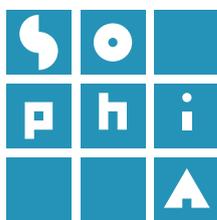


OBSERVAÇÃO DA TERRA

uso de imagens SAR para a
monitorização de águas
costeiras e oceânicas



**DGRM**

Avenida Brasília
1449-030 Lisboa
Portugal
Tel.: +351 213 035 700
Fax: +351 213 035 702
dgrm@dgrm.mam.gov.pt
www.dgrm.mam.gov.pt

SOPHIA

sophia-dqem@dgrm.mam.gov.pt
www.sophia-mar.pt

COPYRIGHT

Logótipo SOPHIA © DGRM 2016. Todos os direitos reservados. Marca registada. Não é permitida qualquer reprodução ou retroversão, total ou parcial, do logótipo SOPHIA sem prévia autorização escrita do Editor.

Guia 3 - Observação da Terra: uso de imagens SAR para a monitorização de águas costeiras e oceânicas. Licença Creative Commons Atribuição Não Comercial Compartilha Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Título

Observação da Terra: uso de imagens SAR para a monitorização de águas costeiras e oceânicas

Autores

Ana Sutcliffe¹, João Catalão², Ana C. Brito¹

¹ MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Departamento de Biologia Vegetal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

² Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Coordenação do Guia Técnico

João Catalão

Coordenação do Projeto SOPHIA na FCUL

Ana C. Brito

Edição

DGRM - Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos
Edição Eletrónica - 2016

Design Gráfico

ESCS - Escola Superior de Comunicação Social
(coordenação: João Abreu; paginação: Joana Souza; infografia: Ricardo Rodrigues; colaboração: Joana Paraíba, Joana Torgal Marques, Pedro Ribeiro, Renata Farinha, Rita Oliveira)

Referência ao Guia Técnico

Sutcliffe, A., Catalão, J. e Brito, A. C. (2016). Observação da Terra: uso de imagens SAR para a monitorização de águas costeiras e oceânicas. DGRM, Lisboa, Portugal. E-book disponível em www.sophia-mar.pt.

Referências importantes para aprofundar conhecimento

Robinson, I.S., (2004). Measuring the Oceans from Space: The principles and methods of satellite oceanography. Springer Praxis Books / Geophysical Sciences, 669 pp.

Robinson, I.S., (2010). Discovering the Oceans from Space: The unique applications of satellite oceanography. Springer Praxis Books / Geophysical Science, 639 pp.

Synthetic Aperture Radar: Marine User's Manual (C. R. Jackson, J. R. Apel), disponível em: www.sarusersmanual.com

Tutoriais

Fundamentals of Remote Sensing (Canada Centre for Mapping and Earth Observation), disponível em: www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satelliteimagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309

Tutoriais SOPHIA, disponíveis em: www.sophia-mar.pt/pt/formacoes

ISBN

978-989-99601-0-7

Documentação de apoio ao módulo de formação SOPHIA – Deteção remota: aplicações de imagens de radar de abertura sintética.

OBSERVAÇÃO DA TERRA

uso de imagens de temperatura
da superfície do mar e cor
do oceano para a monitorização
de águas costeiras e oceânicas





PREFÁCIO	7
CAPÍTULO 1 - Princípios do Radar de Abertura Sintética	9
1.1 Introdução ao SAR - Radar de Abertura Sintética	10
1.2 Funcionamento dos SAR	12
1.3 Resolução do sensor SAR	13
1.4 O que medem os SAR?	15
1.5 Fase e polarização	19
1.6 <i>Speckle</i> /granulosidade da imagem	21
1.7 Missões espaciais SAR: passado, presente e futuro	22
CAPÍTULO 2 - Capacidade de detecção, interpretação e aplicações das imagens SAR	27
2.1 Vento e ondas de Bragg	28
2.2 Assinaturas de fenómenos atmosféricos	29
2.3 <i>Slicks</i> oceânicos	30
2.4 Ondas oceânicas	31
2.5 Detecção de navios e esteiras	33
2.5.1 O efeito de Doppler	34
2.6 Topografia do fundo em locais pouco profundos	36
2.7 Sinergias com imagens da cor do oceano	37
2.7.1 Determinação do tipo de <i>slicks</i>	37
2.7.2 Distinção de ondas internas	37
CAPÍTULO 3 - Discussão dos métodos SAR e integração na Diretiva Quadro da Estratégia Marinha (DQEM)	39
REFERÊNCIAS	43



