

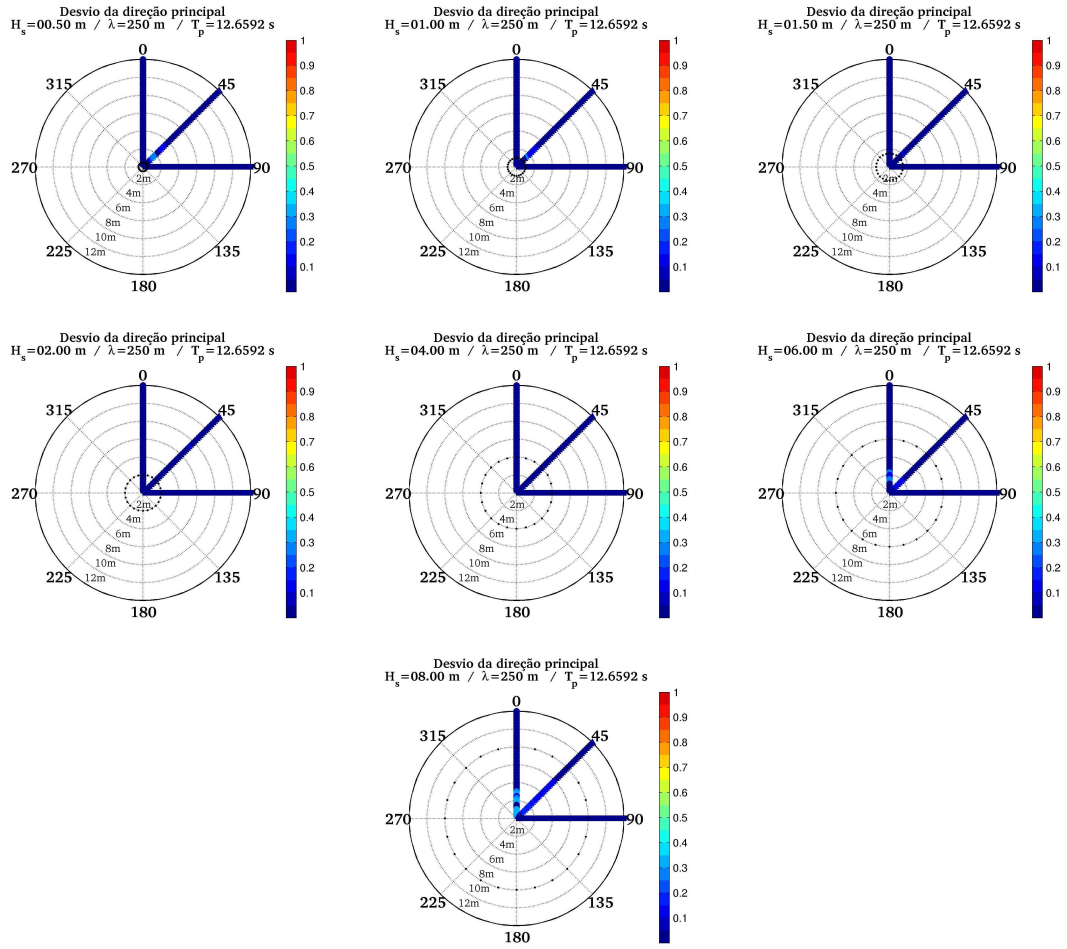


Figura 77 Gráficos polares dos desvios da direção principal obtidos dos experimentos com $\lambda = 250m$.

A Tabela 38 confirma os destaques ilustrados acima, uma vez que exibe desvios médios com valores inferiores a 0.06, sendo os mais elevados relacionados aos experimentos com $H_s = 8.00m$.

Tabela 38 Desvios médios da direção principal por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 250m$.

$\lambda = 250m$		Altura Significativa - $H_s(m)$						
I_n	$\theta(\text{graus})$	00.50	01.00	01.50	02.00	04.00	06.00	08.00
I_1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02
	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_3	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06
	45	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,01	0,04
	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06
	45	0,04	0,05	0,01	0,00	0,00	0,01	0,05
	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Analisando os gráficos da Figura 78, é possível perceber pouca variação na posição dos marcadores, mesmo aqueles associados ao intervalo de variação paramétrica mais amplo, I_4 .

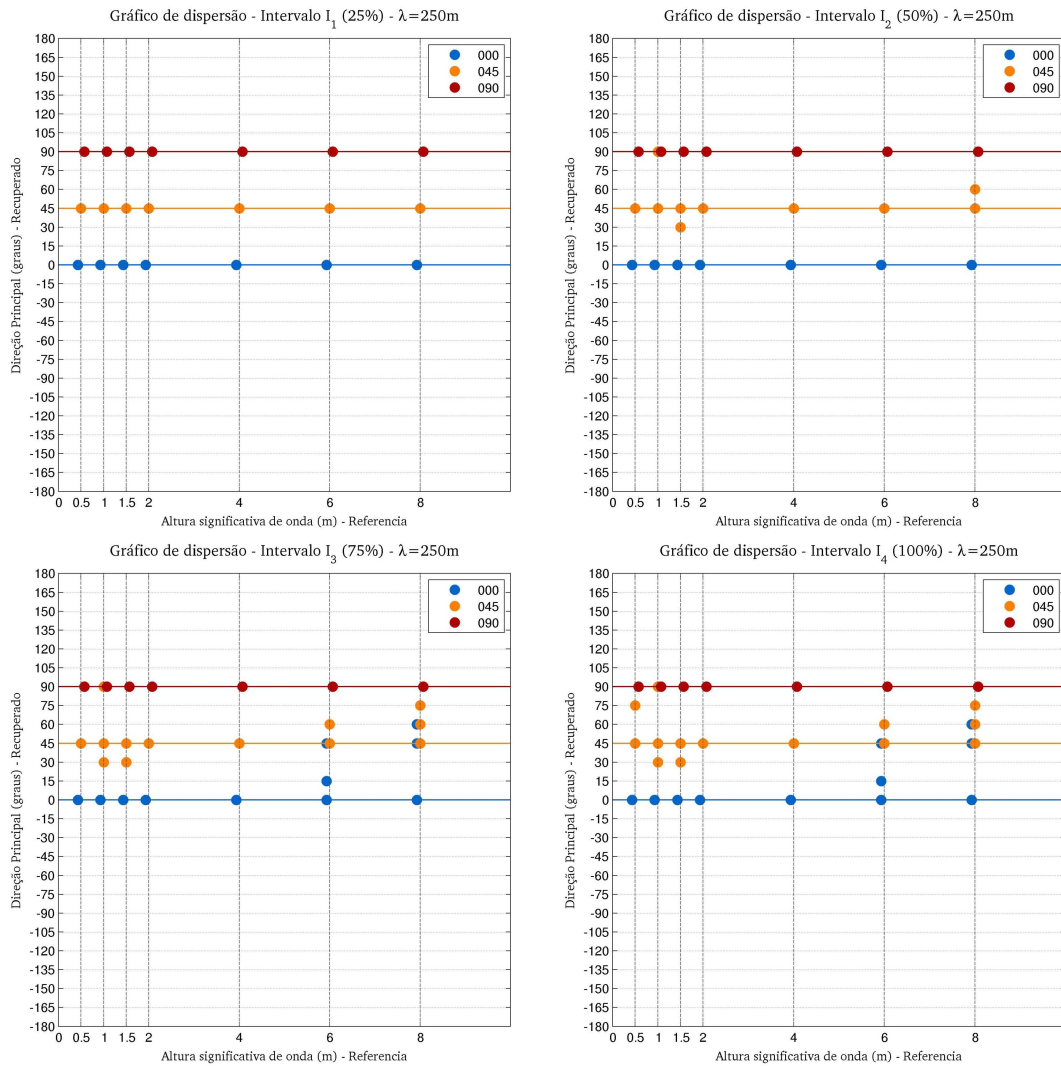


Figura 78 Gráficos de dispersão da direção principal por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 250m$.

Experimentos com $\lambda = 500m$:

A Figura 79 mostra que os desvios dos experimentos com $\lambda = 500m$, em geral, são superiores aos desvios obtidos nos experimentos com $\lambda = 250m$. Nos experimentos com $H_s \leq 1.50m$ houve a ocorrência de desvios mais elevados, sobretudo a certa distância dos valores de referência. Nos demais experimentos ($2.00m \leq H_s \leq 8.00m$) os desvios são reduzidos em faixas mais amplas em torno dos valores de referência.

