et al, 2008). Este diâmetro foi obtido como o valor médio das três campanhas

de medições realizadas pela Universidade del Norte entre 2004 e 2005, onde foram amostrados 19 quilômetros ao longo do delta.

Nesta tese foram usados dados fornecidos pela Universidade del Norte, Cormagdalena e o IDEAM (Instituto de Hidrologia, Meteorología y Estudios Ambientales). Foi utilizada a série de níveis em escala horária da estação Casa de Pilotos (K1) entre os anos de 2010 e 2012, a série de níveis em escala diária da estação Tebsa (K23) entre 1996 e 2017 e a série de níveis em escala diária da estação Calamar (K113) entre 1967 e 2017 (de forma continua desde 1993 até 2017). As estações Casa de Pilotos e Tebsa se localizam dentro do delta (Figura 1), enquanto que a estação Calamar se localiza sobre a planície de inundação a 113 quilômetros a montante e não apresenta influência da maré. As estações Tebsa e Calamar são monitoradas pelo IDEAM e a estação Casa Pilotos pela Universidade del Norte e Cormagdalena. Também, foram utilizados dados mensais de vazão medidos com ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) ao longo do canal a cada quilômetro, desde sua desembocadura até o quilometro 22, entre os anos de 2006 e 2012. Tais medições foram realizadas utilizando uma embarcação que realizava trajetos ida e volta das seções transversais de margem até margem.

Para a análise morfológica foram utilizadas 494 batimetrias mensais realizadas pela Universidade del Norte e Cormagdalena distribuídas em oito setores (ver mais adiante na Figura 12) dentro do canal do delta desde o quilômetro 5 até o quilômetro 22, entre os anos 2006 e 2012. As batimetrias se realizaram mediante seções transversais de margem a margem com linhas a cada 25 metros, processando-se com o software Hypack. Os equipamentos usados para a medição das batimetrias foram: uma ecosonda Echotrack-MKII 3200, um GPS Hiperlite TopCom e para as zonas próximas à embocadura se usou um compensador de ondas TSS-DMS 25.

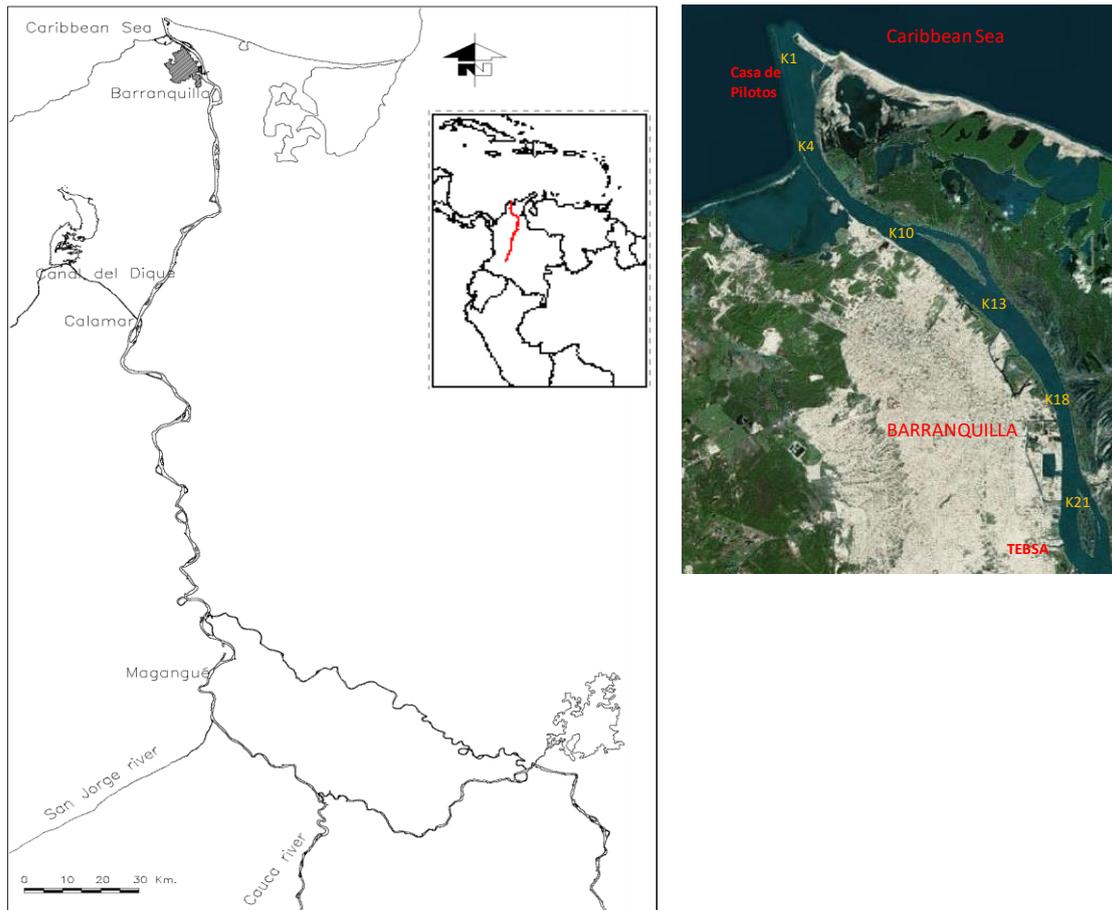


Figura 1. Localização do rio Magdalena na sua planície e seu delta com as estações Tebsa (K23) e Casa Pilotos (K1)

A caracterização do ENSO pode ser feita utilizando diferentes índices, tais como o ONI (NOAA Oceanic Niño Index), o MEI (Multivariate ENSO Index), o JMA (Japanese Meteorological Agency ENSO Index) e o SOI (Southern Oscillation Index). A aplicação e uso de cada índice difere de acordo à fase do ENSO analisada. Sendo assim, o índice JMA é mais sensível para identificar a fase La Niña, e os índices SOI, Niño 3.4 e Niño 4 apresentam similar sensibilidade respeito a fase El Niño (Hanley et al., 2003). Neste estudo se considerou o índice SOI, que consiste em um índice padronizado que relaciona a diferença de pressão entre Tahití e Darwin (Australia) no Oceano Pacífico na sua zona Este e Leste. A série SOI é disponibilizada pelo Bureau of Meteorology-Australian Government e o Queensland Government (www.bom.gov.au/longpaddock.qld.au/soi/). Em condições sem ENSO se apresenta uma baixa pressão em Darwin e alta pressão em Taiti, favorecendo a circulação de ar de Oeste para o Leste, quando o índice SOI apresenta valores negativos por um período prolongado relacionado

ao El Niño. Por outro lado, a fase La Niña é declarada quando o SOI apresenta valores positivos de forma prolongada.

O índice SOI tem sido tradicionalmente usado para avaliar a presença do ENSO na bacia do rio Magdalena (Gutiérrez and Dracup, 2001; Poveda et al., 2001; Restrepo e Kjerfve, 2000). No Brasil, Oliveira et al. (2018) analisaram a correlação entre as anomalias anuais de vazão de todos os rios que desaguam na plataforma continental e a variabilidade interanual relacionada ao SOI e PDO (Pacific Decadal Oscillation). Os autores mostraram que só existe uma correlação significativa na região Norte e Sul da plataforma continental. Por outra parte, Redmond e Koch (1991) usaram o índice SOI como indicador do ENSO para analisar variáveis hidro meteorológicas (precipitação, temperatura e vazão) no Oeste dos Estados Unidos. Também, os autores mostraram que a precipitação e descarga observada entre outubro e março apresentou alta correlação com o índice médio SOI acima do período entre julho e novembro.

A escolha pelo índice SOI como única referência para o ENSO no presente trabalho foi devido aos seguintes elementos: (1) O índice SOI pode ser obtido em uma frequência diária, a diferença de outros índices que apresentam frequências em escalas mensais (a consideração da frequência é necessária para a coerência Wavelet entre os dados hidrodinâmicos do rio e o fenômeno ENSO), e (2) O índice SOI tem sido explorado amplamente em estudos prévios, os quais avaliaram o efeito do ENSO sobre as condições hidrológicas no rio Magdalena. De acordo a Gutiérrez e Dracup (2001), e Poveda et al., (2001), o índice SOI apresenta correlação significativa com o regime fluvial em diferentes rios da Colômbia. Restrepo e Kjerfve (2000) manifestaram que a sazonalidade hidrológica do rio Magdalena pode ser explicada em até 69 % usando o índice SOI. Assim, os resultados desta tese poderão ser consistentes e comparáveis com estudos prévios que avaliaram o índice SOI para analisar a hidrologia do rio Magdalena.

A Figura 2 apresenta a série diária do índice SOI para o período 1993-2017, e a média móvel para 90 dias do índice SOI. Além disso, a Figura 3 apresenta a variação do índice SOI no período 2006-2012 com os índices ONI e MEI, os quais usam outras variáveis para estimativa do fenômeno. O índice ONI considera a temperatura superficial do mar (SST) na região Niño 3.4 e o índice MEI contempla seis variáveis climáticas (pressão do nível do mar, temperatura da superfície do mar, componentes do vento zonal e meridional, temperatura superficial do ar e cobertura de nuvens no céu). Para o período 2006-2012, se determinou a dependência lineal entre os índices mediante o coeficiente

Pearson com resultados de: -0.72 (entre SOI e ONI), -0.78 (entre SOI e MEI) e 0.9 (entre MEI e ONI). Estes valores indicam uma forte relação entre o SOI com os outros índices para representar a variação temporal das correspondentes fases do ENSO para o mesmo período. As correlações negativas se explicam pela escala adotada por cada índice, sendo assim, o El Niño (La Niña) se representa com valores positivos (negativos) nos índices MEI e ONI, enquanto que para a mesma fase é representada por negativos (positivos) valores do SOI.

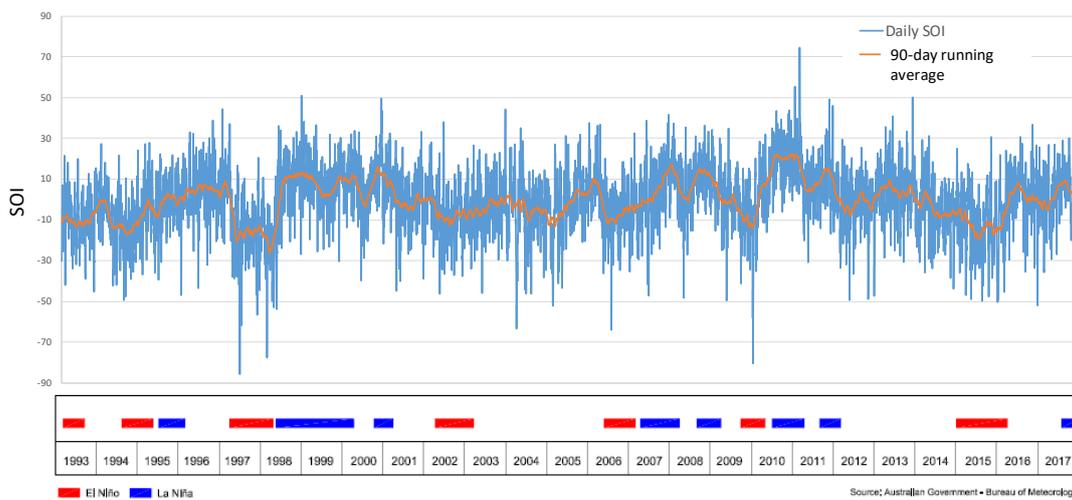


Figura 2. Índice diário SOI 1993-2017 - Eventos ENSO registrados durante 1993-2017 em suas fases El Niño e La Niña

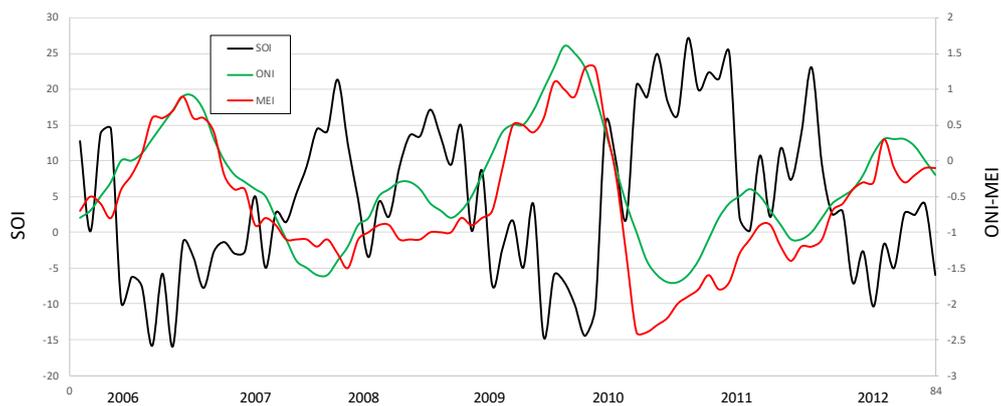


Figura 3. Comparativo entre os índices mensais do ENSO: SOI, MEI e ONI durante 2006-2012

2.2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido mediante o uso de uma análise espectral e estatística para determinar as condições hidrodinâmicas e morfológicas no delta do rio Magdalena. A análise hidrodinâmica foi elaborada através de um sistema invariante no tempo (LTI) e uma prova de independência chi-quadrada, com o objetivo de estimar a associação entre o ENSO e os níveis do rio. Além disso, as anomalias mensais de vazão foram calculadas no delta para o período 2006-2012. Uma análise morfológica foi elaborada através de uma prova ANOVA, usando informação de batimetria mensal para estimar as taxas de erosão e sedimentação.

Foi utilizado um Sistema Linear Invariante no tempo (LTI) para a análise da série de nível do rio obtidos da estação Calamar e seu curva de nível do percentil 50, obtido com base nas séries de níveis diários entre 1967-2017, representativas do sinal de entrada e sinal de saída respectivamente. Um sistema LTI (Figura 4) representa a resposta de um sinal de entrada $x[n]$ convertida num sinal de saída $y[n]$ a traves de uma função de transformação.

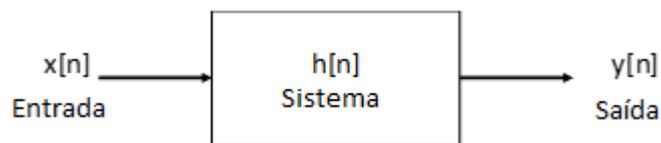


Figura 4. Descrição esquemática dum sistema Lineal Invariante no Tempo LTI

Os sistemas podem ser classificados em: lineares, não lineares, variantes e invariantes no tempo e sistemas com e sem memória. Um sistema linear invariante no tempo com uma única entrada e uma única saída (SISO) permite descrever processos de maneira idealizada e com acertada precisão. A resposta ao impulso de um sistema LTI está definida como a saída do sistema quando a entrada apresenta forma de pulso ou da função delta (Doodge, 1973). Para o caso de um sistema linear, a resposta ao impulso representa uma completa descrição do sistema, que se encarrega de transformar o sinal de entrada num sinal de saída. Um sistema LTI pode ser expresso matematicamente pela convolução do sinal de entrada $x[n]$ com a resposta ao impulso $h[n]$, sendo seu resultado o sinal de saída $y[n]$. A convolução é representada pelo símbolo $*$, e se define como a

combinação de dois sinais para a obtenção de um terceiro sinal pela soma ponderada das respostas ao impulso ocorridas no tempo (Equação 1).

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k] \rightarrow y[n] = x[n] * h[n] \quad (1)$$

Muitos processos físicos podem ser analisados usando sistemas LTI, sendo amplamente implementados na automatização de circuitos elétricos, para a obtenção da resposta sísmica em estruturas (Mahato e Chakraborty, 2016), em modelos hidrológicos determinísticos (Dodge e O'Kane, 2003) e modelos chuva-vazão (Diskin e Boneh, 1975; Norton e Chanat, 2005), como também nas análises do lixo marinho em praias (Kataoka et al., 2013). Neste estudo os sinais de entrada e de saída do sistema foram estabelecidos de forma inicial, só faltando a identificação da resposta ao impulso para obter uma completa caracterização do sistema LTI proposto. A transformada de Fourier aplicada numa convolução se transforma numa multiplicação dos termos no domínio da frequência (Equação 2). Para a obtenção da resposta ao impulso do sistema LTI se usou uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) em ambos os lados da convolução. Mediante o teorema da correlação cruzada, que estabelece que a resposta ao impulso no domínio da frequência $H(w)$ corresponde ao espectro cruzado entre o sinal de entrada e o sinal de saída (dividido pela energia espectral do sinal de entrada) (Equação 3), se calcula a resposta ao impulso do sistema no domínio da frequência. Finalmente se aplica uma Transformada Inversa de Fourier (IFFT) para retornar a resposta ao impulso calculada ao domínio temporal.

$$x[n] * h[n] = y[n] \leftrightarrow X(w) \cdot H(w) = Y(w) \quad (2)$$

$$H(w) = \frac{\overline{X(w)} \cdot Y(w)}{|X(w)|^2} \quad (3)$$

Uma coerência Wavelet foi usada como método de correlação, a qual permite representar sinais em diferentes escalas temporais e se define como o quadrado do espectro cruzado normalizado pelo espectro individual, medindo a correlação cruzada entre dois sinais temporais como função da frequência. A coerência Wavelet apresenta valores entre

0 e 1 para indicar uma baixa e uma alta coerência, respectivamente (Torrence e Compo, 1998).

Uma prova de independência chi-quadrada foi realizada para determinar a associação estatística entre as variáveis das fases do ENSO e os níveis do rio Magdalena. Para esta prova foi elaborada uma tabela de contingência que apresenta a distribuição das frequências observadas. A hipótese nula (H_0) estabelece que as variáveis estão associadas e uma hipótese alternativa (H_a) que estabelece que as variáveis não estão associadas. Para esta prova, as frequências esperadas foram calculadas de acordo à Equação (4), onde n corresponde ao tamanho da mostra, R e C correspondem ao número de amostras por linha e coluna da matriz analisada, respectivamente. Baseado na Equação (5), o estatístico chi-quadrado é calculado usando as frequências observadas O e as frequências esperadas E . Considerando um nível de significância $\alpha=0,05$ se calcula o valor chi-quadrado crítico, estimado de acordo aos graus de liberdade (df) dos dados. A hipótese nula se rejeita em caso que o valor do estatístico chi-quadrado seja maior que o valor do chi-quadrado crítico.

$$E = \frac{R \cdot C}{n} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum(O - E)^2}{E} \quad (5)$$

Para avaliar a variabilidade mensal da vazão dentro do canal do delta respeito ao fenômeno ENSO, foi calculada a anomalia da vazão com os dados medidos com ADCP durante 2006-2012. A anomalia se calcula de acordo à equação 6, onde $Q(m,y)$ corresponde à vazão média mensal dentro do delta (m^3/s), $\mu(m)$ é o valor médio mensal multi anual (m^3/s) e $\sigma(m)$ é o desvio padrão mensal multi anual. A anomalia permite remover o ciclo anual a longo prazo e produz uma série de média nula e desvio padrão unitário.

$$Anomalia = \frac{Q(m, y) - \mu(m)}{\sigma(m)} \quad (6)$$

As análises morfológicas se elaboraram baseado em informação de batimetrias mensais realizadas durante 2006 e 2012 dentro do delta. Se realizou uma análise de

variância (ANOVA) para identificar variações morfológicas significativas durante o período de estúdio.

A prova estatística ANOVA compara as médias de diferentes grupos populacionais baseando-se na distribuição F. Para esta prova, a hipótese nula estabelece que as médias dos grupos populacionais são estatisticamente equivalentes e como hipótese alternativa que não todas as médias são iguais. A prova ANOVA tem como base que as mostras de cada população são independentes, normalmente distribuídas e homocedásticas. A prova ANOVA estima a variação entre as médias das amostras usando a média ponderada, definida como a Média Quadrada dos Tratamentos (MSTR).

$$MSTR = \frac{SSTR}{k - 1} \quad (7)$$

Onde k corresponde ao número de populações e SSTR corresponde à Soma Quadrada do Tratamento, calculada como:

$$SSTR = n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_k(\bar{x}_k - \bar{x})^2 \quad (8)$$

Para estimar a variação das amostras em relação à variância populacional, se calcula o Erro Quadrado Médio (MSE):

$$MSE = \frac{SSE}{n - k} \quad (9)$$

Onde n corresponde ao número de mostras e SSE corresponde à Suma Quadrada do Erro. A Soma Total dos Quadrados equivale à Soma dos Tratamentos com a Soma do Erro:

$$SSE = (n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2 \quad (10)$$

$$SST = SSTR + SSE \quad (11)$$

Finalmente, se calcula o valor do estatístico F mediante a relação entre MSTR e MSE.

$$F = \frac{MSTR}{MSE} \quad (12)$$

O estatístico F se estima baseado na tabela ANOVA (Tabela 1), que apresenta os graus de liberdade e as somas dos quadrados. A rejeição da hipótese nula se determina mediante a comparação entre o estatístico F e o valor do F-crítico F_{α} , obtido com base ao nível de significância α . Os graus de liberdade se definem como $(k-1)$ e $(n-k)$, onde n corresponde ao tamanho da mostra.

Tabela 1. Tabela ANOVA

Fonte	df	SS	MS=SS/df	F-estadístico
Tratamento	k-1	SSTR	MSTR=SSTR/(k-1)	F=MSTR/MSE
Error	n-k	SSE	MSE=SSE/(n-k)	
Total	n-1	SST		

2.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE NÍVEIS D'ÁGUA

Com o registro completo de níveis diários entre 1967 e 2017 da estação Calamar, foi elaborada uma curva de nível do percentil 50, que tem como característica a presença de quatro picos de inflexão que determinam as mudanças em suas declividades (Figura 5). Com a série contínua de níveis diários entre 1993 e 2017 da mesma estação, se comparou as curvas de níveis de cada ano com a curva de nível do percentil 50, observando-se que os quatro picos de inflexão acontecem durante as mesmas datas do ano para ambas as curvas de níveis em todo o período analisado. O primeiro pico (Pico 1) apresenta característica de mínimo e acontece entre o 1 de janeiro até o 30 de abril. O segundo pico (Pico 2) apresenta característica de máximo e acontece entre o 1 de maio e o 31 de julho, O terceiro pico (Pico 3) apresenta característica de mínimo e acontece entre o 1 de agosto e o 30 de setembro e quarto pico (Pico 4) apresenta característica de máximo e acontece entre o 1 de outubro e o 31 de dezembro (Figura 6).

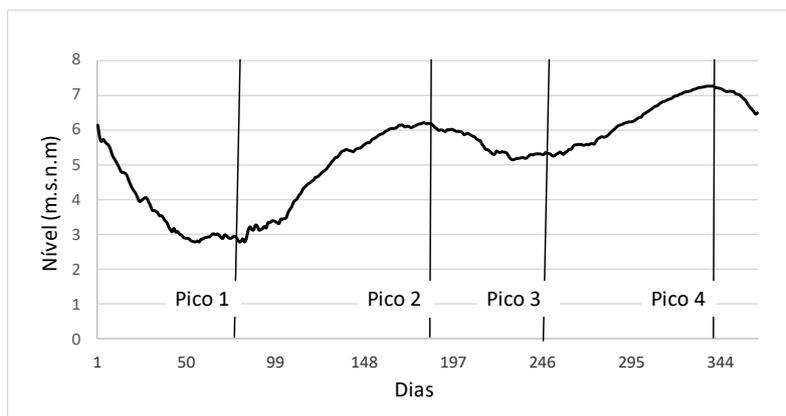


Figura 5. Curva de nível percentil 50 - estação Calamar (1967-2017)

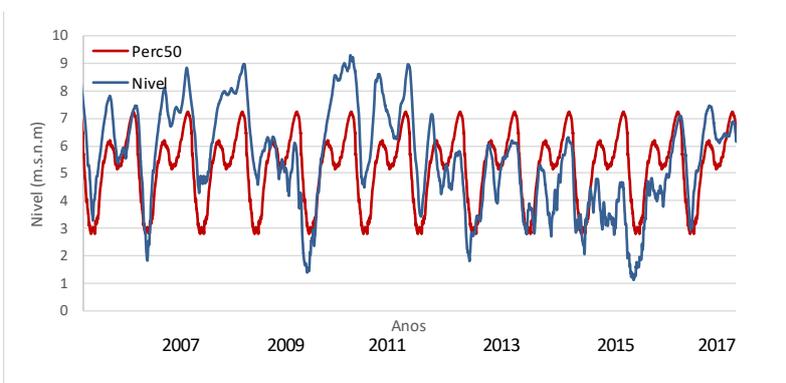
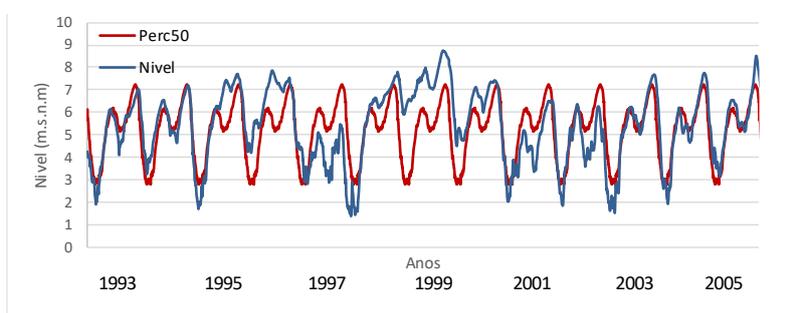


Figura 6. Curva nível percentil 50 (Perc50) VS Níveis medidos 1993-2017 (Nível) - Estação Calamar

2.3.1 Sistema Lineal Invariante no Tempo (LIT) e coerência Wavelet

Dadas as características que apresenta a curva de níveis da estação Calamar referente à ocorrência dos quatro picos de inflexão, se considera que as condições hidrológicas nesta estação estão representadas como um sinal periódico anual com variações na amplitude dos níveis só nos quatro picos de inflexão. Usando a série de

níveis de 1993-2017 e a curva de nível do percentil 50, se elaborou um Sistema Lineal Invariante no Tempo (LTI) para representar o comportamento periódico dos níveis da estação Calamar. O sinal de entrada $x[n]$ usado para o sistema LTI corresponde à curva de nível do percentil 50 repetido 25 vezes (Perc50) e o sinal de saída $y[n]$ corresponde à série de níveis observados durante 25 anos entre 1993-2017 (Nível). Neste caso, para obter uma completa caracterização do sistema LTI proposto, foi calculada a resposta ao impulso $h[n]$ do sistema, a qual descreve todos os processos atuantes que convertem o sinal de entrada no sinal de saída.

Aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) na convolução representativa do sistema LTI, se convertem todos termos ao domínio da frequência e mediante o teorema da correlação cruzada, foi calculada a resposta ao impulso $H(w)$ dentro do domínio da frequência. Aplicando uma Transformada Inversa de Fourier (IFFT) se retorna a resposta ao impulso calculada para o domínio temporal $h[n]$.

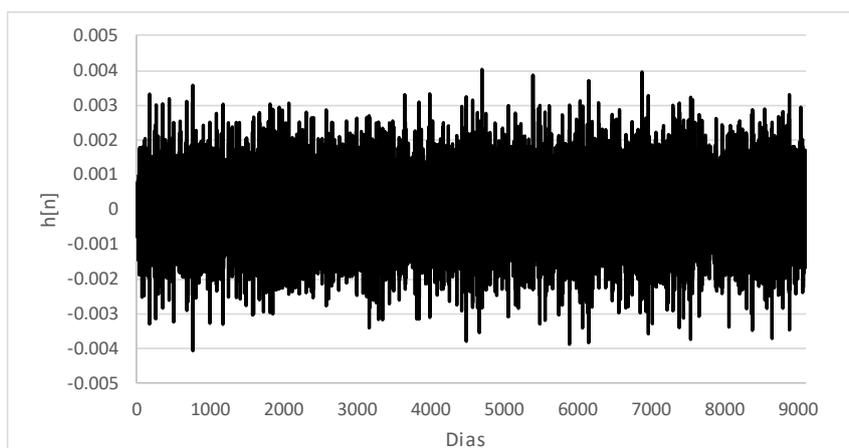


Figura 7. Resposta ao impulso $h[n]$ calculada do sistema LTI

Para estimar os efeitos do ENSO sobre as variações dos níveis no rio Magdalena na estação Calamar, foi correlacionada a resposta ao impulso calculada com a média móvel de 90 dias da série diária do índice SOI entre o período de 1993-2017 (Figuras 2 e 7). As variações do índice SOI são susceptíveis a mudanças climáticas de curta escala como diárias ou semanais, principalmente durante períodos com ciclones tropicais, sendo o motivo de recomendar o uso de séries com períodos mensais ou maiores. A correlação se determinou calculando a coerência Wavelet entre os dois sinais usando uma Morlet Wavelet. A Figura 8 apresenta a coerência Wavelet obtida, na qual se observam as áreas

com alta coerência (amarelo) sobre a banda de período trimestral (0,25 anos) ao longo de todo o período analisado e sobre a banda de período anual (1 ano) durante os anos 2008-2011 e 2015. Comparando as datas em que se apresentaram as altas coerências com os eventos ENSO registrados durante 1993-2017, foi identificada a relação entre ambas as variáveis durante o período analisado (Figura 7 e Figura 8). O motivo de obter altas coerências sobre o período trimestral se deve a que a resposta ao impulso calculada estima a variação na amplitude dos níveis referentes aos picos de inflexão de cada ano, sendo que os picos se apresentam com uma periodicidade próxima à 3 meses. As zonas com altas coerências na banda anual se explicam dado que durante esses anos se tiveram eventos ENSO de magnitude forte: 2008, 2010 e 2011 referidos ao La Niña e o ano 2015 referido ao El Niño, que alteraram a curva de nível durante todo o ano, a diferença dos demais eventos ENSO de magnitude moderada que só afetaram as amplitudes dos níveis sobre os picos de inflexão.

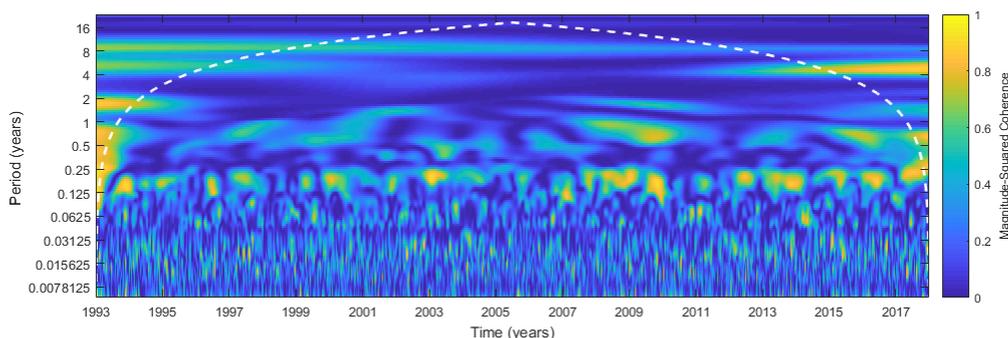


Figura 8. Coerência Wavelet entre a resposta ao impulso e a série diária SOI 1993-2017

2.3.2 Prova de independência

Uma prova de independência chi-quadrada foi elaborada para estimar a relação entre os níveis do rio na estação Calamar e a presença do ENSO em suas fases El Niño, La Niña ou neutro (sem ENSO). Foram usados os níveis mínimos do rio registrados entre o 1 de janeiro e o 30 de abril de cada ano, correspondentes aos níveis do pico de inflexão Pico 1, e os eventos ENSO que aconteceram durante os primeiros meses de cada ano. Esta análise se elaborou só para os níveis do Pico 1 devido a que durante o período do ano que se apresenta este pico, o rio apresenta seus níveis mais baixos e sua vazão se encontra totalmente dentro de sua calha principal, sem apresentar inundações sobre sua

planície, frequentes em outros períodos do ano. Esta característica faz que os valores de nível para o Pico 1 sejam mais sensíveis à variação vertical de nível em vez das variações horizontais que possam acontecer durante os eventos de inundação. A Tabela 2 apresenta os valores de contingência usados na prova chi-quadrada, onde são mostradas as frequências observadas dos eventos registrados por ano de acordo às duas variáveis categóricas definidas: Níveis do Pico 1 e eventos ENSO.

A primeira variável categórica correspondente aos níveis do rio para o Pico 1 se calculou de acordo a sua distribuição percentil, onde se classificaram os níveis em três grupos: os níveis do Pico 1 por debaixo do nível correspondente ao percentil 25 (1,7 m.s.n.m) se classificaram num grupo chamado Baixos, os níveis do Pico 1 entre os níveis correspondentes aos percentis 25 e 75 (3.3 m.s.n.m) se classificaram num grupo chamado Médios e os níveis do Pico 1 acima do nível correspondente ao percentil 75 se classificaram num grupo chamado Altos. Os níveis máximo e mínimo referentes ao Pico 1 do registro foram 5,91 e 0,93 m.s.n.m, respectivamente. A segunda variável categórica referente ao ENSO foi definida classificando cada ano como: El Niño, La Niña ou Neutral, de acordo à presença ou ausência do fenômeno durante os primeiros meses de cada ano.

Tabela 2. Tabela de contingencia da prova chi-quadrada

	El Niño	Neutral	La Niña
Níveis Baixo	12	-	-
Níveis Médio	2	20	2
Níveis Altos	-	1	9

Foi definida a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_a) da seguinte forma:

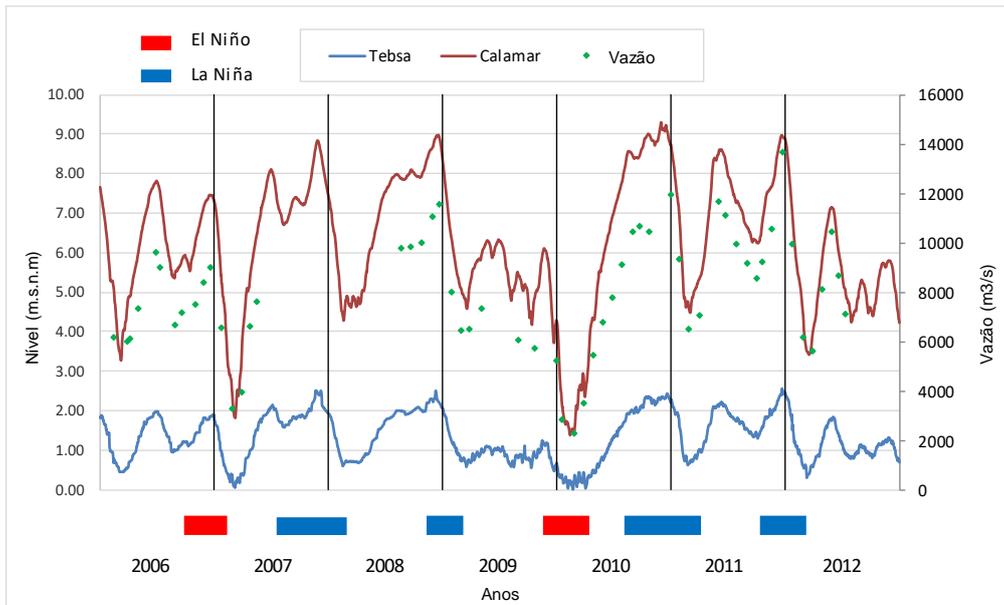
- H_0 : Os níveis do Pico 1 e os eventos ENSO não estão associados;
- H_a : Os níveis do Pico 1 e os eventos ENSO estão associados

O valor do estatístico chi-quadrado obtido com as frequências observadas e esperadas foi de 53,88. Usando um nível de significância α de 0,05 para calcular o valor do chi-quadrado crítico com quatro graus de liberdade se obteve o valor de 9,49. Considerando que o valor chi-quadrado calculado é maior que o valor do chi-quadrado crítico, foi rejeitada a hipóteses nula, concluindo que os níveis do Pico 1 e os eventos ENSO estão associados.

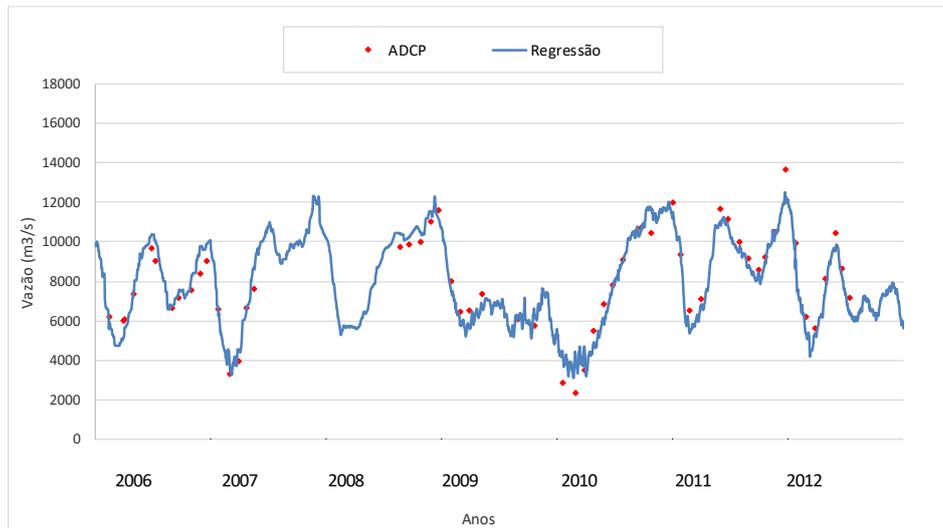
2.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS VAZÕES

Dentro do canal do delta se realizaram medições de vazão com ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) em secções transversais aproximadamente a cada quilómetro desde a foz até a ponte Pumarejo (K22), de forma mensal durante o período 2006-2012. Tais medições foram realizadas mediante secções transversais de margem até margem, desprezando a influência da maré. Se comparou a vazão média mensal com o nível do rio nas estações Tebsa e Calamar, localizadas a 23 e 113 km a montante, durante as mesmas datas das medições (Figura 9). Foi observado que a variação dos níveis é congruente com a variação das vazões em todo o registro, mostrando a vazão fluvial do rio Magdalena como o principal componente hidrodinâmico dentro do delta por acima da maré. Se determinou o coeficiente da variação da vazão de forma espacial dentro do delta para todos os meses, apresentando um valor inferior ao 6% para os sete anos analisados, com exceção dos meses de fevereiro de 2007 e 2010, em que o coeficiente foi superior ao 10%. Durante o mês de fevereiro são registradas as menores vazões, onde se tem a presença da cunha salina que consegue ingressar até 4 quilómetros a montante (Ospino et al., 2018). Possivelmente, a circulação gravitacional explica a maior variação da vazão mensal obtida durante os meses de fevereiro.

A mediana das vazões observadas durante 2006-2012 foi de 7780 m³/s. O período que apresentou as maiores vazões correspondeu aos últimos dois meses do ano em: 2008, 2010 e 2011. Com vazões acima de 11000 m³/s, e sendo o ano 2011 que apresentou as maiores vazões, com oito meses por acima de 9000 m³/s, apresentando-se durante dezembro de 2011 a maior vazão registrada no período analisado, com 13300 m³/s. Nesses anos de altas vazões se apresentou o fenômeno La Niña. Os períodos de menores vazões corresponderam ao período de começo do ano, especialmente durante os meses de fevereiro e março, observando-se a menor vazão registrada no período de análise, durante fevereiro de 2010 com 2600 m³/s. O ano que apresentou menores vazões correspondeu ao 2009 com todas suas vazões mensais abaixo dos 8000 m³/s. Nesses anos de baixas vazões se apresentou o fenômeno El Niño. Com os dados de vazão média mensal se calculou a variância multianual de cada mês, observando-se que o mês que apresenta maior variabilidade nas vazões corresponde ao mês de dezembro (Figura 10).



(a)



(b)

Figura 9. (a) Níveis diários na estação Tebsa e Calamar com vazão média mensal medida (ADCP) no delta – período 2006-2012. (b) Vazão média mensal medida (ADCP) no delta e vazão obtida da regressão dos níveis na estação Tebsa com as vazões medidas (ADCP)

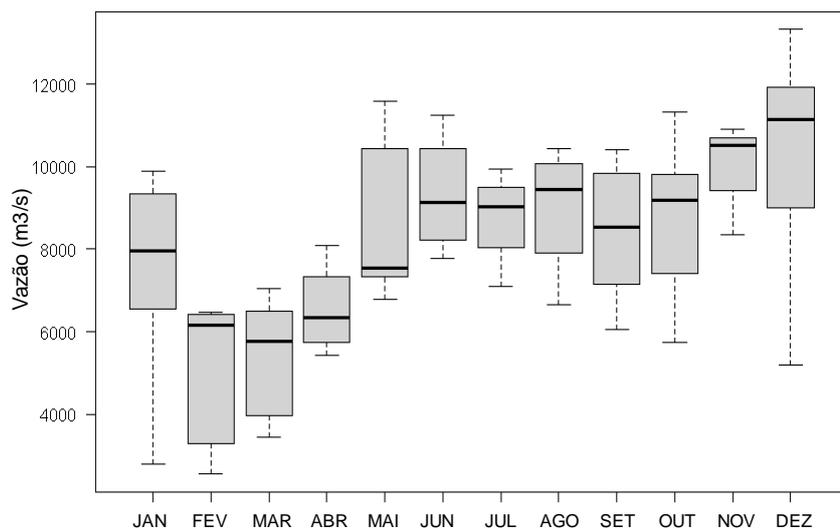


Figura 10. Gráfico Box-Plot das vazões mensais no delta durante 2006-2012

Com as vazões médias mensais medidas no delta durante 2006-2012 se calcularam as anomalias de vazão em escala mensal, comparando-as com o índice mensal SOI e os eventos El Niño e La Niña apresentados durante o período analisado (Figura 11). Se observa uma correspondência entre as anomalias por acima de +1 com eventos La Niña para os anos de 2007, 2008 e 2010-2012 e uma correspondência das anomalias por abaixo de -1 com eventos El Niño durante os anos 2006-2007 e 2009-2010. Isso evidencia a correlação existente entre as magnitudes das vazões com a presença do fenômeno ENSO. No ano 2012 se apresentou um período de anomalia negativa com média de -0,9. O coeficiente de correlação Pearson calculado entre as anomalias mensais e o índice mensal SOI foi de 0,59.