Prefácio

O projeto SOPHIA tem como objetivo a formação de recursos humanos de modo a assegurar competências para a implementação do programa de monitorização e do programa de medidas da Diretiva Quadro da Estratégia Marinha (DQEM). Esta ação de formação destina-se preferencialmente a técnicos superiores da Administração Central e Regional mas também a licenciados de organismos públicos ou privados envolvidos na implementação dos programas de monitorização.

A DQEM define um conjunto de descritores qualitativos que devem ser observados para a definição do bom estado ambiental. Este módulo de formação encontra-se centrado nos descritores relacionados com o lixo marinho e os contaminantes, no sentido da sua deteção e da sua quantificação. Para esse efeito é proposto o recurso à deteção remota espacial com imagens radar de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR). A deteção remota espacial tem características sinópticas e de repetibilidade temporal que garantem uma efetiva monitorização do mar nos pressupostos de cobertura geográfica e temporal prevista na DQEM. Acresce que, no caso da deteção remota radar de abertura sintética, a capacidade de monitorização é realizada em qualquer hora do dia e em quaisquer condições atmosféricas.

Este módulo de formação pretende capacitar os técnicos superiores de ferramentas de processamento e análise de imagens de radar de abertura sintética sobre o mar.

Em particular será dado especial ênfase aos aspetos relacionados com a deteção de lixo marinho, de manchas de óleo no mar e de navios.

As imagens radar de abertura sintética são imagens complexas que contêm a informação relativa à rugosidade e características dielétricas da superfície refletora. A sua interpretação e tratamento é diverso do usado em imagens óticas requerendo um maior aprofundamento dos aspetos relacionados com a propagação das ondas eletromagnéticas e da sua interação com o meio. Neste módulo, os conteúdos programáticos resultam de um compromisso entre os fundamentos teóricos necessários à compreensão do processo e os aspetos mais práticos do saber fazer.

No primeiro capítulo serão abordados os princípios do radar de abertura sintética em que serão versados os aspetos básicos relativos à aquisição das imagens, ao funcionamento dos sistemas SAR, à polarização e à interação da radiação com a superfície. No segundo capítulo, serão abordados os algoritmos e técnicas com capacidade de deteção, interpretação e aplicações das imagens SAR na determinação da direção do vento, na deteção de objetos ou películas sobre o mar e na deteção de navios.

João Catalão e Ana Sutcliffe



CAPÍTULO 1

PRINCÍPIOS DO RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

Ana Sutcliffe, João Catalão



1.1

INTRODUÇÃO AO SAR - RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

Os sistemas SAR (*Synthetic Aperture Radar*) funcionam na banda de frequências designada por micro-ondas (Fig. 1) adquirindo e registando imagens das propriedades dielétricas e geométricas da superfície terrestre em quaisquer condições atmosféricas, de dia ou de noite. O processo de formação de uma imagem consiste na transmissão e registo de uma série de pulsos codificados a partir de uma antena que ilumina numa visada lateral uma porção da superfície terrestre distanciada do traço do satélite. O eco de cada pulso é registado no intervalo entre as duas transmissões. A imagem é formada após o registo de um conjunto de ecos recolhidos ao longo do movimento do satélite, resultando no conceito de *strip mapping*, ou seja, a recolha de dados em faixas paralelas à linha de voo do satélite.

Desde meados de 1960 que se tem procurado desenvolver sensores que consigam fornecer dados da superfície da Terra. Em 1972 a NASA lançou um satélite que mais tarde se viria a chamar de LANDSAT e que, pela primeira vez, fornecia imagens com alta resolução (da ordem dos 80 metros). No entanto, como operava nos comprimentos de onda do visível e infravermelho, as imagens que obtinha dependiam da quantidade de luz solar disponível e da cobertura de nuvens.