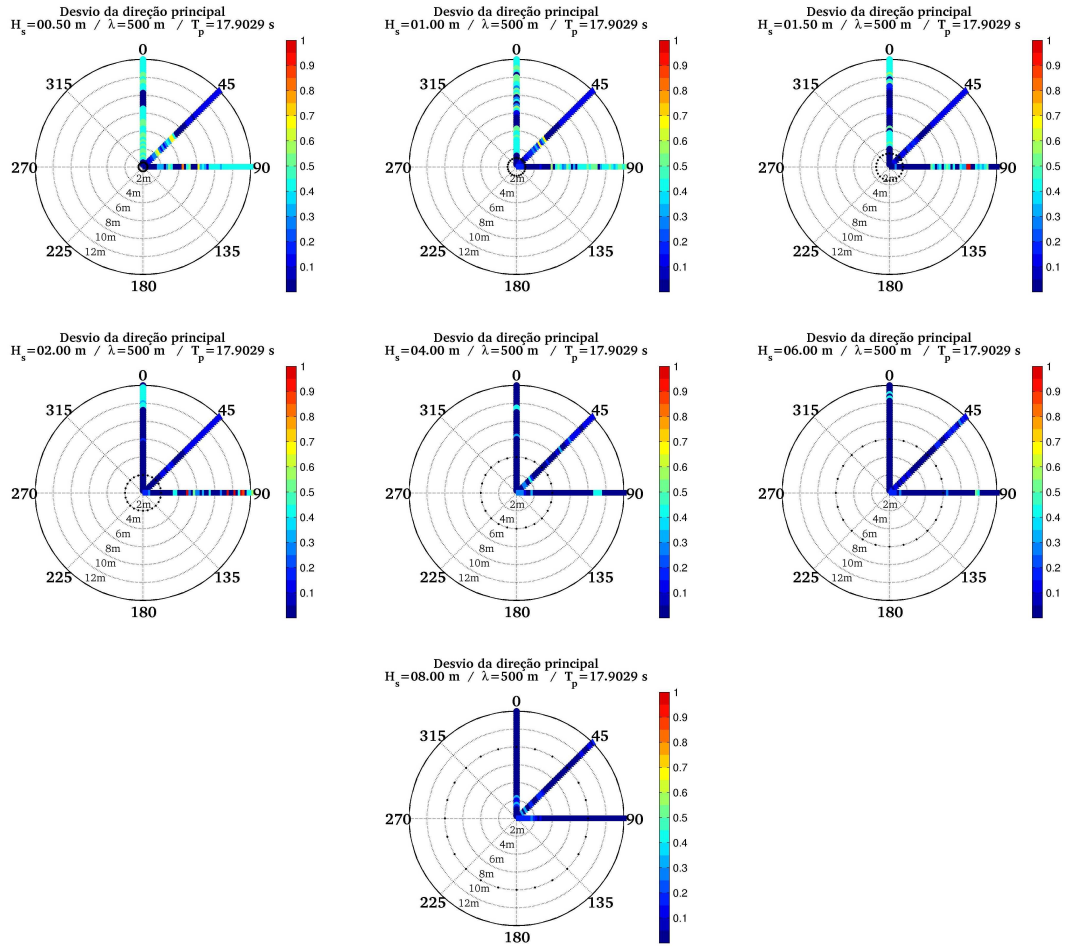


Figura 79 Gráficos polares dos desvios da direção principal obtidos dos experimentos com $\lambda = 500m$.

A Tabela 39 apresenta valores do desvio médio da direção principal inferiores a 0.23, o que indica que os resultados são relativamente próximos dos valores de referência. Nos experimentos com $\lambda \leq 1.50m$ os maiores desvios médios estão associados aos casos com $\theta = 0^\circ$. É possível observar ainda que os experimentos com $2.00m \leq H_s \leq 8.00m$ apresentaram desvios médios entre 0.00 e 0.07.

Tabela 39 Desvios médios da direção principal por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 500m$.

$\lambda = 500m$		Altura Significativa - $H_s(m)$						
I_n	$\theta(\text{graus})$	00.50	01.00	01.50	02.00	04.00	06.00	08.00
I_1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45	0,00	0,03	0,03	0,00	0,02	0,03	0,00
	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
I_2	0	0,14	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
	45	0,06	0,05	0,05	0,02	0,04	0,03	0,02
	90	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
I_3	0	0,23	0,16	0,15	0,00	0,01	0,02	0,02
	45	0,06	0,07	0,05	0,02	0,07	0,05	0,03
	90	0,00	0,05	0,03	0,08	0,01	0,03	0,00
I_4	0	0,23	0,16	0,15	0,00	0,01	0,02	0,02
	45	0,06	0,08	0,06	0,03	0,06	0,06	0,04
	90	0,00	0,04	0,02	0,08	0,03	0,04	0,03

Por fim, a Figura 80 mostra que o intervalo I_2 apresentou variação na direção principal recuperada inferior a 60° para todos os casos, além de exibir um considerável agrupamento dos marcadores em torno dos valores de referência.

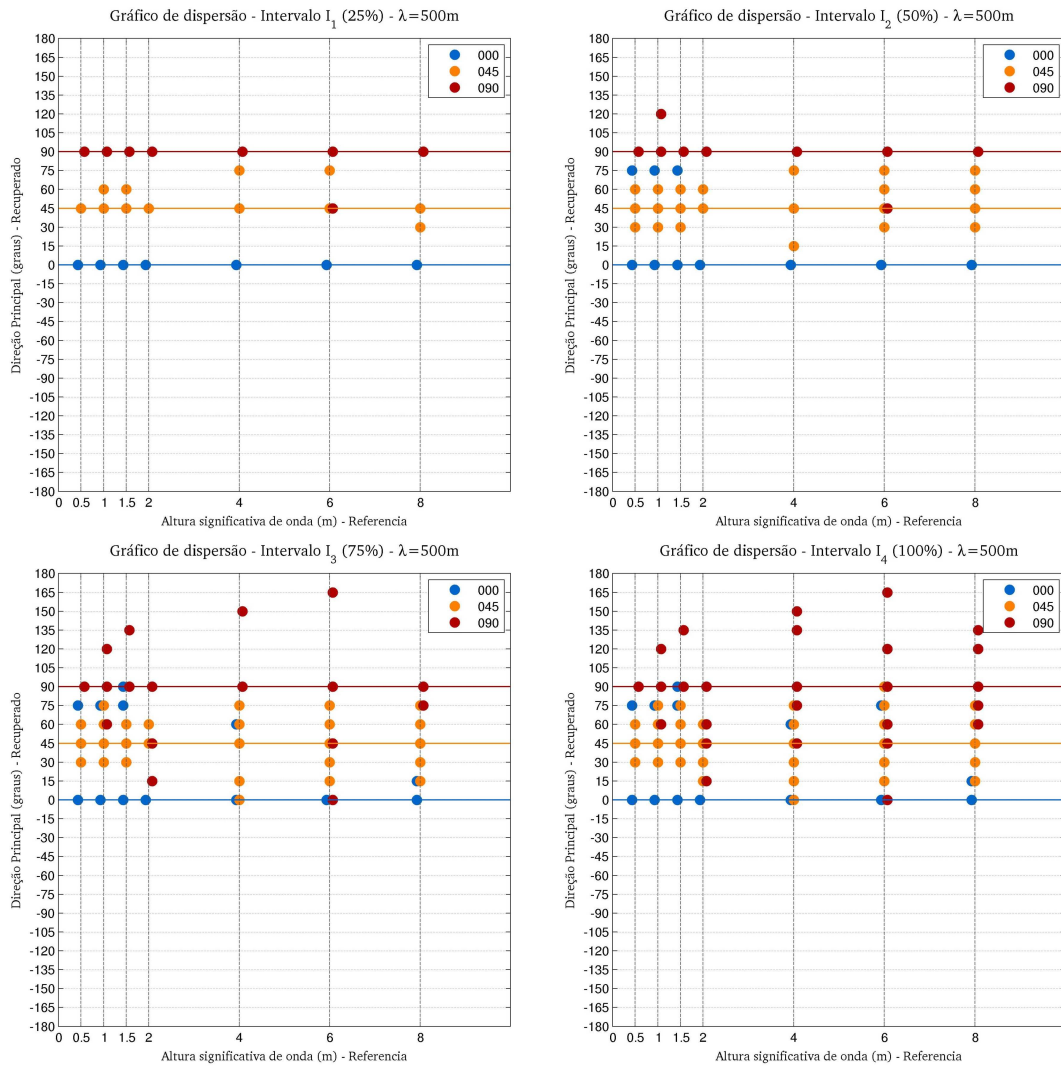


Figura 80 Gráficos de dispersão da direção principal por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 500m$.

4.2.2.3.2 Análise paramétrica - Comprimento de onda

Experimentos com $\lambda = 250m$:

Os gráficos da Figura 81 indicam que o comprimento de onda, em geral, é um parâmetro apresenta desvios reduzidos em torno de uma vizinhança considerável em torno dos valores de referência. Os experimentos com $H_s \leq 1.00m$ apresentam desvios reduzidos em torno de uma vizinhança mais restrita nos casos com $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$, enquanto os casos com $\theta = 90^\circ$ apresentam bons resultados ao longo de uma ampla faixa. Os casos com $1.50m \leq H_s \leq 8.00m$ apresentam desvios reduzidos ao longo de amplas faixas em torno dos valores de referência com a ocorrência isolada de casos com desvios aumentados.