O box-plot das vazões médias mensais durante 2006-2012 (Figura 10) mostra que as maiores vazões se apresentaram durante os meses de novembro e dezembro, e as menores vazões durante os meses de fevereiro e março. Restrepo e Kjerfve (2000) reportaram que a vazão média no período 1975 e 1995 foi de 7200 m³/s, com um mínimo de 4068 m³/s em março e máximo de 10287 m³/s em novembro, mostrando que os eventos ENSO afetam as magnitudes de máximas e mínimas vazões mensais, em vez do comportamento do ciclo anual.

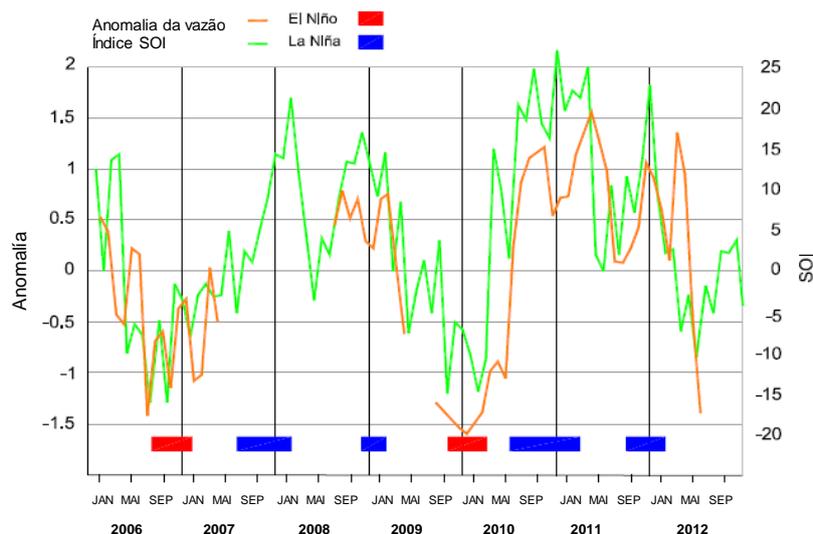


Figura 11. Anomalia da vazão no delta com o índice SOI mensal e os eventos ENSO acontecidos durante 2006-2012

2.5 RESULTADOS DAS ANÁLISES MORFOLÓGICAS

2.5.1 Condições de estabilidade

Durante o período 2006-2012 foram realizadas batimetrias mensais no delta do rio Magdalena para monitorar as condições navegáveis do canal de acesso ao porto de Barranquilla. As batimetrias foram elaboradas em oito zonas de acordo às boias de navegação instaladas no rio (Tabela 3). Cada batimetria foi convertida de profundidade (m) para cota (m.s.n.m) usando as abscissas de cada zona batimétrica e com o nível d'água projetado para cada setor entre as estações Tebsa (K23) e Casa Pilotos (K1), durante as mesmas datas em que se realizaram as batimetrias.

Para cada batimetria se criou uma superfície de terreno TIN (Triangulated Irregular Network) no software AutoCad Civil. Dado que os contornos das batimetrias mensais dentro de cada zona apresentavam irregularidade, se criou para cada uma das oito zonas batimétricas um polígono denominado “setor” mediante uma *breakline* que modificou o contorno de cada batimetria. Este polígono representa um contorno comum para todas as batimetrias mensais de cada zona e permite a comparação das diferentes batimetrias medidas ao longo do registro disponível (Figura 12).

Para cada batimetria mensal foi utilizada a porção dentro do polígono, utilizando um mesmo valor da sua área para os oito setores, igual a 294080 m². Os setores criados e suas abcissas foram os seguintes: Setor 1 (K5+700), Setor 2 (K7+300), Setor 3 (K11+300), Setor 4 (K13+000), Setor 5 (K15+100), Setor 6 (K17+000), Setor 7 (K18+700) e Setor 8 (K20+500). Além disso, para cada setor se criou uma superfície TIN denominada “Superfície de referência”, com um contorno semelhante para cada setor assignado e com uma cota constante de -50 m.s.n.m. Este valor de cota foi utilizado para garantir que todas as superfícies de referência estivessem o suficientemente abaixo de todas as batimetrias mensais. Usando a ferramenta TIN Volume Surface do AutoCad Civil se calculou o volume gerado entre cada batimetria mensal com sua superfície de referência assignada para cada um dos oito setores. O Anexo 1 apresenta as secções transversais de todas as batimetrias mensais para cada setor ao longo do registro (2006-2012). Os volumes mensais calculados por mês e ano para cada setor são mostrados nas Tabelas 4-11 e Figuras 13-20.



Figura 12. Delta do rio Magdalena com as zonas batimétricas (vermelho) e os setores (branco)

Tabela 3. Listagem das batimetrias mensais por zona

Zona	Setor	Número de batimetrias
B3-B7	1	63
B7-B9	2	63
B9-B13	3	62
B13-B15	4	63
B15-B19	5	60
B19-B21	6	60
B21-B23	7	60
B23-PP	8	63
Total batimetrias mensais		494

Tabela 4. Volumes mensais setor 1

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	11038804.9	11105875.6	10999639.0	10685968.4	10914554.06	10743053.6	10503802.5
Fevereiro	11008342.9	11082354.3	11019480.31	10715465.9	10980590.34	10754498.0	10323643.7
Março	11273610.9		10972291.54	10728866.2	11016592.49	10899512.6	10336416.2
Abril	11210268.4	11397092.8	10986995.87	10820933.8	11039941.47		10638315.8
Mai	11208878.9		11066339.29		11326893.37		10602546.0
Junho	11073976.96	11632705.1	11075376.83		11376157.03	10801649.9	10596739.0
Julho	11026349.4		11017315.45		11348742.49	10460074.4	10619464.2
Agosto	11037921.6		10932542.42		11216654.68	10699735.3	
Setembro	10951512.4		10963780.87	10923005.4	10943535.97	10715708.8	
Outubro	10943860.6		10912511.12	10925990.8	10646452.50	10739094.0	
Novembro	11012488.3			10953052.6	10944036.03	10473269.9	
Dezembro	10928037.8			10957608.7	10736301.19	10551173.2	

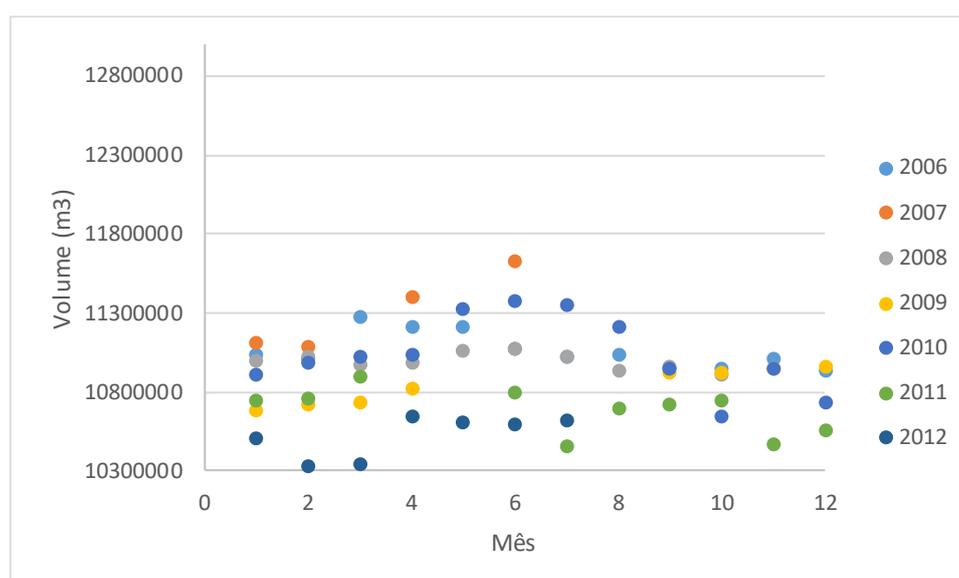


Figura 13. Volumes mensais - setor 1

Tabela 5. Volumes mensais setor 2

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	11502702.06		11406676.9	11224282.2	11317811.75	11274058.1	10583811.5
Fevereiro	11433551.75	11510296.8	11280237.4	11149140	11338826.97	11116669.5	10522548.7
Março	11515751.37		11300647.43	11197410.1	11310413.63	11150057.6	10514666.3
Abril	11595834.87	11577823.2		11226828.1	11458547.06		10744512.8
Mai	11538939.58	11618481.2	11414329.16		11616728.29		10911363.8
Junho	11552479.42	11647639.1	11507243.37		11654045.30	11057022.2	10870891.4
Julho	11516514.89		11482331.61			11087414	10898411
Agosto	11568445.18		11437985.49	11347735.2	11587949.25	11235548.3	
Setembro	11524414.08		11531386.43	11372687.5	11368598.36	11170531.2	
Outubro	11530903		11466610.87	11374025.8	11554365.87	11104645.5	
Novembro	11517562.22		11356721.96	11407536.4	11290380.67	11222452.9	
Dezembro	11503625.38			11344865.1	11352822.13	10922532.9	

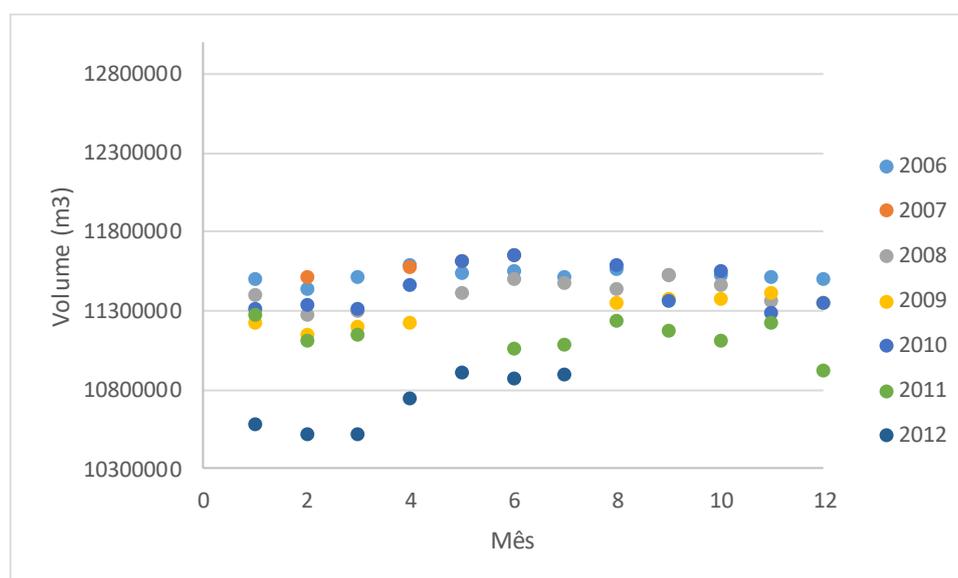


Figura 14. Volumes mensais - setor 2

Tabela 6. Volumes mensais setor 3

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	11924462.48			11428443.3	11604876.85	11629655.8	11398853.5
Fevereiro	11965653.45	11664490.9	11593752.36	11392489.3	11600539.05	11555101.3	11467077.8
Março	11974060.24		11505291.46	11433392	11553566.1	11569088.4	11394740.1
Abril	11993727.21	11680144.7		11561543.7	11639302.82		
Mai	12008797.98	11784880.9	11635128.19		11724897.12		11519930.0
Junho	12079964.55	11948299.2	11652900.55		11681278.12	11754812.9	11669273.1
Julho	11970472.12		11705779.43		11630838.73	11545588.2	11605632.1
Agosto	11938261.76		11595299.41	11654665.2	11811410.27	11395186.1	
Setembro	11891208.91		11575420.53	11629549.6	11900273.5	11491406.4	
Outubro	11723423.61		11580136.06	11624981.7	11864243.14	11693483.4	
Novembro	11724180.33		11412571.81	11575466.4	11868612.38	11365214.9	
Dezembro	11667315.82			11594883.3	11851445	11265610.4	

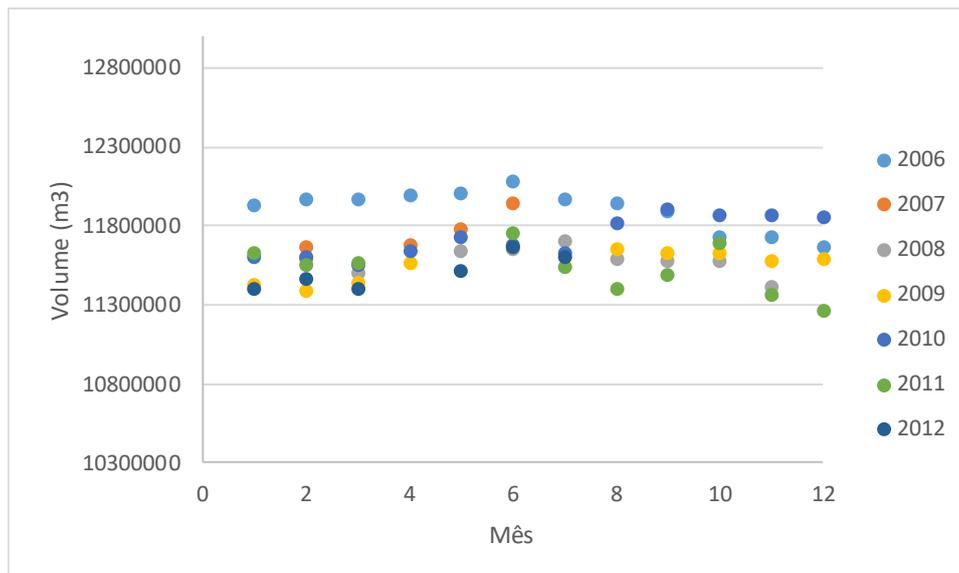


Figura 15. Volumes mensais - setor 3

Tabela 7. Volumes mensais setor 4

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	12375927.9	12347743.3	12375417.9	12313842.6	12305681.93	12030665.6	12108398.63
Fevereiro	12279189.34	12349715.5		12443018.4	12346543.45	12439199.2	12207411.48
Março	12412115.3		12388490.22	12612892.3	12341057.79	12439200.2	12113077.63
Abril	12408553.95	12425998.7		12476786.3	12402240.05		12207278.43
Maiο	12410093.46	12486250.1	12419624.7		12613205.24		12123206.6
Junho	12409178.59	12469757.9	12416315.79		12621115.91	12161704.1	12081551.8
Julho	12403953.74		12374514.42		12569285.57	12067239.3	12049709.5
Agosto	12339373.8		12350130.14	12340651.4	12455729.83	12441649.6	
Setembro	12305687.2		12294409.34	12372997.4	12483042.5	12128082.6	
Outubro	12348895.89		12286563.85	12327435.7	12156573.79	11993314.9	
Novembro	12304903.88		12218946.38	12336669.7	12391426.6	12220535.5	
Dezembro				12363413.5	12137525.3	12128607.4	

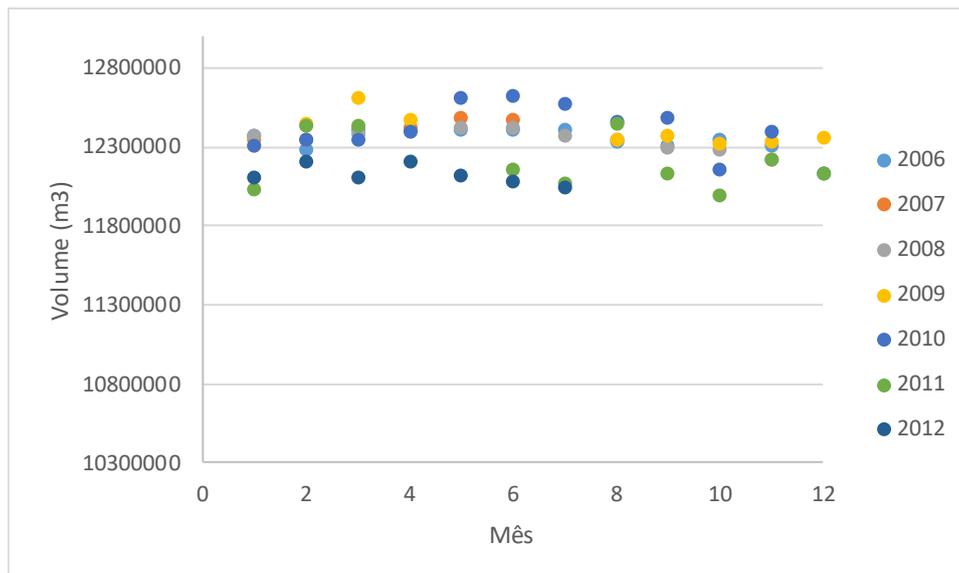


Figura 16. Volumes mensais - setor 4

Tabela 8. Volumes mensais setor 5

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	12339840.47	12464412.7		12445659.1	12433264.36	12561843	12297961.1
Fevereiro	12315452.1	12402425.9	12505081.75	12389553.1	12448745.68	12447455.1	12264646.9
Março	12306580.03		12471887.17	12387376.6	12442389.52		12178946
Abril		12511363.5		12349152.2	12479195.18		12259379.9
Mai	12376797.27	12552140.4	12571202.23		12685546.91		12187672.2
Junho	12448150.72	12567555	12537294.49		12705032.70	12280107	
Julho	12315452.1		12557729.3		12658244.35	12495334.4	12218547.4
Agosto	12395167.64		12546645.63	12404565.9	12665778.83	12450504.6	
Setembro	12407954.77		12521873.85	12435926	12595865.26	12402669.4	
Outubro	12390532.58		12601550.35	12405006.2	12530607.36	12339430.8	
Novembro	12388248.43		12554798.4	12470692.2	12267265.31	12243306.3	
Dezembro				12457222.2	12306602.24	12207375.9	

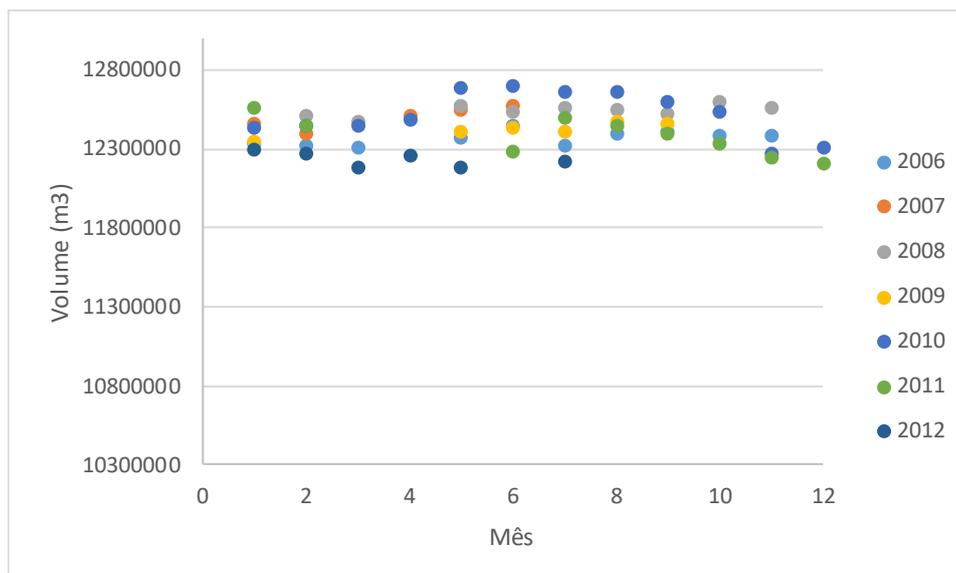


Figura 17. Volumes mensais - setor 5

Tabela 9. Volumes mensais setor 6

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	11165765.99	11178521.8		11009156.5	11218299.69	11162466.5	
Fevereiro		11149146.5	11188522.49	11045609.3	11225801.58	11078494.7	10816592.9
Março	11140357.67		11200574.82	11116339.3	11222207.81	10883589	10813629.5
Abril	11237803.79	11489636		11099349.1	11407887.41		10933197.3
Mai	11296022.06		11311079.97		11463956.07		10903726.3
Junho	11289091.42	11372307.2	11279129.39		11435710.72	11197063.8	10907709.1
Julho	11231939		11233101.78		11323846.34	11048020.6	10979621.2
Agosto	11207771.15		11134722.17	11109130.1	11216477.18	10965391.8	
Setembro	11233805.25		10993132.93	11143905.7	11123339.69	11004955.4	
Outubro	11198953.73		11002035.1	11147363	11048199.69	10964460.8	
Novembro	11195798.65		10883961.72	11212285.5	11110955.17	10877091.3	
Dezembro				11141393.4	11340284.67	10893047.5	

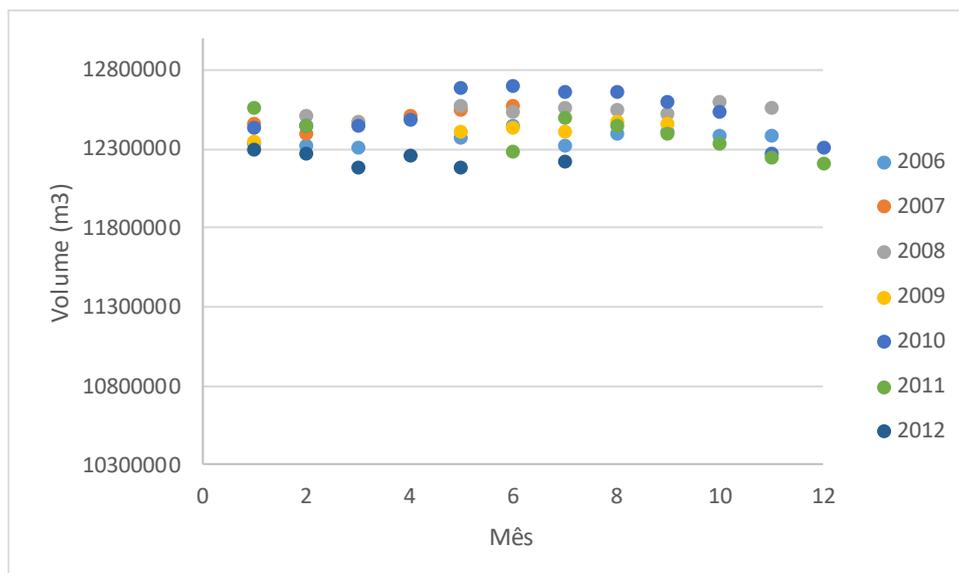


Figura 18. Volumes mensais - setor 6

Tabela 10. Volumes mensais setor 7

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	11107804.05	11098207.5		11191219.3	11221407.05	11007541.1	
Fevereiro	11155101.26	11135388.6	11631651.77	11161292.6	11213352.73	10871691.3	10747705.2
Março	11218567.88		11432590.65	11146158.8	11262941.02	10945100.3	10688903.8
Abril	11165747.34	11286526.3		11160727.1	11258941.27		10731132.5
Mai	11176564.89	11250408.6	11462621.35		11265438.42		10784313.4
Junho	11119526.29	11172694.4	11408226.49		11313694.14		11023146.2
Julho	11129207.78		11341125		11297227.91	11020902.1	10979090.5
Agosto	11140581.99		11296975	11173573	11537908.56	10993528.9	
Setembro	11141583.46		11288934.04	11174243.1	11520309.24	10963870.9	
Outubro	11117300.95		11401221.63	11178750	11402363.81	10895551.7	
Novembro	11069039.21		11383876.59	11161260.4	11267695.58	10940791.6	
Dezembro					11302841.5	10986289.7	

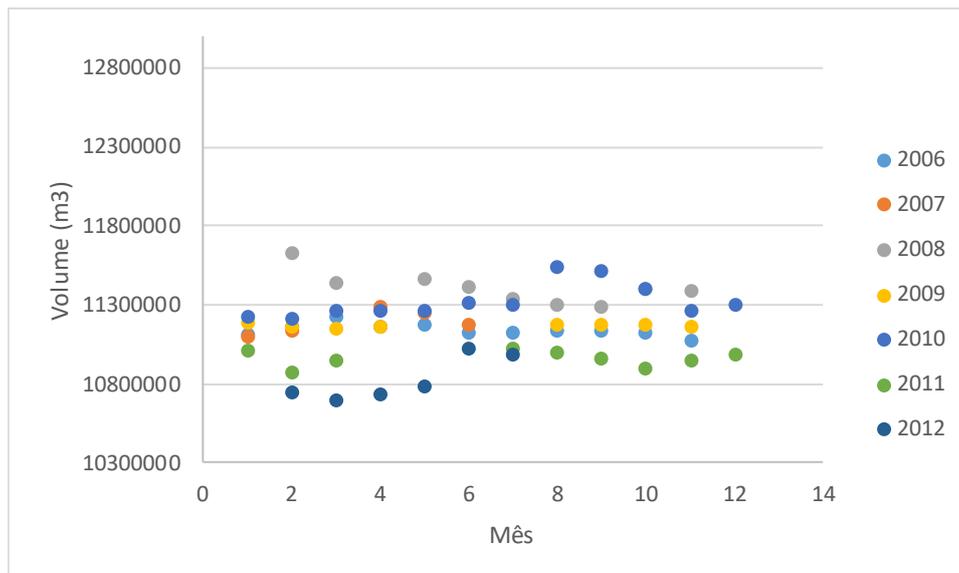


Figura 19. Volumes mensais - setor 7

Tabela 11. Volumes mensais setor 8

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	12716333.9	12621494.09		12455082.56	12448456	12521770.27	12439983.14
Fevereiro	12646728.6	12629055.64	12675577.99	12615854.22	12420704.9	12677143.26	12493831.69
Março	12686316.1	12627834.9	12675666.53	12606945.25	12465138.89	12657616.54	12464643.8
Abril	12690117.8	12688820.37		12594770.75	12470318.03		12487523.66
Mai	12697589.7		12730148.8		12493909	12519783.32	
Junho	12664838.0	12634906.73	12662295.22		12526842.24	12555006.72	12539401.97
Julho	12645834.4		12582254.17		12601914.92	12429848.09	12518440.65
Agosto	12628850.9		12634182.29	12529945.55	12696164.5	12345428.8	
Setembro	12637340.2		12571173.75	12507955.43	12686176.16	12338119.38	
Outubro	12641711.4		12588997.33	12525313.56	12444456.72	12335443.56	
Novembro	12626226.3		12559406.3	12499055.38	12657979.65	12389016.48	
Dezembro				12469562.93	12524073.35	12454931.9	

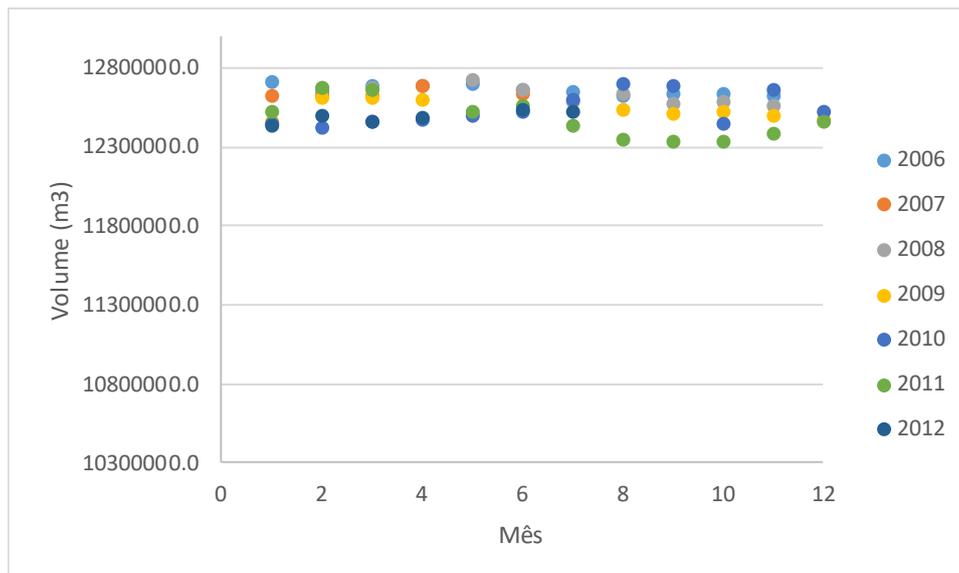


Figura 20. Volumes mensais - setor 8

Com os volumes mensais de cada setor se determinou se as condições morfológicas no delta do rio Magdalena permaneceram estáveis durante o período 2006-2012, ou se foram variantes. Usando os volumes médios anuais de cada setor se elaborou uma análise de variância (ANOVA) para determinar se todos os volumes médios anuais permaneceram estatisticamente iguais ou se variaram durante o tempo analisado (Figura 21). A hipótese nula (H_0) da prova ANOVA usada foi que todos os volumes médios anuais são iguais e a hipótese alternativa (H_a) usada foi que não todos os volumes médios anuais foram iguais. O valor de significância α escolhido para determinar o F crítico em todas as provas ANOVA foi de 0,05, a hipótese nula e a hipótese alternativa se definiram da seguinte maneira:

- H_0 : $\overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
Todos os volumes médios anuais foram iguais.
- H_a : Não todos os volumes médios anuais foram iguais.

O resultado das provas ANOVA realizadas para todos os setores mostraram rejeição da hipótese nula e aceitação da hipótese alternativa, indicando que as médias dos volumes anuais não foram iguais. Por tanto se conclui que as condições morfológicas no delta do rio Magdalena durante 2006-2012 não foram estatisticamente estáveis. No Anexo 2 se apresentam as provas ANOVA realizadas para cada setor.

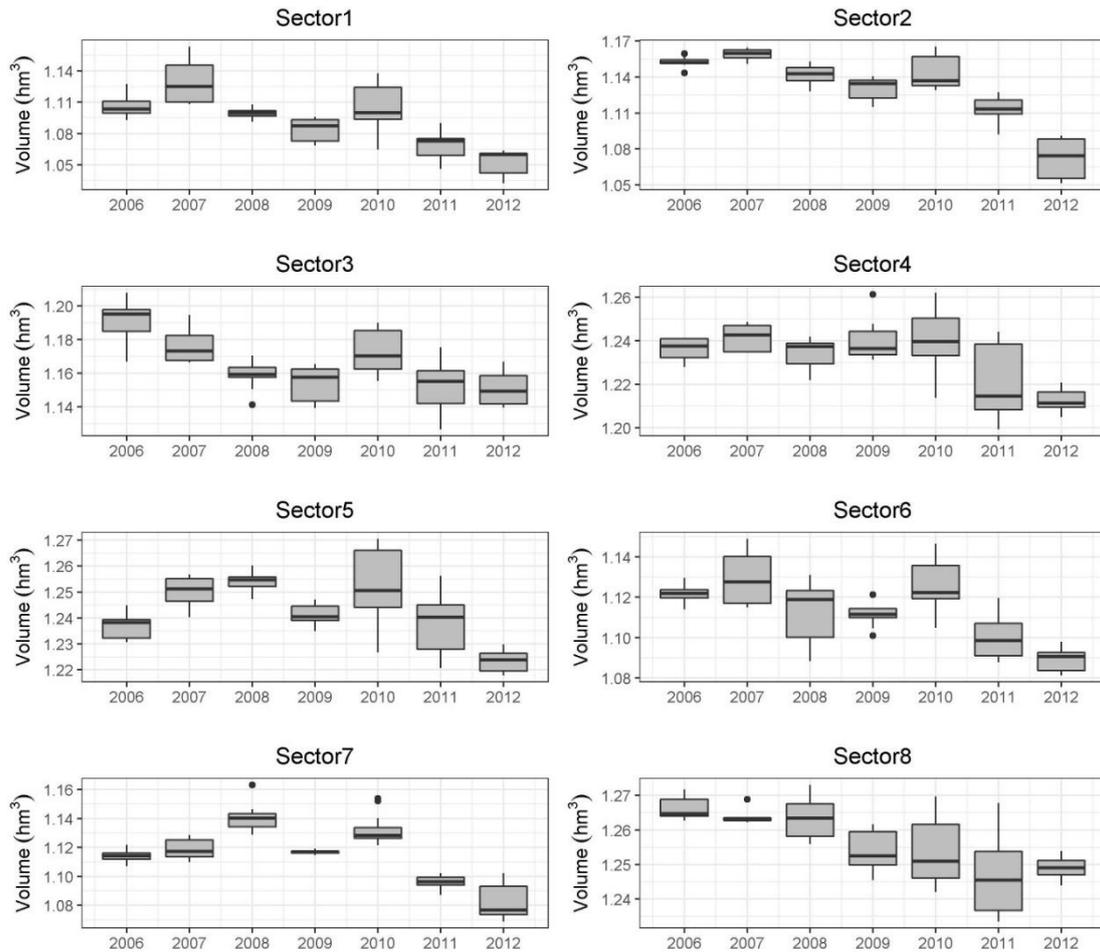


Figura 21. Distribuição anual dos oito setores com os volumes gerados entre as batimetrias mensais e a batimetria de referência na cota -50 m.s.n.m

2.5.2 Variabilidade morfológica do fundo em escala interanual

Com os volumes anteriormente mencionados se calcularam as diferenças dos volumes entre meses adjacentes do registro disponível. Estas diferenças foram divididas pela área do setor com o fim de obter a variação do fundo em unidade de metros. Os valores das diferenças em negativo correspondem a erosões e os valores das diferenças em positivo correspondem a sedimentações. O total de sedimentação e erosão anual equivale à somatória de todas as diferenças de cada ano. Na tabela 12 se observa os valores finais obtidos para cada setor de forma anual e os valores acumulados por ano e setor. Se observa que durante o período 2006-2012 se apresentou uma tendência à erosão em todos os setores. Durante o período analisado a vazão média foi de $8100 \text{ m}^3/\text{s}$, valor superior à vazão média histórica de $7100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Alvarado et al., 2008).

Os valores de erosão foram maiores nos setores próximos à embocadura do rio, sendo os setores 1 e 2 os mais afetados, o qual evidencia o possível efeito das ondas e maré sobre as variações no fundo, assim como possíveis obras de dragagem nesse setor.

Embora a tendência durante 2006-2012 seja de erosão, os dados mostraram anos com picos de sedimentação, como 2007, 2009 e 2012; evidenciando a variabilidade morfológica no delta. Estas sedimentações indicam a necessidade do porto em realizar atividades de dragado constantemente nesses anos para poder manter o porto operativo e evitar diminuição do calado. De acordo com a *Universidad del Norte e Cormagdalena* (2012), durante o período analisado se apresentaram o seguinte registro dos dragados: $1139 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2006, $984 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2007, $1011 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2008, $518 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2009, $408 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2010 e $490 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2011. De 2006 até 2008 se realizaram obras para aumentar o calado do canal navegável até 12 m. Estas obras incluíram dragagens e a construção de espigões dentro dos primeiros 13 quilômetros (setores 1 e 2). Se observa que o maior volume dragado se concentrou nos anos 2006 e 2008.

Tabela 12. Variações no fundo (m) anual nos setores dentro do delta

Anos	Variação do fundo (m)								Acumulado
	Setor 1	Setor 2	Sctor 3	Setor 4	Setor 5	Setor 6	Setor 7	Setor 8	
2006	-0.38	0.00	-0.87	-0.10	0.42	0.04	-0.03	-0.32	-1.23
2007	0.24	-0.33	-0.25	0.09	0.14	0.03	1.81	0.18	1.93
2008	-0.97	-0.88	-0.68	0.23	-0.39	-0.49	-1.60	-0.20	-4.98
2009	0.90	0.65	0.71	-0.33	0.20	0.61	0.18	-0.66	2.25
2010	-0.77	-0.76	-0.15	0.32	0.00	-0.50	-1.16	0.87	-2.16
2011	-1.47	-2.02	-0.30	-0.79	-0.62	-0.89	-0.42	-0.62	-7.13
2012	1.01	1.28	0.47	-0.54	-0.16	0.55	0.79	0.08	3.49
Acumulado	-1.43	-2.05	-1.08	-1.11	-0.41	-0.63	-0.44	-0.67	

Os resultados obtidos neste trabalho são diferentes com aqueles indicados por Restrepo et al. (2012), quem afirmou que as condições no delta do rio Magdalena permaneceram estáveis durante 2000-2011. Nesse caso, os autores avaliaram quatro áreas dentro do delta: Mouth/Frontal bar, Outlet, Delta Front (I) e Delta Front (II). A zona Outlet apresenta uma região comum com o Setor 1 usado neste estudo. Restrepo et al. (2012) mostraram a análise do setor Outlet em dois períodos: comparando batimetrias de junho 2000 com maio 2004 para o primer período e batimetrias de maio 2004 com julho 2011 para o segundo período. O primer período apresentou tendência à erosão com um volume igual a $2,16 \times 10^6 \text{ m}^3$, e um volume de sedimentação igual a $1,89 \times 10^6 \text{ m}^3$, com diferença de $-0,28 \times 10^6 \text{ m}^3$. Para o segundo período se apresentou tendência à sedimentação com um volume igual a $4,15 \times 10^6 \text{ m}^3$, e um volume de erosão igual a

$1,67 \times 10^6 \text{ m}^3$, com a diferença de $+2.475 \times 10^6 \text{ m}^3$. Para este último período, os dados analisados no presente estudo (2006-2012) para o Setor 1 mostraram diferentes condições morfológicas aos obtidos por Restrepo et al. (2012) com um volume final igual a -419340 m^3 .

Os setores com maior tendência de erosão foram 1, 2, 3 e 4, com erosões acumuladas superiores ao 1 m. Este valor é relativamente alto em comparação aos setores 5, 6, 7, e 8 que apresentaram erosões acumuladas menores ao 0,7 m. A Figura 22 apresenta a evolução no fundo do delta para cada setor e os valores acumulados por ano, com as maiores e menores vazões de cada ano. Os resultados mostraram que a maioria dos setores apresentaram máximos valores de erosão nos anos 2006, 2008, 2010 e 2011. Os anos que apresentaram maiores valores de sedimentação correspondem a 2007, 2009 e 2012. Os valores de sedimentação observados não atingiram 1m em todos os setores, com exceção do Setor 7, que apresentou 1,8 m em 2007. Por outro lado, as erosões foram menores ao valor de 1 m para todos os setores, com exceção do Sector 1 (-1,5 m), Sector 2 (2 m) em 2011 e Sector 7 (-1,5 m) em 2008. Para os anos 2006 e 2009-2010, se apresentou a ocorrência do El Niño e para os anos 2007, 2008 e 2010-2012 a ocorrência de La Niña. Os resultados mostraram que para a escala interanual, o máximo valor anual de erosão se apresentou durante a fase La Niña e o valor máximo anual de sedimentação se apresentou durante a fase El Niño.

No estúdio realizado por Restrepo e Kjerfve (2000) se analisaram dados de vazão e carga de sedimento no rio Magdalena durante 1975-1995, encontrando que a carga total de sedimento está correlacionada com o ciclo do ENSO, indicando que as variações no SOI explicariam o 54% da variabilidade da carga de sedimento. Nesse estudo é mostrado que a carga de sedimento apresenta aumento durante La Niña com um pico de $1600 \times 10^3 \text{ Tdia}^{-1}$ e diminuição durante El Niño. A carga média diária de carga de sedimento é 511 Tdia^{-1} e 256 Tdia^{-1} durante La Niña e El Niño, respectivamente. Comparando o resultado obtido por Restrepo e Kjerfve. (2000) com as taxas de erosão/sedimentação encontradas neste estudo, se observa um comportamento característico no delta do rio Magdalena, onde se apresenta uma tendência à erosão durante altas cargas de sedimento acompanhadas de alta vazão e tendência à sedimentação durante baixas cargas de sedimento acompanhadas de baixa vazão.