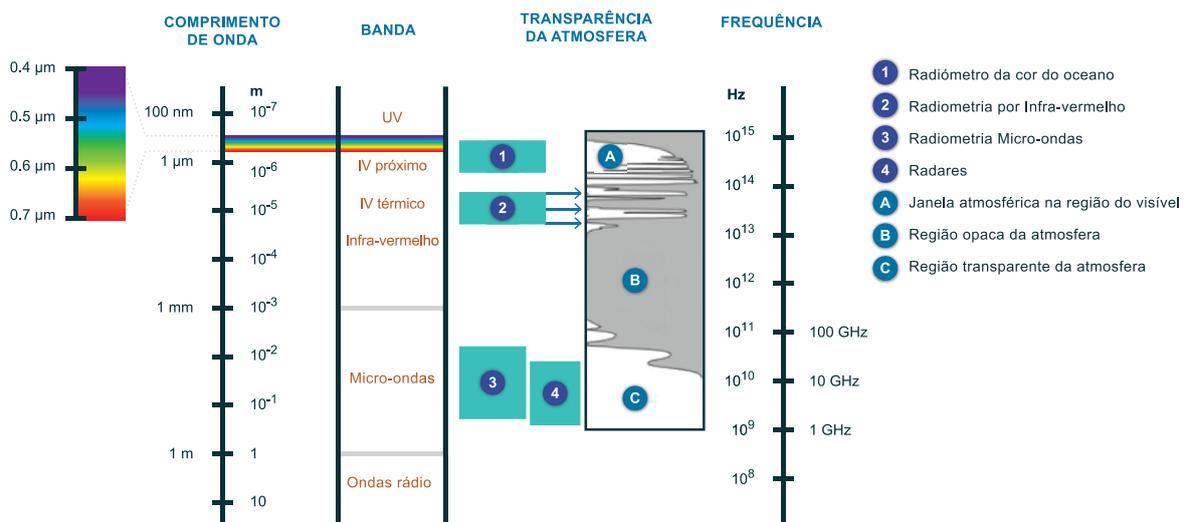


Fig. 1 - Esquema do espectro eletromagnético e das bandas usadas pelos vários sensores de observação da Terra. Os SAR usam as micro-ondas, zona em que o espectro eletromagnético é transparente à passagem da radiação (a transmissividade atmosférica é quase 100%). (adaptada de Robinson, 2010)

O conceito SAR, radar de abertura sintética, foi proposto nos anos 50 por Wiley (1954) e usado pela primeira vez por Graham (1974). Os SAR são sensores ativos ou radares assim chamados pois não se limitam a receber radiação emitida ou refletida da superfície do mar. Um sensor ativo emite um pulso eletromagnético e espera o retorno do seu eco. As diferenças entre o pulso emitido e o recebido contêm informação sobre a superfície do mar. A partir da informação assim recebida é possível construir-se uma imagem da superfície do oceano. Estes sensores operam nas frequências das micro-ondas, nas bandas resumidas na Tabela 1. Nas frequências das micro-ondas as nuvens não são um problema já que a radiação nestes comprimentos de onda é capaz de as atravessar sem ser absorvida, sendo assim possível obter informação da superfície do oceano independentemente da cobertura de nuvens¹. Outro aspeto positivo do uso desta zona do espectro é a possibilidade de recolher dados do oceano independentemente da luz solar disponível.

A energia emitida pelos SAR em forma de pulsos eletromagnéticos repetidos irá incidir sobre uma dada área sendo depois refletidos (ou retrodifundidos) em várias direções pelos objetos iluminados. A parte da energia que é retrodifundida na direção do sensor é recebida na antena do radar.

Tabela 1 - Resumo das bandas, frequências e comprimentos de onda usados nos radares SAR.

Comprimento de Onda (cm)	Frequência (GHz)	Banda
2,4 – 3,8	12,5 – 8	X
3,8 – 7,5	8 – 4	C
7,5 – 15	4 – 2	S
15 – 30	2 – 1	L
30 – 100	1 – 0,3	P

Ao receber a energia retrodifundida, o sensor irá analisar não só o tempo decorrido entre a emissão e a receção do pulso como irá analisar alterações no sinal (fase, amplitude e polarização). Todas estas alterações fornecem informação sobre o objeto refletor, visto que dependem das suas propriedades refletoras. O sinal recebido no sensor é transmitido para estações recetoras na superfície da Terra onde é processado de forma a obter imagens da superfície do mar.