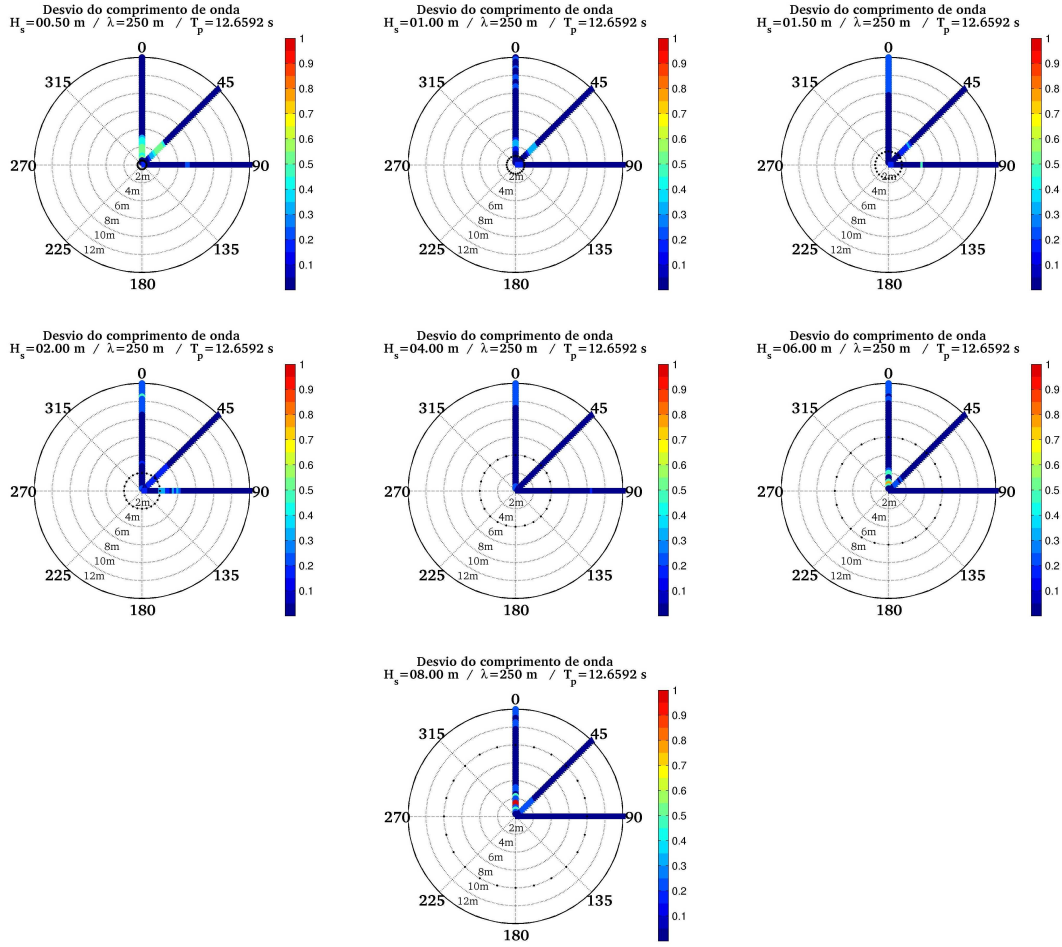


Figura 81 Gráficos polares dos desvios do comprimento de onda obtidos dos experimentos com $\lambda = 250m$.

A Tabela 40 confirma os resultados destacados acima. Experimentos com $H_s = 0.50m$ apresentam desvios médios nulos no intervalo de variação paramétrica I_1 e desvios médios entre 0.04 e 0.24 em I_4 . Experimentos com $H_s = 1.00m$ apresentam comportamento semelhante, mas um pouco mais sutil, com valores entre 0.04 e 0.08 em I_4 . Os demais experimentos ($1.50m \leq H_s \leq 8.00m$) apresentam majoritariamente valores inferiores a 0.15.

Tabela 40 Desvios médios do comprimento de onda por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 250m$.

$\lambda = 250m$		Altura Significativa - $H_s(m)$						
I_n	$\theta(\text{graus})$	00.50	01.00	01.50	02.00	04.00	06.00	08.00
I_1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	45	0,00	0,00	0,06	0,14	0,00	0,00	0,00
	90	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00
I_2	0	0,18	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05
	45	0,00	0,00	0,08	0,16	0,00	0,00	0,00
	90	0,06	0,04	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00
I_3	0	0,24	0,08	0,00	0,02	0,01	0,09	0,14
	45	0,00	0,03	0,08	0,15	0,00	0,01	0,02
	90	0,06	0,05	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00
I_4	0	0,24	0,08	0,00	0,02	0,01	0,09	0,14
	45	0,04	0,06	0,10	0,13	0,00	0,02	0,03
	90	0,04	0,04	0,01	0,16	0,00	0,00	0,00

Analisando a Figura 82 pode-se concluir que há uma tendência à sobrestimação dos valores recuperados nos experimentos com $\theta = 0^\circ$ e subestimação nos experimentos com $\theta = 90^\circ$. A distribuição dos marcadores é bastante agrupada em torno do valor de referência. O intervalo I_2 parece ser o de melhor resultado geral, visto que há poucas ocorrências com desvios superiores a 0.5.

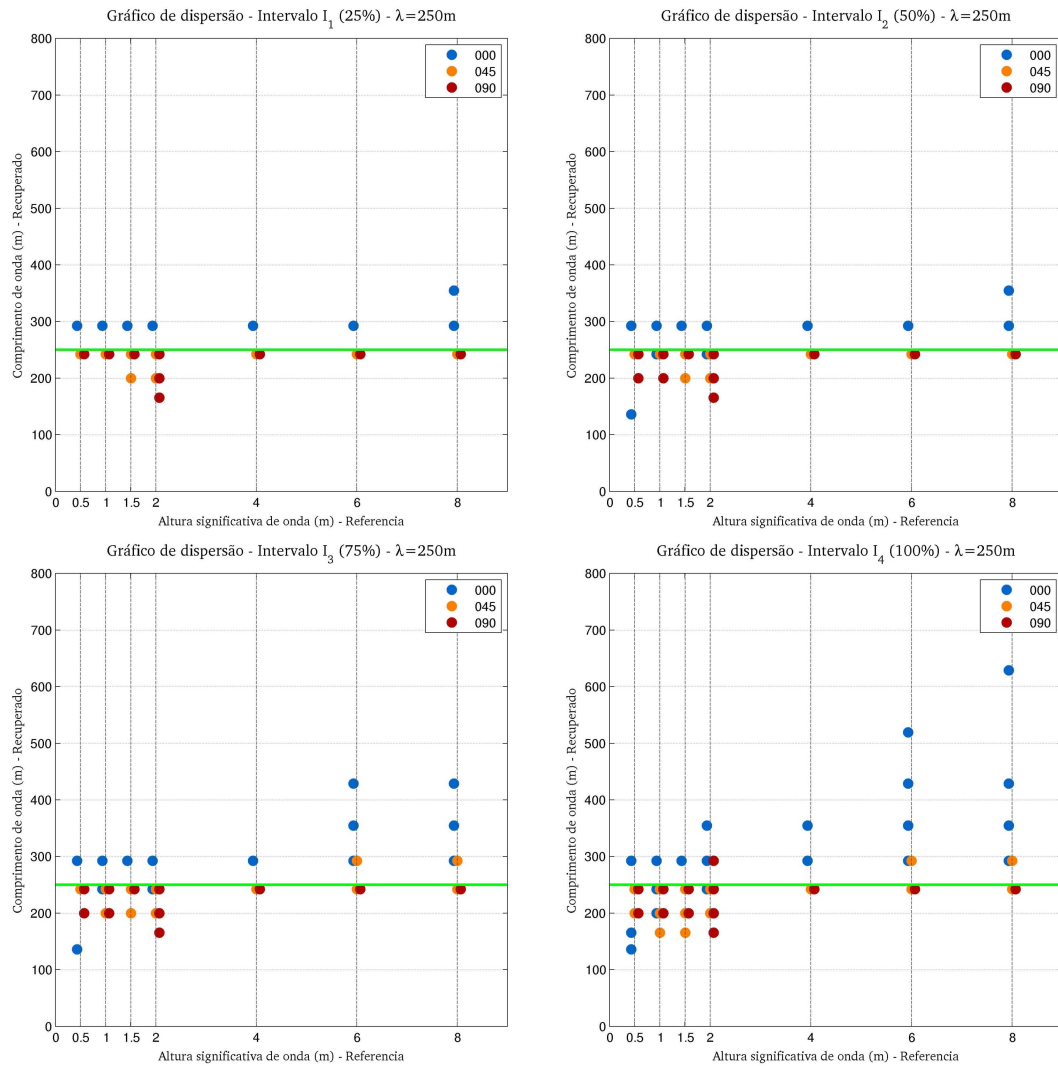


Figura 82 Gráficos de dispersão do comprimento de onda por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 250m$.

Experimentos com $\lambda = 500m$:

Observando os gráficos da Figura 83 é possível verificar que os desvios dos experimentos com $\lambda = 500m$, em geral, são superiores aos desvios obtidos nos experimentos com $\lambda = 250m$. De uma forma geral, pode-se dizer que há ocorrência de desvios reduzidos em torno dos valores de referência em todos os casos. Nos experimentos com $H_s \leq 2.00m$ houve a ocorrência de desvios mais elevados, sobretudo nos casos com $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 45^\circ$. Por fim, os experimentos com $H_s = 8.00m$ apresentaram grande ocorrência de desvios superiores a 0.3, sobretudo a certa distância dos valores de referência.