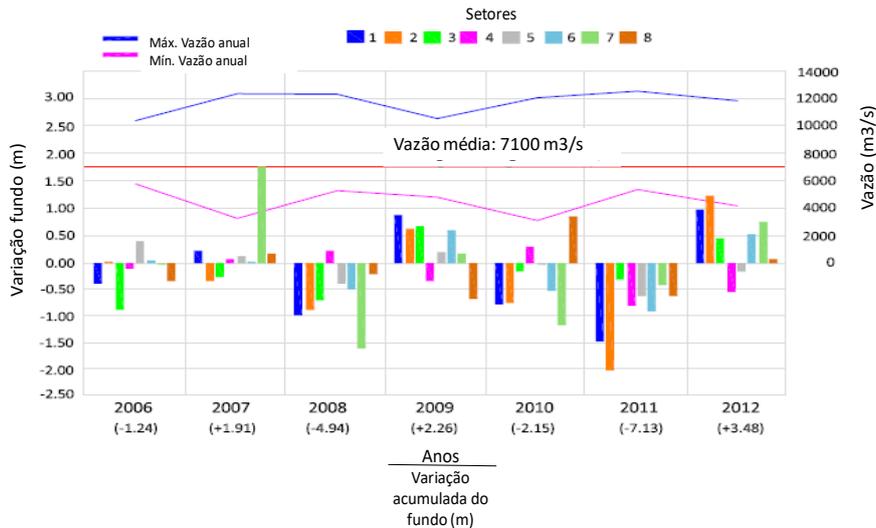


Figura 22. Variação do fundo por cada sector durante 2006-2012 com as máximas e mínimas vazões anuais

2.5.3 Variabilidade morfológica do fundo em escala intra anual

Para a escala intra anual foi analisada a influência dos quatro picos de amplitude observados nos hidrogramas de níveis sobre a morfológica do fundo. O ano foi dividido em três períodos: o primeiro período entre janeiro até abril, onde se apresenta do Pico 1, o segundo período entre maio até agosto, onde se apresenta os Picos 2 e 3, e o terceiro período entre setembro até dezembro, onde apresenta o Pico 4. Com as variações do fundo obtidas a partir das diferenças de volumes entre meses adjacentes (que posteriormente foram convertidas em metros ao se dividir pela área do setor), se elaborou uma curva de duração para cada período do ano usando as variações do fundo. A curva de duração (Figura 23) mostra as frequências acumuladas das variações do fundo e indica a porcentagem do tempo em que cada variação do fundo foi igualada ou excedida. Para o período janeiro-abril se observa que o 68% do tempo a variabilidade do fundo apresenta valores positivos e o 15% do tempo apresenta variabilidades acima de 0,5m. Para o período maio-agosto se observa que o 56% de tempo as variabilidades apresentam valores positivos e 17% do tempo maiores que 0,5 m. No período entre setembro-dezembro se observa que o 26% do tempo as variabilidades apresentam valores positivos e 2% do tempo maiores que 0,5 m. As curvas de duração realizadas para cada período indicaram que para a ocorrência do Pico 1 se encontraram maiores taxas de sedimentação em relação

ao restante do ano, com valores acima de 1,5 m. Para o Pico 4 se apresentaram maiores taxas de erosão com relação ao resto do ano e menores taxas de sedimentação, atingindo como máximo 0,5 m. Durante o período maio-agosto as taxas de sedimentação e erosão mostram relativo equilíbrio, com 56% do tempo com variabilidades positivas.

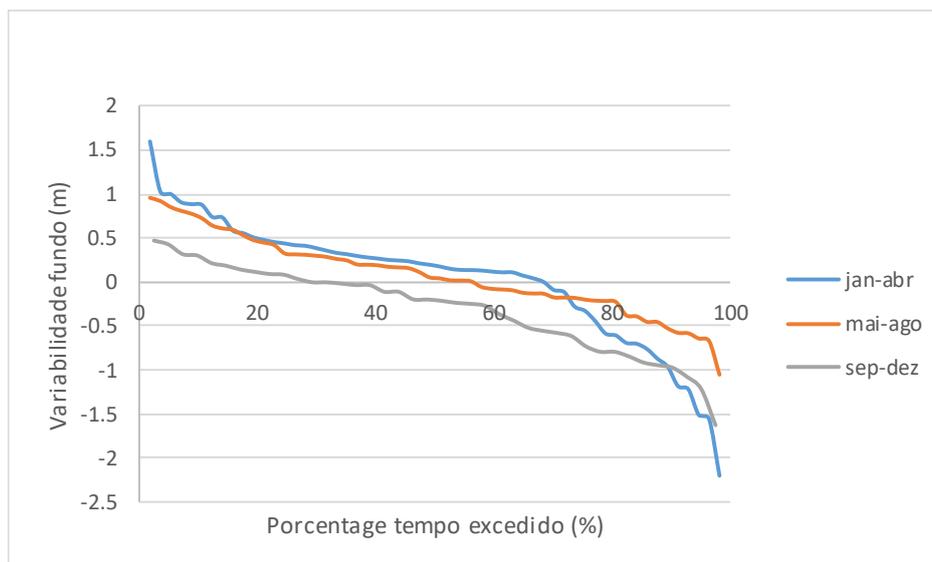


Figura 23. Curva de duração da variabilidade do fundo em escala intra anual. As variabilidades do fundo em unidade de metros obtidas a partir das diferenças de volumem indicam erosão em caso de apresentar valores negativos e indicam sedimentações em caso de apresentar valores positivos.

2.5.4 Influência das dragagens

Durante o período 2006-2012 foram realizadas dragagens no canal navegável para aumentar o calado do rio até uma profundidade de 12 m. Os registros dos volumes totais dragados obtidos pela Universidade del Norte e Cormagdalena (2012) correspondem aos seguintes valores: $1139 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2006, $984 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2007, $1011 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2008, $518 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2009, $408 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2010 e $490 \times 10^3 \text{ m}^3$ em 2011. As informações dos volumes dragados se apresentam como quantidades totais anuais e para tudo o canal navegável, sem diferenciar os períodos do ano e os setores dentro do canal navegável em que se realizaram as dragagens. Para os anos de 2006, 2007 e 2008, os volumes foram próximos de $1000 \times 10^3 \text{ m}^3$ com uma média de $1044 \times 10^3 \text{ m}^3$ e para os anos de 2008, 2009 e 2010, os volumes foram próximos aos $500 \times 10^3 \text{ m}^3$, com uma média de $472 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Para comparar os volumes dragados com os volumes mensais obtidos das batimetrias (Tabela 12), se converteram as unidades dos volumes dragados (m^3) para unidade de metros (m), dividindo estes volumes anuais pela área total do canal de acesso, assumindo que o canal foi totalmente dragado. Para calcular a área do canal de acesso foi utilizada a largura mínima do canal navegável, a qual equivale a 150 m, e seu comprimento desde sua foz até o porto de Barranquilla, igual a 22 km, obtendo uma área de $3,3 \text{ km}^2$. Assim, para o período 2006-2008, usando a média do volume dragado desse período ($1044 \times 10^3 \text{ m}^3$) a quantidade dragada anual em metros no canal de acesso corresponde a 0,32 m e para o período de 2009-2011, usando a média do volume dragado desse período ($472 \times 10^3 \text{ m}^3$) a quantidade dragada em metros seria de 0,14 m.

Comparando os valores equivalentes das dragagens em metros com os valores das variações do fundo em metros obtidas das batimetrias em escala anual (Tabela 12 e Figura 22), se observa que nos anos com maior erosão (2008, 2010 e 2011), as quantidades dragadas são inferiores às quantidades totais erodidas para cada setor (da ordem de 43% em 2008, 21% em 2010 e 16% em 2011), mostrando o pouco efeito que tem o volume dragado na magnitude sobre o volume total erodido. Por outra parte, nos anos de 2006 e 2007, as erosões totais por setor são equivalentes aos valores das dragagens (representando 94%), mostrando que as taxas erosivas totais calculadas puderam estar marcadas pelo efeito das dragagens, além da baixa tendência da erosão por causa da baixa vazão. Embora isso, se observou que as tendências de erosão e sedimentação a escala interanual se mantiveram condicionadas às variações das magnitudes da vazão e não às dragagens, como se observa em anos com El Niño e que apresentaram altos volumes de dragagens (2006) e baixa taxa de erosão em comparação com anos com volumes de dragagens similares (2008), mas com presença de La Niña onde se obtiveram maiores taxas de erosão.

As margens dos primeiros 22 km no delta se encontram protegidas contra a erosão pelos terminais portuários e obras hidráulicas, por tanto a maior parte da erosão causada no canal devido às variações da vazão se concentram principalmente no seu fundo, de forma similar aos efeitos das dragagens. Outros estudos que analisaram o efeito das dragagens sobre os processos de sedimentação em estuários (Monge-Ganuzas et al, 2013; Van Rijn, 2005), mostraram que ao incrementar-se a profundidade no fundo pelas dragagens, se faz aumentar igualmente a tendência de sedimentação no longo prazo, devido principalmente pelas baixas velocidades após a obra. Das taxas de

sedimentação/erosão calculadas para o ano 2012 pode-se observar este efeito de sedimentação após um período de excessiva erosão, dado que nesse ano foi precedido por dois anos que apresentaram de forma prolongada tanto dragagens ($449 \times 10^3 \text{ m}^3$ em volume médio dragado 2010-2011) como altas vazões que induziram erosão, provocando um aprofundamento excessivo e explicando as altas taxas de sedimentação encontradas no ano 2012.

2.6 CONCLUSÕES

Este capítulo avaliou as condições hidrodinâmicas e morfológicas no delta e a planície de inundação do rio Magdalena em escala diária, intra anual e interanual. Baseado numa prova de independência chi-quadrada e um sistema linear invariante no tempo (LTI) se avaliou o efeito do fenômeno ENSO sobre os níveis do rio na estação Calamar. Os resultados mostraram que os mínimos níveis presentes no rio durante janeiro até abril são altamente influenciados pelo ENSO, apresentando-se níveis mínimos na fase El Niño, altos níveis na fase La Niña, e níveis médios durante anos neutros.

Uma análise de coerência Wavelet foi realizada usando a resposta ao impulso calculada do sistema LTI, a qual determina a variação na amplitude dos níveis medidos em relação ao hidrograma do percentil 50, com a série SOI diária entre 1993-2017. O resultado mostrou correlação significativa nos períodos de alta variabilidade da amplitude dos níveis com os eventos ENSO acontecidos no período analisado. Complementando a análise dos níveis, se comparou a anomalia da vazão mensal dentro do delta com a série SOI, a qual mostrou que as maiores anomalias se apresentaram durante os eventos ENSO, com anomalias positivas durante La Niña e anomalias negativas durante El Niño.

A análise morfológica foi realizada baseando-se em informação obtida de 494 batimetrias mensais realizadas dentro do delta durante 2006 e 2012, entre os quilômetros 5 e 22. Foram definidos oito setores dentro do delta, avaliando a variação morfológica de fundo. As provas ANOVA realizadas para determinar a condição de estabilidade morfológica do fundo, para cada setor analisado no canal mostraram condições de instabilidade durante o período analisado, com uma tendência à erosão em todos os setores. Os períodos que apresentaram sedimentação significativa correspondem aos anos

de 2007, 2009 e 2012 e os períodos com condições de erosão corresponderam aos de 2006, 2008, 2010 e 2011.

Se observou que os anos que apresentaram maiores processos de sedimentação aconteceram durante anos com presença da fase El Niño ou períodos de anomalias negativas da vazão. Os anos que apresentaram maiores erosões aconteceram durante anos com La Niña ou períodos com anomalias positivas da vazão. Se avaliou a influência dos picos de amplitude presentes no hidrograma de níveis sobre a morfologia do delta, observando-se que durante o período em que acontece o Pico 1 (baixas vazões), entre janeiro-abril, se apresentam as maiores taxas de sedimentação do ano. Durante o período em que acontece o Pico 4 (altas vazões), entre setembro-dezembro, se apresentam as maiores taxas de erosão. Para o período entre maio-agosto, em acontecem os Picos 2 e 3 (vazões médias), as taxas de erosão e sedimentação são aproximadamente iguais. Durante os anos 2017 até 2020 o calado do canal navegável dentro do delta foi reduzido de 12m para 9m. Esta redução no delta foi precedida de um evento El Niño de magnitude forte, acontecido durante 2015-2016, que de acordo aos resultados obtidos neste estudo, pode ter aumentado as taxas de sedimentação no delta e diminuindo seu calado. Comparando os volumes dragados no período analisado com as mudanças no fundo obtidas das batimetrias para os oito setores, se observou que as tendências dos anos com alta sedimentação não foram alteradas pelas dragagens, onde prevaleceram as condições morfológicas impostas pela baixa vazão para a sedimentação. Por outra parte, nos anos com alta erosão se encontrou que a as quantidades dragadas foram muito menores comparadas ao total dos volumes erodidos, mostrando a relevância das altas vazões sobre a morfologia acima de possível interferência dos volumes de dragagens nos cálculos realizados neste estudo.

3 CAPÍTULO 2

Neste capítulo se configurou um modelo de transporte de sedimentos com evolução morfológica para o delta do rio Magdalena. Foram simulados diferentes cenários hidrodinâmicos no software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System program), desenvolvido pelo corpo de engenheiros dos Estados Unidos (US Army Corps of Engineers).

3.1 O MODELO HEC-RAS

O software HEC-RAS permite realizar análises unidimensional em condições hidráulicas permanentes, não permanentes, transporte de sedimento e análises de qualidade da água. As análises de transporte de sedimento requerem de um componente geométrico, um componente hidráulico e um componente para o tipo de sedimento.

HEC-RAS permite realizar simulações de transporte de sedimento para fluxo não permanente ou fluxo quase permanente (que permitem maior estabilidade). Para as simulações em escoamento quase permanente (utilizadas neste estudo) se representa um hidrograma contínuo com séries discretas de fluxo permanente, dividindo o tempo em três intervalos de duração: Duração do fluxo, Incremento computacional e Passo de tempo de mistura. O tempo de Duração do fluxo é o maior intervalo de tempo onde se assume que o nível, vazão, temperatura e sedimento permanecem constantes. O tempo de Duração do fluxo é dividido em intervalos de tempo chamados Incremento computacional, em que a hidrodinâmica e a geometria do fundo se atualizam. O tempo do Incremento computacional é dividido em intervalos chamados Passo de tempo de mistura, em que os parâmetros hidráulicos, batimetria e potencial de transporte permanecem constantes e as mudanças são realizadas para os cálculos de erosão e sedimentação (Brunner, 2016),

O software HEC-RAS realiza os cálculos para uma dimensão em condições de fluxo permanente mediante o cálculo dos perfis da lamina d'água desde uma seção transversal para a seguinte seção a montante, através do cálculo da equação da Energia mediante métodos iterativos (Brunner, 2016), (Equação 13):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (13)$$

Onde:

Z_1, Z_2 = Elevação do canal principal

Y_1, Y_2 = Profundidade da lâmina d'água na seção transversal

V_1, V_2 = Velocidade média (vazão total/área total do fluxo)

a_1, a_2 = Coeficiente de velocidade ponderada

g = Aceleração da gravidade

h_e = Perda de energia

A perda de energia (h_e) entre duas seções transversais está composta pelas perdas de atrito e as perdas por contração ou expansão (equação 14):

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (14)$$

Onde:

L = Longitude de trecho (entre as seções consideradas)

\bar{S}_f = Declividade da linha de energia

C = Coeficiente de perda por expansão ou contração

Para o transporte de sedimento, o software realiza a solução da equação de continuidade sedimentológica, denominada a equação Exner (Equação 15):

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (15)$$

Onde:

B = Largura do canal

z_b =Elevação do fundo

λ_p = Porosidade da camada ativa

t =Tempo

x =Distância

Q_s =Carga de transporte de sedimentos

A característica da equação Exner é que o armazenamento do sedimento se localiza no leito numa mistura multi fase com água, requerendo porosidade para traduzir a mudança de massa em mudança de volume. A equação traduz a diferença entre as cargas de entrada e saída em mudanças do leito, erodindo ou depositando (Brunner, 2016).

Para o cálculo da carga ou transporte de sedimento tem que ser utilizadas fórmulas de transporte, determinada a velocidade de queda do material e considerado o tipo de blindagem ou proteção do leito. O potencial de transporte de sedimento é a massa transportável de uma determinada classe de grão em resposta à parâmetros hidráulicos da seção transversal. HEC-RAS calcula o potencial de transporte com uma de várias equações disponíveis no software. As equações de transporte disponíveis em HEC-RAS são: Acker e White (1973), Engelund-Hansen (1967), Laursen-Copeland (1968), Meyer-Peter Müller (1948), Toffaleti (1968), Yang (1973, 1984), Wilcok (2003). A equação de transporte usada neste estudo corresponde a equação de Toffaleti que tem sido usada de forma satisfatória nos rios: Mississippi, Arkansas, Sacramento e Atchafalaya, entre outros. A equação de Toffaleti é uma função de carga total desenvolvida primeiramente para areias seguindo os princípios básicos de transporte por Einstein. A equação de Toffaleti é usualmente aplicada para grandes rios devido que a maior parte dos dados usados para desenvolver a equação foram tomados de grandes sistemas com elevada carga em suspensão (Brunner, 2016). No item 3.2.3. é mostrada uma discussão da sensibilidade do modelo para diferentes equações de transporte, e a justificativa da escolha da fórmula de Toffaleti.

Toffaleti divide a distribuição da carga suspensa em zonas verticais, replicando o movimento de sedimento em 2D. Existe uma zona superior, zona média, zona baixa e zona do leito. O transporte de sedimento é calculado independentemente para cada zona e somada para obter o transporte de sedimento total. A equação de Toffaleti (para um único tamanho de grão) é apresentada a seguir:

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1 + n_v - 0.756z} \quad \text{Zona baixa} \quad (16)$$

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1 + n_v - z} \quad \text{Zona média} \quad (17)$$

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad \text{Zona do leito} \quad (18)$$

$$(19)$$

$$M = 43.2C_L(1 + n_v)VR^{0.756z-n_v}$$

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (20)$$

Onde:

g_{ssL} = Transporte de sedimento suspendido na zona baixa (tons/dia/m)

g_{ssM} = Transporte de sedimento suspendido na zona média (tons/dia/m)

g_{ssU} = Transporte de sedimento suspendido na zona alta (tons/dia/m)

g_{sB} = Transporte de sedimento do leito (tons/dia/m)

g_s = Transporte de sedimento total (tons/dia/m)

M = Parâmetro de concentração do sedimento

C_L = Concentração de sedimento da zona baixa

R =Rádio hidráulico

d_m =Diâmetro mediano de partícula

Z =Expoente que descreve a relação entre sedimento e caraterísticas hidráulicas

n_v =Expoente de temperatura

HEC-RAS apresenta cinco opções para determinar a velocidade de queda: Ruby, Toffaleti, Van Rijn, Reporte 12 e Dietrich. Neste estudo se usou a equação de velocidade de queda de Rubey, devido que tem se mostrado ser adequada para diferentes faixas de

sedimentos, desde silte a areias grossas e cascalhos. A equação de Rubey determina analiticamente a relação entre o fluido, propriedades do sedimento e a lei de Stokes (para partículas finas) ou uma fórmula de impacto (para partículas grandes fora da região de Stokes) (Brunner, 2016), (Equação 21):

$$\omega = F_1 \sqrt{(s-1)gd_s} \quad (21)$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3(s-1)}} \quad (22)$$

Onde:

ω = Velocidade de queda da partícula

v = Viscosidade cinemática

s = Gravidade específica da partícula

d = Diâmetro da partícula

HEC-RAS apresenta três algoritmos para simular a classificação e blindagem do leito: Thomas (Exner 5), Capa ativa e Copeland (Exner 7). Nestes algoritmos se divide o leito numa camada ativa e uma camada inativa, sendo que a camada ativa é a capa superficial que representa ativamente o transporte de material e sua gradação evoluciona independente. O material é movimentado entre a capa superficial e o material principal na capa inativa abaixo desta. Neste estudo se usou o método Thomas (Exner 5) que se usa por default em HEC-RAS em que se divide o leito em três capas de mistura e a divisão da capa se realiza entre uma capa coberta e uma subsuperficial, permitindo uma fina capa para engrossar e regular a erosão. A capacidade de transporte calculada corresponde à gradação da capa total ativa, que inclui as capas combinada de coberta e subsuperficial (Brunner, 2016).

3.2 MODELAGEM DO DELTA EM HEC-RAS

As simulações realizadas contemplaram diferentes cenários hidrodinâmicos correspondentes aos anos com altas vazões (anos com La Niña), anos com baixas vazões (anos com El Niño) e anos neutrais e condições sem maré. Foi considerada uma geometria do canal navegável correspondente às batimetrias de junho de 2011 e a uma geometria em forma de canal idealizada, com uma declividade longitudinal de 0,03%, para observar as condições do rio num cenário onde as profundidades irregulares das seções transversais apresentem menor relevância. Usou-se a mesma caracterização do sedimento para todas as simulações realizadas. Ao final foram realizados comparativos entre os resultados das diferentes simulações para determinar os cenários onde o delta apresentou maior taxa de sedimentação e erosão.

3.2.1 Componente geométrico

Com as batimetrias zonais realizadas dentro do delta durante o mês de junho de 2011 se criou uma superfície TIN (Triangulated Irregular Network) entre o delta desde sua foz até o quilometro 20, transformando os valores de profundidade das batimetrias para cota usando o perfil da água projetado entre os níveis do rio nas datas dos levantamentos batimétricos entre as estações hidrométricas de Casa Pilotos (K1) e Tebsa (K23).

O motivo da seleção desta data atendeu a que durante o período de junho 2011-junho 2012, os dados de vazão estavam disponíveis de forma contínua. Com as batimetrias zonais de junho de 2011, se definiu um perfil longitudinal pelo talvegue do delta, criando seções transversais distanciadas aproximadamente cada 800 metros (Figura 24), começando na seção km-0,181 a jusante e finalizando na seção km-19,9 a montante. O arquivo da geometria gerado (geometria real) com as batimetrias de junho de 2011 se elaborou no software Autocad Civil e logo exportado para o HEC-RAS. A coordenada da abcissa zero do perfil longitudinal é $11^{\circ} 06' 27,1''$ N $74^{\circ} 51' 8,1''$ W.



Figura 24. Localização no delta do rio Magdalena do talvegue e secções transversais usadas em HEC-RAS

Uma segunda geometria (canal idealizado) foi criada usando as mesmas secções transversais da geometria de junho de 2011, com modificação do seu fundo. A cota do fundo de cada seção transversal foi calculada com base na declividade longitudinal média do talvegue, definida em 0,03%. A largura de cada seção transversal original foi mantida. A Figura 25 apresenta os perfis longitudinais pelo talvegue e as seções transversais das abcissas (km): 1,6; 4,6; 7,6; 10,2; 13,3 e 17,9 (figura 26), para ambas as geometrias (real - junho de 2011) e idealizada (canal).

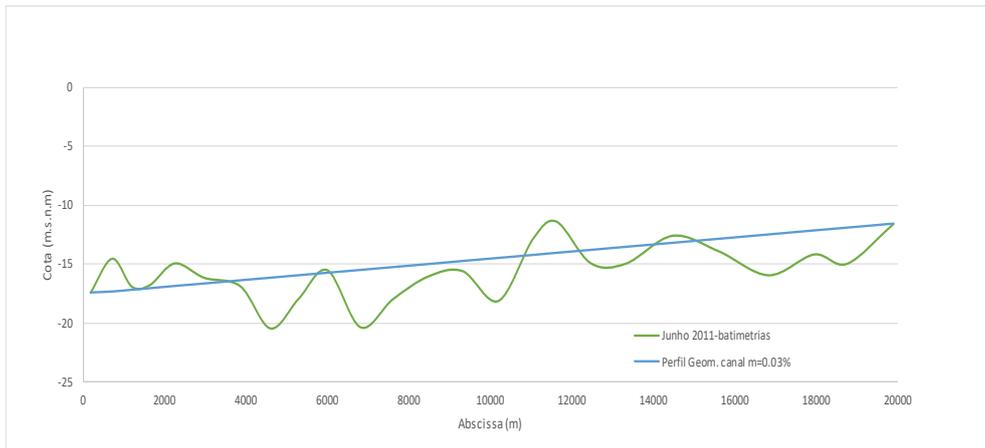
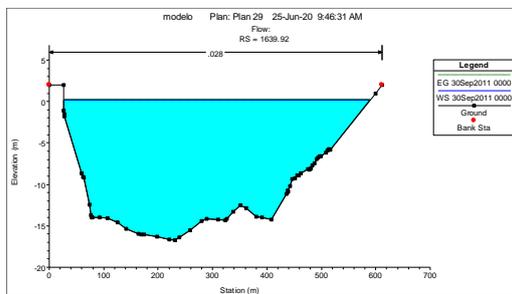
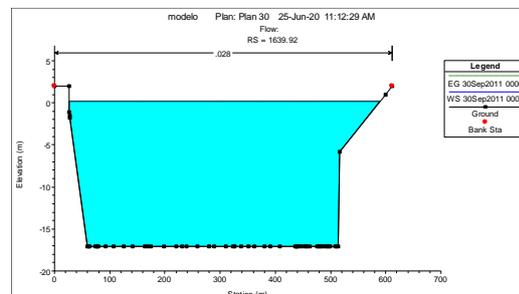


Figura 25. Perfis longitudinais pelo talvegue das geometrias usadas em HEC-RAS- Geometria real (junho 2011) e geometria em forma de canal (idealizada)



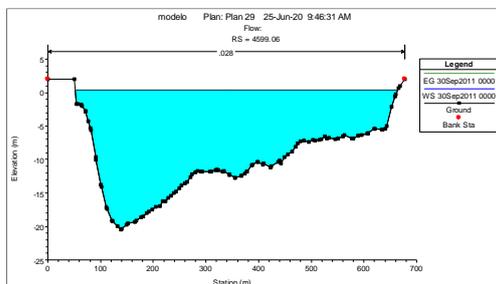
Seção 1639



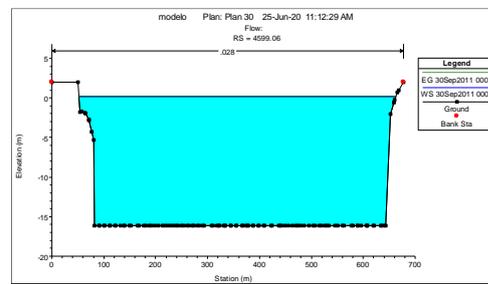
Seção 1639



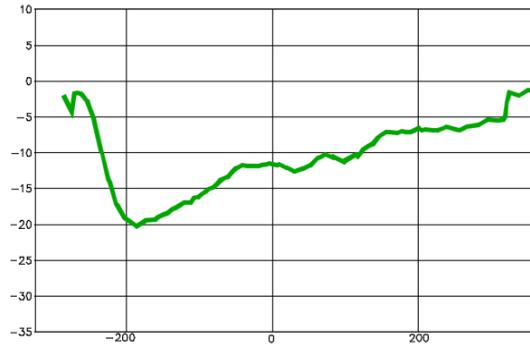
Seção 1639



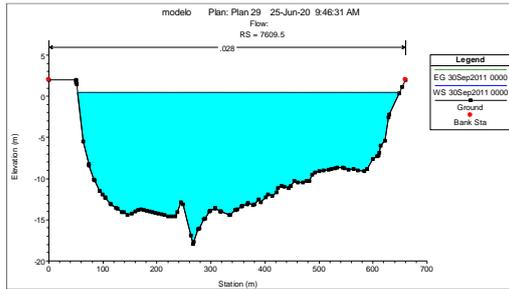
Seção 4599



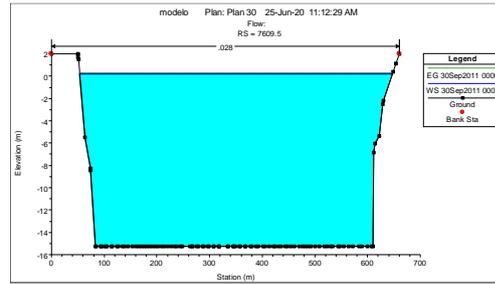
Seção 4599



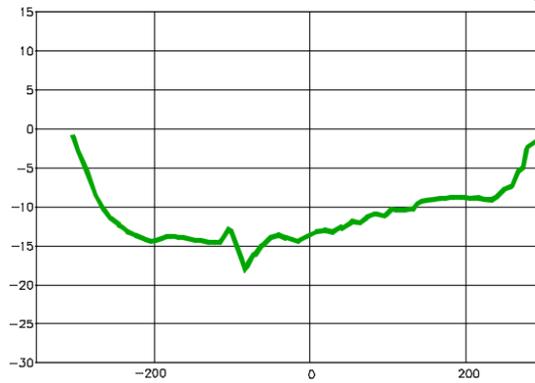
Seção 4599



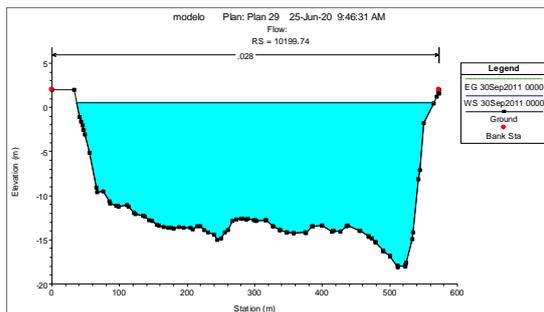
Seção 7609



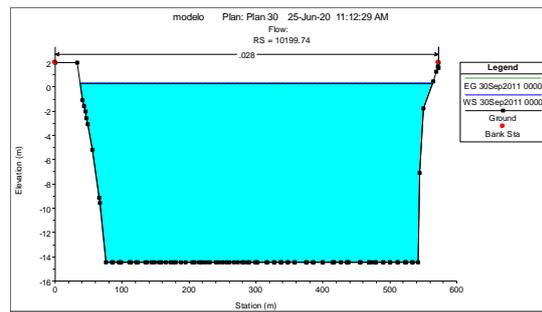
Seção 7609



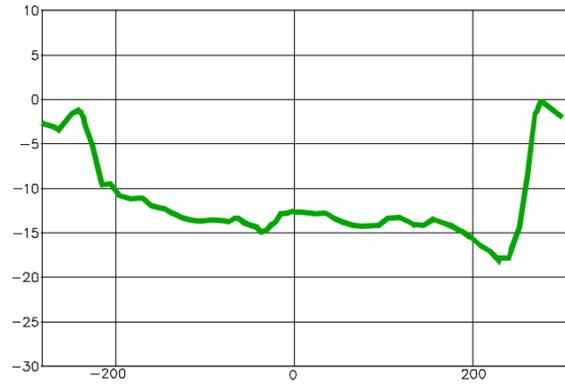
Seção 7609



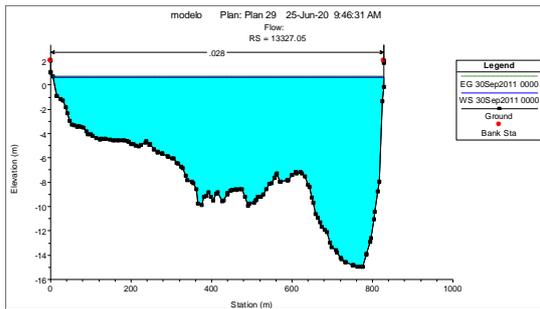
Seção 10199



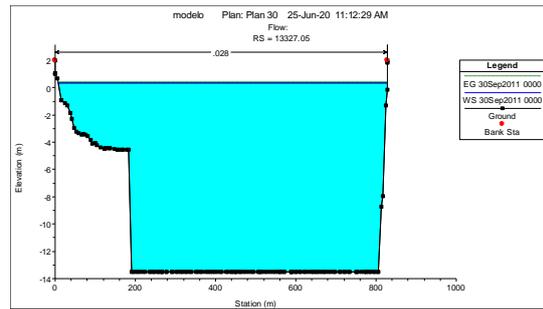
Seção 10199



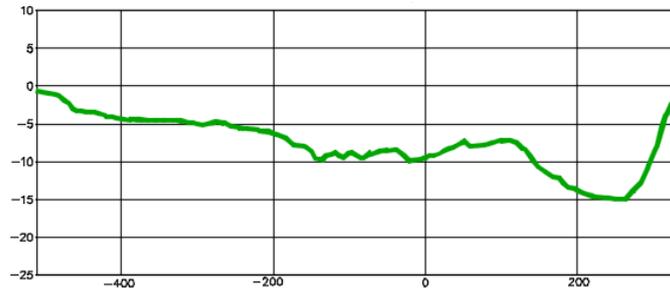
Seção 10199



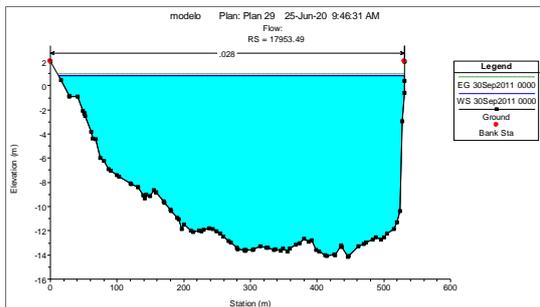
Seção 13327



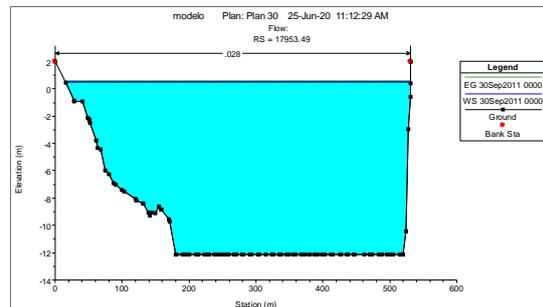
Seção 13327



Seção 13327



Seção 17953



Seção 17953

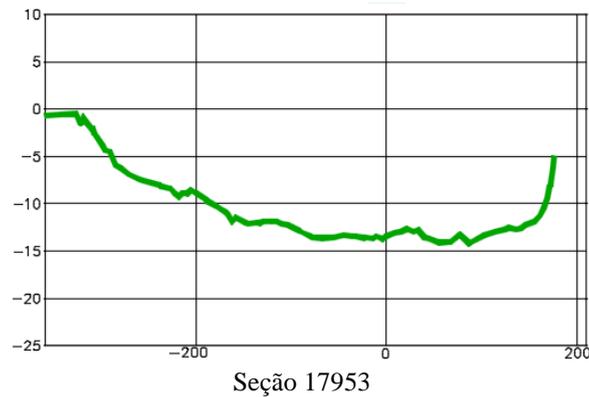


Figura 26. Diferentes secções transversais da geometria real (junho 2011) e secções da geometria idealizada em HEC-RAS

Foram comparadas (Tabela 13) as características das secções transversais para as duas geometrias (real e idealizada) para os parâmetros de: área, largura na boca, profundidade hidráulica e perímetro molhado; usando uma simulação de vazão constante de 7000 m³/s (média histórica) em ambas as geometrias. Os parâmetros que apresentaram maiores diferenças corresponderam à área e a profundidade hidráulica. Por outra parte, os valores que permaneceram próximos entre as duas geometrias corresponderam à largura e ao perímetro molhado.

Tabela 13. Comparativo das secções transversais para a geometria em forma de canal e geometria real

Geometria	Seção	Area (m ²)	Variação percentual das áreas (%)	Largura boca (m)	Profundidade hidráulica (m)	Perímetro molhado (m)
Canal	1639	8363.01	78	562.3	14.87	576.83
Real		6560.83		562.71	11.66	566.81
Canal	4599	9359.58	73	611.31	15.31	630.74
Real		6805.76		612.17	11.12	617.41
Canal	7609	8499.22	82	593.48	14.32	605.49
Real		6982.16		595.14	11.73	599.87
Canal	10199	7195.6	96	527.3	13.65	537.79
Real		6914.7		529.2	13.07	536.79
Canal	13327	9453.78	73	820.76	11.52	830.44
Real		6881.13		822.61	8.37	827.78
Canal	17953	5469.02	108	515.37	10.61	523.01
Real		5888.02		518.9	11.35	526.76

Na figura 27 se mostra a variação das larguras das seções transversais ao longo do delta para ambas as geometrias. A variação é similar em ambas as geometrias dado que se usou esse parâmetro em comum para a construção da geometria do canal. Observa-se uma menor largura nas abscissas km-19,7 e próximo da foz, com valor de 500 metros. As maiores larguras se localizam na abscissa km-15, com um valor maior a 900 metros. A largura média do delta é de 615 metros. Já quanto às profundidades se apresentam diferenças significativas entre as duas geometrias, apresentando-se maiores profundidades nos primeiros 10 km do delta, onde a geometria real apresenta as profundidades de dragagem, em torno de 12 m, em comparação com a geometria de canal que sua maior profundidade foi de 16 m.

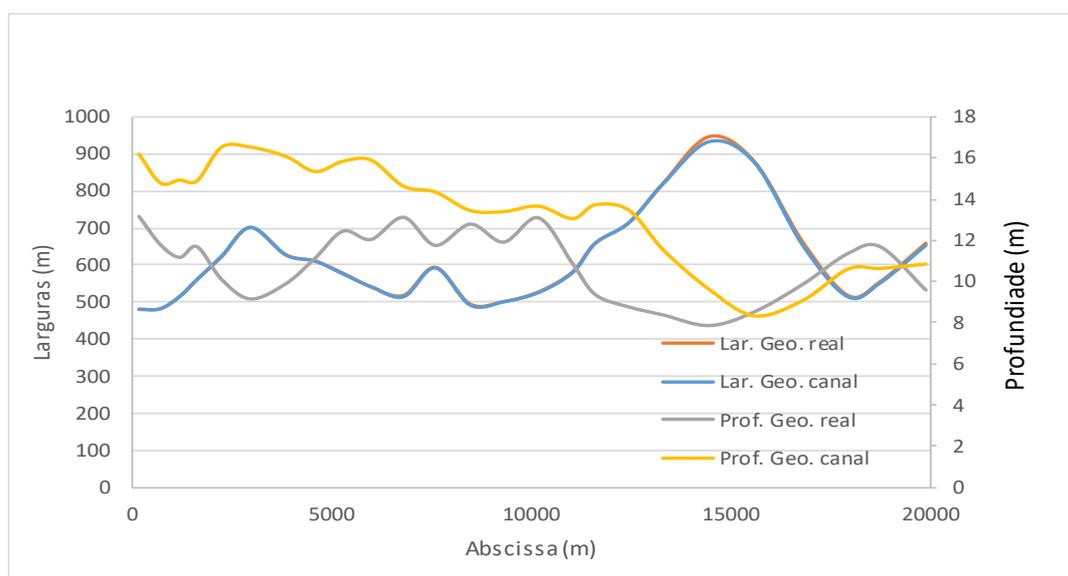


Figura 27. Larguras e profundidades das seções transversais ao longo do delta da geometria real e geometria em forma de canal

3.2.2 Componente hidrodinâmico

Para este estudo se realizaram simulações de transporte de sedimento com fluxo quase permanente, onde o tempo de variação do fluxo inserido no modelo para as simulações foi de 24 horas e o incremento computacional de 6 horas. Esses tempos foram definidos com base nos intervalos em que os dados de vazão (diário) e maré (cada 6 horas) se ingressaram ao modelo. As condições de contorno definidas a jusante de seção km-

0,181 correspondem à previsão de marés do ano 2011 no setor de Puerto Colômbia no Mar Caribe (gerado pelo Instituto de Hidrologia, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM). A série de maré original apresenta dados em intervalos irregulares, por tanto, foi necessário realizar uma discretização em intervalos regulares a cada 6 horas mediante interpolação. A condição de contorno a jusante (figura 28) foi a mesma para todas as simulações realizadas, com exceção da simulação que representa condição de mínima maré, em que se usou uma série de maré correspondente à componente M2 (Lunar principal semidiurna), com amplitude e 0,059 m e fase de 347,5 graus (figura 29). Os valores da constante harmônica usada foram calculados para a baía de Cartagena (zona próxima da foz do rio) e obtido de acordo a Lozano (1993).

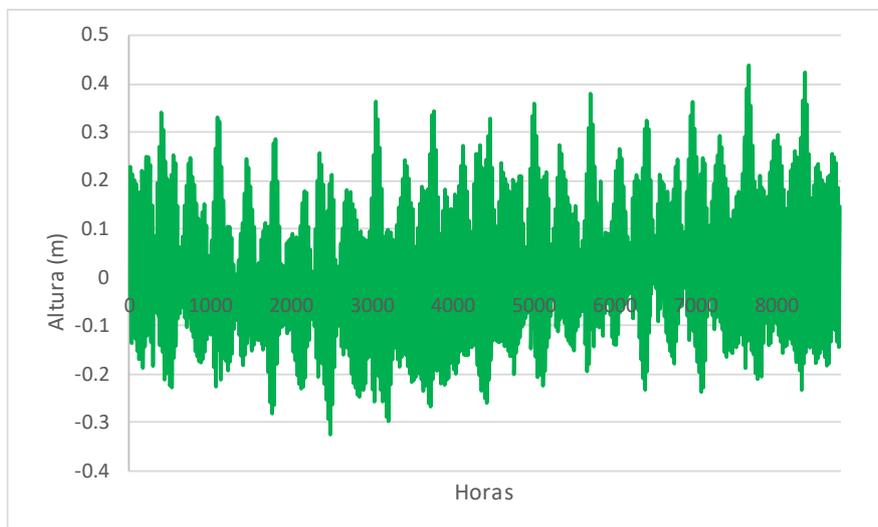


Figura 28. Série anual da previsão de maré obtida do IDEAM para o ano 2011 com intervalos cada 6 horas- Mar Caribe, setor Puerto Colômbia

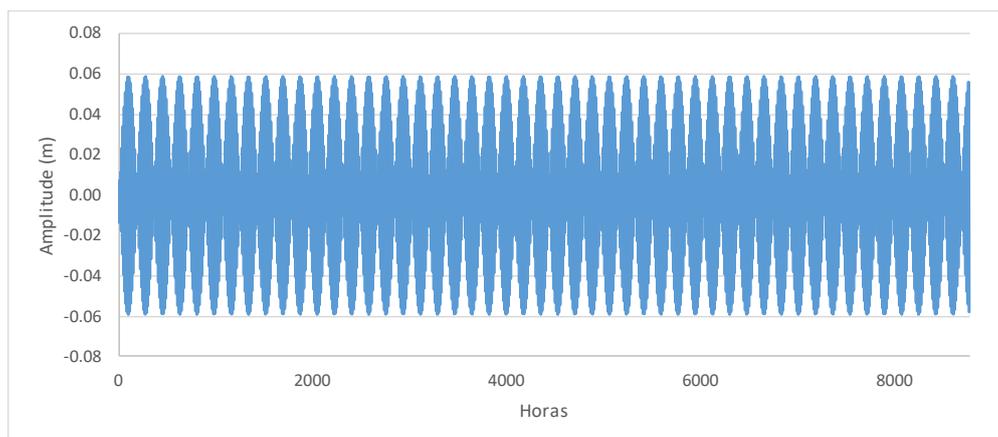


Figura 29. Série de maré da componente M2 para a baía de Cartagena

Se correlacionaram as vazões medidas com ADCP durante 2006-2012 com os níveis do rio na estação Tebsa, localizada dentro do delta 23 quilômetros à montante, nas datas em que se fizeram as medições. Correlacionadas à vazão e o nível do rio da estação Tebsa se gerou uma curva chave (Figura 30) para determinar a vazão em função dos níveis do rio (série disponível para 2011). A condição de contorno a montante se definiu para a seção km-19,9 do perfil em HEC-RAS com os hidrogramas de vazão requeridos em cada simulação.