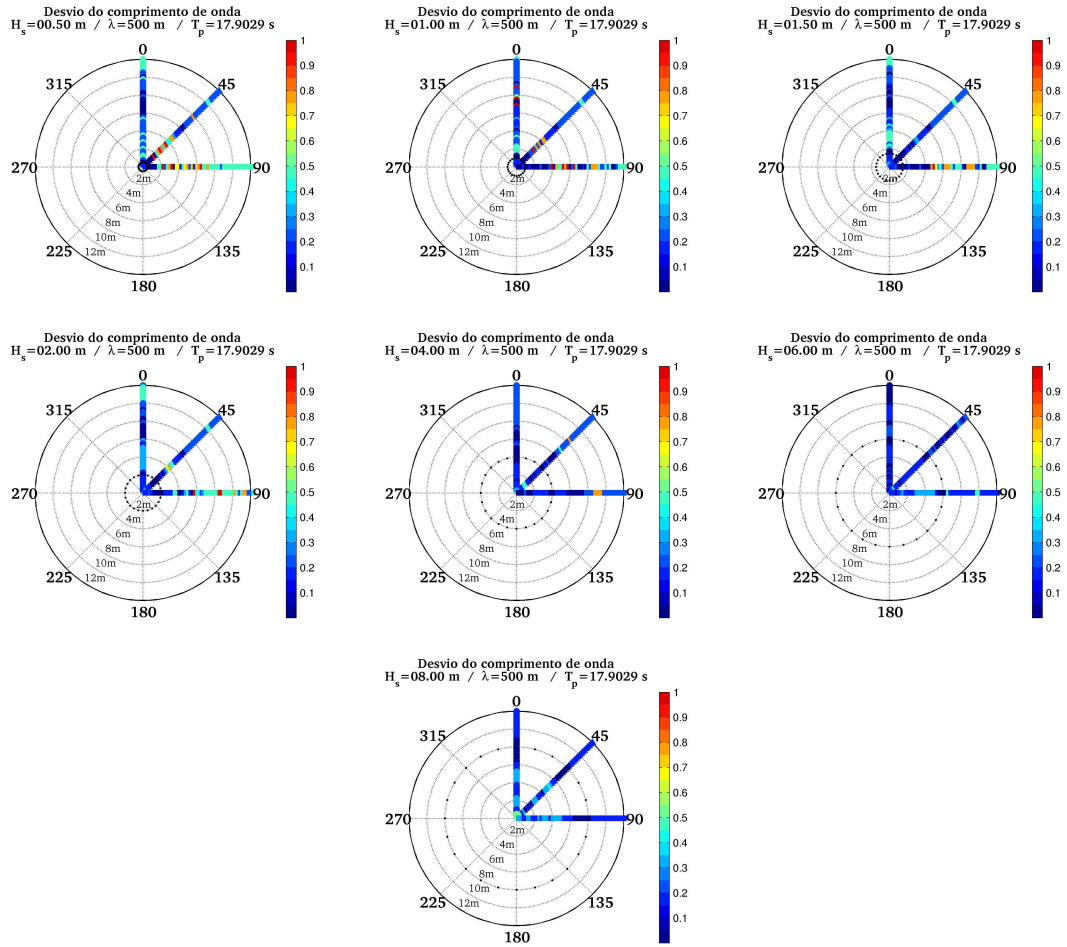


Figura 83 Gráficos polares dos desvios do comprimento de onda obtidos dos experimentos com $\lambda = 500 \text{ m}$.

A Tabela 41 mostra que todos os experimentos associados ao intervalo de variação paramétrica I_1 apresentaram desvios médios entre 0.00 e 0.17, enquanto os valores referentes ao intervalo I_4 estavam entre 0.04 e 0.24.

Tabela 41 Desvios médios do comprimento de onda por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 500m$.

$\lambda = 500m$		Altura Significativa - $H_s(m)$						
I_n	$\theta(\text{graus})$	00.50	01.00	01.50	02.00	04.00	06.00	08.00
I_1	0	0,00	0,06	0,06	0,17	0,02	0,12	0,06
	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,09	0,08
	90	0,00	0,06	0,00	0,07	0,12	0,16	0,09
I_2	0	0,13	0,16	0,19	0,20	0,07	0,13	0,14
	45	0,06	0,04	0,00	0,04	0,06	0,10	0,15
	90	0,06	0,07	0,03	0,08	0,11	0,20	0,15
I_3	0	0,21	0,24	0,24	0,23	0,10	0,09	0,18
	45	0,06	0,05	0,04	0,09	0,14	0,10	0,16
	90	0,06	0,05	0,04	0,15	0,08	0,21	0,17
I_4	0	0,21	0,24	0,24	0,23	0,10	0,09	0,18
	45	0,04	0,07	0,06	0,18	0,15	0,13	0,17
	90	0,04	0,04	0,05	0,14	0,09	0,20	0,18

Por fim, a Figura 84 sugere que há uma considerável subestimação dos valores recuperados que independe das características dos experimentos. Além disso, nota-se pouca diferença nos afastamentos dos marcadores para cada intervalo de variação paramétrica apresentado, sobretudo nos casos com $H_s > 1.50m$.

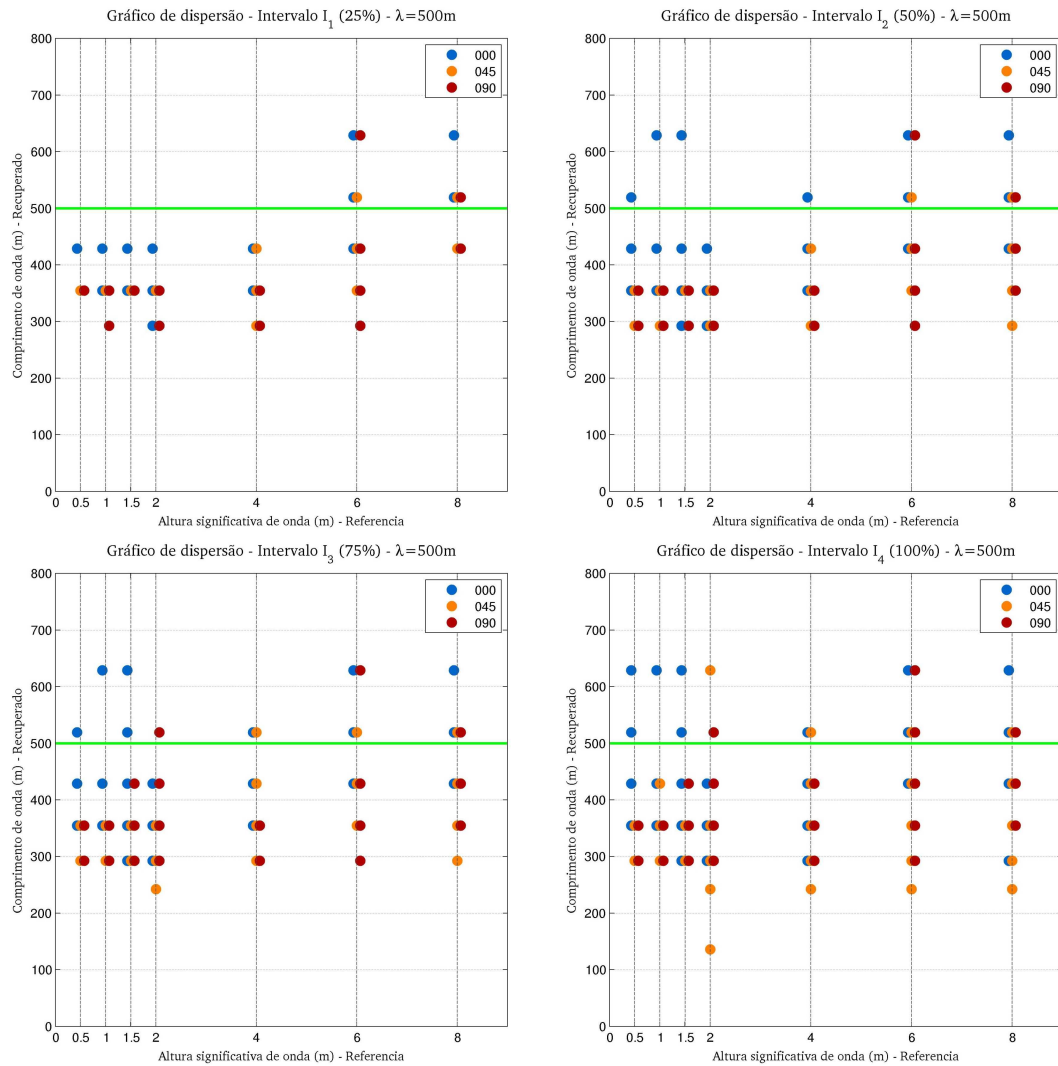


Figura 84 Gráficos de dispersão do comprimento de onda por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 500m$.