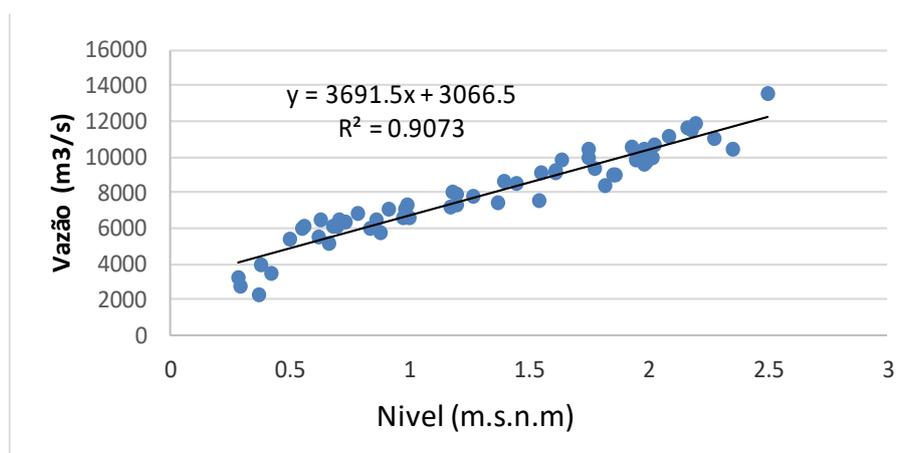


Figura 30. Curva chave (Vazão medida no delta do rio Magdalena VS níveis do rio) na estação Tebsa

Os cenários hidrodinâmicos simulados foram os seguintes (Figura 31):

- (1) O período entre 30 de setembro 2015- 1 junho de 2016, representativo de um ano com baixas vazões onde se teve a presença de El Niño.
- (2) O período entre 30 setembro 2011-1 junho 2012, representativo de um ano com altas vazões onde se teve a presença de La Niña.
- (3) Um hidrograma anual correspondente ao percentil 50, representativo de um ano neutral.
- (4) Um ano com vazão constante igual à vazão média histórica (7000 m³/s).

A Figura 31 apresenta as considerações hidrodinâmicas feitas para cada cenário. Se destaca uma marcada influência da maré sobre os níveis durante o período de baixas vazões (fevereiro-abril) na curva de nível do ano 2015-2016 (baixas vazões).



Figura 31. Hidrogramas utilizados para as condições de contorno hidrodinâmicas

3.2.3 Componente da caracterização do sedimento

Na componente da caracterização do sedimento foi necessário definir a curva granulométrica do material transportado, a função de transporte, a equação da velocidade de queda e o método da blindagem do leito. A curva granulométrica usada neste estudo foi extraída de uma campanha de medição de sedimentos coletada na abscissa km-8 do canal do delta do rio Magdalena pela Universidade del Norte e Cormagdalena em janeiro de 2006, com uma vazão de 9700 m³/s. A distribuição do material (Figura 32) se encontra entre 0,05 mm e 0,5 mm, clasificando-se como areia muito fina até areia grossa. O 50 % do material se encontra na abertura da peneira 0,25 mm, correspondente a uma areia fina.

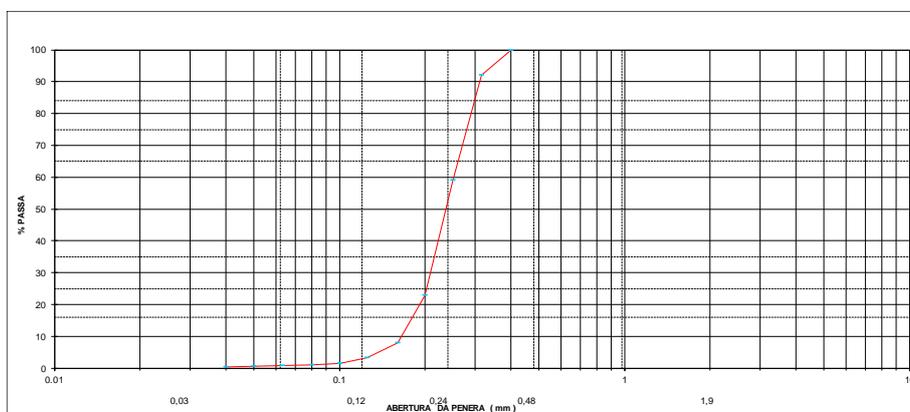


Figura 32. Curva granulométrica de uma amostra de sedimento tomada no delta do rio Magdalena (km-8)

Se analisaram diferentes funções de transporte para testar a sensibilidade do modelo com a geometria de junho de 2011 e o hidrograma de vazões médias. Os resultados de massa acumulada longitudinal no final de cada simulação anual de acordo a cada função de transporte usada foram: Engelund-Hansen ($-9,9 \times 10^6$ ton/ano), Acker e White ($-7,9 \times 10^6$ ton/ano), Laursen-Copeland ($-1,7 \times 10^6$ ton/ano), Toffaleti ($-2,3 \times 10^6$ ton/ano), Yang ($1,82 \times 10^6$ ton/ano), Wilcok ($-1,12 \times 10^6$ ton/ano) e Meyer-Peter Muller ($-1,12 \times 10^6$ ton/ano). Todas as funções apresentaram tendência à erosão no delta com exceção da equação de Yang. Por outra parte, as equações de Ackers e White e Engelund-Hansen, surgidas com base em dados de canais de laboratório e para gradações uniformes de tamanho (Brunner, 2016), apresentaram os maiores valores de erosão. A equação de Meyer-Peter Muller, aplicada para o transporte de sedimentos mais grossos, foi a que apresentou menores valores de erosão. A média de todos os resultados das fórmulas consideradas foi de $-3,17 \times 10^6$ ton/ano e considerando uma variação de $\pm 50\%$ pode ser definido um intervalo de $-4,76$ a $-1,59 \times 10^6$ ton/ano. Os resultados da equação de Toffaleti, escolhida para o presente estudo, ficaram dentro desta faixa, pelo que se considerou que poderia representar de forma adequada o transporte na região.

Quanto à equação de velocidade de queda, foi utilizada a equação de Rubey, devido a que tem se mostrado adequada para diferentes tipos de sedimento, incluindo areias finas. Para a equação de blindagem do leito foi usado o método Thomas (Exner 5), estabelecida como default no HEC-RAS. A condição de contorno definida para o transporte do sedimento se encontra explicada na calibração morfológica.

3.3 CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA

3.3.1 Calibração e validação dos níveis

A calibração hidrodinâmica do modelo foi elaborada para encontrar o melhor ajuste entre a curva de níveis simulada (imposta pelo hidrograma de vazões) com o hidrograma de níveis observado. Foi utilizado o período entre 1 junho de 2011 até 1 de junho de 2012 para o processo de calibração. A calibração foi baseada no ajuste do coeficiente n de Manning para todas as secções transversais da geometria em HEC-RAS. Os n de Manning simulados foram: 0,027; 0,028 e 0,029. A comparação dos hidrogramas

simulado e medido se realizou mediante o cálculo do coeficiente de determinação (r^2) entre os dois hidrogramas.

O coeficiente de é a proporção da variação nos valores observados da variável resposta explicada mediante a regressão. O coeficiente de determinação apresenta valores entre 0 e 1.

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (20)$$

$$SSE = \sum (y - \hat{y})^2 \quad (21)$$

$$SST = \sum (y - \bar{y})^2 \quad (22)$$

Onde:

SSE=Soma quadrática do erro

SST=Soma total dos quadrados

y =Valor observado

\bar{y} =Média dos valores observados

\hat{y} =Valor calculado/simulado

Os valores do coeficiente obtidos entre os níveis medidos (observados) e os níveis calculados, para cada simulação com n de Manning diferente se apresentam na tabela 14. Vale ressaltar que nas simulações foi utilizado o mesmo valor de n para todas as seções. O valor n de Manning que apresentou coeficiente de determinação mais próximo de 1 correspondeu ao n de 0,028 com um coeficiente de determinação de 0,965. A comparação dos hidrogramas (simulado e medido) para o n de 0,028 é mostrado na figura 33.

Tabela 14. Valores n de Manning usado nas simulações de calibração e seu coeficiente de determinação

n	r^2
0.027	0.932
0.028	0.965
0.029	0.956

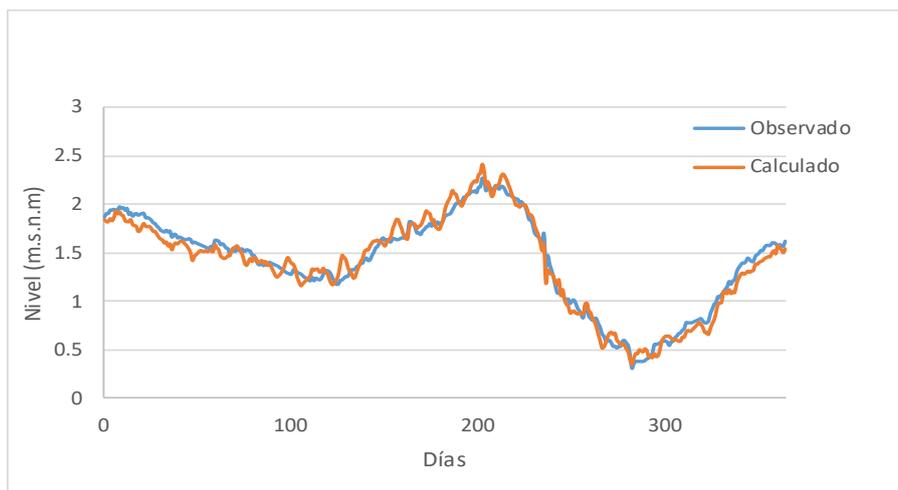


Figura 33. Calibração de níveis do modelo HEC-RAS – período junho 2011-junho 2012, para a abscissa km-19,9

A validação do modelo hidrodinâmico se realizou comparando os hidrogramas (observado e simulado) para um período diferente da calibração. Foi utilizado o período entre 1 junho de 2006 até 1 junho de 2007 e a comparação foi realizada entre o hidrograma de níveis observado na abscissa km-19,9 (Figura 34). Dado que a calibração do modelo se realizou com um hidrograma que apresentou magnitude de níveis altos (vazão média $8900 \text{ m}^3/\text{s}$), se decidiu validar o modelo com um hidrograma que tivera magnitudes de nível menores (vazão média $7600 \text{ m}^3/\text{s}$) ao hidrograma da calibração, e assim, observar a resposta do modelo em diferentes cenários hidrodinâmicos. O coeficiente de determinação obtido para o hidrograma de validação entre junho 2006- junho 2007 foi de 0,954, garantindo uma adequada validação do modelo.

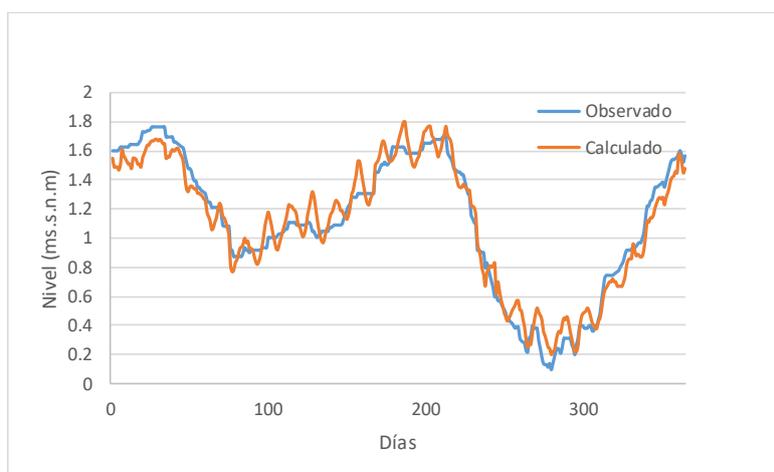
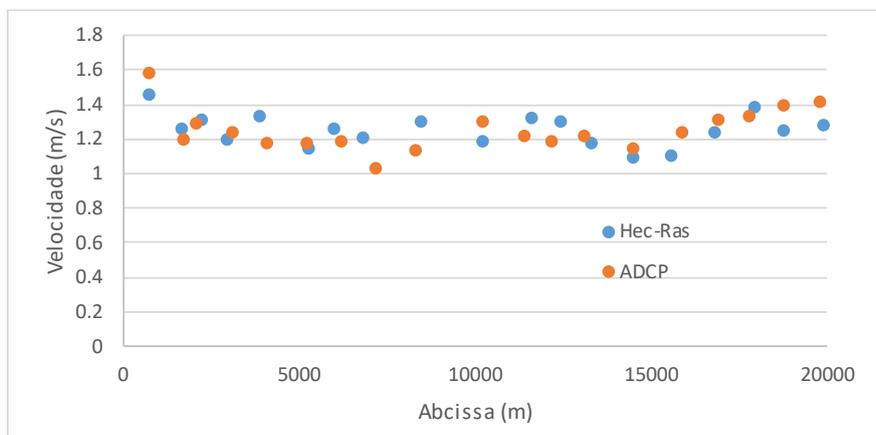


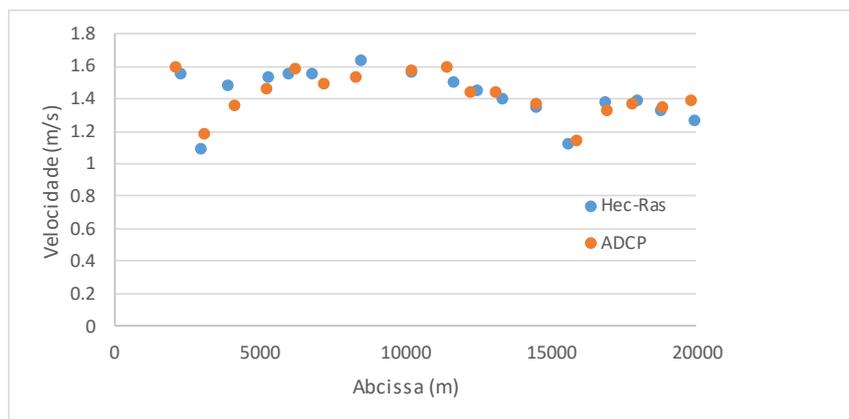
Figura 34. Validação de níveis no modelo HEC-RAS – período junho 2006-junho 2007, para a abscissa km-19,9

3.3.2 Validação da velocidade

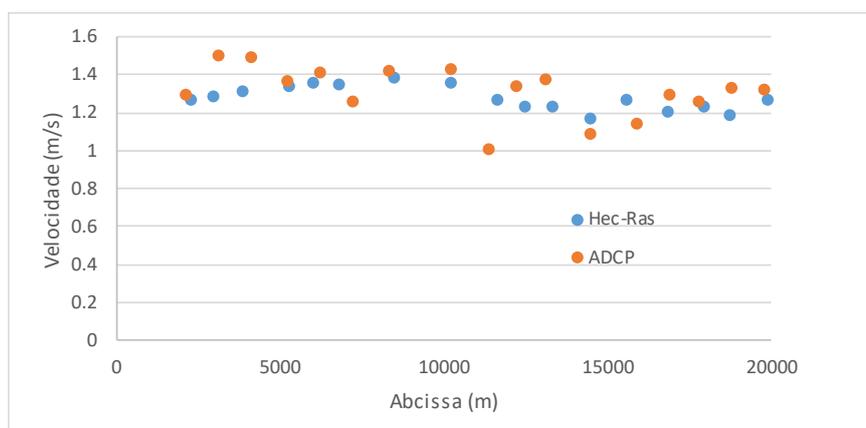
Se compararam para cada seção transversal as velocidades simuladas e as velocidades médias na seção obtidas pelas medições de vazão com ADCP. As simulações consideraram um n de Manning de 0,028 (obtida da calibração de níveis) e as velocidades do modelo se obtiveram do resultado da simulação para o período de 1 de junho de 2011 até 1 de junho de 2012. Os meses selecionados para o comparativo das velocidades foram: setembro de 2011 ($Q=8500 \text{ m}^3/\text{s}$), janeiro de 2012 ($Q=13600 \text{ m}^3/\text{s}$) e maio de 2012 ($Q=5600 \text{ m}^3/\text{s}$), abrangendo diferentes condições hidrodinâmicas. O comparativo das velocidades (figura 35) mostra que existe similaridade na sua magnitude em todas as seções transversais para os três meses analisados, apresentando-se a máxima diferença para o mês de maio de 2012 com um valor de 0,26 m/s (79 %). Os coeficientes de correlação Pearson entre as velocidades medidas com ADCP e as velocidades obtidas pelo modelo foram: 0,5, 0,9 e 0,5 para os meses de setembro, janeiro e maio, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 35. Comparativo das velocidades simuladas (HEC-RAS) com as medidas (ADCP), para: (a) setembro 2011, (b) janeiro 2012, (c) maio 2012

As maiores velocidades medidas durante os meses de setembro 2011, janeiro 2012 e maio 2012 foram 1,58 m/s, 1,6 m/s e 1,5 m/s, respetivamente. As maiores velocidades geradas pelo modelo para os meses de setembro de 2011, janeiro de 2012 e maio de 2012 foram de 1,46 m/s, 1,64 m/s e 1,39 m/s, respetivamente. As mínimas velocidades simuladas foram de 1,09 m/s no mês de setembro de 2011 e janeiro de 2012 e a mínima velocidade medida foi de 1,01 m/s no mês de maio de 2012.

A distribuição espacial de velocidades mostra que para o mês de setembro de 2011, as maiores magnitudes se apresentaram na abcissa km-0,715, tanto no modelo como no ADCP com um valor de 1,46 m/s e 1,58 m/s, respetivamente. As menores velocidades se apresentaram na abcissa km-14,5 com 1,09 m/s (no modelo) e na abcissa km-7,2 com 1,03 m/s (medida). Para o mês de janeiro de 2012 a maior velocidade no modelo se apresentou na abcissa km-2,25 com 1,56 m/s e na abcissa km-2,1 com

velocidade medida de 1,6 m/s. As menores velocidades do modelo se apresentaram na abcissa km-2,975 e na abcissa km-15,9 com 1,14 m/s nas observações. Para o mês de maio de 2012 a maior velocidade no modelo se apresentou na abcissa km-8,48 com 1,39 m/s e nas medidas foi na abcissa km-11,4 com 1,01 m/s.

As menores velocidades dentro do delta durante os três meses analisados se localizaram sobre a abcissa km-15 e a abcissa km-3, devido a que nessas abcissas a largura no delta é maior com relação à largura média (Figura 27).

3.4 CALIBRAÇÃO MORFOLÓGICA

A calibração morfológica do modelo de transporte de sedimento em HEC-RAS se realizou mediante a comparação de três talwegues obtidos para diferentes batimetrias: os talwegues de junho 2011 e de junho de 2012 (ambos calculados com base nos levantamentos batimétricos dos respectivos meses) e o talvegue de junho de 2012 (obtido da geometria final resultante da simulação de transporte de sedimento realizado com a batimetria de junho de 2011 como geometria inicial). A calibração morfológica em HEC-RAS se realizou mediante o ajuste da condição de contorno para o sedimento na seção a montante. O software dispõe de três opções para essa condição de contorno: carga de equilíbrio, curva de classificação e série temporal do sedimento. A opção de curva de classificação, utilizada neste trabalho, calcula a carga de sedimento ingressada ao modelo com base em diferentes combinações de vazões líquidas (m^3/s) e sua respectiva carga total de sedimento (ton/dia). Adicionalmente se deve incluir uma gradação do sedimento em forma de incremento percentuais para cada combinação de vazões líquidas e sólidas.

O transporte total de sedimento no rio Magdalena se divide em transporte em suspensão e transporte de arrasto. O transporte em suspensão se divide a sua vez em areias e carga de lavado, composto de silte e argilas com diâmetros menores a 63 micrometros. No delta do rio Magdalena, o transporte de arrasto está composto por areias com um diâmetro característico D50 de aproximadamente 225 micrometros (Alvarado et al., 2008). De acordo com Restepo et al. (2016), o rio Magdalena transporta na estação de Calamar uma carga total de sedimentos de 144×10^6 ton/ano. Além disso, medições realizadas pela Universidade del Norte no setor de Pimsa (K38), próximo ao delta, mostraram que para vazões de $5800 m^3/s$ (04-out-2000) e $9200 m^3/s$ (29-jun-2000), a

porcentagem de carga de lavado correspondeu a um 89% e 76% do sedimento em suspensão, respectivamente (Alvarado et al., 2008). A deposição final do sedimento transportado pelo rio chega até uma fossa marinha localizada próxima da foz e também, na formação de barras na foz e em zonas marinhas adjacentes (setor Caño Dulce). De acordo com Higgins et al. (2017) o transporte por arrasto varia entre $8,4 \times 10^6$ ton/ano e $0,75 \times 10^6$ ton/ano na temporada chuvosa e seca respectivamente. Por outra parte, Alvarado (1992, 1998) reportou que o rio transporta um 83% e 17 % como carga de suspensão e carga de arrasto para um transporte total de 180×10^6 ton/ano. Uma vez que não se contam com dados disponíveis de transporte de sedimentos para o período de análise, se utilizou para calibração do modelo em HEC-RAS uma primeira aproximação do valor da carga total de sedimentos de 144×10^6 ton/ano. O perfil resultante da simulação foi muito diferente do perfil gerado pela batimetria de junho de 2012, apresentando um excesso de sedimentação ao longo de todo o delta (Figura 36). Por este motivo o valor de carga de sedimentos usada foi ajustado até atingir uma correspondência entre o perfil final da simulação (junho 2012-10Mton/ano) e o perfil medido (junho 2012-batimetrias).

No caso do Magdalena, uma vez que o material em suspensão transita pelo canal distributivo, seu sedimento seria composto basicamente por carga de lavado que só se deposita na região marítima. No caso foi considerada no modelo o sedimento em suspensão e sedimento de arrasto com a exclusão da carga de lavado, com valores de carga de sedimento usados ligeiramente inferiores as reportados em estudos prévios, mas dentro dos rangos de valor aceitáveis. No caso se usou a hipótese que só a carga de sedimentos majoritariamente por arrasto seria responsável pelo ajuste morfológico do delta.

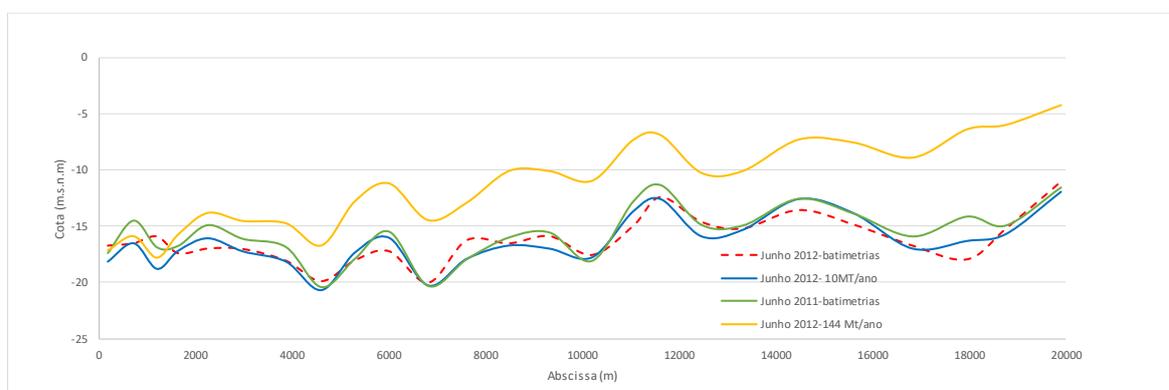


Figura 36. Comparativo do perfil inicial (junho de 2011), o perfil final medido (junho de 2012) e o perfil ao final de um ano de simulação (10×10^6 ton/ano). Também é mostrado o perfil final simulado para a carga de sedimento de 144×10^6 ton/ano, apresentando excesso de sedimentação.

Para definir a condição de contorno na calibração morfológica, a partir do valor de carga de sedimento integrado de 10×10^6 ton/ano, que apresentou o melhor ajuste (Figura 36), se definiram três valores de carga de sedimento para diferentes magnitudes de vazão líquida, correspondente para altas ($12000 \text{ m}^3/\text{s}$), médias ($7000 \text{ m}^3/\text{s}$) e baixas ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$) vazões. Para cada um destes valores da vazão assignados, se definiram valores de carga total (ton/dia), de tal forma que sua integração ao valor de carga anual, seja igual ao valor de carga de sedimento total que apresentou o melhor ajuste entre os talvegues (10×10^6 ton/ano). Na tabela 15 se apresentam os valores de carga de sedimento usados para as diferentes vazões líquidas.

Tabela 15. Condição de contorno para uma carga de sedimento de 10Mton/ano

Vazão (m ³ /s)	Carga total (ton/dia)
2000	10000
7000	20000
12000	40000

A Figura 37 mostra o comparativo das diferenças em profundidades entre os perfis finais de junho de 2012 (simulado e observado), com o perfil inicial, medido em junho de 2011. Se observa uma tendência geral de erosão (diferenças negativas) ao longo do delta durante o período simulado. Embora exista essa tendência de erosão generalizada, o perfil medido apresenta sedimentações em algumas seções que não conseguiram ser representada pela modelagem, abcissas: km-0,181, km-1,19, km-7,6 e km-19,9. As magnitudes das diferenças de erosão e sedimentação entre os dois comparativos apresentam similaridade entre os perfis simulado e observado. A maior erosão registrada se apresentou na abcissa km-18 com um valor próximo de -4m e a máxima sedimentação se apresentou com um valor de 1,5 m na abcissa km-7. O valor total das diferenças, incluindo sedimentações e erosões para cada comparativo, foram de -18,9 m e -14 m, para o perfil simulado e medido (real), respectivamente. Esta diferença significaria 0,7 m/km ao longo da área analisada.

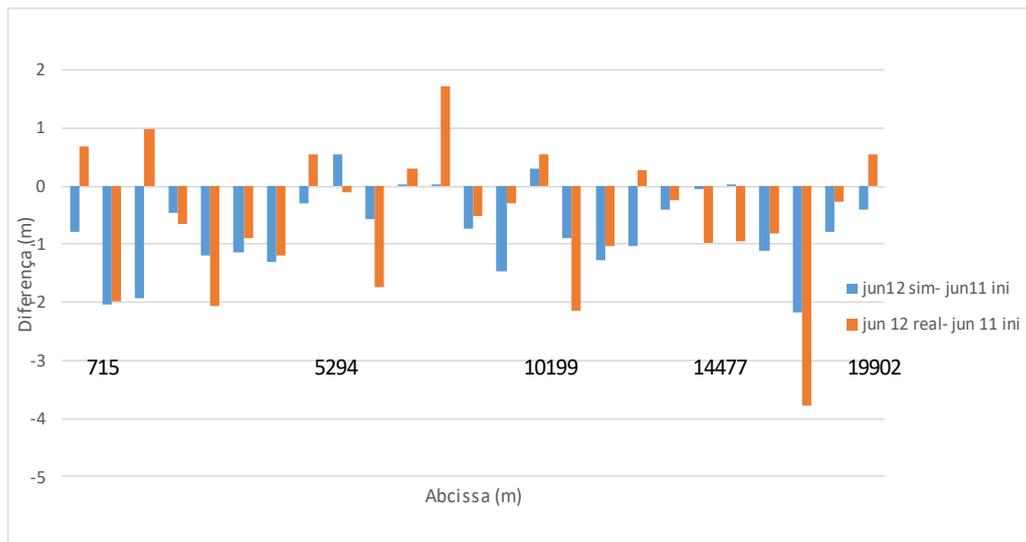


Figura 37. Comparativo das diferenças de profundidade por abscissa entre os perfis longitudinais inicial e final (simulado e real)

3.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os cenários simulados foram os seguintes:

a) Geometria idealizada e vazão constante:

Com este cenário se pretende analisar o delta numa condição em que as profundidades não sejam relevantes e sem as variações de vazão presentes no ano.

b) Geometria idealizada e hidrograma médio (percentil 50):

Com este cenário se pretende analisar o delta numa condição em que as profundidades não sejam relevantes para um ano hidrológico em condições neutrais.

c) Geometria real e vazão constante:

Com este cenário se pretende analisar o delta em condições reais e sem as variações de vazão presentes no ano.

d) Geometria real e hidrograma média (percentil 50):

Com este cenário se pretende analisar o delta em condições reais com um ano hidrológico em condições neutrais.

e) Geometria real e hidrograma altas vazões (ano 2011-2012):

Com este cenário se pretende analisar o delta em condições reais com um ano hidrológico em condições de La Niña.

f) Geometria real e hidrograma baixas vazões (ano 2015-2016):

Com este cenário se pretende analisar o delta em condições reais com um ano hidrológico em condições de El Niño.

g) Geometria real e hidrograma médio (percentil 50) com maré sintética:

Com este cenário se pretende analisar a influência da maré na morfologia do delta.

Para cada simulação se apresentam as seguintes análises:

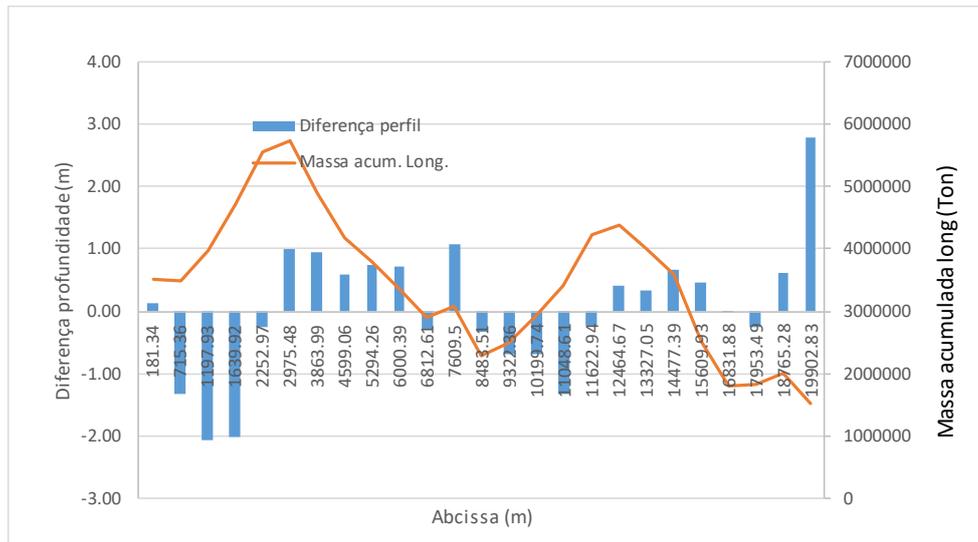
- (1) Diferenças das profundidades entre o perfil final e o perfil inicial em forma de diagrama de barras e comparando com um perfil longitudinal de massa acumulada gerado pelo HEC-RAS. O perfil de massa acumulada representa a mudança total da massa acumulada do leito do rio no espaço e no tempo. A acumulação espacial de massa se apresenta por seção transversal em sentido montante até jusante, sendo que o incremento na curva indica sedimentação e o decremento na curva indica erosão.
- (2) Variações das velocidades simuladas no tempo em comparação com a largura de cada seção transversal.

3.5.1 Resultados para a Geometria idealizada

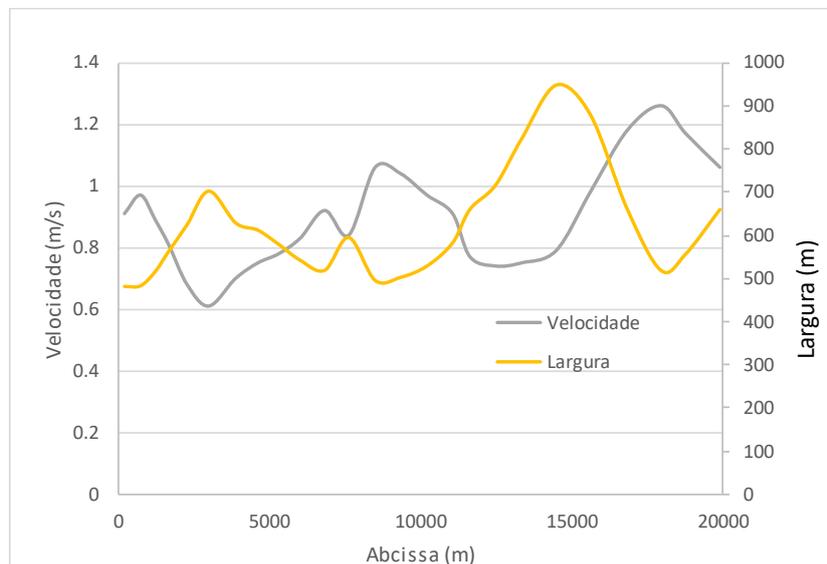
a) Cenário com vazão constante

Usando a geometria idealizada com forma de canal, se realizou uma simulação de transporte de sedimento com a condição hidrodinâmica de vazão constante ($7000 \text{ m}^3/\text{s}$). O gráfico de diferenças de profundidade (barras na Figura 38a) entre o perfil final e o perfil inicial mostra alternância entre as sedimentações e erosões ao longo do delta. Se apresentaram sedimentações nas abcissas km-19,9, km-14,4, e km-5 com valor máximo de 2,8 m na abscissa km-19,9 e valores próximos aos 1,05 m nos restantes picos de sedimentação. As erosões se apresentaram nas abcissas km-17, km-9,3, e km-1,6, com valor máximo de -2 m na abscissa km-1,1.

O comportamento da massa acumulada longitudinal (linha laranja) mostra uma tendência geral no delta de sedimentação, com alguns picos de erosão nas abcissas km-17,9, km-9,3 e km-0,7. O máximo valor de massa obtido foi na abcissa km-2,9 com um valor de 5728457 toneladas e o valor final atingido no delta foi de $3,51 \times 10^6$ ton.



(a)



(b) Figura 38. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria idealizada com vazão constante. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

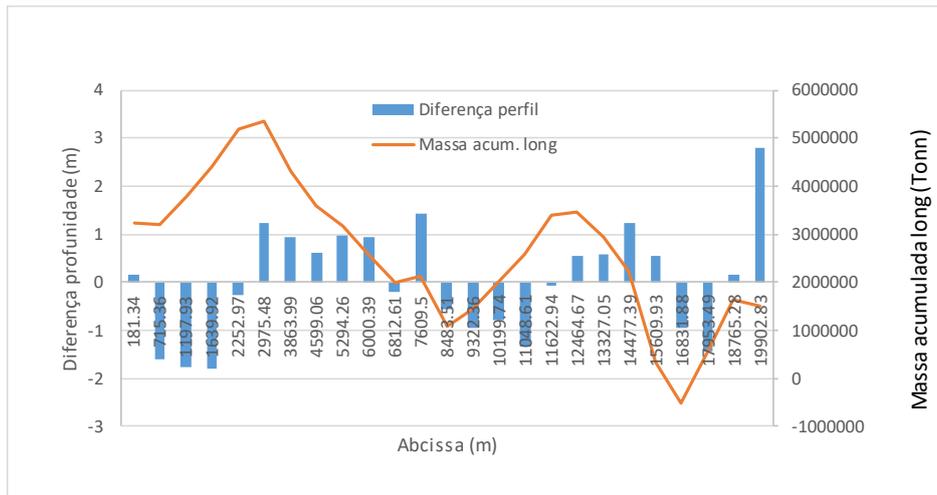
A Figura 38b mostra o comportamento das velocidades médias em cada seção (abcissa) com suas respectivas larguras. Se observa concordância entre as seções com baixas velocidades e maior largura, assim como as seções com menor largura e maior

velocidade. A velocidade média foi de 0,9 m/s, a velocidade máxima de 1,26 m/s na abscissa km-17,95 e a velocidade mínima de 0,63 m/s na abscissa km-2,97. Comparando os perfis de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que as sedimentações se apresentaram nos setores com menores velocidades próximos às abscissas km-6 e km-15 e as erosões se apresentaram nos setores com maiores velocidades próximos às abscissas km-18, km-10 e km-1. As velocidades nos setores com sedimentação apresentaram valores iguais ou inferior a 0,6 m/s. Por outra parte, as velocidades nos setores que apresentaram erosão foram superiores ao 1 m/s.

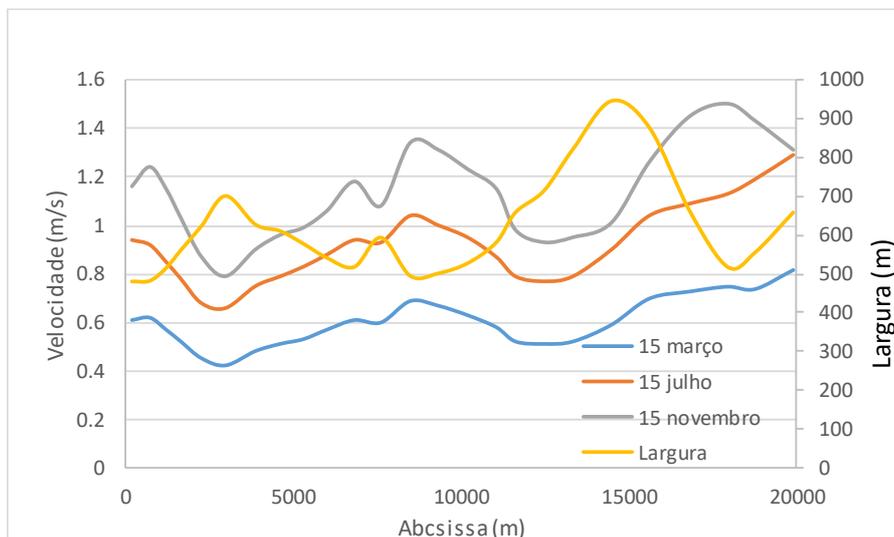
b) Cenário com hidrograma médio

Com base na geometria idealizada, se realizou uma simulação de transporte de sedimento com a condição hidrodinâmica do percentil 50 da estação Tebsa. O gráfico das diferenças de profundidade (barras na Figura 39a) mostra, igual que no caso anterior, picos alternados de erosão e sedimentação ao longo do delta. As sedimentações se apresentam nas abscissas km-19,9, km-14,4, km-7,6 e desde a abscissa km-6 até a km- 2,9, com valores de 2,2 m na abscissa km-19,9 e menor de 1,34 m nos demais picos de sedimentação. As erosões se apresentaram nas abscissas km-17,9, km-11 e km-1 com valor máximo de -1,8 m.

O gráfico de massa acumulada longitudinal (linha laranja) mostra diferentes tendências ao longo do delta, presentando-se erosão nas abscissas km-17, km-8 e km-1. Os picos de sedimentação se apresentaram nas abscissas km-12 e km-2,9. O valor final atingido foi de $3,23 \times 10^6$ ton.



(a)



(b)

Figura 39. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria idealizada com hidrograma médio. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

A Figura 39b mostra as velocidades médias em cada seção nas datas de 15 março (vazão média: 0,6 m/s), 15 julho (vazão média: 0,91 m/s) e 15 novembro (vazão média: 1,1 m/s) correspondentes aos níveis compreendidos entre janeiro-abril, quando acontece o Pico 1, maio e agosto, quando acontecem os Picos 2 e 3 e setembro-dezembro quando acontece o Pico 4. Se observa concordância entre as seções com baixas velocidades e maior largura, assim como as seções com menor largura e maior velocidade. Os perfis de velocidade apresentam diferenças nas magnitudes sendo maiores para o 15 de novembro e menor para o 15 de março. A menor velocidade se apresenta no perfil de março 15 com um valor de 0,42 m/s na seção km-2,97 e a maior velocidade no perfil de novembro 15

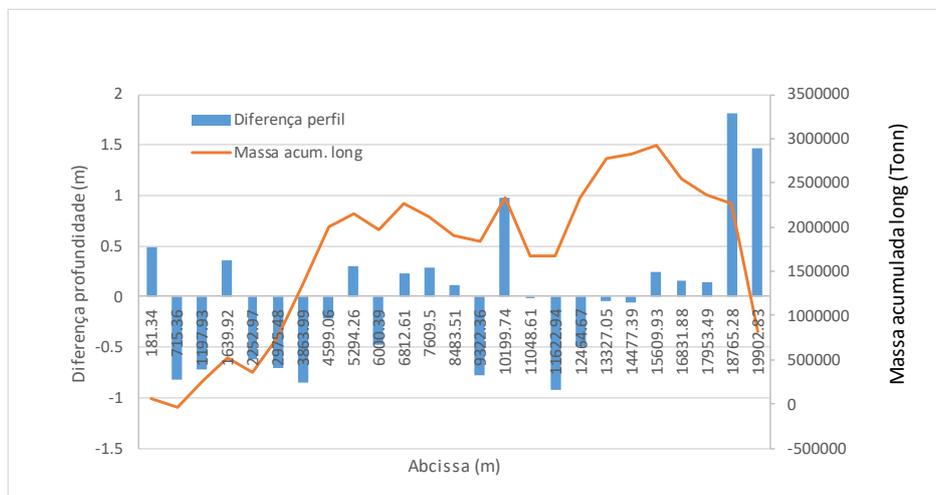
com 1,5 m/s na seção km 17,95. As velocidades médias nos perfis foram de 0,6, 0,91 e 1,13 m/s nos perfis de março, junho e novembro, respectivamente. Comparando os perfis de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que as sedimentações se apresentaram nos setores com menores velocidades próximos às abscissas km-4 e km-14 e as erosões se apresentaram nos setores com maiores velocidades próximos às abscissas km-1 e km-10.

3.5.2 Resultados para a Geometria real

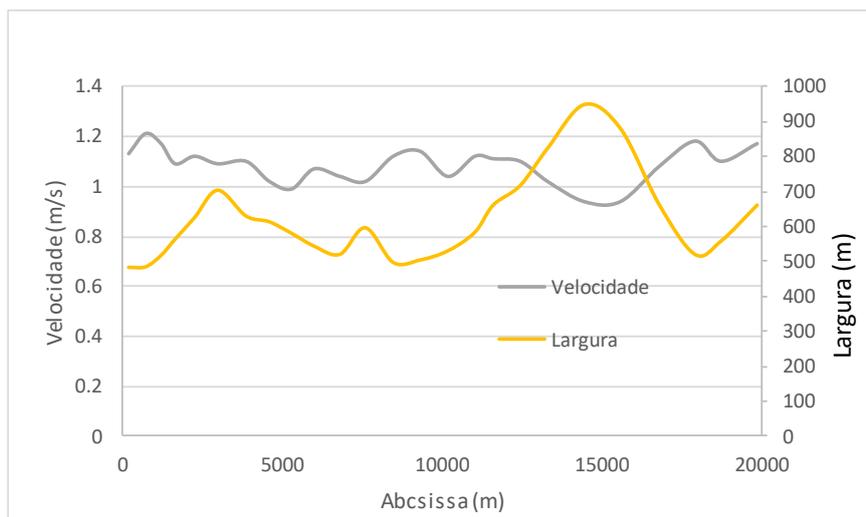
a) Cenário com vazão constante

Foi realizada uma simulação anual de transporte de sedimento utilizando a vazão constante de $7000 \text{ m}^3/\text{s}$, com o fim de avaliar uma condição sem variações sazonais. O gráfico das diferenças de profundidade (barras na Figura 40a) apresenta um pico de alta sedimentação na abscissa km-18,7 com valor de 1,81 m. No restante do delta se apresentaram picos alternados de erosão e sedimentação sendo relevante na abscissa km-10 com sedimentação de valor 0,65 m e nas abscissas km-11,6, km-9,3, km-3,8 e km-1 com erosão de valor de 0,87m.

O gráfico de massa acumulada (linha laranja) mostra uma mínima tendência à sedimentação, em que as taxas de erosão e sedimentação foram quase equivalentes. O valor final de massa acumulado foi de $0,06 \times 10^6 \text{ ton}$.



(a)



(b)

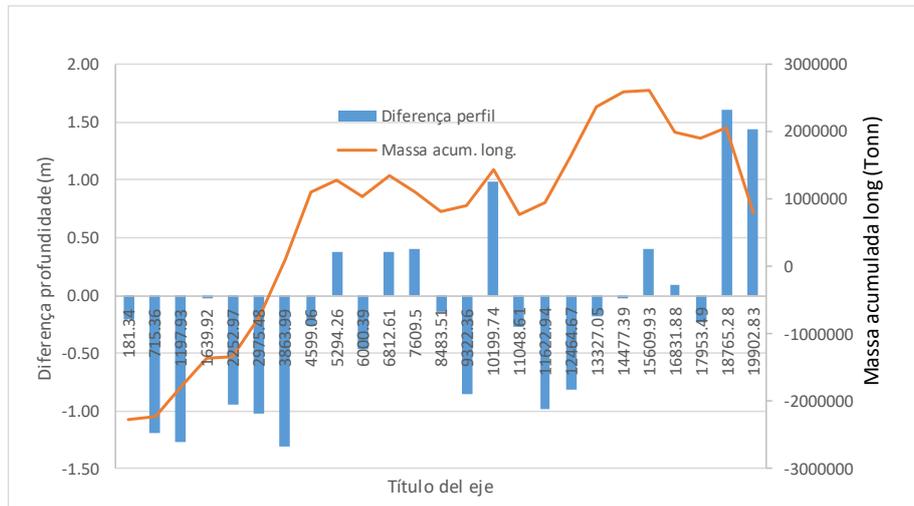
Figura 40. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com vazão constante. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

No gráfico comparativo entre as velocidades médias e as larguras de cada seção (Figura 40b) se observa uma concordância entre as seções com baixas velocidades e maior largura, assim como as seções com menor largura e maior velocidade. Comparando o perfil de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que as sedimentações se apresentaram nos setores com menores velocidades próximos às abcissas km-5 e km-15 e as erosões se apresentaram nos setores com maiores velocidades próximos às abcissas km-1 e km-10.

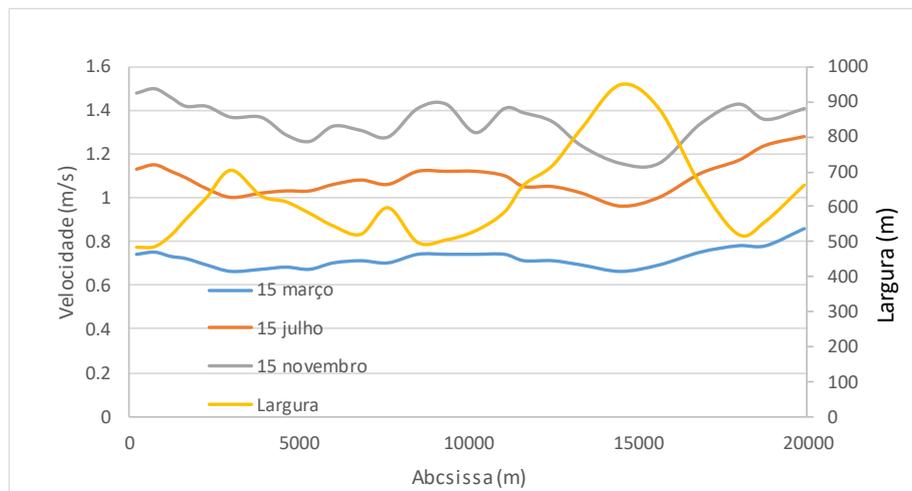
b) Cenário com hidrograma médio

Foi realizada uma simulação de transporte de sedimento para a condição hidrodinâmica mediante o uso do hidrograma do percentil 50 da estação Tebsa. Esta simulação permite observar o comportamento morfológico do delta em condições neutras. O gráfico das diferenças de profundidade (barras na figura 41a) mostra que se apresentaram picos de erosão e sedimentação de forma alternada ao longo do delta, com picos de sedimentação nas abcissas km-19 e km-10 com valor de 1,61 e 0,8 m respectivamente, e picos de erosão nas abcissas km-12, km-9, km-3,8 e km-1,1 com valores máximos de -1,31 m nas duas últimas seções mencionadas.

O gráfico de massa acumulada longitudinal (linha laranja) mostra uma tendência de sedimentação entre as abscissas km-19,9 e 13,3 com um pico de sedimentação na abscissa km-15,6 com valor de 2620946 toneladas. Entre as abscissas km-5 e 0 se apresenta uma tendência à erosão. O valor de massa acumulada final é de $-2,26 \times 10^6$ ton.



(a)



(b)

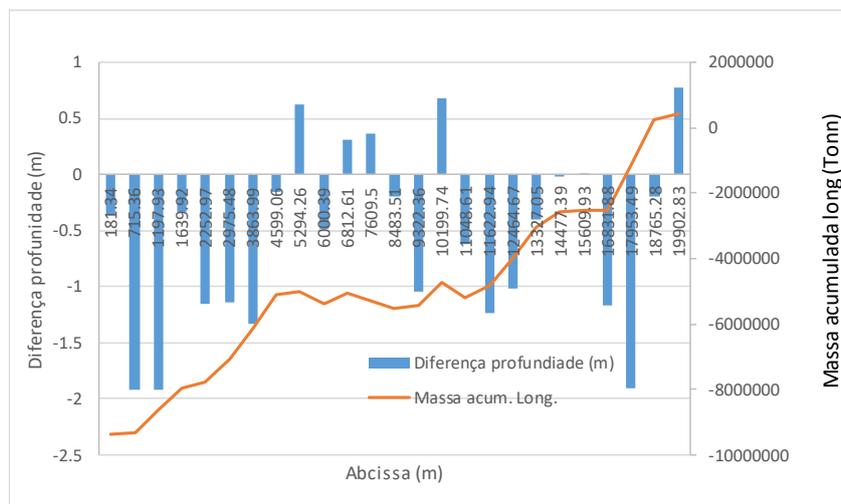
Figura 41. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma médio. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

O gráfico de velocidades com a largura (figura 41b) mostra as velocidades médias em cada seção nas datas de 15 março, 15 julho e 15 novembro com as larguras das seções. Se observa concordância entre as seções com baixas velocidades e maior largura, assim como as seções com menor largura e maior velocidade. Os perfis de velocidade mostram incremento no período de vazões altas e decremento no período de vazões baixas. No

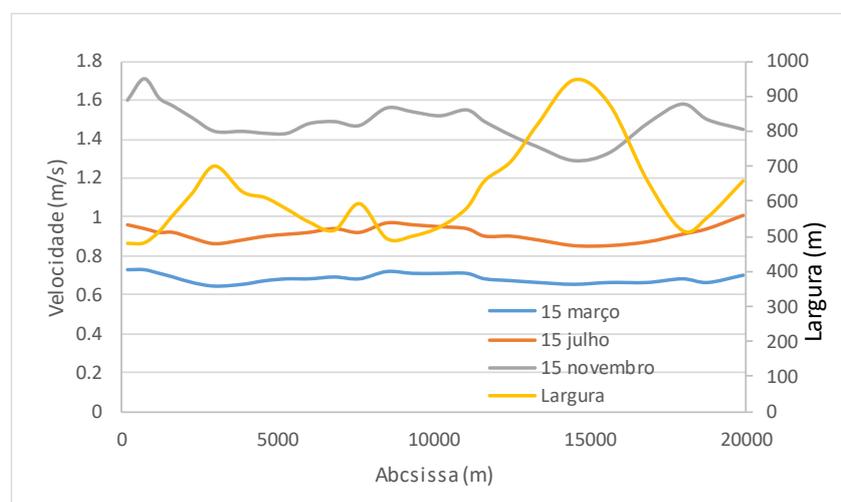
perfil de março 15 a menor velocidade foi 0,66 m/s, a velocidade máxima foi de 0,86 m/s e velocidade média de 0,7 m/s; no perfil de julho 15 a velocidade mínima foi de 0,96 m/s, a velocidade máxima de 1,28 m/s e a velocidade média de 1,09 m/s; e no perfil de 15 novembro a velocidade mínima foi de 1,16 m/s, a velocidade máxima de 1.5 m/s e a velocidade média de 1,34 m/s. Comparando os perfis de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que as sedimentações se apresentaram nos setores com menores velocidades próximos na abcissa km-5 e as erosões se apresentaram nos setores com maiores velocidades próximos às abscissas km-1 até km-4, e próxima na abcissa km-10.

c) Cenário com hidrograma alto

Usando a condição hidrodinâmica a montante igual ao hidrograma de 30 setembro de 2011 até 30 de setembro de 2012 (ano de altas vazões), se realizou um modelo de transporte de sedimento para determinar a resposta morfológica do delta. O gráfico das diferenças de profundidade (barras na figura 42b) entre o perfil inicial e o perfil final mostra que o delta se erodiu entre as abscissas km-19,9 até a abcissa km-10, com pico de erosão na abcissa km-17,9 com valor de -1,91 m. Nas abscissas km-10, km-7,6 e km-5 se apresentam picos de sedimentação com valor de 0,65 m. Nas abscissas km-9 se apresentou erosão com valor de -1,04 m e desde a abcissa km-5 até a abcissa 0 se apresentou erosão com um valor pico na abcissa km-1 de -1,83 m. O gráfico de massa acumulada longitudinal (linha laranja) mostra uma tendência à erosão em todo o delta com uma alta declividade negativa, entre as abscissas km-19,9 e km-10 e desde a abcissa km-5 até a abcissa 0. O valor final de massa acumulada foi de $-9,37 \times 10^6$ ton.



(a)



(b)

Figura 42. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma alto. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

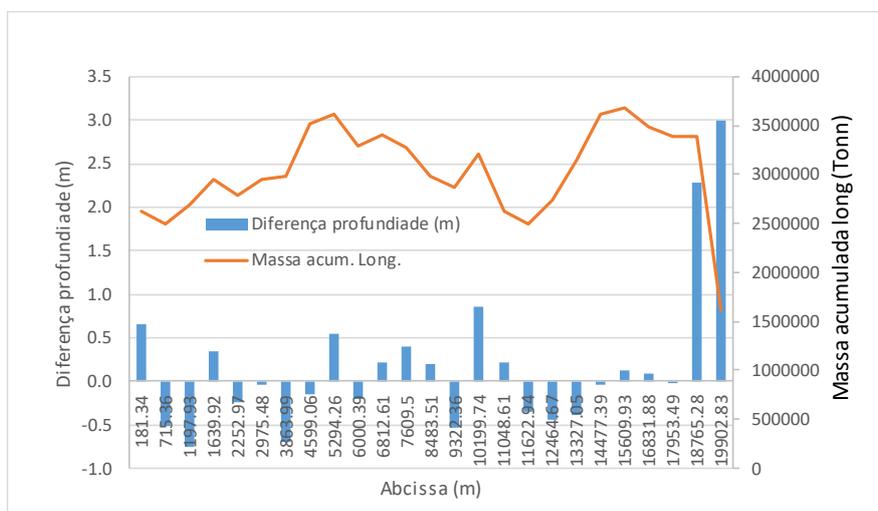
O gráfico de velocidades com a largura (figura 42b) mostra as velocidades médias em cada seção nas datas de 15 março, 15 julho e 15 novembro. Se observa concordância entre as seções com baixas velocidades e maior largura, assim como as seções com menor largura e maior velocidade. Os perfis de velocidade mostram incremento no período de vazões altas e decremento no período de vazões baixas. No perfil de março 15 a menor velocidade foi 0,64 m/s, a velocidade máxima foi de 0,73 m/s e velocidade média de 0,68 m/s; no perfil de julho 15 a velocidade mínima foi de 0,85 m/s, a velocidade máxima de 1,01 m/s e a velocidade média de 0,92 m/s; e no perfil de 15 novembro a velocidade mínima foi de 1,29 m/s, a velocidade máxima de 1,71 m/s e a velocidade média de 1,49

m/s. Comparando os perfis de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que as sedimentações se apresentaram nos setores com menores velocidades próximos na abcissa km-5 e km-11, as erosões se apresentaram nos setores com maiores velocidades próximos às abcissas km-1 até km-4 e próxima na abcissa km-10.

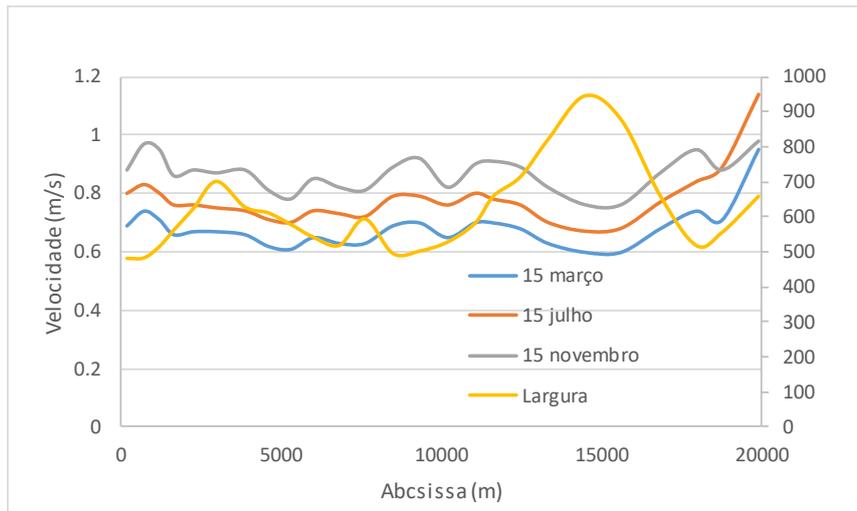
d) Cenário com hidrograma baixo

Usando a condição hidrodinâmica a montante igual ao hidrograma de 30 setembro de 2015 até 30 de setembro de 2016 (ano de baixas vazões), se realizou um modelo de transporte de sedimento para determinar a resposta morfológica do delta. O gráfico das diferenças de profundidade (barras na figura 43a) entre o perfil final e o perfil inicial mostra um pico de sedimentação na abcissa km-19,9 com valor de 3 m, e nas abcissas km-10, km-5 e km-1,6 com 0,78 m. Nas abcissas km-12, km-9, km-4 e km-1 se apresentaram erosões com valor inferior ao -0,6m.

O gráfico de massa acumulada longitudinal (linha laranja) mostra uma tendência geral à sedimentação no delta do Magdalena, com maior declividade positiva entre as abcissas km-19,9 até km-15 e entre as abcissas km-10 e km-5. Entre as abcissas km-5 até a abcissa 0 se apresentou uma tendência à erosão. O valor de massa acumulado final foi de $2,62 \times 10^6$ ton.



(a)



(b)

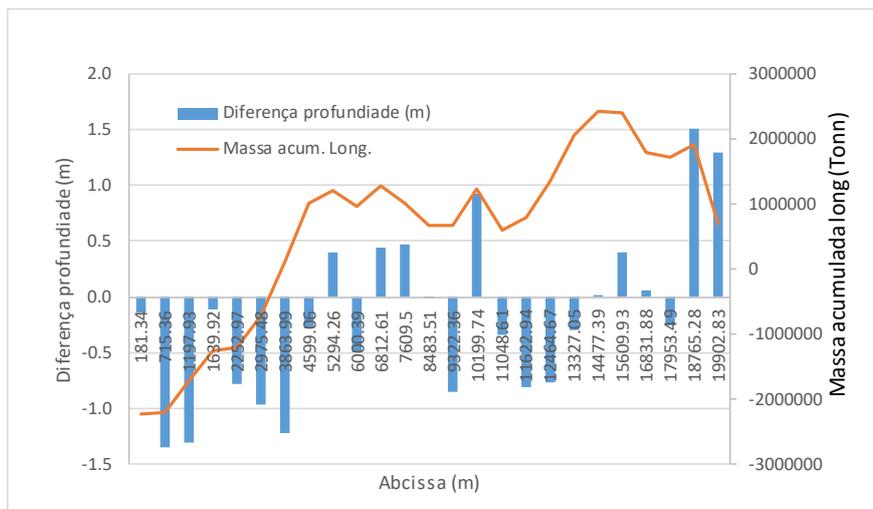
Figura 43. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma baixo. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

O gráfico de velocidades com a largura (figura 43b) mostra as velocidades médias em cada seção nas datas de 15 março, 15 julho e 15 novembro. Se observa concordância entre as seções com baixas velocidades e maior largura, assim como as seções com menor largura e maior velocidade. Os perfis de velocidade mostram incremento no período de vazões altas e decremento no período de vazões baixas. No perfil de março 15 a menor velocidade foi 0,6 m/s, a velocidade máxima foi de 0,95 m/s e velocidade média de 0,68 m/s, no perfil de julho 15 a velocidade mínima foi de 0,67 m/s, a velocidade máxima de 1,14 m/s e a velocidade média de 0,78 m/s, no perfil de 15 novembro a velocidade mínima foi de 0,98 m/s, a velocidade máxima de 0,76 m/s e a velocidade média de 0,87 m/s. Comparando os perfis de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que a maior sedimentação aconteceu a montante do delta, onde se apresentou uma diminuição nas velocidades. No resto do delta existem picos de sedimentação e erosão alternados coincidentes com as variações nas velocidades.

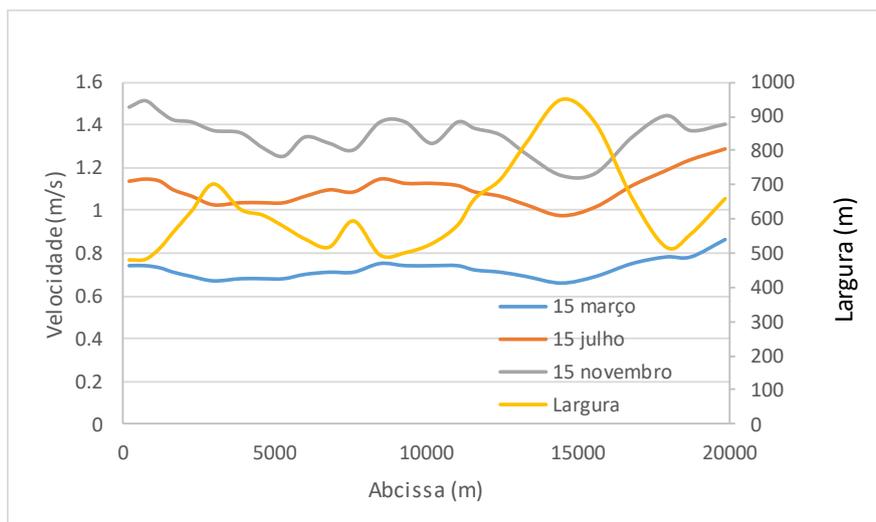
3.5.3 Cenário de geometria real e hidrograma médio com maré sintética mínima

Finalmente, se realizou uma simulação de transporte de sedimento em condição hidrodinâmica médio com uma condição de maré sintética, simulando o mínimo efeito devido à maré. Este modelo serve para observar a relevância que apresenta a maré sobre a morfológica no delta. O gráfico de diferenças de profundidade (barras na figura 44a) mostra intervalos de erosão e sedimentação ao longo do delta, com sedimentação pronunciada entre a abscissa km-19,9 e km-15,6 com um valor máximo de 1,5 m e erosão pronunciada entre as abscissas km-5 e 0 com um valor mínimo de -1,4 m.

O gráfico de massa acumulada longitudinal (linha laranja) mostra uma tendência à sedimentação entre as abscissas km-19,9 e 15,6 para logo apresentar intervalos entre erosão e sedimentação desde aa abscissa km-15,6 até km-5. Entre a abscissa km-5 e a foz se apresentou tendência de erosão até atingir um valor final de massa acumulada de $-2,23 \times 10^6$ ton, praticamente equivalente ao valor de $-2,26 \times 10^6$ ton, obtido com a maré real.



(a)



(b)

Figura 44. (a) Diferença da profundidade (barras) (erosão: valores negativos, sedimentação: valores positivos) e perfil de massa acumulada longitudinal para o cenário de geometria real com hidrograma médio com maré sintética. (b) Velocidades e larguras nas seções transversais

O gráfico de velocidades com a largura (figura 44b) mostra as velocidades médias em cada, apresentando similar comportamento a Figura 41b (hidrograma médio e maré real). Comparando os perfis de velocidade com as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) se observa que a maior erosão se apresentou entre as abcissas km-4 até km-1 e nas abcissas km-12. As sedimentações se observaram com quedas na velocidade no setor das abcissas km-7 e km-19,9.

3.6 DISCUSSÃO - COMPARATIVO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram comparados os resultados das simulações de transporte de sedimento realizadas para os distintos cenários com o fim de avaliar a sensibilidade morfológica do delta considerando diferentes geometrias e condições de contorno de vazões (montante) e maré (jusante). Na Tabela 16 são listados os resultados finais de cada simulação, quanto à massa acumulada e tendência anual (erosão ou sedimentação). Todos os cenários realizados com a geometria simplificada do canal mostraram tendência geral de sedimentação. No modelo com geometria real, os únicos cenários que apresentaram

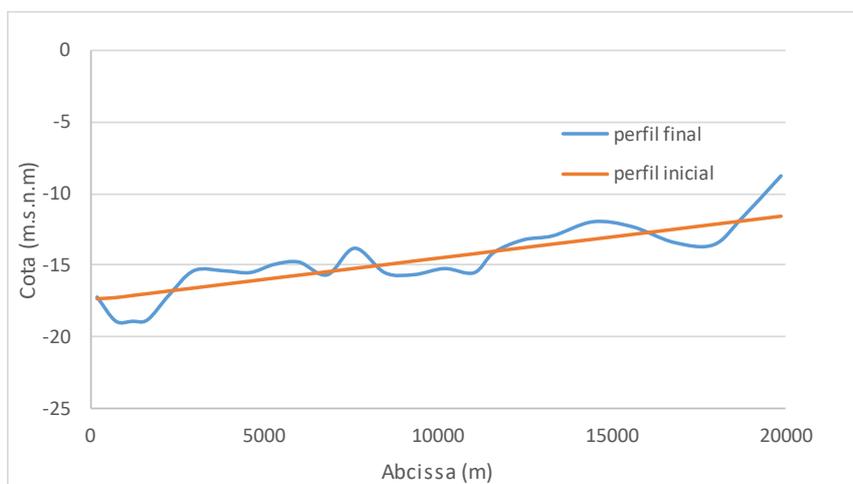
tendências erosivas foram os que tinham condição de contorno com hidrograma médio e com alta vazão.

Tabela 16. Resumo dos resultados das simulações

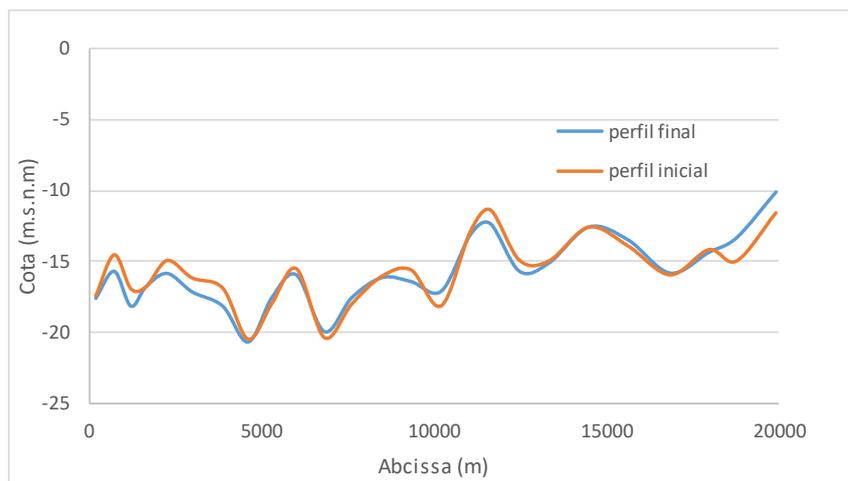
Simulação	Massa acumulada longitudinal (Mtonn)	Tendencia
Geometria ideal-vazão constante	3.51	Sedimentação
Geometria ideal-hidrograma médio	3.23	Sedimentação
Geometria real-vazão constante	0.06	Sedimentação
Geometria real-hidrograma médio	-2.26	Erosão
Geometria real-hidrograma alto	-9.37	Erosão
Geometria real-hidrograma baixo	2.62	Sedimentação
Geometria real-hidrograma médio-maré sintética	-2.23	Erosão

3.6.1 Influência da geometria: Geometria idealizada com hidrograma médio VS. geometria real com hidrograma médio

A Figura 45 apresenta os perfis finais (pelo talvegue) para ambas simulações. Para a geometria simplificada podem ser observadas as maiores sedimentações entre as abcissas km-16 e km-12 e no trecho inferior do delta, entre km 9 e km-2. O perfil de geometria real apresentou maior sedimentação no trecho médio, entre as abcissas km-11 e 7.



(a)



(b)

Figura 45. Comparativo dos perfis final e inicial pelo talvegue para o hidrograma médio (a) geometria idealizada (b) geometria real

Na Figura 46 se apresentam as diferenças de profundidade entre o perfil do talvegue final e inicial das simulações (erosão ou sedimentação). As zonas de erosão e sedimentação ao longo do delta apresentaram diferenças entre os dois cenários. O perfil transversal do canal apresenta sedimentações (diferenças positivas) em zonas com larguras maiores e erosões (diferenças negativas) em larguras menores. Por outra parte, o perfil real não apresenta uma relação direta com a largura ao longo do delta, mostrando uma possível influência de irregularidades na batimetria. A influência das diferentes profundidades pode ser observada na comparação dos resultados dos dois cenários ao longo do trecho médio e inferior (entre as abscissas km-15 e 1).

Como mostrado na Figura 27, para os dois cenários analisados se mantiveram as larguras originais, mas com maiores profundidades no canal idealizado. Esta pode ser uma evidência de como o aprofundamento no canal de navegação, devido à dragagem, pode favorecer o processo de sedimentação. Na análise das batimetrias do capítulo 1, a região do porto com maior taxa de erosão (entre S1 e S5) é a mais susceptível de dragagem (boia 7: 5+000-6+700, boia 15: 10+400-13-500 e boia 19: km 14+900-15+200), apresentando também os maiores picos de sedimentação anual. Além disso, estudos anteriores sinalizam o processo de dragagem como responsáveis por elevadas taxas de assoreamento (Monge-Ganuzas et al, 2013) (Van Rijn, 2005).

O diagrama de massa acumulada longitudinal (Figura 47) apresenta diferenças entre ambos os perfis. Na abscissa km-18 o perfil da geometria idealizada mostra

tendência pronunciada à erosão contrária ao perfil da geometria real que apresenta tendência à sedimentação. O perfil da geometria idealizada apresenta um pico de sedimentação na abscissa km-11 e ambos os perfis apresentam tendência à erosão próxima à abscissa km-10. Entre a abscissa km-6 e a foz (onde são apresentadas as maiores diferenças nas profundidades-veja Figura 27), os perfis divergem, apresentando-se erosão acumulada no perfil da geometria real com valor de $-2,26 \times 10^6$ ton e sedimentação acumulada no perfil da geometria idealizada com valor de $3,23 \times 10^6$ ton.

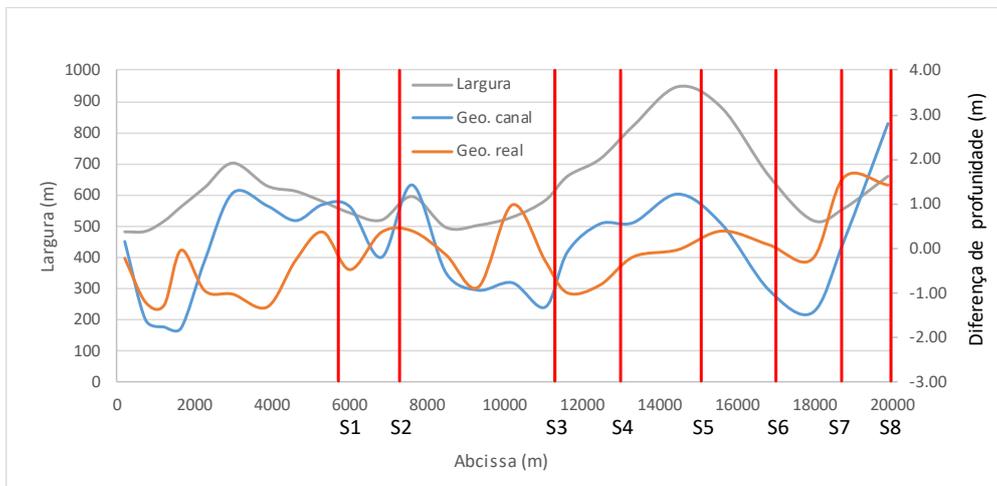


Figura 46. Diferenças de profundidade VS largura do delta com os setores batimétricos para o comparativo entre a geometria idealizada e a geometria real usando o hidrograma médio

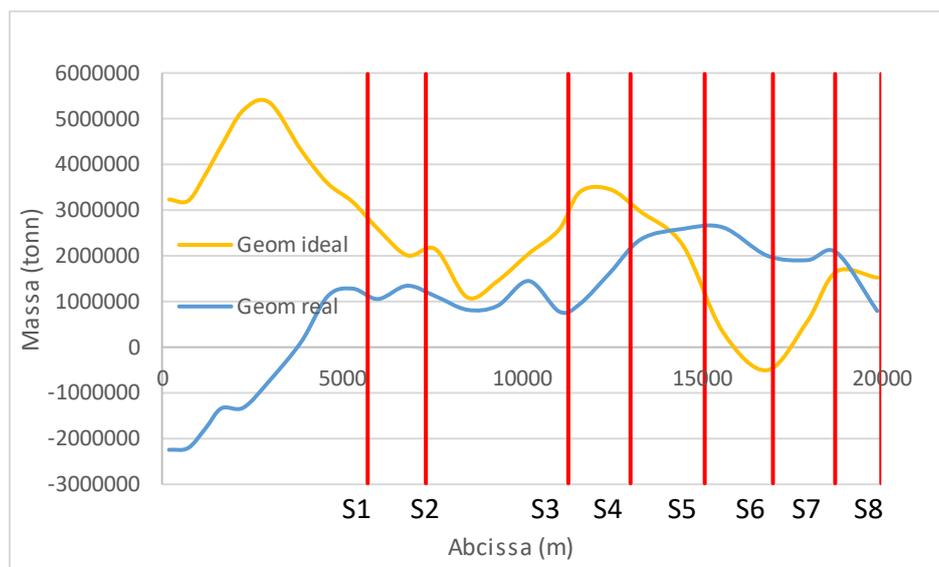


Figura 47. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal com setores batimétricos para geometria idealizada com hidrograma médio e geometria real com hidrograma médio

3.6.2 Influência da vazão (escala interanual): Geometria real com vazão alta VS. geometria real com vazão média VS. geometria real com vazão baixa

O ano de altas vazões está representado pelo hidrograma do ano 2011-2012 (ano com fase La Niña), o ano de vazões médias se representa pelo hidrograma do percentil 50 (neutro) e o ano de baixas vazões pelo hidrograma do ano 2015-2016 (ano com fase El Niño). O comparativo dos perfis finais de cada simulação pelo talvegue (Figura 48) mostra que as maiores diferenças entre os perfis se localizam nas abcissas km-18 e entre as abcissas km-5 e 0. Durante o hidrograma com alta vazão se apresentou a maior erosão, sendo acentuada sobre as abcissas km-18, km-12 e perto da foz. O ano que apresentou maior sedimentação correspondeu ao hidrograma com baixa vazão, acentuando-se nas abcissas km-18 e perto da foz.

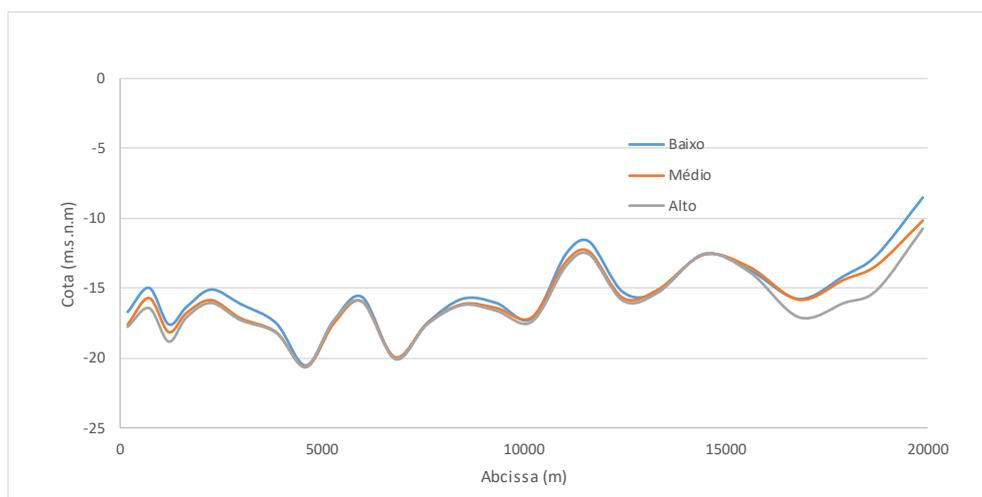


Figura 48. Comparativo dos perfis pelo talvegue com geometria real para os hidrogramas alto, médio e baixo

Na Figura 49 se mostram as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) entre o perfil do talvegue final e o inicial das três simulações. Pode ser observada certa similaridade na forma dos três perfis com maiores diferenças em zonas específicas: km-19,9, onde o perfil de hidrograma de baixa vazão e médio apresentam sedimentação (diferenças positivas) e erosão (diferença negativa) no perfil de hidrograma de alta vazão. Entre as abcissas km-2 e km-4 os perfis referentes aos hidrograma de alta vazão e médio apresentam erosão, porém, o perfil de hidrograma de baixa vazão apresenta sedimentação.

Destaca-se que nas abscissas km-18 e km-1 todos os perfis apresentam uma tendência à erosão, sendo zonas com largura menor à largura média no delta.

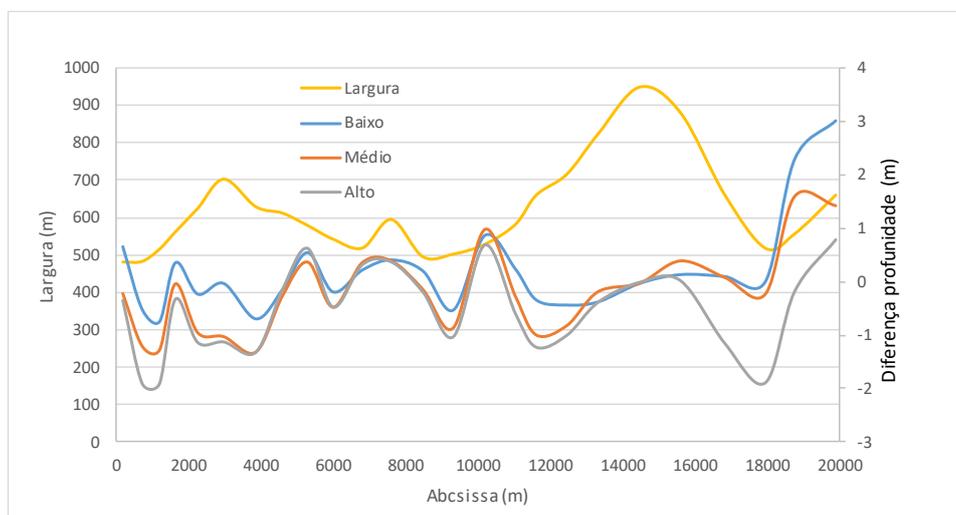


Figura 49. Diferenças de profundidade VS largura do delta para o comparativo entre os hidrogramas baixo, médio e alto usando a geometria real

O comparativo dos perfis de massa acumulada longitudinal para os três cenários hidrodinâmicos simulados (Figura 50) mostra que existem diferenças morfológicas no perfil resultante. Para o hidrograma com baixa vazão o delta tende a sedimentar-se em toda sua extensão com um valor acumulado de $2,62 \times 10^6$ ton. Para o perfil do hidrograma médio se apresenta sedimentação desde a abscissa km-20 até a abscissa km-4 com valor intermediário menor aos 2×10^6 ton e depois uma tendência de erosão desde a abscissa km-4 até 0, até atingir o valor final de massa acumulada de $-2,26 \times 10^6$ ton. O perfil de massa acumulada para o hidrograma de alta vazão mostra que o delta se erode em toda sua extensão, sendo pronunciada desde a abscissa km-20 até km-10 e entre as abscissas km-5 até 0, quando atinge o valor de massa acumulado final de $-9,37 \times 10^6$ ton. Estes resultados corroboram os resultados obtidos no capítulo 1 onde, através da análise comparativa das batimetrias, foi destacado que os anos que apresentaram maiores processos de sedimentação aconteceram durante anos com El Niño (hidrogramas com baixa vazão) e os anos que apresentaram maiores erosões aconteceram durante anos com La Niña (hidrogramas com alta vazão).