4.2.2.3.3 Análise paramétrica - Altura significativa

Experimentos com $\lambda = 250m$:

Analisando os gráficos da Figura 85 é possível verificar que os experimentos com $H_s \leq 1.00m$ apresentam desvios reduzidos em vizinhanças bem restritas em torno dos valores de referência, apresentando desvios muito elevados nos demais casos. Os experimentos com $1.50m \leq H_s \leq 8.00m$ apresentaram desvios reduzidos em faixas mais amplas em torno dos valores de referência e desvios bem elevados a certa distância destes. Fica claro que os experimentos com $\lambda = 90^\circ$ apresentaram os melhores resultados, na medida em que apresentaram faixas mais amplas de desvio reduzido.

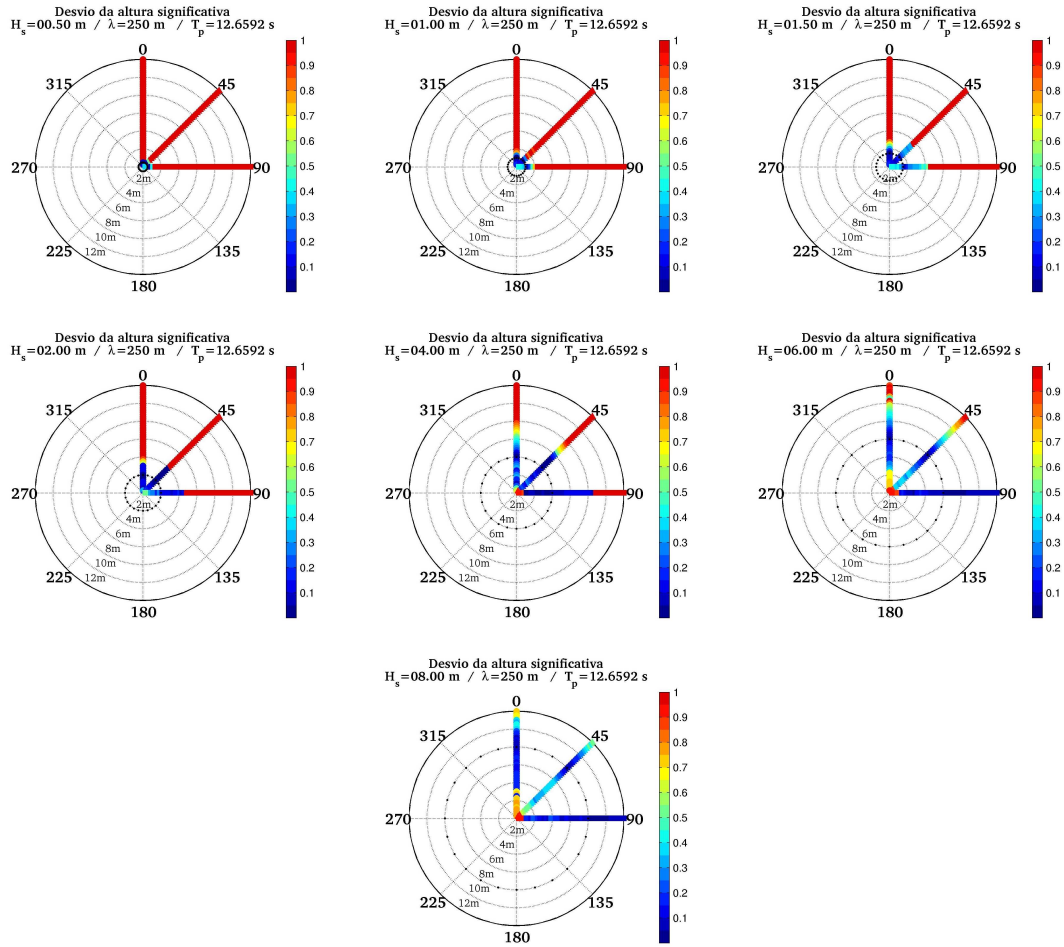


Figura 85 Gráficos polares desvios da altura significativa obtidos dos experimentos com $\lambda = 250m$.

A Tabela 42 reforça as observações destacadas acima. Os desvios médios dos experimentos com $H_s \leq 1.00m$ associados ao intervalo de variação apramétrica I_1 variam de 0.03 a 0.18, enquanto os demais intervalos apresentaram valores entre 0.22 e 0.90. Os experimentos com $1.50m \leq H_s \leq 8.00m$ apresentaram desvios médios inferiores a 0.30 associados ao intervalo I_2 e inferiores a 0.15 associados ao intervalo I_1 .

Tabela 42 Desvios médios da altura significativa por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 250m$.

$\lambda = 250m$		Altura Significativa - $H_s(m)$						
I_n	$\theta(\text{graus})$	00.50	01.00	01.50	02.00	04.00	06.00	08.00
I_1	0	0,03	0,10	0,07	0,04	0,14	0,12	0,12
	45	0,05	0,13	0,13	0,02	0,03	0,11	0,15
	90	0,05	0,18	0,14	0,14	0,04	0,03	0,04
I_2	0	0,60	0,23	0,16	0,07	0,21	0,20	0,23
	45	0,22	0,32	0,16	0,03	0,07	0,22	0,27
	90	0,28	0,28	0,24	0,14	0,05	0,04	0,05
I_3	0	0,90	0,42	0,33	0,27	0,37	0,47	0,35
	45	0,22	0,37	0,17	0,04	0,18	0,31	0,28
	90	0,28	0,36	0,26	0,16	0,05	0,04	0,07
I_4	0	0,90	0,42	0,33	0,27	0,37	0,47	0,35
	45	0,50	0,46	0,19	0,10	0,30	0,41	0,34
	90	0,46	0,44	0,28	0,17	0,11	0,10	0,12

Por fim, a Figura 86 mostra uma distribuição mais ampla dos marcadores, sobretudo aqueles associados a experimentos com $H_s \geq 4.00m$ e direção $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$. Em geral, experimentos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram marcadores bem concentrados em torno dos valores de referência associados aos intervalos de variação paramétrica I_1 , I_2 e I_3 . O intervalo I_1 parece ser o de melhor resultado geral, visto que seus desvios foram inferiores a 0.5 em todos os casos.

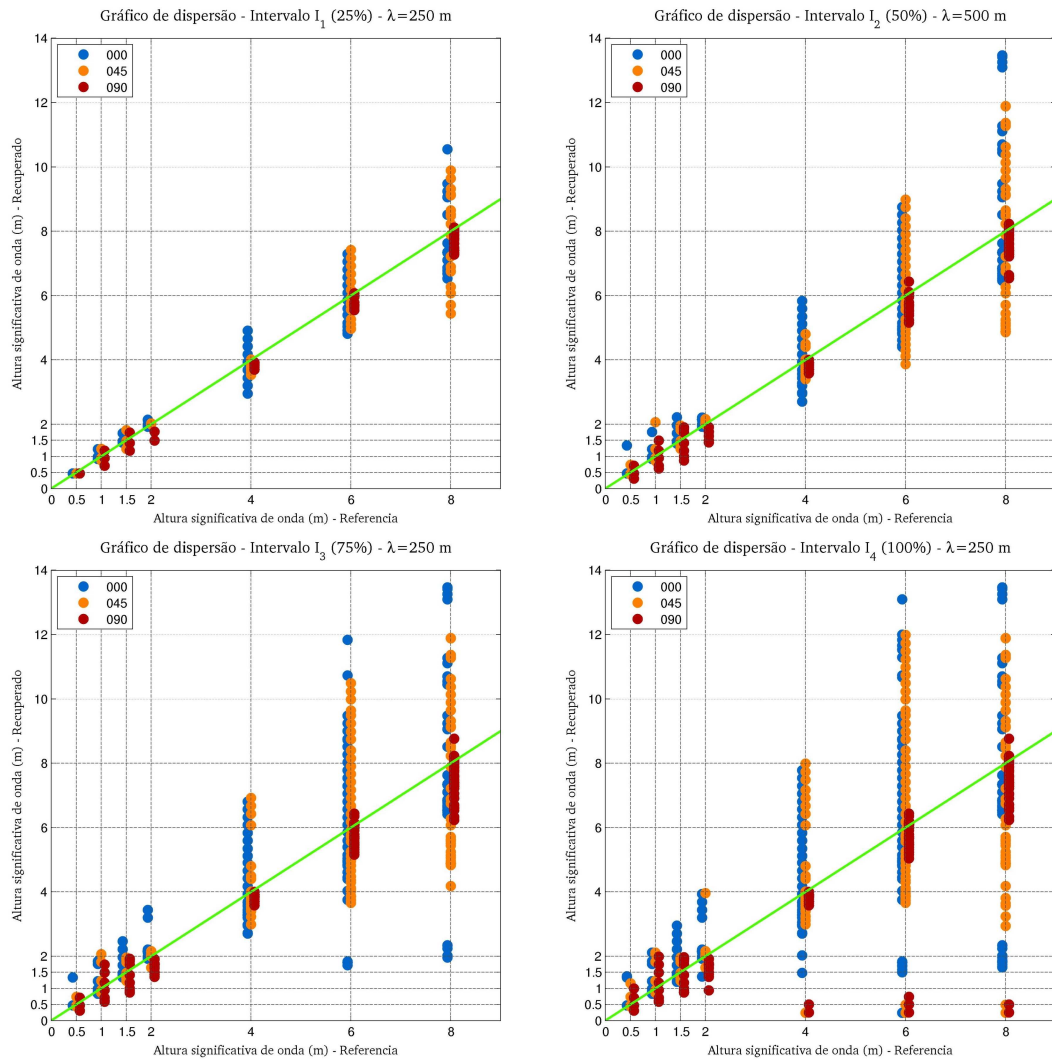


Figura 86 Gráficos de dispersão da altura significativa por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 250m$.