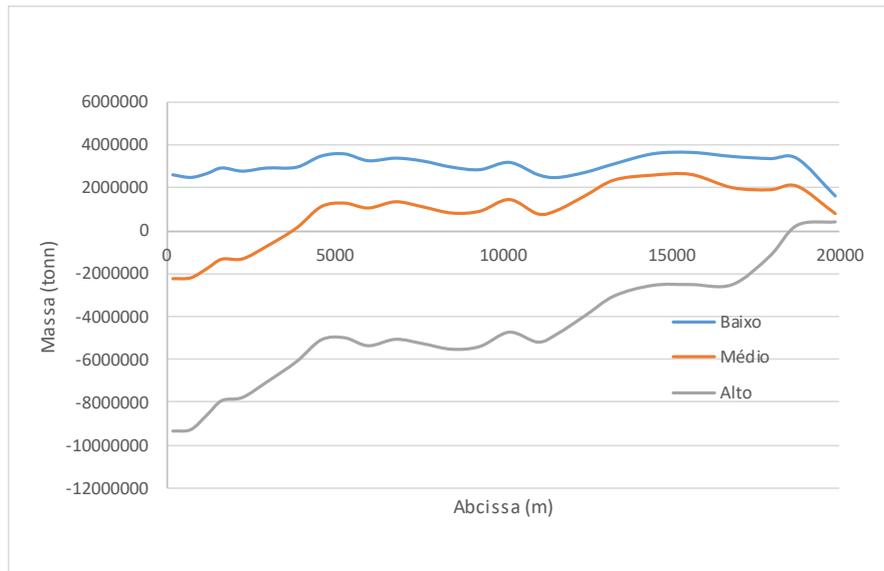


Figura 50. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal para a geometria real com os hidrogramas alto, médio e baixo

As análises complementarias foram realizadas visando explicar o efeito de diferentes magnitudes de vazão no comportamento morfológico do delta. Assim, com as vazões diárias se construíram as curvas de frequência (figura 51) para cada hidrograma (alto, médio e baixo) para determinar a percentagem do tempo correspondente às vazões iguais ou superior à vazão dominante. A vazão dominante se define como a vazão teórica que realiza as maiores mudanças morfológicas devido ao transporte de sedimentos e que tem um período de retorno entre 1,5 e 2,4 anos (Knighton, 1998; Richards, 1982). Neste estudo se calculou a vazão dominante mediante as distribuições Weibull e Gumbel a partir das vazões máximas anuais dos dados observados entre 1996-2017 na estação Tebsa (Figura 30). Para um período de retorno de 1,5 anos se obteve a vazão dominante igual a $9000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ao comparar as curvas de frequência dos hidrogramas com vazões alta, média e baixa, se obtiveram as porcentagens do tempo que excedem o valor da vazão dominante calculada, de 33%, 11% e 0%, respectivamente. O resultado mostra a razão pela qual para o hidrograma alto se apresentam maiores mudanças morfológicas quando se comparam aos resultados morfológicos das simulações com os hidrogramas médio e baixo, evidenciando a relevância que apresentam a vazão dominante sobre a morfologia no distributario do delta. O fato das vazões do hidrograma com vazão baixa nunca excederem a vazão dominante seria um indicativo da tendência geral de sedimentação.

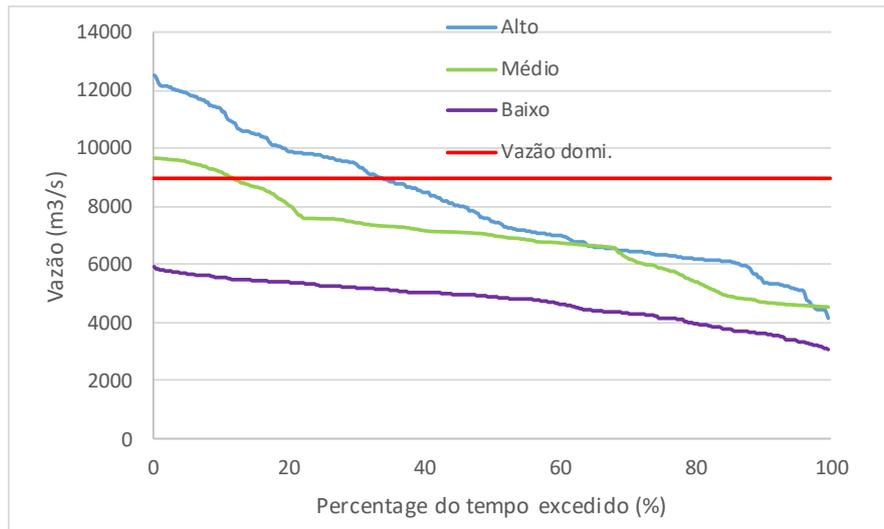


Figura 51. Curva de frequência das vazões diárias para os hidrogramas alto, médio e baixo, comparando com o valor da vazão dominante.

3.6.3 Influência da vazão (escala intra anual): Geometria real com vazão média VS. geometria real com vazão constante

O gráfico comparativo das profundidades entre os perfis pelo talvegue para as duas simulações (Figura 52) mostra que não existem grandes diferenças ao final do ano de simulação, apresentando menores profundidades o perfil do cenário com vazão constante.

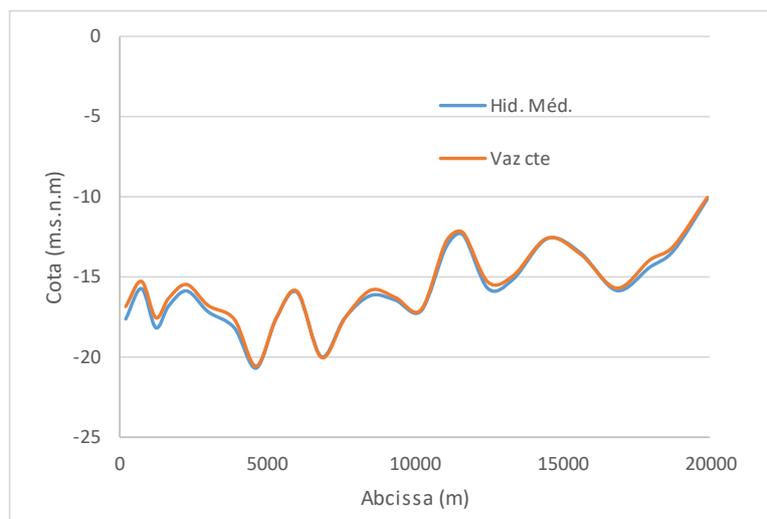


Figura 52. Comparativo dos perfis pelo talvegue de geometria real com hidrograma médio e vazão constante

Na Figura 53 se apresentam as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) entre o perfil do talvegue final e o inicial das simulações com o hidrograma médio (percentil 50) e vazão constante (7000 m³/s). Ambos os perfis apresentam congruência nas zonas onde se apresentam sedimentações (diferenças positivas) e erosões (diferenças negativas), só mudando a magnitude das diferenças. No perfil de vazão média as erosões são maiores ao perfil de vazão constante entre as abscissas km-2 até km-4 com 0,5 m de diferença e na abscissa km-1. Na região onde acontece sedimentação (abscissas km-19 e km-12), se observa que os resultados no cenário com vazão constante se mostram com uma tendência maior à sedimentação.

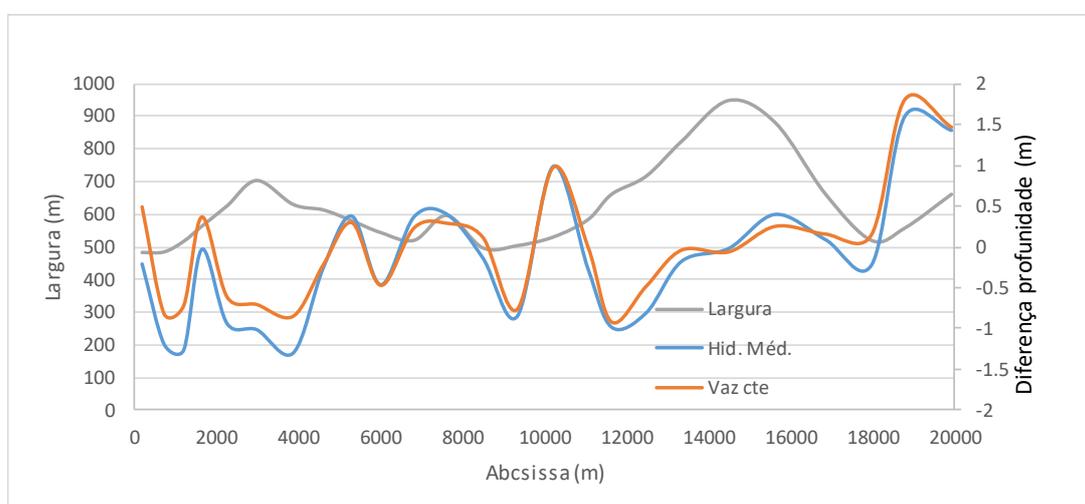


Figura 53. Diferenças de profundidade VS largura do delta para o comparativo entre hidrograma médio e vazão constante usando a geometria real

O perfil de massa acumulada longitudinal (Figura 54) para os cenários hidrodinâmicos de vazão média e vazão constante mostra similaridade no comportamento nas áreas onde se apresentaram os eventos de erosões e sedimentações. Entre as abscissas km-19,9 e km-13 se apresentou sedimentação em ambos os perfis, sendo maior no perfil de vazão constante. Entre as abscissas km-10 e km-5 os perfis mostram uma tendência à estabilidade, com baixa declividade. Entre as abscissas km-5 e 0 ambos os perfis mostraram erosão, sendo esta tendência maior no perfil de vazão média, com valores finais de $-2,26 \times 10^6$ ton e de $0,06 \times 10^6$ ton, para o hidrograma e vazão constante, respectivamente. Se observa que para este comparativo se apresentaram diferenças significativas entre ambas as simulações em comparação com comparativos resultados com similares regimes de vazões, mas com a geometria idealizada. Neste caso é evidente

o efeito que tem a geometria sobre a resposta morfológica do delta, onde as diferentes profundidades de cada seção transversal afetam consideravelmente, resultando maiores erosões e sendo mais sensível às variações de vazão ao longo do ano.

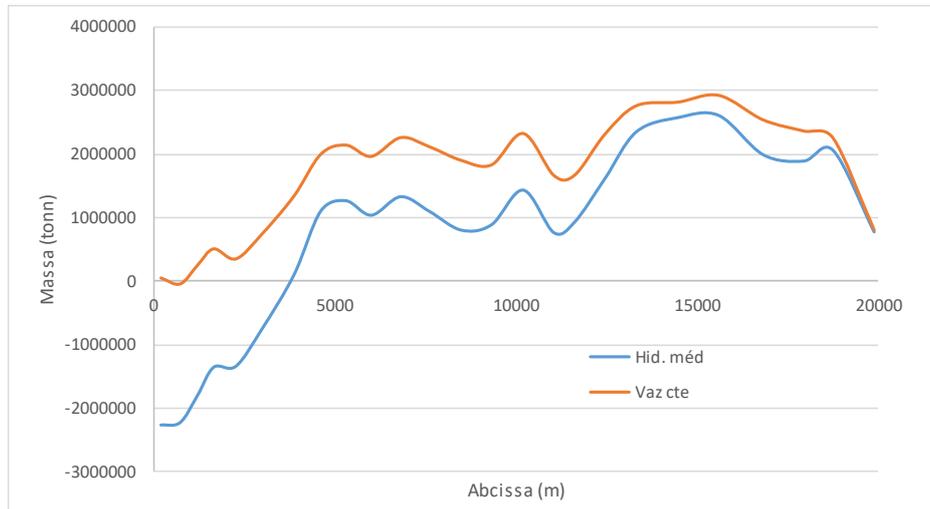


Figura 54. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal de geometria real com hidrorrama médio e vazão constante

Além disso, as variações intra anuais de vazões apresentaram diferentes respostas morfológicas. Se avaliaram as diferenças de profundidade pelo talvegue (erosões e sedimentações) entre períodos compreendidos durante os picos de amplitude de vazões do capítulo 1. Se selecionaram 3 perfis característicos de três períodos do ano: o período entre 30 de setembro até 31 de dezembro em que se apresenta o Pico 4 (vazão média: $8100 \text{ m}^3/\text{s}$), o período entre 1 de janeiro e 30 de abril em que se apresenta o Pico 1 (vazão média: $5600 \text{ m}^3/\text{s}$), o período entre 1 de maio e 31 de agosto em que se apresentam os Picos 2 e 3 (vazão média: $7000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Na Figura 55 se observa que as maiores mudanças no fundo acontecem durante a presença do Pico 4, quando acontecem as maiores vazões do ano, com tendência à erosão na maior parte do delta com algumas zonas de sedimentação como são as abcissas: km-19, km-16, km-10, km-7 e km-5. Nos períodos compreendidos para o Picos 1, 2 e 3; as mudanças no leito são mínimas em comparação às acontecidas durante o Pico 4, com diferença da abscissa km-19, em que apresenta maior sedimentação durante o Pico 1, e com a mesma tendência, mas com menor magnitude de sedimentação durante os Picos 2 e 3. A simulação realizada começa no dia 30 de setembro, por tanto a ordem cronológica

dos perfis mostrados na figura 55 é: 30 de dezembro, 30 abril e 30 de agosto. Comparando cada um dos perfis da Figura 55, se observa que a maior mudança no talvegue acontece para o perfil de 30 de dezembro, quando se apresentam as altas vazões, depois, o delta apresenta tendência a estabilizar-se ou sedimentar-se durante as baixas e médias vazões. Neste caso, a morfologia do delta é sensível às variações da vazão, concentrando-se as principais mudanças durante o período de altas vazões (setembro-dezembro).

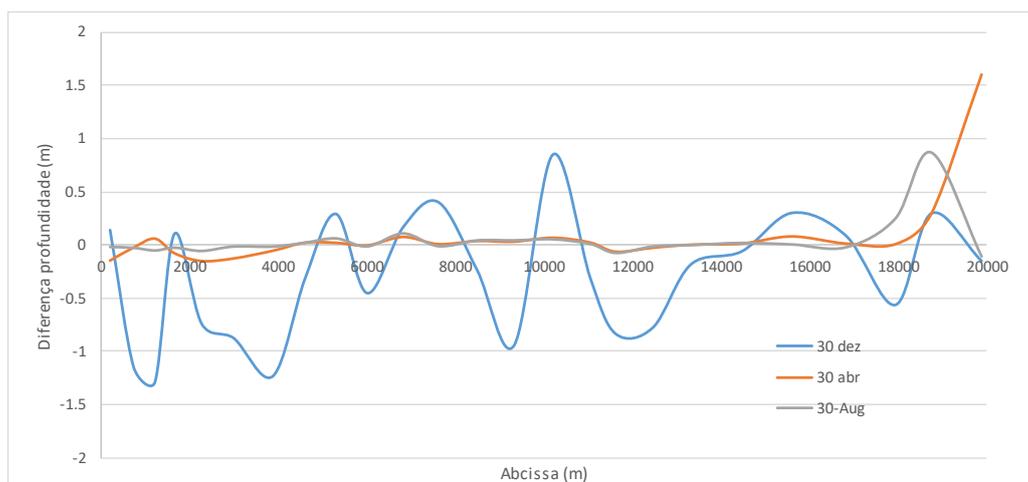


Figura 55. Comparativo das diferenças de profundidade ao longo do ano em três períodos: 30 dezembro, 30 abril e 30 de agosto

3.6.4 Influência da maré: Geometria real com vazão média com maré VS. geometria real com vazão média com maré sintética (M2)

O gráfico comparativo entre os perfis do talvegue finais (Figura 56) mostra uma similitude entre ambos os perfis, sem apresentar diferença significativa nas zonas onde acontecem as erosões e sedimentações (diferenças inferiores a 18 cm). Na Figura 57 se mostram as diferenças de profundidade (erosão e sedimentação) entre o perfil do talvegue final e o inicial das simulações com o hidrograma médio (percentil 50) e geometria real para um cenário com maré e um cenário sem maré (maré sintética mínima). Novamente, o gráfico mostra similaridade em ambos os perfis com mínimas diferenças (18 cm) nos valores das diferenças de profundidade.

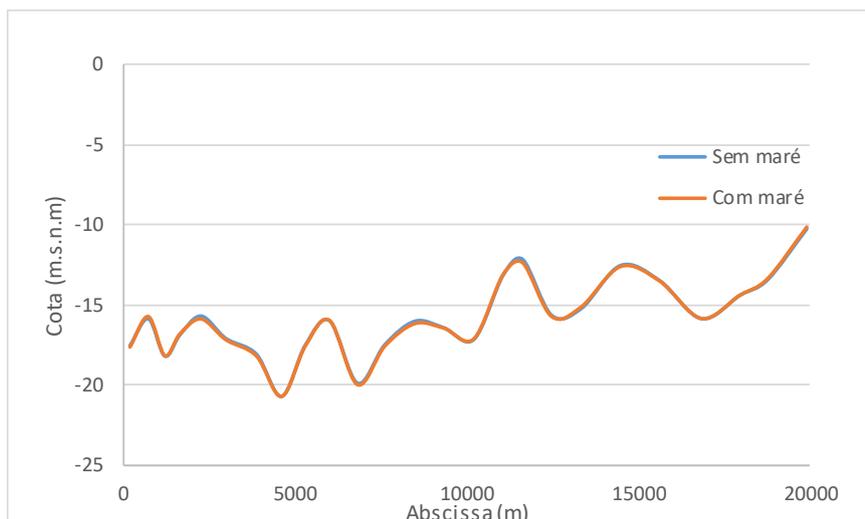


Figura 56. Comparativo dos perfis pelo talvegue da geometria real com hidrograma médio com maré e hidrograma médio com maré sintética

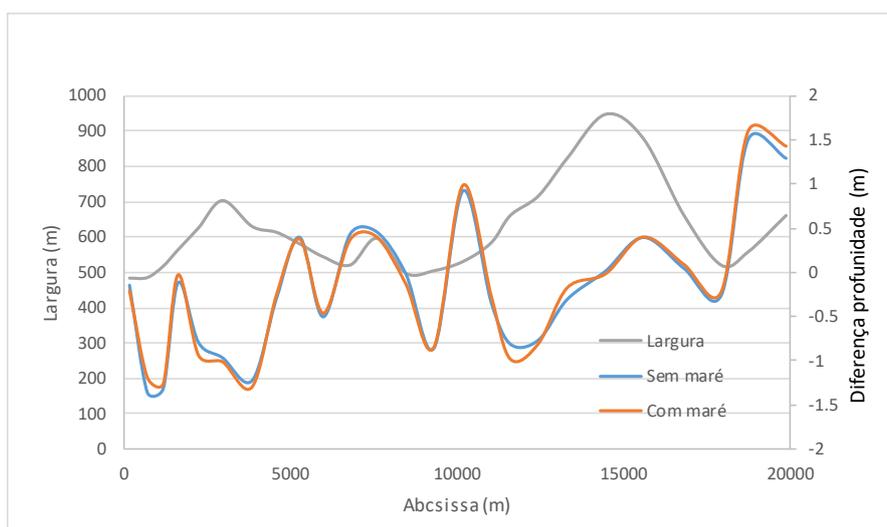


Figura 57. Diferenças de profundidade VS largura do delta usando a geometria real para o comparativo entre hidrograma médio com maré e maré sintética

O perfil comparativo de massa acumulado longitudinal (Figura 58) para as condições hidrodinâmica com maré e sem maré, mostra similaridade no resultado final para ambos perfis, apresentando-se as mesmas tendências de erosões e sedimentações nos mesmos lugares para ambos perfis. Se observa um leve incremento na sedimentação para o perfil com maré na abcissa km-15 e km-10. O valor da massa acumulada final é de erosão em ambos dos perfis com valor de $-2,26 \times 10^6$ ton na condição com maré e de $-2,23 \times 10^6$ ton na condição sem maré. Com a simulação realizada com maré sintética que apresenta uma amplitude mínima, para simular um cenário sem maré, se verifica o

comentado no Capítulo 1, em que o efeito da maré astronômica na morfologia do delta do rio Magdalena seria mínimo em comparação ao efeito da vazão, sendo a vazão o fator hidrodinâmico dominante.

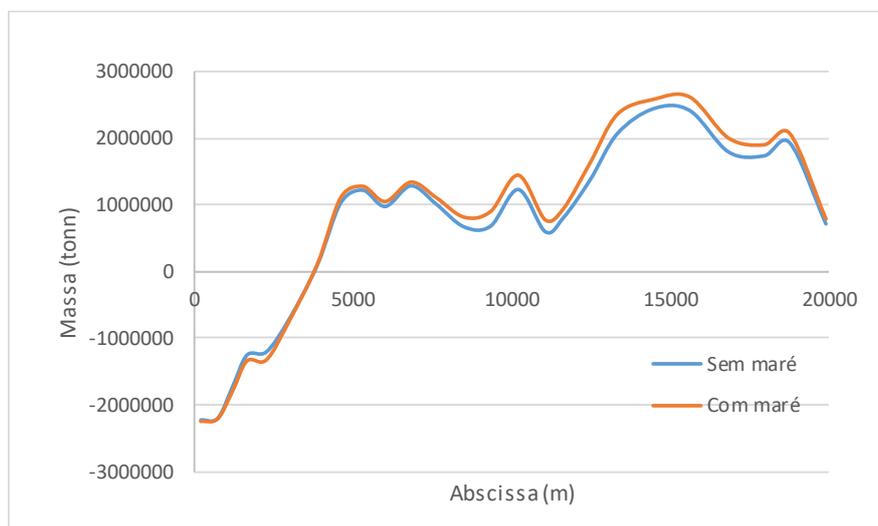


Figura 58. Comparativo das curvas de sedimento acumulado longitudinal (valores positivos: sedimentação, valores negativos: erosão) da geometria real usando hidrograma médio com maré e hidrograma médio com maré sintética

3.7 SITUAÇÃO ATUAL NO DELTA (JULHO 2021)

Atualmente o canal de acesso no delta do rio Magdalena apresenta problemas de sedimentação que dificultam o ingresso de navios aos terminais portuários, precisando-se de desvios das embarcações para outros portos vizinhos, afetando a economia portuária e da cidade de Barranquilla. Entre os anos de 2004 e 2008 foram realizados estudos e construção de obras hidráulicas para aumentar a profundidade no canal navegável até 12 m, mas na atualidade, a profundidade tem caído até 7 m em alguns setores dentro do delta (El Tiempo, 2021, “Complejo panorama en acceso al Puerto de Barranquilla: calado baja a 6,9 m”). A solução das autoridades portuárias para enfrentar o problema da alta sedimentação consiste em dragar de forma emergencial as zonas com problemas usando-se dragas pequenas sem nenhum tipo de planificação, dando solução no curto prazo. Contudo, passado um tempo o rio volta a ter as mesmas profundidades anteriores ao dragado. Usando os níveis diários da estação Calamar do registro 2013-2021, se calcularam os valores da vazão com uma equação de regressão a partir dos valores de nível diário na estação Calamar e da vazão medida (ADCP) no delta (Figura 59).

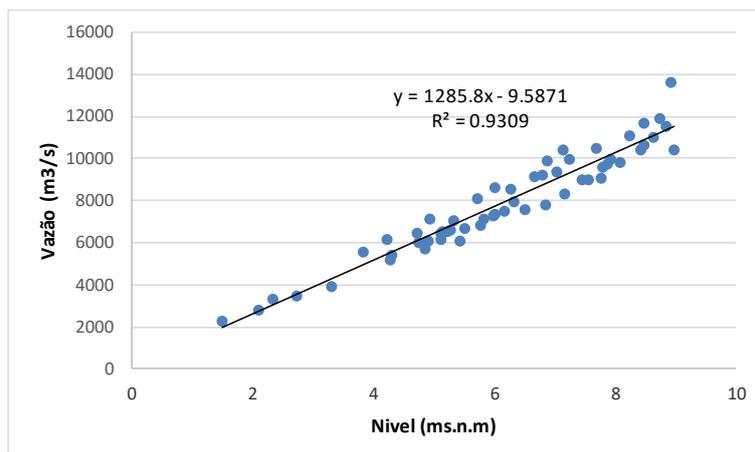


Figura 59. Vazão medida (ADCP) no delta VS níveis do rio na estação Calamar

Com base nas vazões diárias obtidas a partir da equação de regressão mostrada na Figura 59, se criou uma curva de frequência excedida e se comparou com a vazão dominante no delta ($9000 \text{ m}^3/\text{s}$), observando-se que só no 2,4% do tempo as vazões foram maiores à vazão dominante (Figura 60). Por outra parte, durante o período 2013-2021 a vazão máxima foi de $9400 \text{ m}^3/\text{s}$, levemente maior à vazão dominante. A vazão média (2013-2021) foi de $5400 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo este valor menor à vazão média histórica ($7100 \text{ m}^3/\text{s}$) e similar à vazão média das vazões mínimas mensais no período usado neste estudo: 2006-2012 ($5200 \text{ m}^3/\text{s}$). No período 2013-2021 se registrou a menor vazão histórica ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$), acontecida durante o ano 2015 em que se teve a presença de El Niño com intensidade forte. De acordo aos resultados obtidos neste estudo, a causa da alta sedimentação presente (ano 2021) no delta do rio Magdalena é devida a um período longo (9 anos) de baixas vazões prolongadas, onde as vazões superiores à vazão dominante só têm acontecido durante um período breve de tempo e, somado às atividades de dragagens realizadas sem planificação que intensificam os processos de sedimentação.

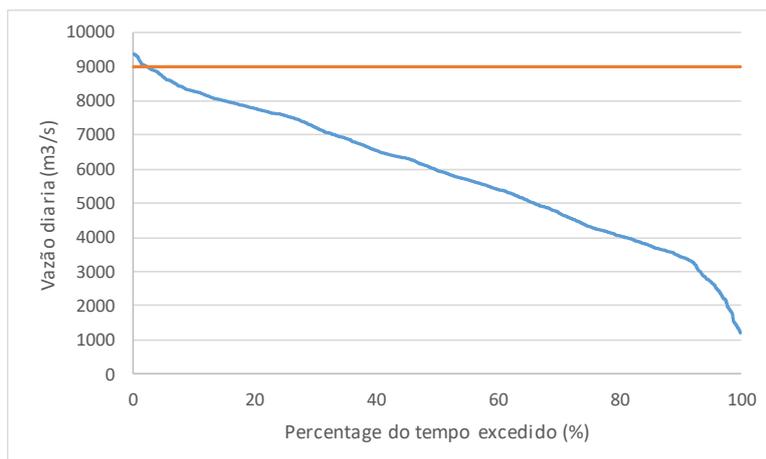


Figura 60. Curva de frequência excedida das vazões diárias a partir dos níveis da estação Calamar no período 2013-2021

3.8 CONCLUSÕES

Se realizaram simulações de transporte de sedimento em HEC-RAS com o objetivo de analisar a resposta morfológica do delta do rio Magdalena para a diferentes cenários hidrodinâmicos. De acordo com Alvarado et al. (2008), os processos de sedimentação no delta do rio Magdalena são originados pelo transporte de arrasto e não pelo transporte em suspensão. A calibração morfológica do modelo implementado respondeu corretamente para a carga do sedimento por arrasto, correspondente ao 7 % da carga total. Se simularam duas geometrias, uma em forma de canal idealizado, com declividade longitudinal de 0,03%, e uma geometria real, com base em batimetrias de junho de 2011. O comparativo dos resultados entre as duas geometrias mostrou que para o cenário de canal idealizado, o delta apresenta maior sedimentação que para o cenário de geometria real. Este comportamento pode ser explicado pela diferença das profundidades nas secções transversais da geometria idealizada e da geometria real, mostrando o efeito que tem um canal altamente dragado, gerando maior sedimentação.

Diferentes condições hidrodinâmicas foram simuladas, representando um ano de vazões altas correspondente ao ano 2011-2012, um ano com vazões médias correspondentes ao hidrograma do percentil 50, um ano com vazões baixas correspondentes ao ano 2015-2016, e com vazão constante igual à vazão média histórica de 7000 m³/s.

Nas simulações com a geometria idealizada, as zonas de erosão (km-1, km-10 e km-18) e sedimentação (km-3, km-5, km-12 e km-19) foram as mesmas para os cenários hidrodinâmicos de vazão constante e hidrograma médio. Por outra parte, para as simulações com geometria real, se observou que para o cenário de vazões médias se apresentam sedimentações (km-5, km-12 e km-19) e erosões (km-1, km-3 e km-11) de forma alternada ao longo do delta, similares ao cenário com vazão constante, ocorrendo sedimentação pronunciada entre as abcissas km-20 e a abcissa km-12 (zonas com maior largura) e erosão pronunciada entre as abcissas km-5 até a abcissa 0 (zonas com menor largura). No cenário de hidrograma com vazão alta o delta apresenta tendência à erosão em todo o trecho (com exceção da abcissa km-19), enquanto que no cenário de hidrograma com vazão baixa o delta apresenta tendência à sedimentação (com exceção das abcissas km-12 e km-3 até km-1).

Os resultados mostraram a influência dominante da variabilidade das vazões sobre a morfologia do delta. Comparando os resultados com as zonas críticas que requerem dragagens atualmente, correspondentes aos setores entre km-5 e km-7, km-10,5 e km-13,5, km-14-9 e km-15,2 e km-20,9 e km-21,6; se observa considerável coerência com as zonas de erosões e sedimentação no delta. Os resultados encontrados nas simulações em HEC-RAS verificam as conclusões do Capítulo 1 deste estudo, em que se observou através das análises das batimetrias que durante anos com altas vazões (La Niña), o delta apresenta tendência à erosão e para anos com baixas vazões (El Niño) o delta apresenta tendência à sedimentação. As simulações com vazão constante mostraram similitude nos resultados com os cenários de vazão média (percentil 50), só se apresentando diferenças na magnitude da sedimentação, sendo maior no cenário de vazão constante. Na escala intra anual, as maiores mudanças se apresentaram durante o período de vazões altas (setembro-dezembro) em comparação aos demais períodos do ano, em que se apresentam tendências à estabilidade ou sedimentação.

O cenário com mínima maré apresenta similaridade aos resultados com maré completa e evidenciam o pouco efeito das oscilações astronômicas sobre a morfologia do delta. Possíveis mudanças do nível médio, associadas à efeitos não astronômicos como a maré meteorológica poderiam ter maior influência devido ao efeito de remanso da vazão fluvial. Este efeito não foi avaliado nesta tese.

4 CONCLUSÕES GERAIS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No canal distributario do delta do rio Magdalena se localiza o canal de acesso ao porto de Barranquilla, considerado o quarto porto mais importante de Colômbia. A relevância do porto na economia do país tem sido afetada pela sedimentação que acontece dentro do delta, alterando o normal trânsito de navios aos terminais portuários. Com base em medições de campo realizadas como parte de campanhas de monitoramento ao canal navegável (2006-2012), se analisou o comportamento hidrodinâmico e morfológico do delta do rio Magdalena, com o objetivo de poder entender as causantes das taxas de sedimentação que afetam ao canal navegável e contribuir no entendimento dos processos morfológicos atuantes sobre os deltas em geral.

As análises hidrodinâmicas no delta do rio Magdalena se basearam em dados de nível em 3 estações ao longo do delta e dados de vazões. Para a análise dos níveis se detectou que existe uma periodicidade na ocorrência de quatro picos de amplitude que definem a tendência anual da curva de níveis, apresentando-se só variação nas amplitudes ou magnitude destes quatro picos ao longo de tudo o registro disponível (45 anos). O fator causante da variação da amplitude dos níveis foi determinado com base numa prova qui-quadrada e um sistema lineal invariante no tempo (LTI), mostrando que o fenômeno ENSO é o principal fator sobre o comportamento dos níveis no delta do rio Magdalena.

A análise dos dados de vazões mostrou que a variação mensal das magnitudes é dependente do ENSO, mas, a tendência do comportamento mensal é independente do ENSO, apresentando-se as menores e maiores vazões de forma constante durante os mesmos meses do ano. Alta correlação foi identificada entre as anomalias da vazão e a série SOI (anomalias inferiores a -1 durante El Niño e anomalias superiores a +1 durante La Niña).

A análise morfológica foi realizada com base em um registro de 494 batimetrias mensais realizadas em oito regiões dentro do delta. A prova ANOVA mostrou que o volume médio anual foi diferente ao longo do período analisado, determinando assim que as condições morfológicas no delta do rio Magdalena têm sido instáveis durante 2006-2012. Este resultado difere do estabelecido em estudos anteriores, que afirmavam que o delta apresentava condições de estabilidade morfológica.

Com base nas diferenças de volumes entre meses adjacentes se determinou a taxa morfológica de cada setor de forma interanual e intranual. Na escala interanual se detectou que o delta apresentou uma tendência geral de erosão, sendo esse mesmo período afetado por um período de altas vazões. Nesse caso, se identificou que os anos com taxas de erosão corresponderam a anos com La Niña ou com períodos com anomalias de vazão positiva. Ao contrário, taxas de sedimentação se detectaram em anos com El Niño ou períodos com anomalias de vazão negativa.

Na escala intranual, utilizando uma curva de duração de vazões, se encontrou que durante o período de baixas vazões existe maior tendência à sedimentação, no período de altas vazões existe maior tendência à erosão e no período de vazões médias, a tendência de erosão e sedimentação é equivalente.

O modelo numérico 1D em HEC-RAS se elaborou para validar os resultados do Capítulo 1, simulando diferentes cenários hidrodinâmicos. O modelo foi construído, calibrado e validado com base nos dados medidos de vazão, nível e batimetrias. Se realizaram simulações com duração anual para diferentes cenários onde se modificou a geometria, a vazão e a influência da maré.

Os resultados das simulações foram comparados para avaliar a influência da geometria, em que se mostraram que os setores com sedimentação se apresentam em abscissas com larguras maiores e as zonas com erosão se apresentam em zonas com larguras menores. Também, a influência das maiores profundidades foi relevante ao apresentar-se diferenças nos resultados entre geometrias consideradas, indicando à possível influência das dragagens nas altas taxas de assoreamento. Por outra parte, os resultados dos diferentes cenários de vazão mostraram que a morfologia do delta apresenta tendência à erosão durante cenário com vazões altas característicos de anos com La Niña, e tendência à sedimentação em cenário com vazões baixas característico de anos com El Niño. A simulação com a condição de contorno sem maré, usando a componente de maré M2, mostrou similar resultado que com condição de contorno com maré, mostrando que o efeito da maré astronômica no delta do rio Magdalena seria mínimo, comparado com os efeitos gerados pelas mudanças da vazão.

Os resultados obtidos nesta tese permitem obter um melhor entendimento dos processos hidrodinâmicos e morfológicos atuantes no delta do rio Magdalena, que possam ajudar em melhorar as condições navegáveis do seu porto. As conclusões do primeiro

capítulo se obtiveram baseando-se em uma série de dados medidos, realizados durante um período consideravelmente longo do tempo, gerando uma maior robustez nos resultados, ressaltando-se que para muitos casos de estudo para outras regiões, não se dispõe da resolução ou extensão dos dados disponível neste estudo. Os resultados mostraram a correlação entre a hidrodinâmica e morfologia do delta com o fenômeno ENSO, podendo-se ser usada esta alta correlação nas políticas portuárias baseando-se na previsão do ENSO. Por outra parte, os resultados do capítulo 2 são congruentes aos obtidos no capítulo 1, mostrando a mesma resposta morfológica para diferentes cenários hidrodinâmicos representativos das distintas fases do ENSO.

Atualmente o delta apresenta condições de alta sedimentação que impedem uma ótima navegação, que podem ter sido afetadas pelo fenômeno El Niño do 2015-2016, ressaltando-se que desde essa data até o presente, não tem acontecidos períodos com consideráveis altas vazões. Na escala interanual se observa a tendência à erosão durante La Niña e tendência à sedimentação durante El Niño, sendo a ocorrência destes fenômenos de forma cíclica e aleatória. De outra maneira, na escala intranual, se apresentam tendências à erosão durante o período setembro-dezembro, época de maior vazão e sedimentação durante o período janeiro-abril, época de menor vazão. No período entre maio e agosto as taxas de erosão e sedimentação são equivalentes. Nos resultados do modelo 1D se observou que para o cenário de geometria idealizada, simulando-se um canal totalmente dragado com altas profundidades, o delta apresentou tendência à sedimentação de forma mais pronunciada que para o cenário com geometria real, usando as mesmas condições hidrodinâmicas. Este resultado mostra o efeito que podem ter as obras de dragagens sobre as taxas de sedimentação, devido principalmente à diminuição das velocidades nas zonas mais profundas que foram dragadas. Se observa que os setores com maiores dragagens na atualidade, foram os setores que apresentaram maiores taxas de sedimentação nas simulações.

Se destaca que as séries utilizadas apresentaram alguns períodos sem dados, e para o modelo se usaram os mesmos valores de n de Manning para todos os setores analisados. Além disso, não se teve a consideração dos efeitos de intrusão salina, maré meteorológica e ondas, forçantes que podem ser relevantes nos períodos de menores vazões (durante janeiro-março) e na entrada de frentes frias.

Os resultados desta tese serviriam para otimizar a gestão portuária, através de atividades de programação das dragagens de acordo aos resultados obtidos em escalas

intra e interanual, onde se detectou os períodos com maior tendência à sedimentação. Por outra parte, o modelo 1D, calibrado e validado do canal distributario no delta, pode ajudar para detectar as zonas mais susceptíveis à sedimentação e que apresentem um risco à navegação. Este modelo poderia adaptar-se facilmente nos cenários futuros no delta utilizando-se uma nova geometria a partir de batimetrias atualizadas.

Se recomenda para a implementação e aplicação das metodologias propostas nesta tese para futuros estudos, em realizar de forma continua e nas mesmas escalas temporais e espaciais, as mesmas medições de nível, vazão e batimetrias. A vantagem de medir continuamente o delta consiste em que permitirá realizar outras análises com diferentes ferramentas e metodologias, usando-se uma maior base de dados que ajudará a otimizar as atividades de navegação e reduzindo o impacto ambiental gerado por atividades antrópicas.

5 BIBLIOGRAFIA

Allison, M. A. (1998). Historical changes in the Ganges-Brahmaputra delta front. *Journal of Coastal Research*, 1269-1275

Alvarado, M., 1992. Río Magdalena (sector Calamar-Bocas de Ceniza): caracterización hidrosedimentológica y cuña salina basada en mediciones realizadas durante 20 campañas. Technical Report, Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Barranquilla, Colombia.

Alvarado, M., 1998. Cambios antrópicos en la desembocadura del Río Magdalena y su efecto en la zona. In: IOCARIBE-EAFIT (Ed), Memorias del Primer Seminario Nacional sobre Manejo Integrado de Zonas Costeras. EAFIT Press, Medellin, pp 3-6

Alvarado, M., Anaya, H., Castro, R., Castro, G., Caicedo, J., Corredor, H., ... & Vargas, G. (2008). Río Magdalena, navegación marítima y fluvial (1986-2009). *Ed. Uninorte, Barranquilla, Colombia.*

Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. Hydrologic Engineering Center Davis CA.

Complejo panorama en acceso al Puerto de Barranquilla: calado baja a 6,9 m. (2021, agosto 22). Recuperado de <http://www.eltiempo.com>

Diskin, M. H., & Boneh, A. (1975). Determination of an optimal IUH for linear, time invariant systems from multi-storm records. *Journal of Hydrology*, 24(1-2), 57-76

Dooge, J. (1973). Linear theory of hydrologic systems (No. 1468). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Dooge, J. C., & O'Kane, P. (2003). Deterministic Methods in Systems Hydrology: IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press

Calado autorizado para el Puerto de Barranquilla cayó a 8.3 metros. (2020, noviembre 15). Recuperado de <http://www.elheraldo.com.co>

Elliott, T., & Reading, H. G. (1986). Sedimentary environments and facies. *Siliciclastic shorelines. Blackwell, Oxford*, 155-188

- Gutiérrez, F., & Dracup, J. A. (2001). An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Colombia using El Niño–Southern Oscillation indicators. *Journal of Hydrology*, 246(1-4), 181-196
- Hanley, D. E., Bourassa, M. A., O'Brien, J. J., Smith, S. R., & Spade, E. R. (2003). A quantitative evaluation of ENSO indices. *Journal of Climate*, 16(8), 1249-1258.
- Harmar, O. P., Clifford, N. J., Thorne, C. R., & Biedenharn, D. S. (2005). Morphological changes of the Lower Mississippi River: geomorphological response to engineering intervention. *River Research and Applications*, 21(10), 1107-1131
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Otero, L. J., Ortiz, J. C., & Conde, M. (2017). Distribución vertical de sedimentos en suspensión en la zona de desembocadura del Río Magdalena, Colombia. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 724-736
- Jiang, C., Pan, S., & Chen, S. (2017). Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: Causes and environmental implications. *Geomorphology*, 293, 93-107
- Kataoka, T., Hinata, H., & Kato, S. (2013). Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter. *Marine pollution bulletin*, 77(1-2), 266-273
- Kennish, M. J. (2016). *Encyclopedia of Estuaries*. Springer
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes: a new perspective*. Oxford University Press, New York, 400 p.
- Lozano, A. (1993). Análisis armónico y predicción de la marea para la Bahía de Cartagena. *Trabajo de grado. Facultad de Oceanografía. Escuela Naval Almirante Padilla. Cartagena (Colombia)*
- Mahato, S., & Chakraborty, A. (2016). EKF Based Parameter Identification of LTI System from Seismic Response Measurements. *Procedia Engineering*, 144, 360-365
- Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelcz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology*, 400, 12-23.

- Monge-Ganuzas, M., Cearreta, A., & Evans, G. (2013). Morphodynamic consequences of dredging and dumping activities along the lower Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve, southeastern Bay of Biscay, Spain). *Ocean & coastal management*, 77, 40-49.
- Norton, J. P., & Chanut, J. G. (2005). Linear time-varying models to investigate complex distributed dynamics: A rainfall-runoff example. *Mathematics and Computers in Simulation*, 69(1-2), 123-134
- Oliveira, J. C., Aguiar, W., Cirano, M., Genz, F., & de Amorim, F. N. (2018). A climatology of the annual cycle of river discharges into the Brazilian continental shelves: from seasonal to interannual variability. *Environmental earth sciences*, 77(5), 192.
- Ortiz-Royero, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J., & Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 13(11).
- Ospino, S., Restrepo, J. C., Otero, L., Pierini, J., & Alvarez-Silva, O. (2018). Saltwater intrusion into a river with high fluvial discharge: a microtidal estuary of the Magdalena River, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 34(6), 1273-1288.
- Passalacqua, P. (2017). The Delta Connectome: A network-based framework for studying connectivity in river deltas. *Geomorphology*, 277, 50-62.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water resources research*, 37(8), 2169-2178
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), 201-222
- Prins, A. (1973). Río Magdalena and Canal del Dique survey project.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of hydrology*, 235(1-2), 137-149.
- Restrepo, J. C., Ortiz, J. C., Maza, M., Otero, L., Alvarado, M., & Aguirre, J. (2012, October). Estimating fluvial discharge in the Caribbean seaboard of Colombia: Magnitude, variability and extreme events. In *Proceedings of the international conference on coastal engineering* (pp. 1-6)

Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., ... & Marriaga, L. (2016). Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a period of intense change and human intervention (1990–2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575-589

Richards, K.S. (1982). *Rivers: Form and Processes in Alluvial Channels*. Ed. Methuen, Londond, U.K., 358 p.