Experimentos com $\lambda = 500m$:

Observando os gráficos da Figura 87 é possível verificar que os experimentos com $H_s \leq 1.50m$ apresentaram desvios reduzidos em uma estreita vizinhança em torno do valor de referência, sobretudo nos casos com $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$, enquanto os casos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram esses resultados em faixa mais ampla. Destaca-se ainda a ocorrência de desvios muito elevados a certa distância dos valores de referência. Os experimentos com $H_s = 2.00m$ apresentaram desvios reduzidos em vizinhanças amplas em torno do valor de referência, sobretudo nos casos com $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$, enquanto os casos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram desvios em torno de 0.3. Por fim, os experimentos com $4.00m \leq H_s \leq 8.00m$ apresentaram desvios reduzidos em faixas mais amplas em torno dos valores de referência.

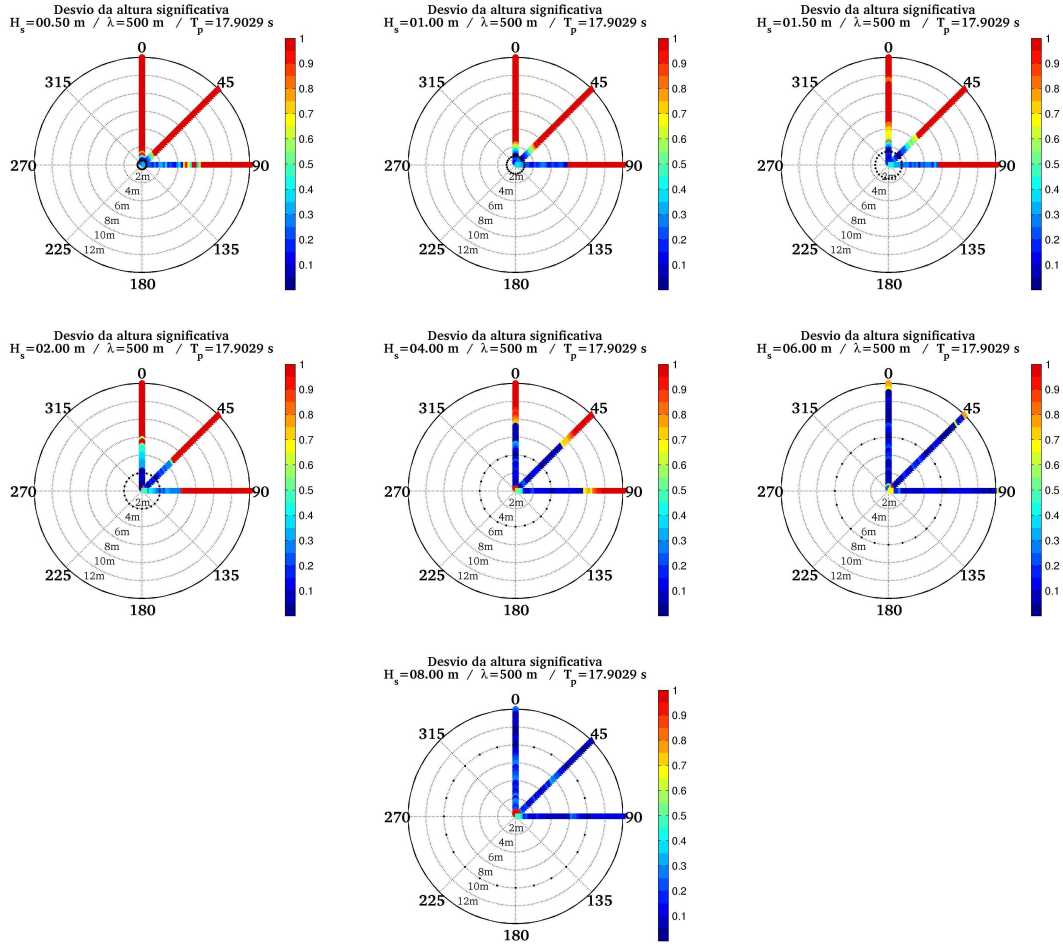


Figura 87 Gráficos polares desvios da altura significativa obtidos dos experimentos com $\lambda = 500m$.

A Tabela 43 mostra que os experimentos com $H_s \leq 1.50m$ apresentaram os menores desvios médios associados ao intervalo de variação paramétrica I_1 , com significativa diferença em relação aos valores apresentados nos demais intervalos. Os experimentos com $H_s = 2.00m$ apresentaram desvios inferiores a 0.21 para os casos com $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$ e inferiores a 0.29 para os casos com $\theta = 90^\circ$. Os experimentos com $4.00m \leq H_s \leq 8.00m$ apresentaram todos desvios médios inferiores a 0.18.

Tabela 43 Desvios médios da altura significativa por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 500m$.

$\lambda = 500m$		Altura Significativa - $H_s(m)$						
I_n	$\theta(\text{graus})$	00.50	01.00	01.50	02.00	04.00	06.00	08.00
I_1	0	0,00	0,10	0,07	0,10	0,12	0,11	0,08
	45	0,00	0,09	0,06	0,11	0,06	0,10	0,09
	90	0,22	0,25	0,23	0,25	0,09	0,08	0,11
I_2	0	0,21	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,12
	45	0,16	0,14	0,14	0,13	0,06	0,09	0,09
	90	0,26	0,24	0,25	0,28	0,09	0,08	0,09
I_3	0	0,39	0,27	0,29	0,17	0,18	0,14	0,17
	45	0,16	0,19	0,16	0,14	0,07	0,10	0,09
	90	0,26	0,24	0,26	0,29	0,10	0,07	0,09
I_4	0	0,39	0,27	0,29	0,17	0,18	0,14	0,17
	45	0,19	0,22	0,20	0,21	0,18	0,15	0,14
	90	0,24	0,23	0,27	0,29	0,18	0,10	0,10

A Figura 88 indica que os experimentos com $\lambda = 500m$ apresentaram marcadores dispostos de forma mais concentrada em torno dos valores de referência do que aqueles com $\lambda = 250m$. Os experimentos com $H_s \leq 6.00m$ indicam uma leve tendência à subestimação dos valores recuperados nos casos com $\theta = 90^\circ$. Esta mesma tendência se estende a todas as direções nos experimentos com $H_s = 8.00m$. O intervalo de variação paramétrica I_3 parece ser o de melhor resultado, visto que seus desvios, em geral, são inferiores a 0.5.