Sabatier, F., Maillet, G., Provansal, M., Fleury, T. J., Suanez, S., & Vella, C. (2006). Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. *Marine Geology*, 234(1-4), 143-157

Sedimentación dificulta entrada a Puerto de Barranquilla. (2017, fevereiro 16). Recuperado de <http://www.eltiempo.com>

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78

Van Rijn, L. C. (2005). Estuarine and coastal sedimentation problems. *International Journal of Sediment Research*, 20(1), 39-51.

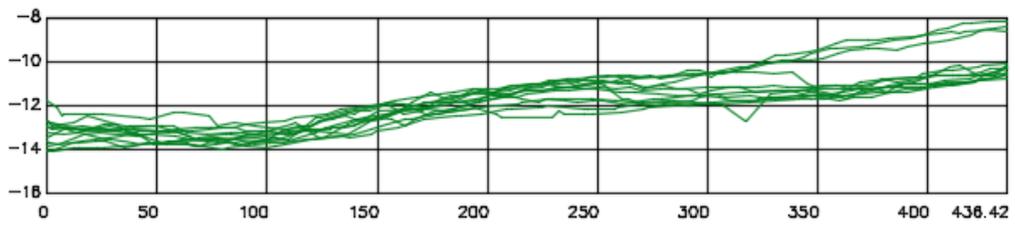
Wu, C. S., Yang, S., Huang, S., & Mu, J. (2016). Delta changes in the Pearl River estuary and its response to human activities (1954–2008). *Quaternary International*, 392, 147-154

6 ANEXOS

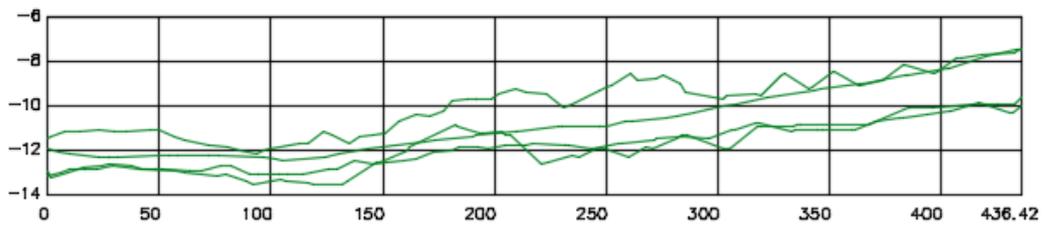
6.1 ANEXO 1 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS SETORES BATIMÉTRICOS