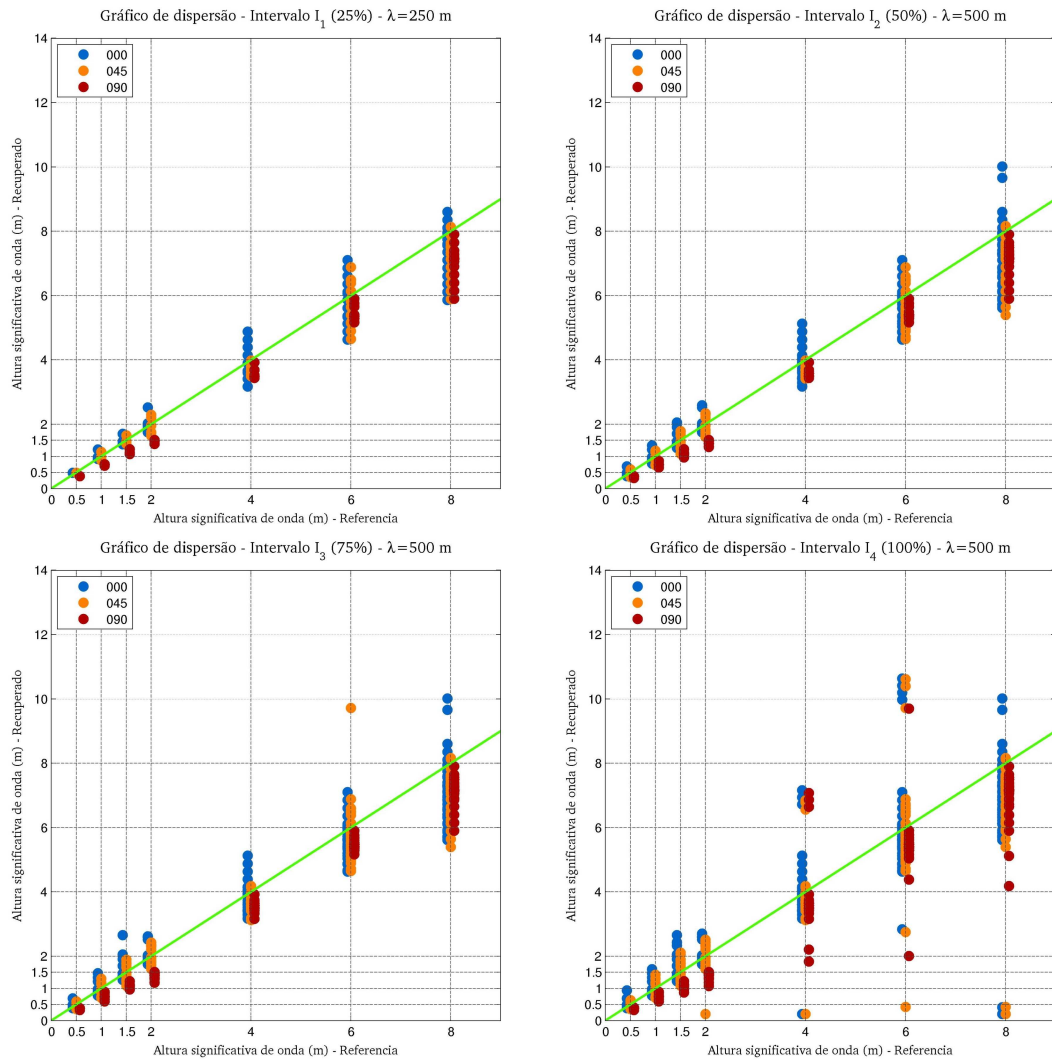


Figura 88 Gráficos de dispersão da altura significativa por intervalo de variação paramétrica referentes aos experimentos com $\lambda = 500m$.

4.3 Síntese dos resultados

Nesta seção, será elaborada uma síntese de todos os resultados apresentados nas seções anteriores deste capítulo.

O processamento de imagens SAR reais apresentou resultados muito interessantes, no sentido de representar muito bem sobretudo as partições de maior energia presentes no espectro direcional de ondas das boias. No caso 1, o espectro da boia era bastante complexo e isso acabou trazendo impactos na qualidade de seu resultado. Já no caso 2, o espectro da boia, multimodal, era mais simples o que favoreceu a ocorrência de melhores resultados.

Os experimentos baseados na variação da direção principal do *first-guess* mostraram algumas diferenças entre seu processamento pelo MPI original e pelo MPI modificado, sendo este, em geral, o de resultados com menores desvios. Ainda assim, pode-se dizer que todos os resultados destacaram características bastante semelhantes. Em geral, o intervalo de variação paramétrica J_4 parece ser o de melhor resultado para todos os parâmetros. Abaixo, seguem algumas observações sobre cada parâmetro analisado.

- Direção principal

Os resultados apresentaram desvio reduzido quando a perturbação variou entre $[\theta - 75^\circ, \theta + 75^\circ]$, faixa correspondente ao intervalo de variação paramétrica J_4 .

A direção principal foi o parâmetro mais sensível deste experimento (apresentando maior discrepância em seus desvios conforme a perturbação do *first-guess*).

Os experimentos processados pelo MPI modificado apresentaram os melhores resultados.

- Comprimento de onda

Este parâmetro apresentou resultados com desvios reduzidos em todas as direções.

Os experimentos processados pelo MPI original apresentaram os melhores resultados.

O intervalo de variação paramétrica J_5 apresentou bons resultados.

- Altura significativa

Este parâmetro apresentou resultados com desvios reduzidos em todas as direções.

Os experimentos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram os maiores desvios.

Os experimentos processados pelo MPI modificado apresentaram os melhores resultados.

O intervalo de variação paramétrica J_5 apresentou bons resultados.

Os experimentos baseados na variação do comprimento de onda do *first-guess* mostraram algumas diferenças entre seu processamento pelo MPI original e pelo MPI modificado, sendo o primeiro, em geral, o de resultados com menores desvios. Ainda assim,

pode-se dizer que todos os resultados destacaram características bastante semelhantes. Em geral, o intervalo de variação paramétrica K_2 parece ser o de melhor resultado para todos os parâmetros. Abaixo, seguem algumas observações sobre cada parâmetro analisado.

- Direção principal

Este parâmetro apresentou resultados com desvios reduzidos em todas as direções.

Os experimentos processados pelo MPI original apresentaram os melhores resultados.

Em geral, as ocorrências com desvios maiores estão associadas a casos aos experimentos com $\lambda \leq 125m$ e $\lambda \geq 500m$.

- Comprimento de onda

Os experimentos processados pelo MPI original apresentaram resultados muito semelhantes aqueles processados pelo MPI modificado.

Em geral, as ocorrências com os melhores resultados em faixas mais amplas estão associadas aos experimentos com $100m < \lambda < 500m$.

O comprimento de onda foi o parâmetro mais sensível deste experimento (apresentando maior discrepância em seus desvios conforme a perturbação do *first-guess*).

- Altura significativa

Os experimentos processados pelo MPI original apresentaram resultados muito semelhantes aqueles processados pelo MPI modificado.

Em geral, as ocorrências com os melhores resultados em faixas mais amplas estão associadas a casos com aos experimentos com $100m \leq \lambda \leq 500m$.

Foi identificada uma tendência à subestimação dos valores recuperados para este parâmetro nos experimentos com $\lambda \geq 500m$.

Os experimentos baseados na variação da altura significativa do *first-guess* mostraram algumas diferenças entre seu processamento pelo MPI original e pelo MPI modificado,

sendo este o de melhor resultado considerando todos os parâmetros. Ainda assim, pode-se dizer que todos os resultados destacaram características bastante semelhantes. Em geral, o intervalo de variação paramétrica I_2 parece ser o de melhor resultado para todos os parâmetros. A seguir seguem algumas observações sobre cada parâmetro analisado apresentados conforme o comprimento de onda dos experimentos ($\lambda = 250m$ e $\lambda = 500m$).

- Direção principal - $\lambda = 250m$

Este parâmetro apresentou resultados com desvios reduzidos em todas as direções.

Os experimentos com $H_s = 8.00m$ apresentaram os maiores desvios.

- Comprimento de onda - $\lambda = 250m$

Este parâmetro apresentou resultados com desvios reduzidos em todas as direções e em ampla faixa em torno dos valores de referência, sobretudo nos casos com $1.50m \leq H_s \leq 8.00m$.

Os experimentos com $\theta = 0^\circ$ apresentaram tendência de sobrestimação dos valores recuperados enquanto os experimentos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram tendência de subestimação dos mesmos.

- Altura significativa - $\lambda = 250m$

Em geral, as ocorrências com os melhores resultados em faixas mais amplas estão associadas a casos com aos experimentos com $1.50m \leq H_s \leq 6.00m$.

Experimentos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram os melhores resultados.

Experimentos com $H_s \leq 1.00m$ apresentaram desvios reduzidos em faixas mais restritas em torno dos valores de referência.

- Direção principal - $\lambda = 500m$

Os experimentos com $\lambda = 500m$ em geral apresentaram desvios da direção principal mais elevados do que aqueles com $\lambda = 250m$.

Experimentos com $H_s \leq 1.50m$ apresentaram desvios maiores, sobretudo nos casos com $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$.

Os experimentos com $1.75 \leq H_s \leq 8.00m$ em geral apresentaram desvios reduzidos em ampla faixa em torno dos valores de referência.

- Comprimento de onda - $\lambda = 500m$

Os experimentos com $\lambda = 500m$ em geral apresentaram desvios do comprimento de onda mais elevados do que aqueles com $\lambda = 250m$.

Este parâmetro apresentou resultados com desvios reduzidos em todas as direções e em ampla faixa em torno dos valores de referência, sobretudo nos casos com $2.00m \leq H_s \leq 6.00m$.

Experimentos com $H_s \leq 1.75m$ $H_s = 8.00$ em geral apresentaram desvios elevados.

Os experimentos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram os menores desvios.

Verifica-se que há uma tendência geral de subestimação dos valores recuperado.

- Altura significativa - $\lambda = 500m$

Em geral, as ocorrências com os melhores resultados em faixas mais amplas estão associadas a casos com aos experimentos com $1.50m \leq H_s \leq 6.00m$.

Experimentos com $\theta = 90^\circ$ apresentaram os melhores resultados.

Experimentos com $H_s \leq 1.50m$ apresentaram desvios reduzidos em faixas mais restritas em torno dos valores de referência e ainda considerável ocorrência de desvios elevados nas demais faixas.

CONCLUSÃO

Esta tese foi desenvolvida com base em questões ainda em aberto no que diz respeito à operação e à qualidade dos resultados do algoritmo MPI de recuperação de espectros direcionais de onda a partir de imagens SAR. Esta abordagem foi dividida em quatro etapas: Desenvolvimento do Processador Espectral, adaptação do algoritmo MPI para utilização de imagens do satélite Sentinel, elaboração de uma metodologia para análise de sensibilidade do algoritmo MPI em relação ao *first-guess* e, por fim, a execução desta análise de sensibilidade.

O Processador Espectral foi desenvolvido para gerar espectros de imagem SAR sintéticos associados a espectros direcionais de onda. Ele opera tanto com as configurações correspondentes aos satélites ERS-1&2 e também aos satélites Sentinel-1A&1B. Seu acoplamento ao algoritmo MPI (original e modificado) consolidou uma robusta ferramenta de simulação e processamento de dados SAR, que abre caminhos para uma série de outras investigações sobre o tema. A coerência dos resultados apresentados nesta tese mostram a consistência desta ferramenta.

A adaptação do algoritmo MPI para utilização de imagens dos satélites Sentinel representa um grande avanço nas pesquisas sobre este tema. O acervo de imagens dos satélites Sentinel, que estão no início de seu ciclo de operação, é aberto ao público e, além disso, será possível explorar suas características, tendo uma visão evolutiva dos sistemas satélite-radar com SAR. Os resultados obtidos nos dois casos propostos, envolvendo o processamento de imagens reais, foram bastante satisfatórios (sobretudo em relação às partições de maior energia), de certa forma validando este importante avanço. O mesmo pode-se dizer da análise de sensibilidade, que apresentou resultados muito consistentes.

Foi proposta uma metodologia para a análise de sensibilidade do algoritmo MPI em relação ao *first-guess*, baseada em ([17]), que envolveu a definição de critérios para avaliação, indicadores numéricos, grande número de experimentos, formas de exibição dos resultados, etc. De acordo com a consistência dos resultados apurados, pode-se dizer que a metodologia proposta consagrou-se como uma poderosa ferramenta que deve seguir em desenvolvimento uma vez que pode considerar cenários mais complexos (multimodais), além de poder ser adaptada a outras técnicas.

A execução da análise de sensibilidade se consolidou após a realização de quase 5000 experimentos, considerando simulações de estados de mar unimodais com variação

individual de parâmetros de onda (direção principal, comprimento de onda e altura significativa). Esses resultados permitiram a realização de avanços significativos nas questões que motivaram este trabalho.

A seguir, serão apresentados algumas observações importantes sobre a análise de sensibilidade do algoritmo MPI (original e modificado).

O parâmetro de onda que sofre a perturbação no *first-guess* é o que produz mais impactos nos resultados.

Os experimentos de variação da direção principal mostraram que perturbações de até 75° foram bem toleradas pelo algoritmo MPI, resultando em desvios paramétricos reduzidos nesta faixa.

Os experimentos com variação do comprimento de onda mostraram boa tolerância associada aos casos com perturbações de até 50% dos valores de referência. O mesmo vale para os experimentos com variação da altura significativa.

No sentido de buscar o detalhamento dos limites operacionais do algoritmo MPI, conclui-se que os experimentos com variação do comprimento de onda indicam que os melhores resultados foram obtidos com $150m \leq \lambda < 500m$, enquanto os experimentos com variação da altura significativa sugerem que os melhores resultados foram obtidos quando $2.00m \leq H_s \leq 6.00m$. Porém, deve-se destacar que esta é uma conclusão geral, ou seja, há ocorrência de bons resultados fora dessas faixas que variam de acordo com as características dos experimentos.

Os efeitos relacionados à direção dos experimentos (azimutal, intermediária e *range*) variam bastante conforme as características dos mesmos, não sendo possível destacar nenhum comportamento generalizado.

Em geral, os experimentos processados pelo algoritmo MPI modificado (Sentinel) apresentaram resultados melhores se comparados aos seus correspondentes processados pelo algoritmo MPI original.

Por fim, apresentam-se algumas oportunidades de desenvolvimento para o futuro:

- Elaborar uma série de experimentos para avaliação da sensibilidade para casos multimodais;
- Implementar um novo processo de minimização no algoritmo MPI e avaliar seus resultados;

- Avaliar como o algoritmo MPI escolhe os melhores resultados em seu processo iterativo e propor modificações;
- Propor novas formulações para a adição de ruído ao espectro de imagem SAR (Arquivo INV);
- Adaptar o algoritmo MPI para usar imagens dos demais modos de operação dos satélites Sentinel;
- Desenvolver alternativas para simulação e processamento de imagens SAR complexas (usando a técnica do espectro cruzado - [6]).

REFERÊNCIAS

- [1] ALPERS, W. Monte carlo simulations for studying the relationship between ocean wave and synthetic aperture radar image spectra. *Journal of Geophysical Research*, v. 88, p. 1745–1759, 1983.
- [2] BRÜNING, C. et al. Validation of a synthetic aperture radar ocean wave imaging theory by the shuttle imaging radar-b experiment over the north sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 93, n. C12, p. 15403–15425, 1988. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/JC093iC12p15403>>.
- [3] HASSELMANN, K.; RANEY, R.K.; PLANT, J. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: A marsen view. *J. Geophys. Res.*, v. 90, p. 4659–4686, 1985.
- [4] HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 96, n. C6, p. 10713–10729, 1991. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/91JC00302>>.
- [5] VIOLANTE-CARVALHO, N. et al. The effect of the spatially inhomogeneous wind field on the wave spectra employing an ers-2 {SAR} {PRI} image. *Continental Shelf Research*, v. 36, n. 0, p. 1 – 7, 2012. ISSN 0278-4343. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434311003773>>.
- [6] ENGEN, G.; JOHNSEN, H. Sar-ocean wave using image cross spectra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 4, 1995.
- [7] HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S.; BRÜNING, C.; HEIMBACH, P. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n. C7, p. 16615–16629, July 15 1996.
- [8] MASTENBROEK, C.; VALK, C. F. de. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 105, n. C2, p. 3497–3516, 2000. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/1999JC900282>>.

- [9] SCHULZ-STELLENFLETH, J.; LEHNER, S.; HOJA, D. A parametric scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 110, n. C5, p. n/a–n/a, 2005. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2004JC002822>>.
- [10] COLLARD, F.; ARDHUIN, F.; CHAPRON, B. Extraction of coastal ocean wave fields from sar images. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 30, n. 3, p. 526–533, 2005.
- [11] ENGEN, G. et al. Directional wave spectra by inversion of ers-1 synthetic aperture radar ocean imagery. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 32, n. 2, p. 340–352, Mar 1994. ISSN 0196-2892.
- [12] TILLEY, D.; BEAL, R. Ers-1 and almaz estimates of directional ocean wave spectra conditioned by simultaneous aircraft sar and buoy measurements. *Atmosphere-Ocean*, v. 32, n. 1, p. 113–142, 1994. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/07055900.1994.9649492>>.
- [13] HEIMBACH, P.; HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K. Statistical analysis and intercomparison of wam model data with global ers-1 sar wave mode spectral retrievals over 3 years. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 103, n. C4, p. 7931–7977, 1998. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/97JC03203>>.
- [14] VOORRIPS, A. C.; MASTENBROEK, C.; HANSEN, B. Validation of two algorithms to retrieve ocean wave spectra from ers synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 106, n. C8, p. 16825–16840, 2001. ISSN 2156-2202. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/1999JC000156>>.
- [15] VIOLANTE-CARVALHO, N. On the Retrieval of Significant Wave Heights from Spaceborne Synthetic Aperture Radar (ERS-SAR) using the Max-Planck Institut (MPI) Algorithm. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, v. 77, n. 4, p. 745–755, 2005.
- [16] SANTOS, A. L. C. *Recuperação do espectro direcional de ondas oceânicas com o uso do SAR transportado por satélite*. Tese (Doutorado) — UERJ, 2015.

- [17] SANTOS, A. L. C.; SANTOS, F. M.; CARVALHO, L. M.; VIOLANTE-CARVALHO, N. Sensibilidade de espectros de ondas oceânicas recuperados por radar de abertura sintética. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, n. 2, p. 251–272, 2015.
- [18] SANTOS, F. M. D. *Acoplamento de simulador de imagens SAR a interpretador MPI para estimação do espectro direcional de ondas*. Dissertação (Mestrado) — UERJ, 2012.
- [19] TEIXEIRA, S. *Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras*. Tese (Doutorado) — Insituto de Geociências - UFPA, 2011.
- [20] RANEY, K. *Radar Fundamentals: technical perspective*. [S.l.]: John Wiley, 1998.
- [21] NOVO, E. Bases teóricas para o uso de imagens sar no estudo de áreas alagadas. *1^o Simpósio de Geotecnologias no Pantanal - Campo Grande*, Anais, p. 883–894, 2006.
- [22] WANG, B. *Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- [23] LEWIS A.J.; HENDERSON, F. *Radar fundamentals: The Geoscience Perspective*. [S.l.]: John Wiley, 1998.
- [24] KANEVSKY, M. *Radar imaging of the ocean waves*. [S.l.]: Elsevier, 2009.
- [25] SWIFT, C. Passive microwave remote sensing of the ocean—a review. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 18, n. 1, p. 25–54, 1980.
- [26] NUNZIATA F.; GAMBARDELLA, A. M. M. An educational sar sea surface waves simulator. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, p. 11,3051–3066, 2008.
- [27] WAFO-group. Wafo - a matlab toolbox for analysis of random waves and loads - a tutorial. Disponível em: <<http://www.maths.lth.se/matstat/wafo>>.
- [28] GODA, Y. *Random Seas And Design Of Maritime Structures, Advanced Series On Ocean Engineering*. [S.l.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2000. v. 15.
- [29] BROOKER, G. *UWA processing algorithm specification Version 2.0*. [S.l.], 1995.