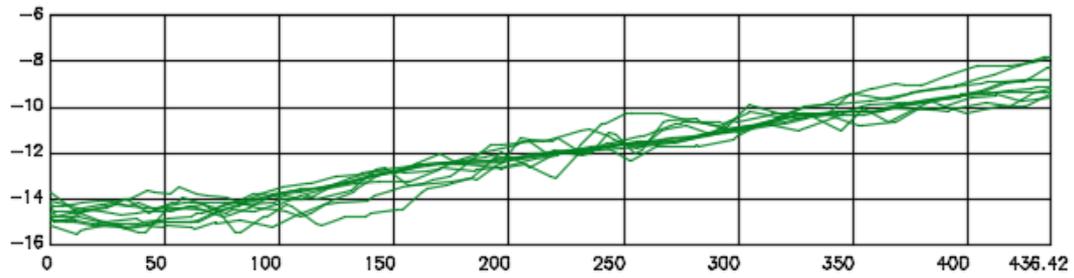
SETOR 1



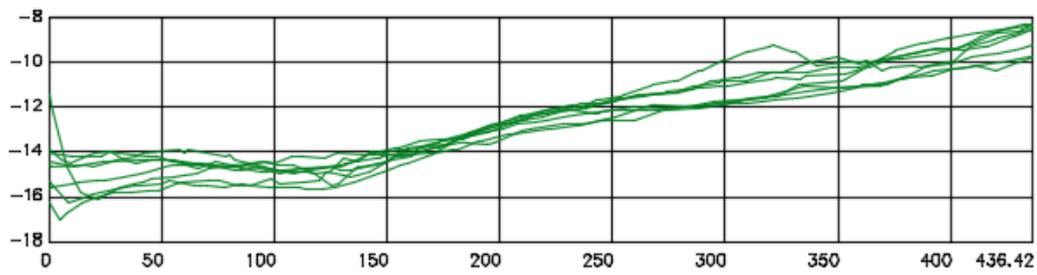
2006



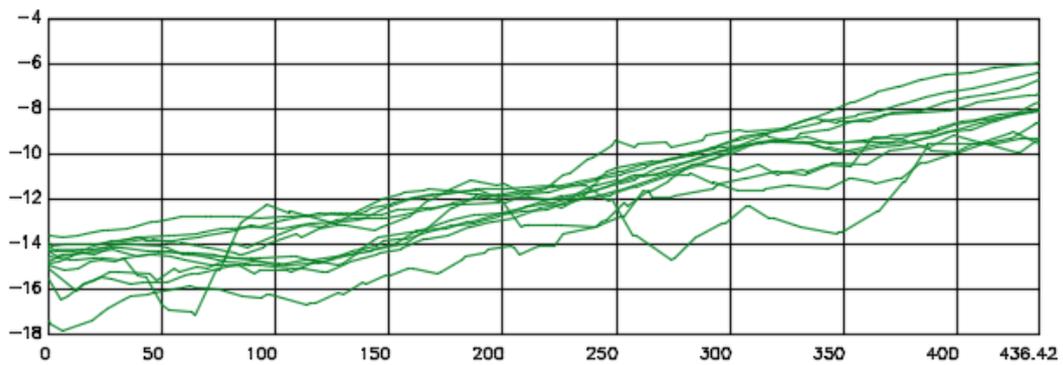
2007



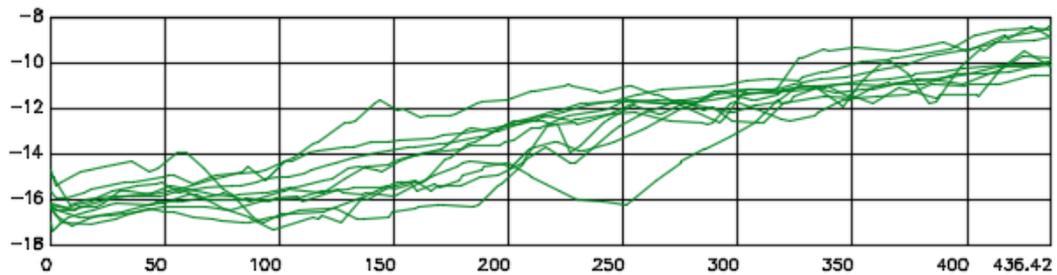
2008



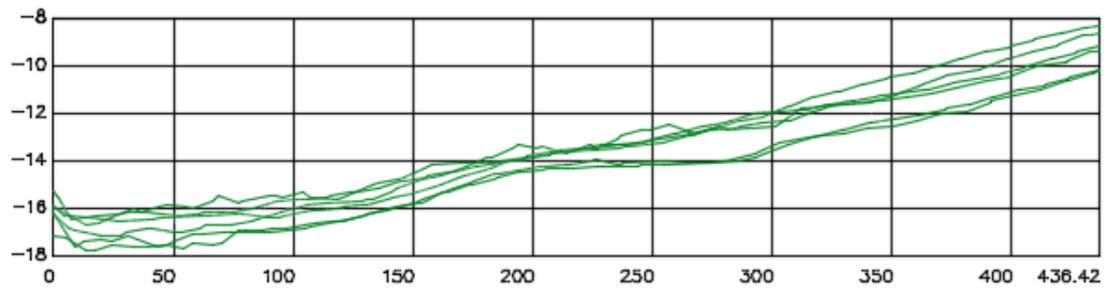
2009



2010

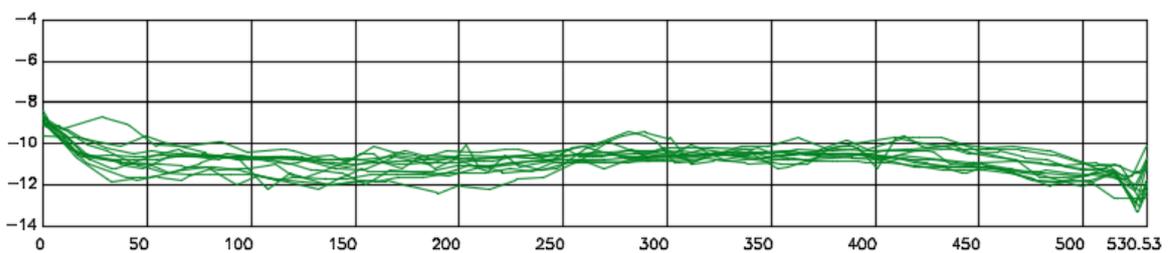


2011

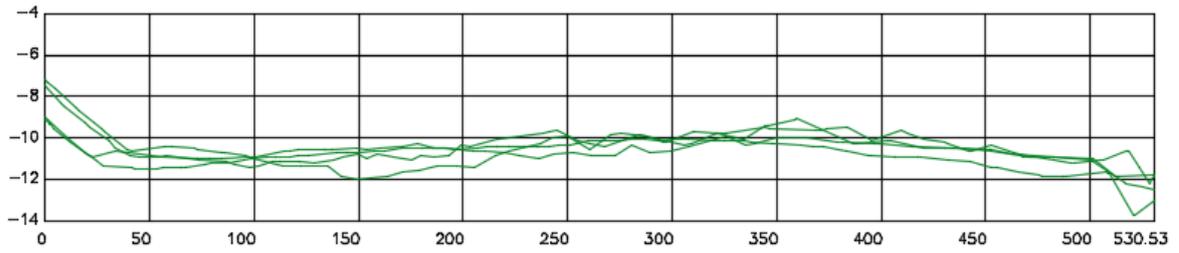


2012

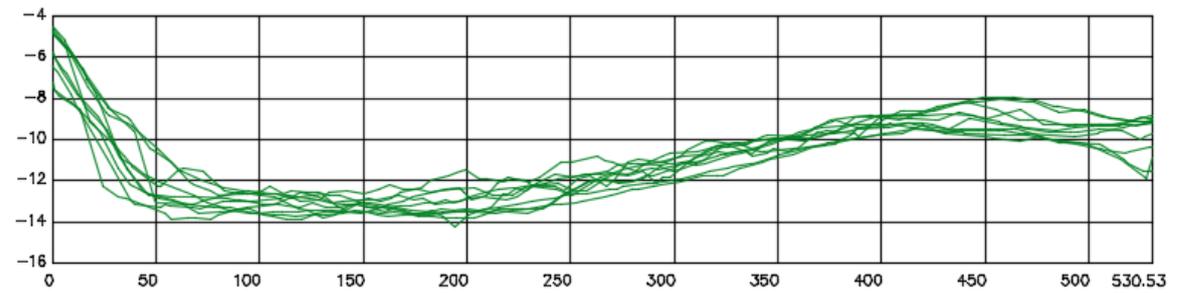
SETOR 2



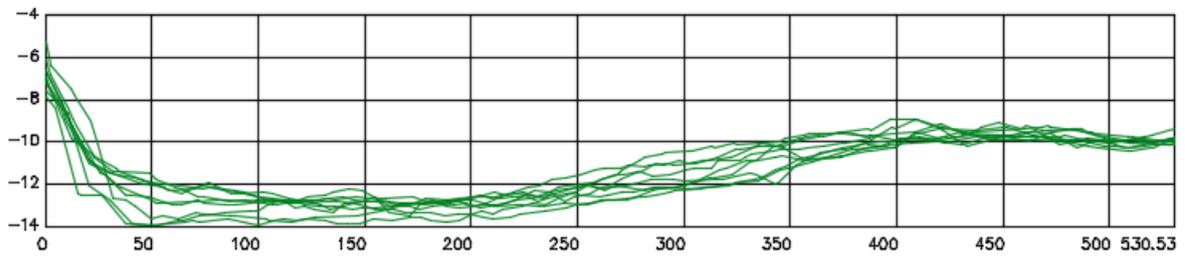
2006



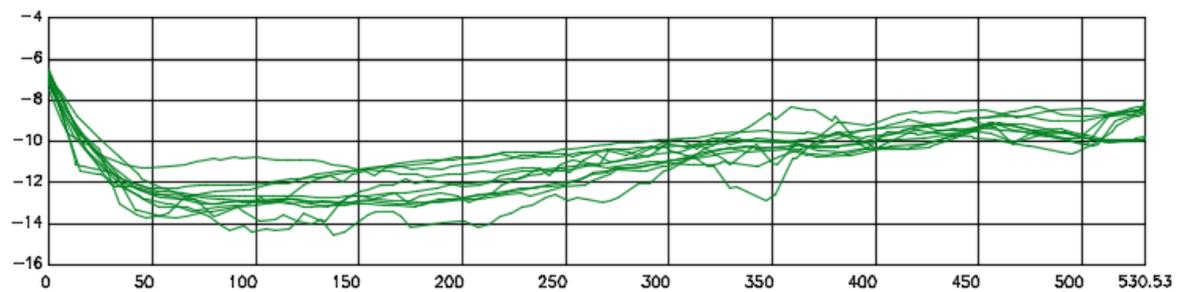
2007



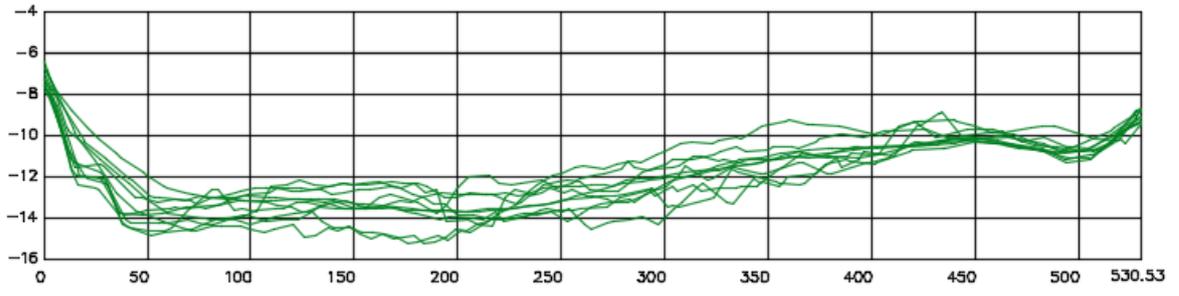
2008



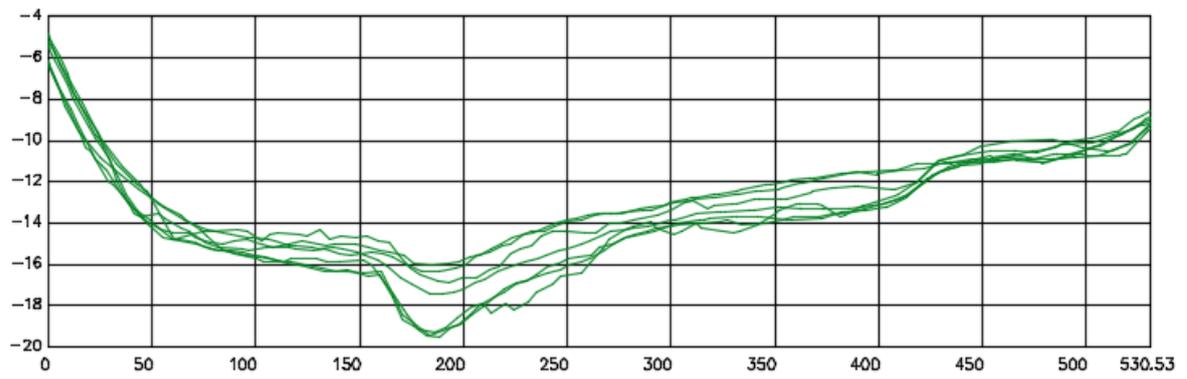
2009



2010



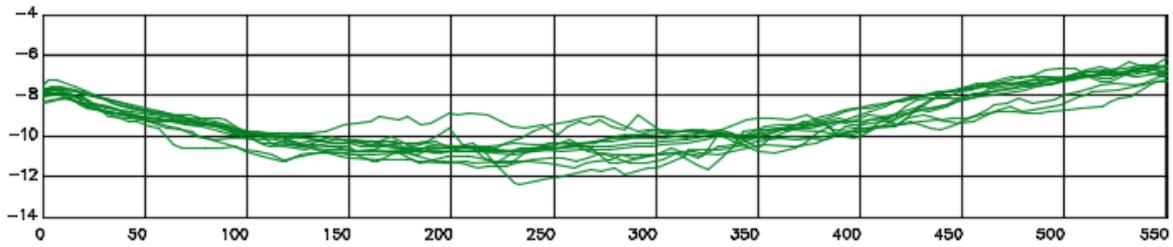
2011



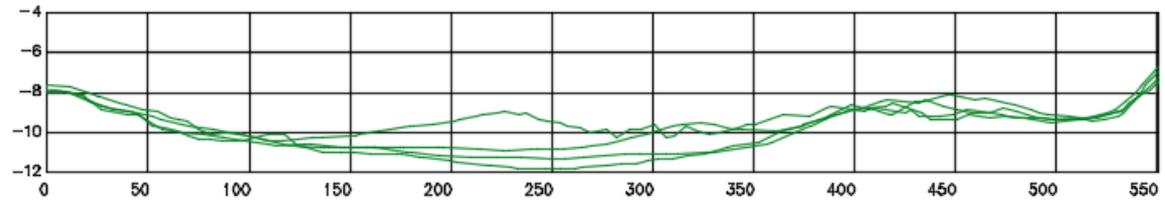
2012

SETOR 3

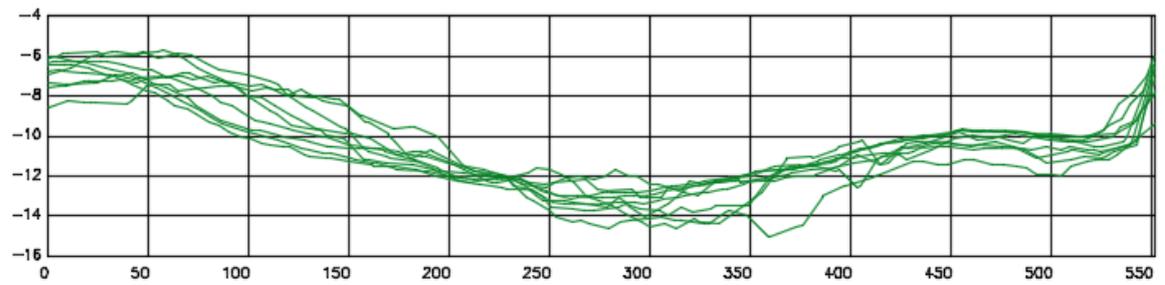




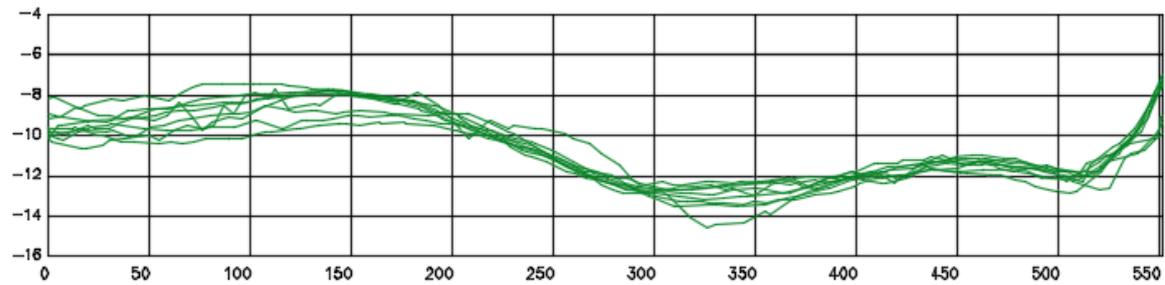
2006



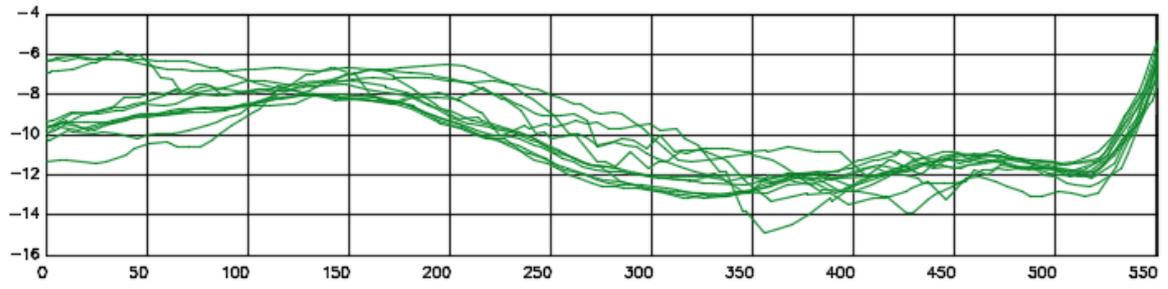
2007



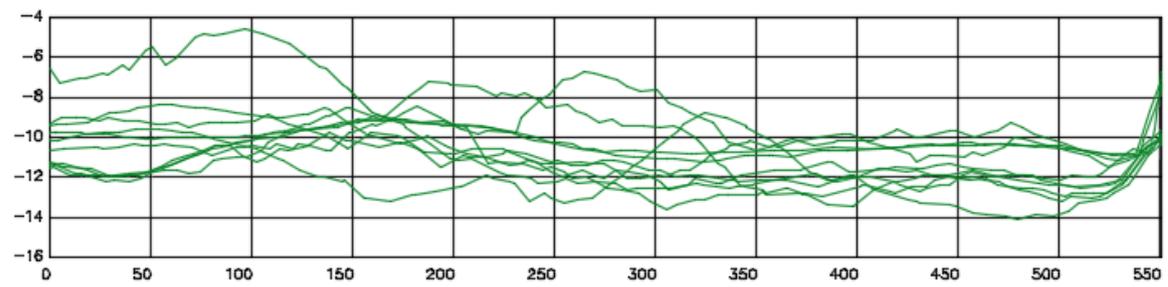
2008



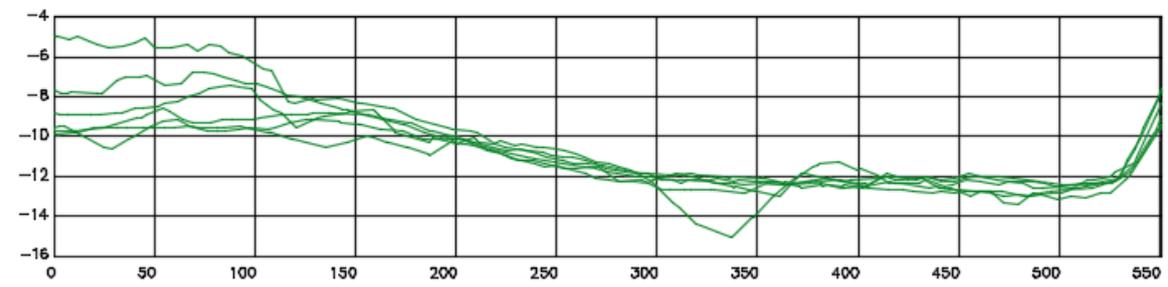
2009



2010

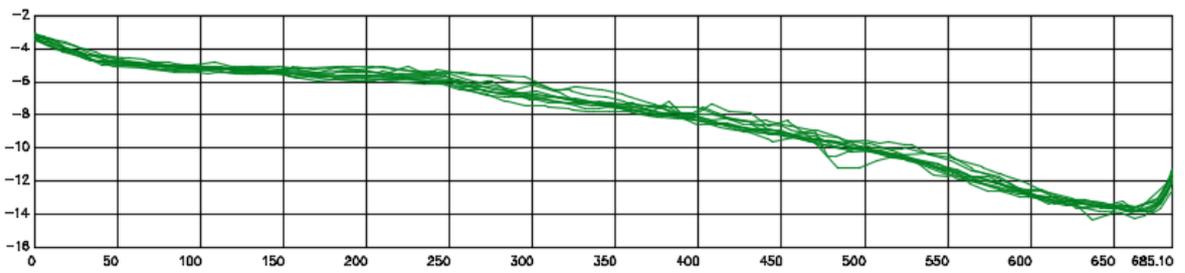


2011

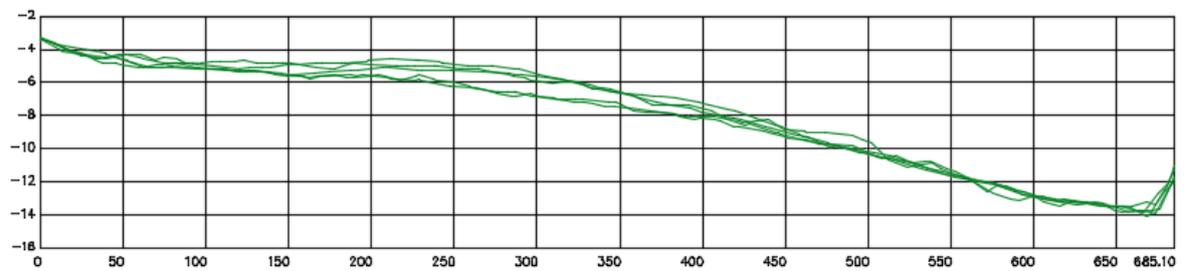


2012

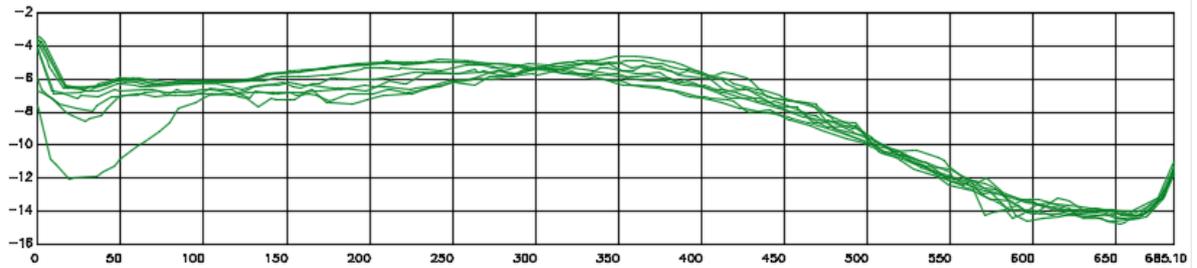
SETOR 4



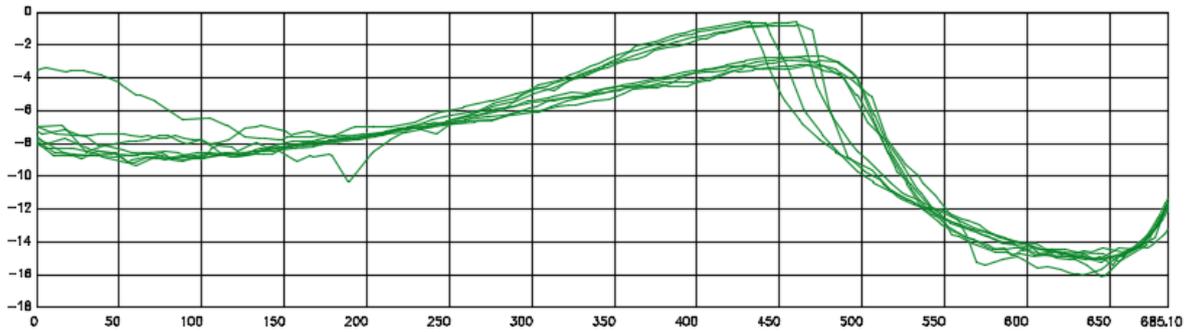
2006



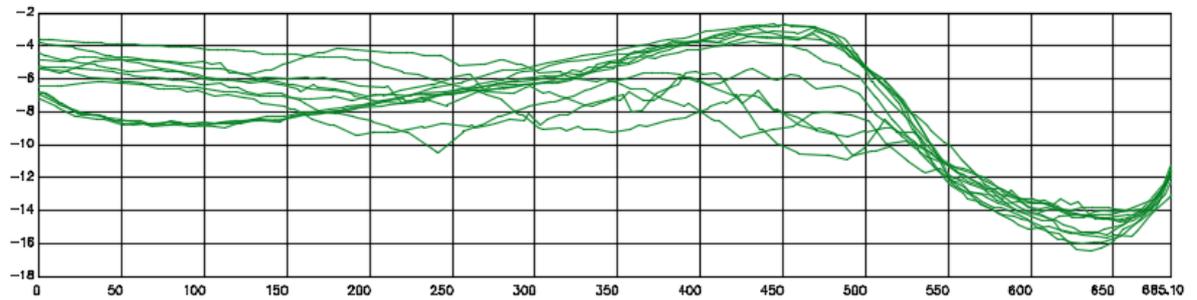
2007



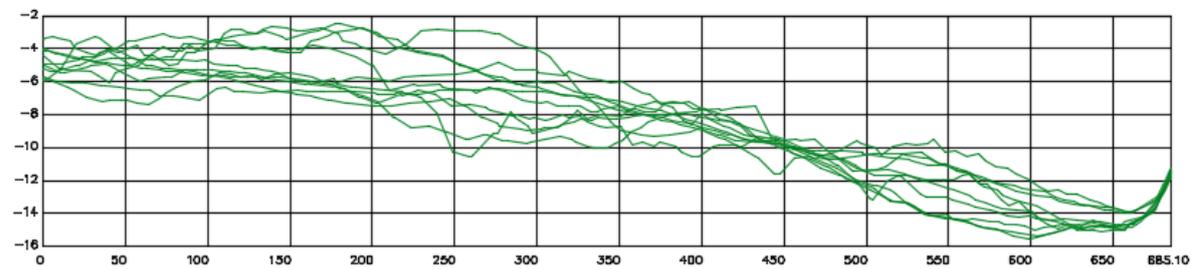
2008



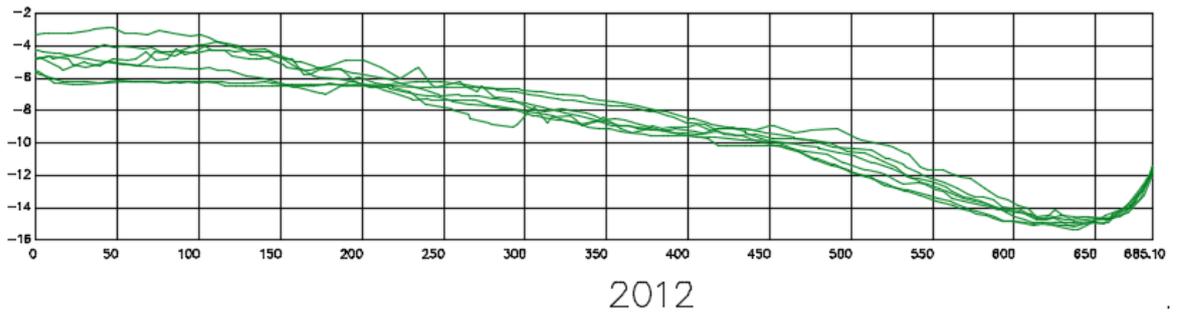
2009



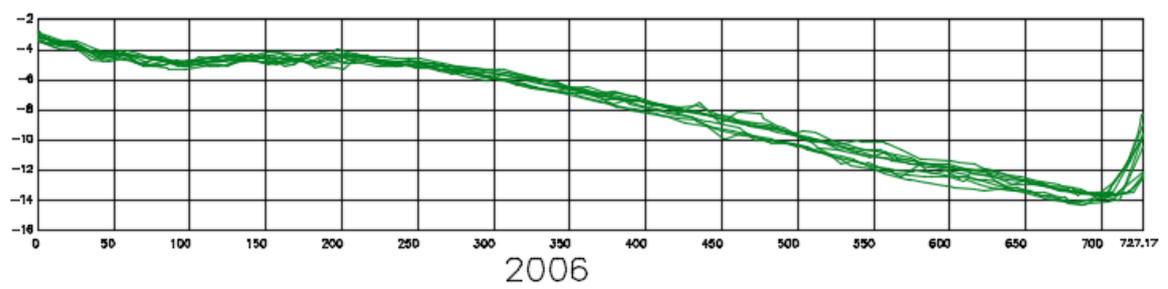
2010

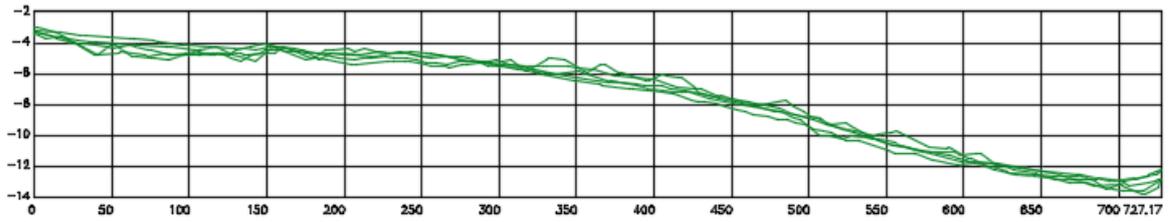


2011

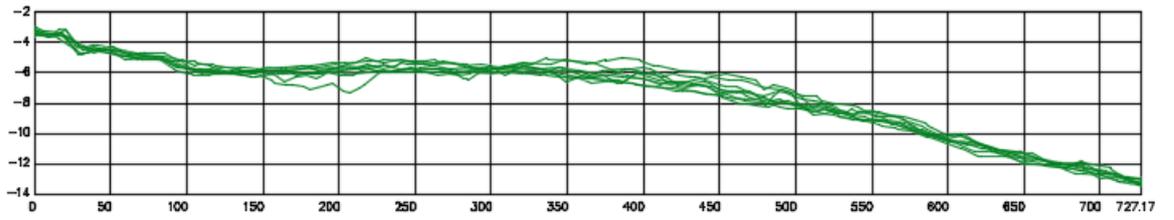


SETOR 5

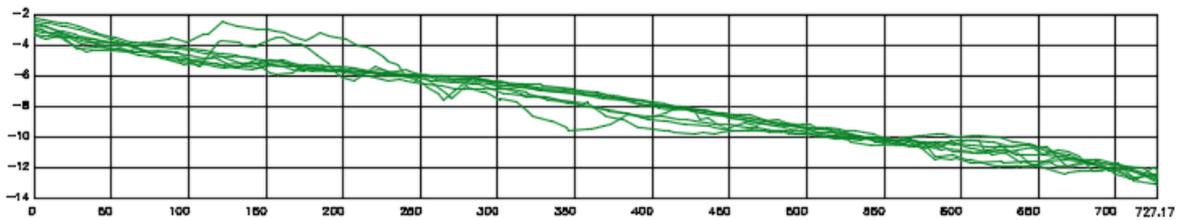




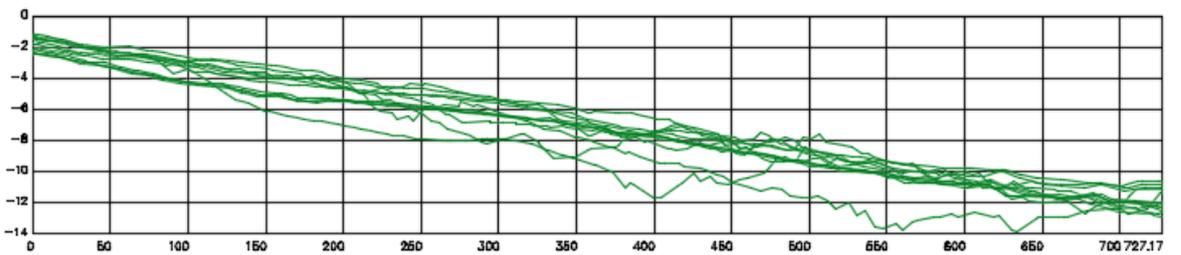
2007



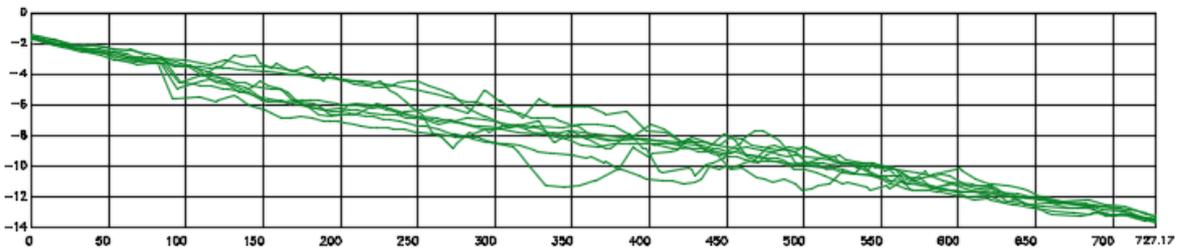
2008



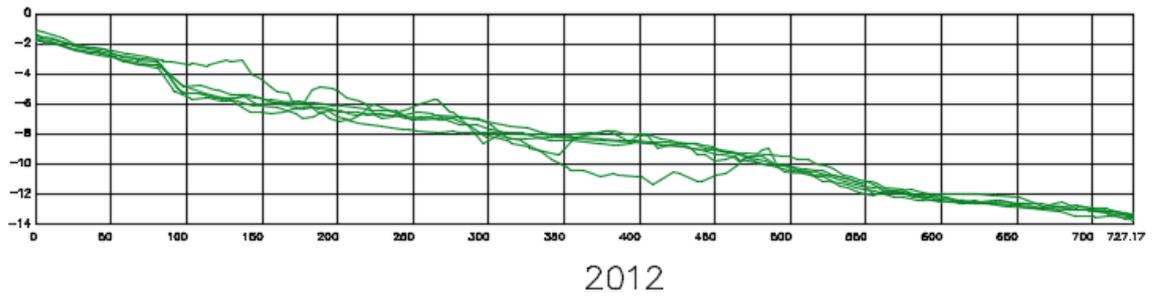
2009



2010

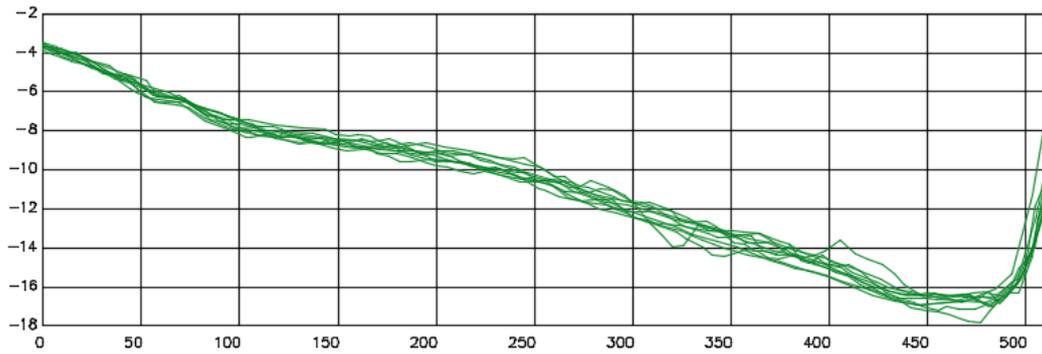


2011

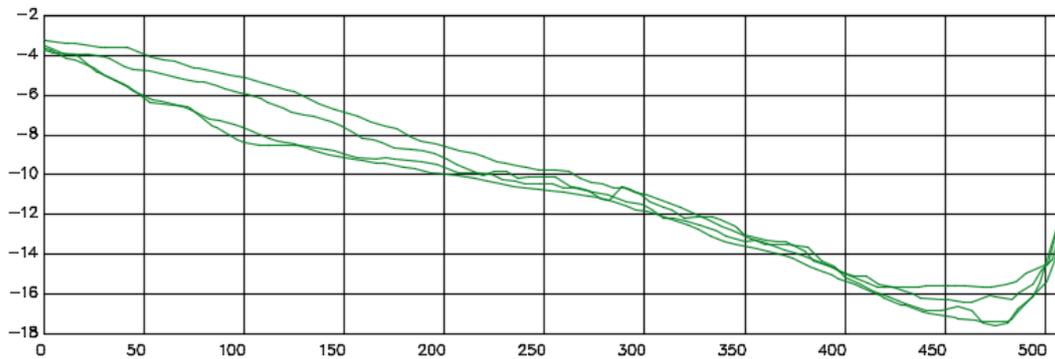


SETOR 6

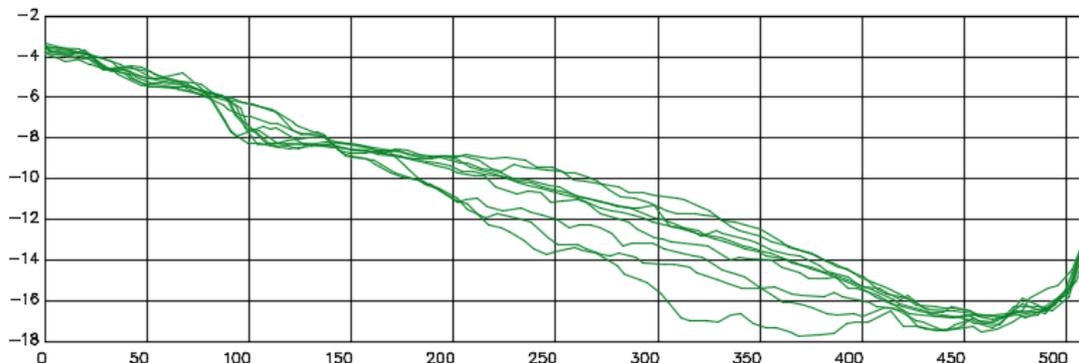




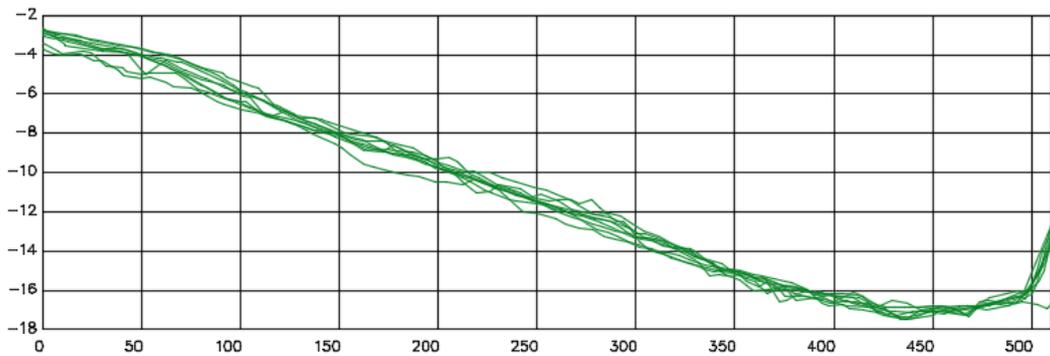
2006



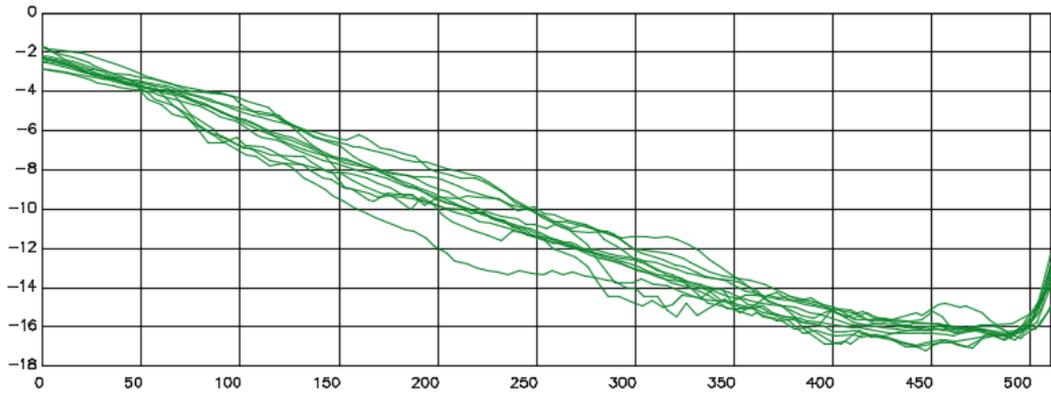
2007



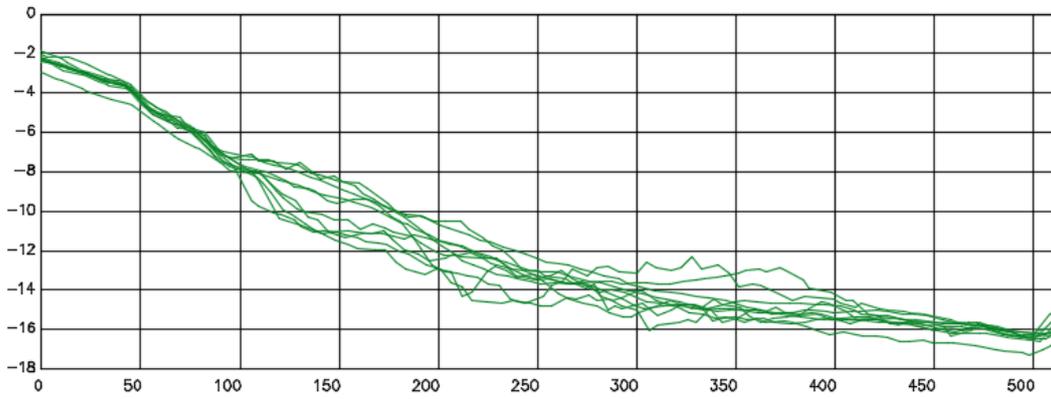
2008



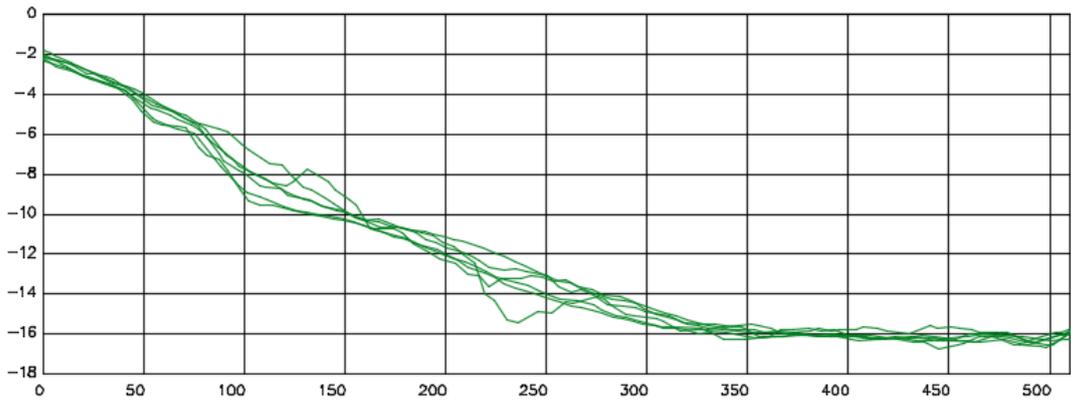
2009



2010

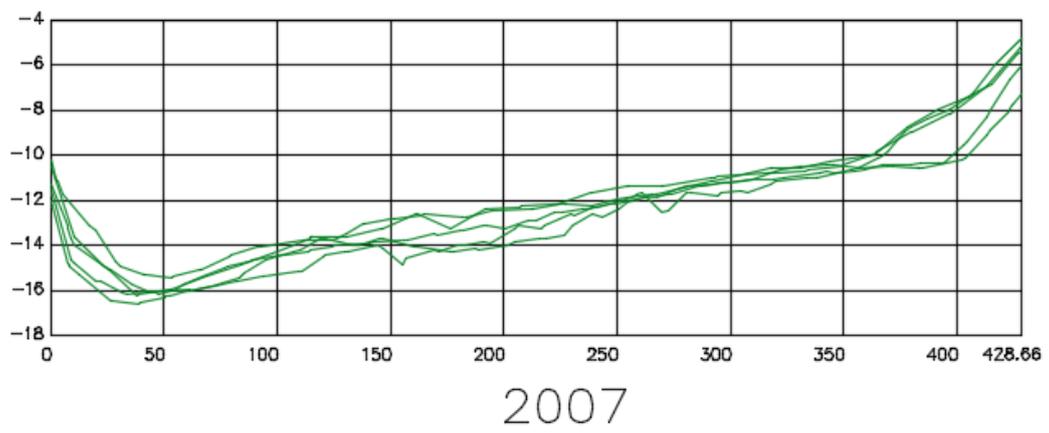
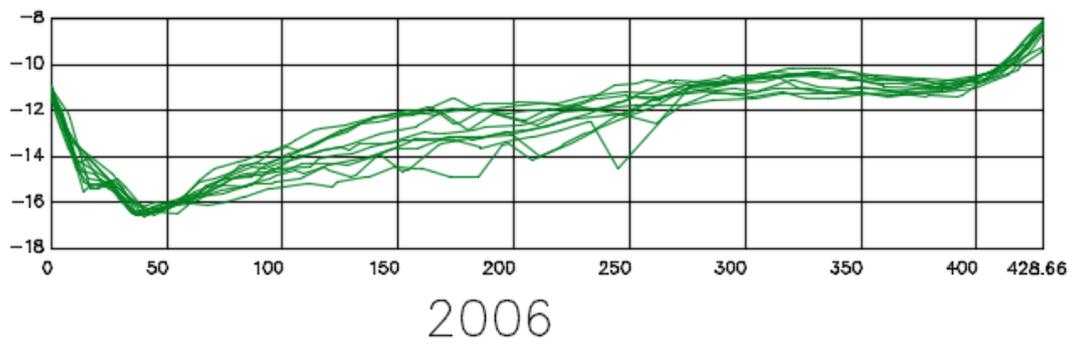


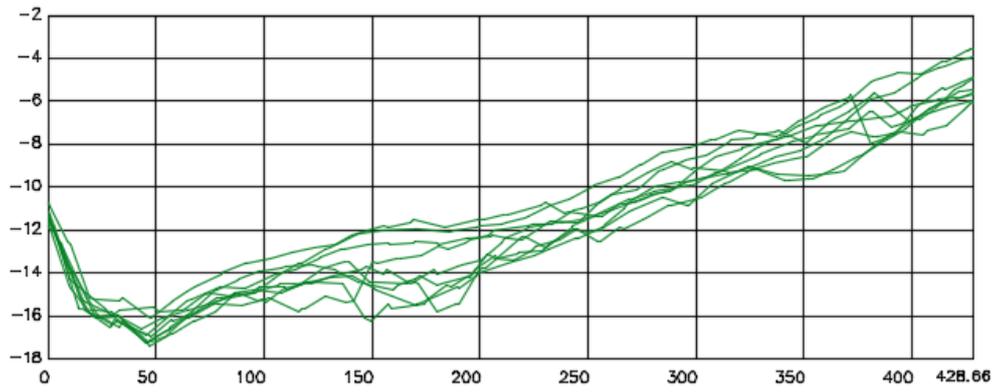
2011



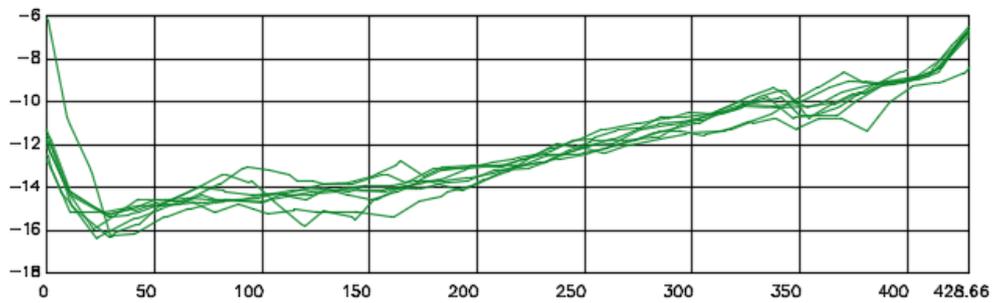
2012

SETOR 7

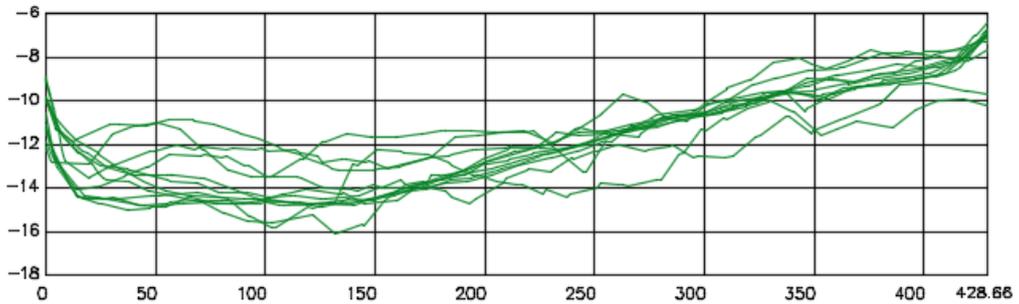




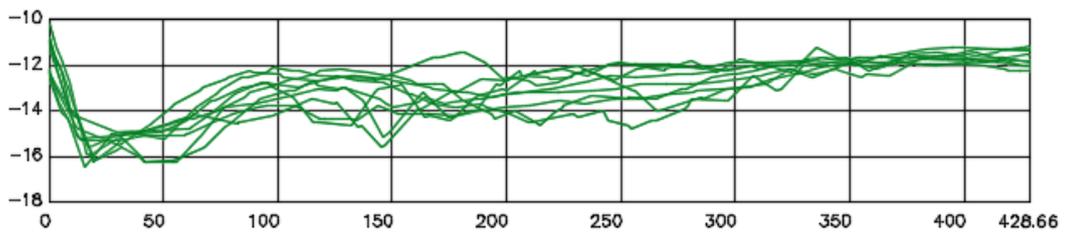
2008



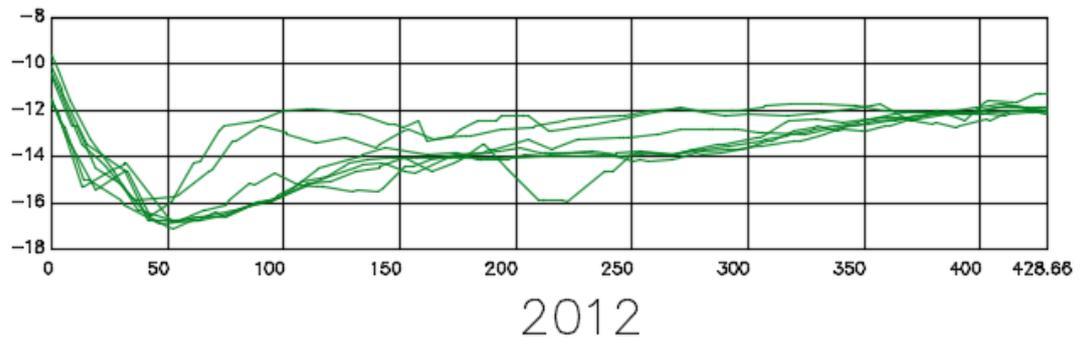
2009



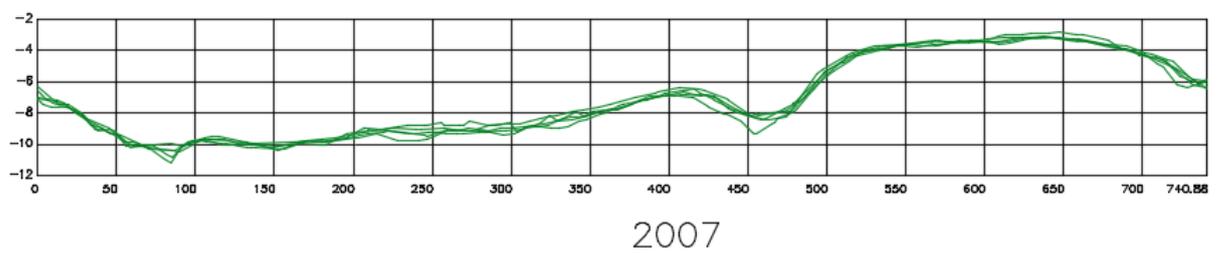
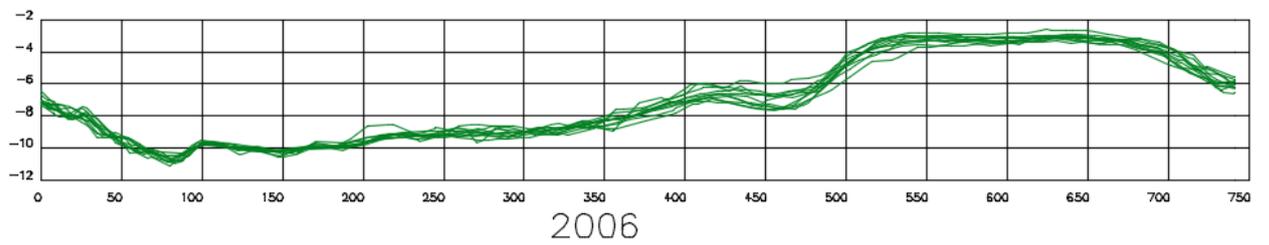
2010

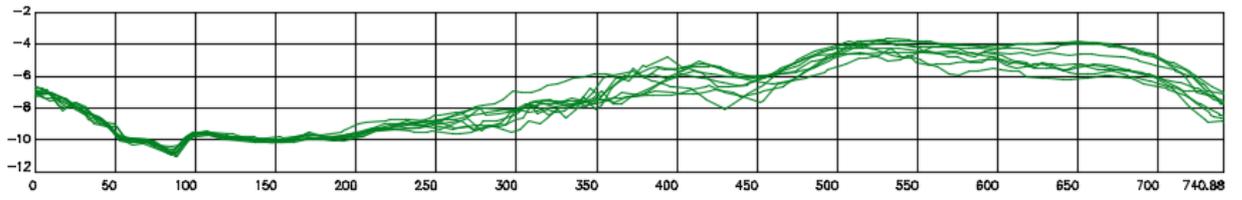


2011

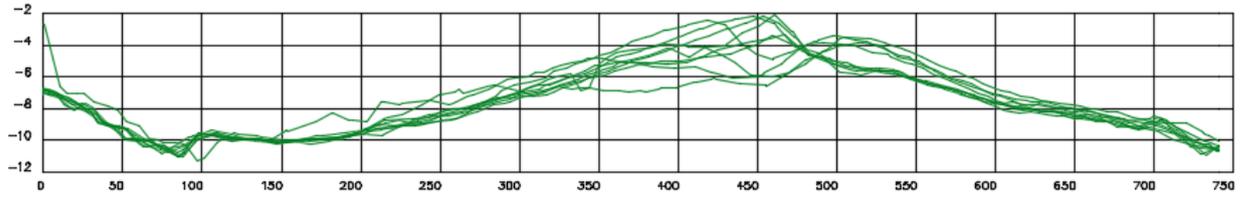


SETOR 8

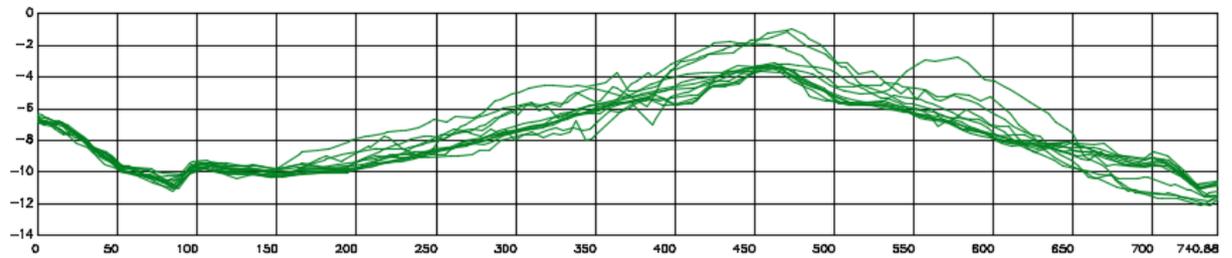




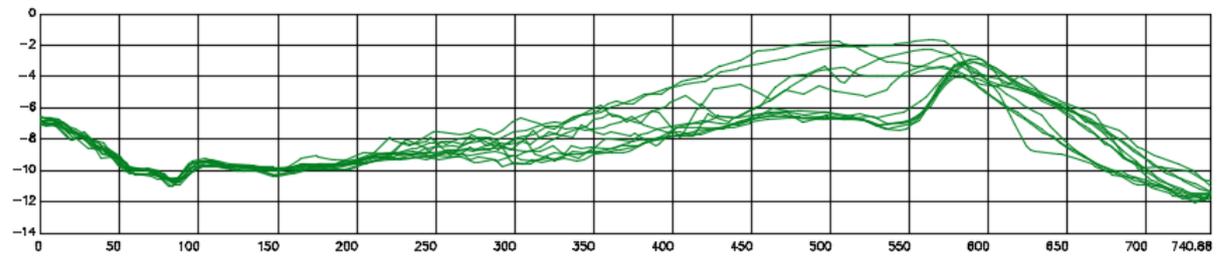
2008



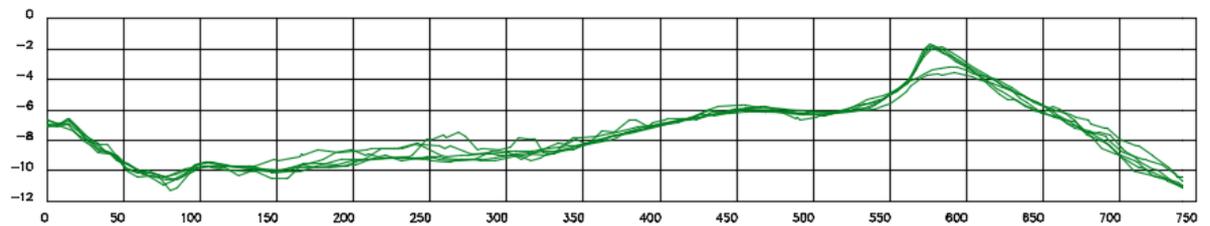
2009



2010



2011



2012

6.2 ANEXO 2 – PROVAS ANOVA NOS SETORES

ANOVA Setor 1

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 1 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

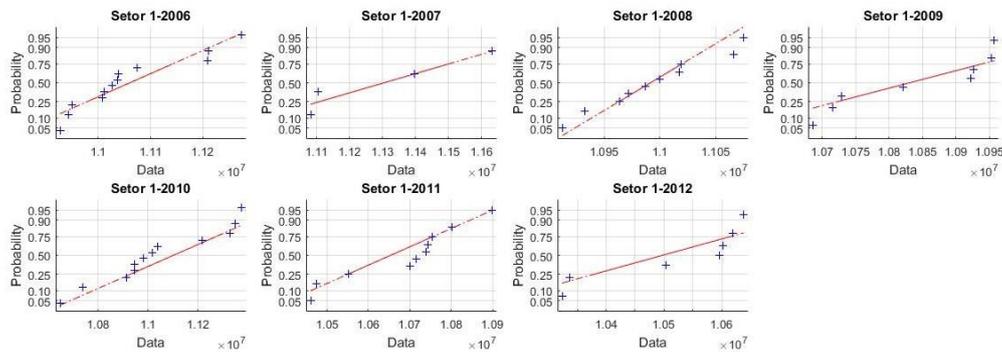
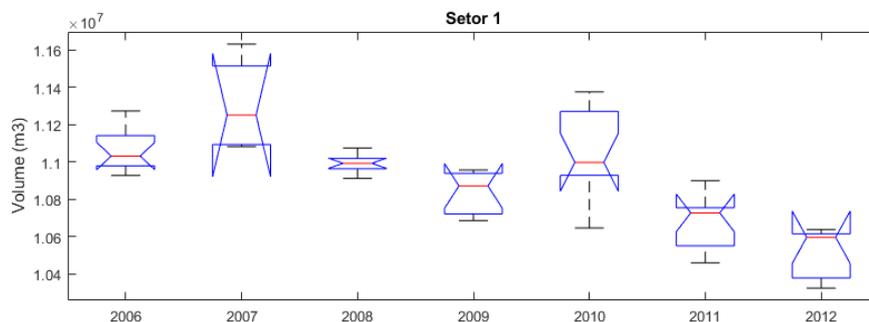


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 1



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - setor 1

Tabela ANOVA –Setor 1

ANOVA - Setor 1					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	2.799E+12	4.6652E+11	19.14	5.5356E-12
Erro	56	1.365E+12	2.4369E+10		
Total	62	4.164E+12			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 2

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 2 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

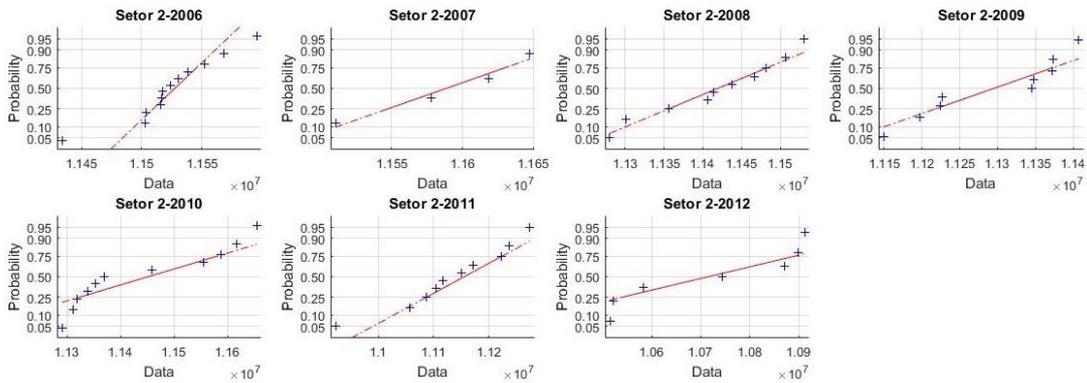
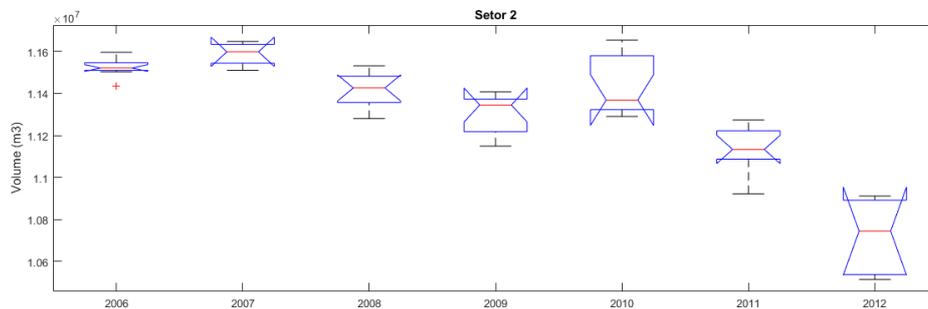


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 2



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - setor 2

Tabela ANOVA –Setor 2

ANOVA - Setor 2					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	3.912E+12	6.5203E+11	57.3	4.0812E-22
Erro	56	6.373E+11	1.138E+10		
Total	62	4.549E+12			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 3

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 3 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

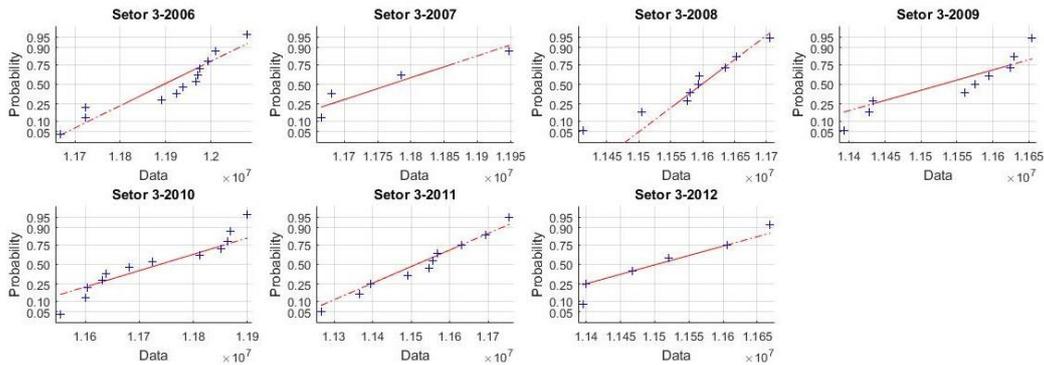
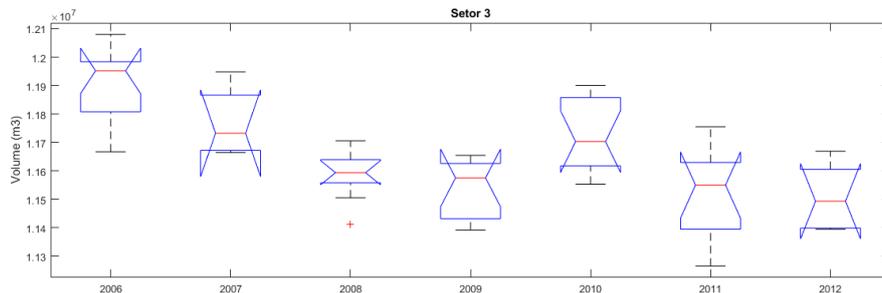


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 3



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - setor 3

Tabela ANOVA –Setor 3

ANOVA - Setor 3					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	1.311E+12	2.185E+11	14.8	5.7549E-10
Erro	55	8.135E+11	1.479E+10		
Total	61	2.124E+12			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 4

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 4 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

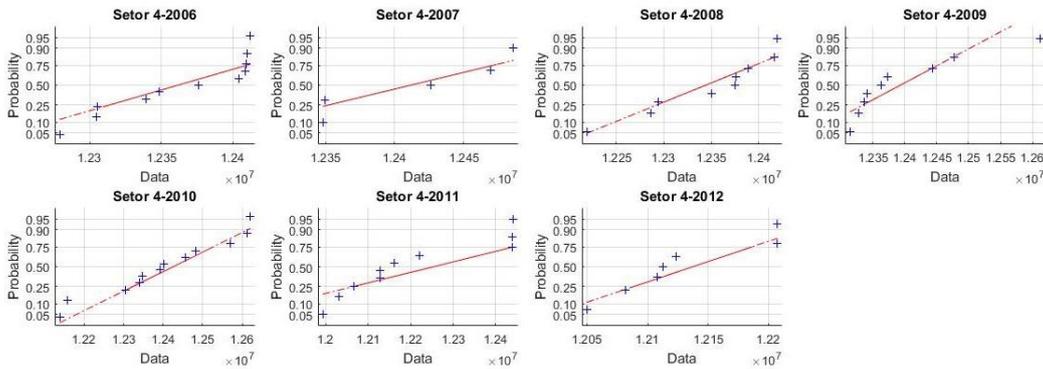
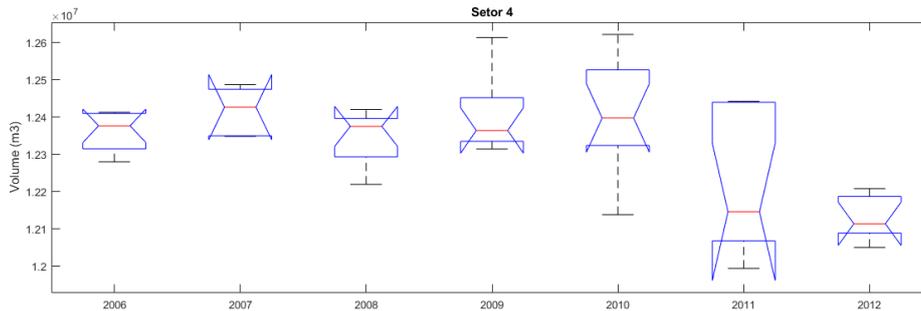


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 4



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - setor 4

Tabela ANOVA –Setor 4

ANOVA - Setor 4					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	5.995E+11	9.991E+10	7.7	4.5755E-06
Erro	56	7.253E+11	1.295E+10		
Total	62	1.325E+12			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 5

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 5 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

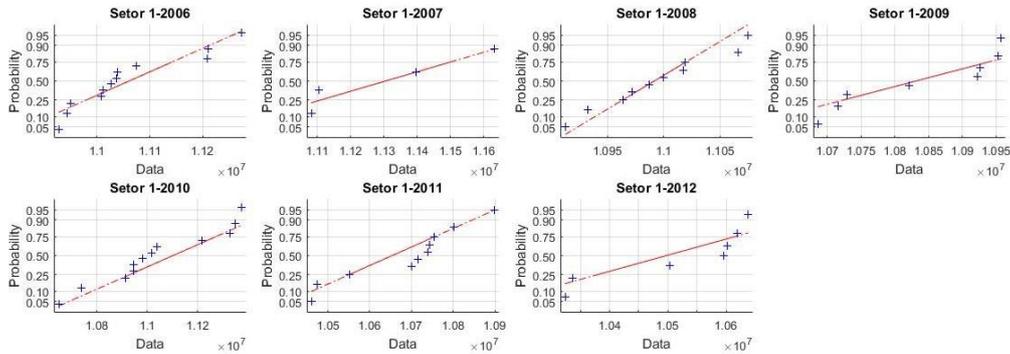
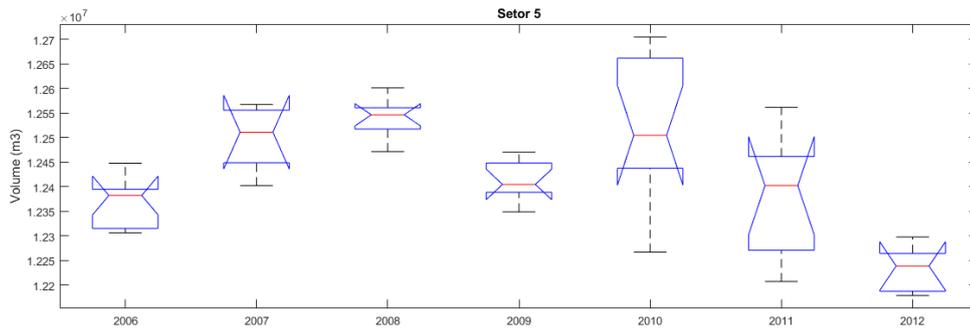


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- setor 5



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - setor 5

Tabela ANOVA –Setor 5

ANOVA - Setor 5					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	5.188E+11	8.647E+10	10.7	8.7758E-08
Erro	53	4.269E+11	8.055E+09		
Total	59	9.457E+11			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 6

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 6 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

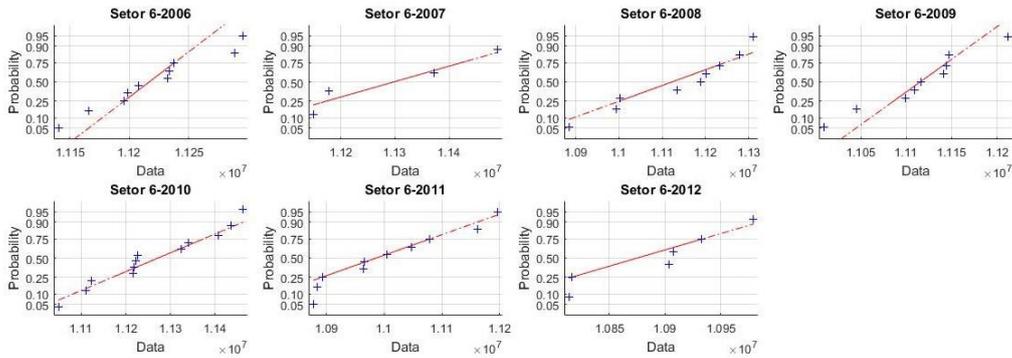
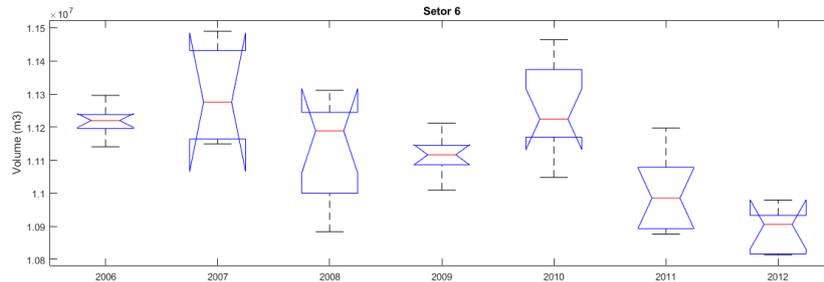


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 6



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - Setor 6

Tabela ANOVA –Setor 6

ANOVA - Setor 6					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	8.887E+11	1.481E+11	12.4	1.1112E-08
Erro	53	6.322E+11	1.193E+10		
Total	59	1.521E+12			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 7

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 7 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

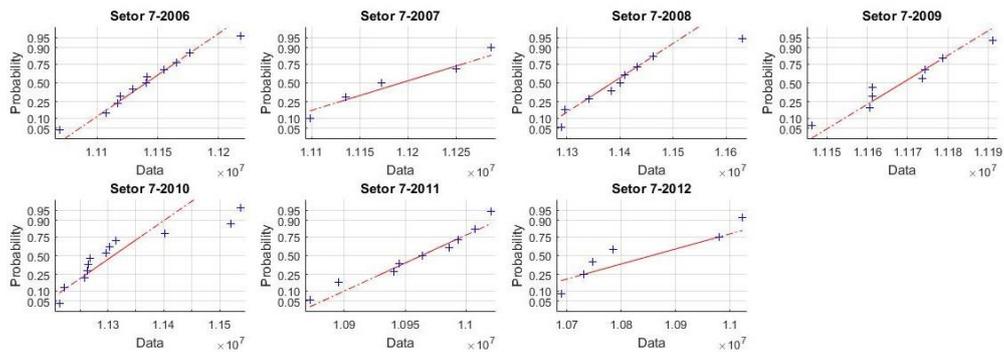
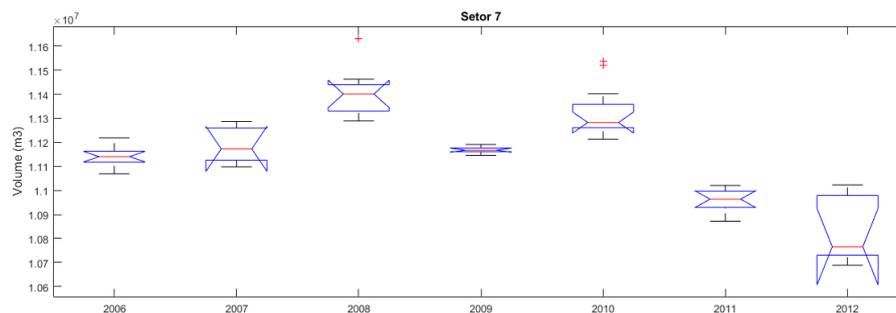


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 7



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - Setor 7

Tabela ANOVA –Setor 7

ANOVA - Setor 7					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	1.89997E+12	3.167E+11	44.9	4.6593E-19
Erro	53	3.7395E+11	7.056E+09		
Total	59	2.27392E+12			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.

ANOVA Setor 8

- $H_0: \overline{Vol}_{2006} = \overline{Vol}_{2007} = \overline{Vol}_{2008} = \overline{Vol}_{2009} = \overline{Vol}_{2010} = \overline{Vol}_{2011} = \overline{Vol}_{2012}$
volumes médios anuais no setor 8 são iguais
- H_a : Não todos os volumes médios são iguais.

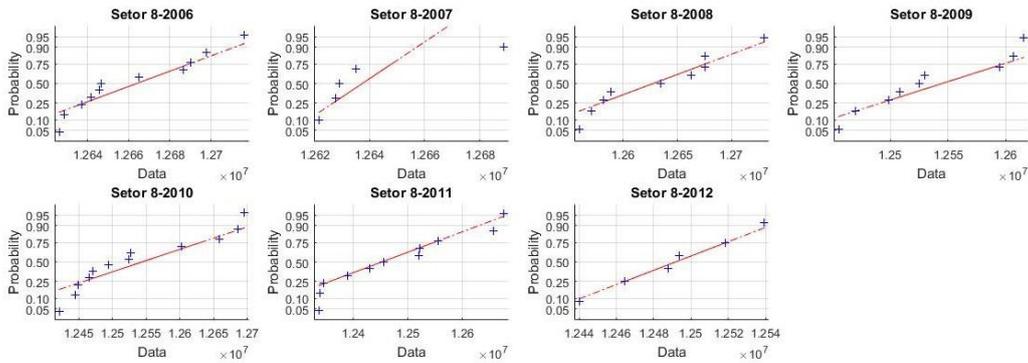
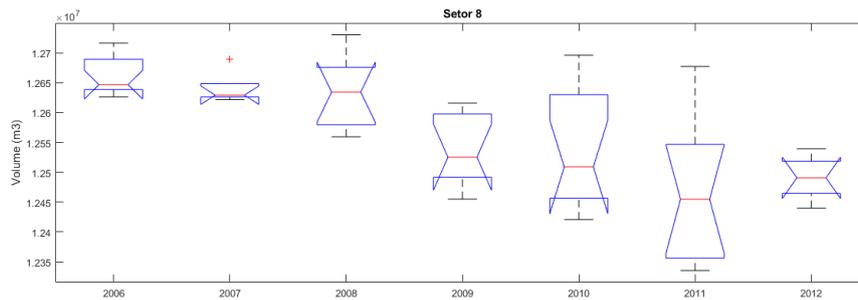


Gráfico de probabilidade normal dos volumes- Setor 8



Distribuição dos volumes anuais acima da batimetria de referência - Setor 8

Tabela ANOVA –Setor 8

ANOVA - Setor 8					
Fonte	df	SS	MS	F	Prob>F
Tratamento	6	3.12244E+11	5.204E+10	8.8	9.6888E-07
Erro	56	3.32404E+11	5.936E+09		
Total	62	6.44648E+11			

O valor P é menor que o nível de significância α escolhido de 0.05. Se rejeita a hipótese nula e aceita-se a hipótese alternativa. Os volumes médios não são iguais.