¹ A presença na atmosfera de água no estado líquido pode absorver radiação nas micro-ondas.

1.2 FUNCIONAMENTO DOS SAR

O sensor SAR é instalado a bordo de satélites que descrevem órbitas quase polares a uma altitude entre os 600 e 800 km. Nestas órbitas, os satélites descrevem trajetórias quase circulares que os levam a passar por cima dos polos com períodos de cerca de 100 minutos. Com a Terra a girar por debaixo deles, os satélites cobrem a Terra de norte para sul na face iluminada pelo Sol e depois de sul para norte na outra face da Terra, cerca de 14 vezes por dia. Nestas órbitas os sensores fornecem uma cobertura regular e extensiva da superfície da Terra, pelo que são ideais para fins de observação da Terra. Existe um caso especial da órbita quase-polar que se designa por órbita hélio-síncrona por estar sincronizada com o Sol. Em termos práticos isto significa que o plano da órbita do satélite acompanha o Sol, girando a linha dos nodos no sentido contrário ao da rotação da Terra. Sendo assim, a hora local de passagem e consequentemente a iluminação solar é igual em cada passagem sobre a Terra, o que torna mais fácil o processamento da imagem produzida. No entanto, uma órbita hélio-síncrona não pode ser precisamente polar, o que se reflete na cobertura espacial dos sensores, já que não irão conseguir fazer medições nas latitudes mais altas.

O SAR possui uma antena retangular com dimensões típicas de 10 m por 1 m em que o seu comprimento está alinhado com a direção de voo do satélite, a chamada direção de azimute. O radar emite pulsos eletromagnéticos lateralmente, na direção perpendicular à linha de voo, a chamada direção de alcance (ver Fig. 2). Os pulsos são emitidos a um ângulo, θ , definido como o ângulo de incidência, que pode variar entre os 15° e os 60° . Este ângulo irá definir a área da superfície iluminada, ou por outra palavras, irá definir a pegada do sensor (zona a verde na Fig. 2) que aumenta em largura com o ângulo de incidência.

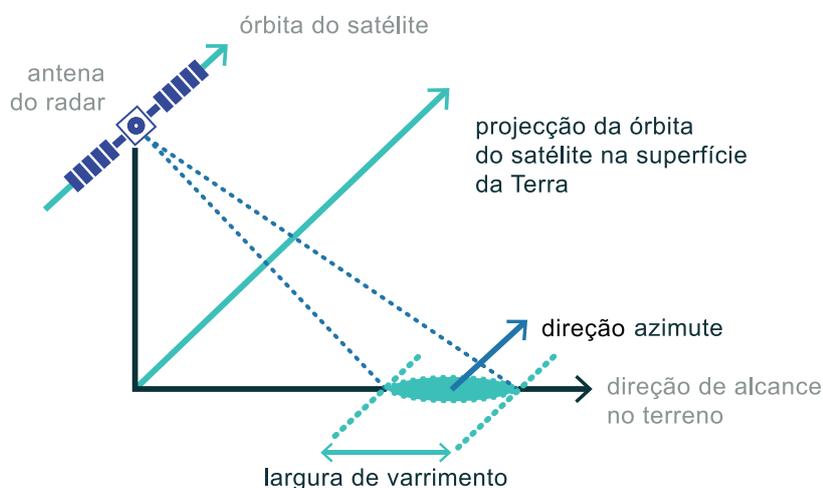


Fig. 2 - Geometria de um sistema de radar de imagem. (adaptada de Robinson, 2004)

1.3

RESOLUÇÃO DO SENSOR SAR

Uma característica deste tipo de radares é a sua elevada resolução no solo, a chamada resolução espacial, tipicamente de 25 m. Esta alta resolução espacial é obtida à custa de *strip maps* com larguras de varrimento mais estreitas e de uma menor resolução temporal, sendo o intervalo de tempo entre sucessivas imagens SAR da ordem de dias (12 dias para o Sentinel-1).

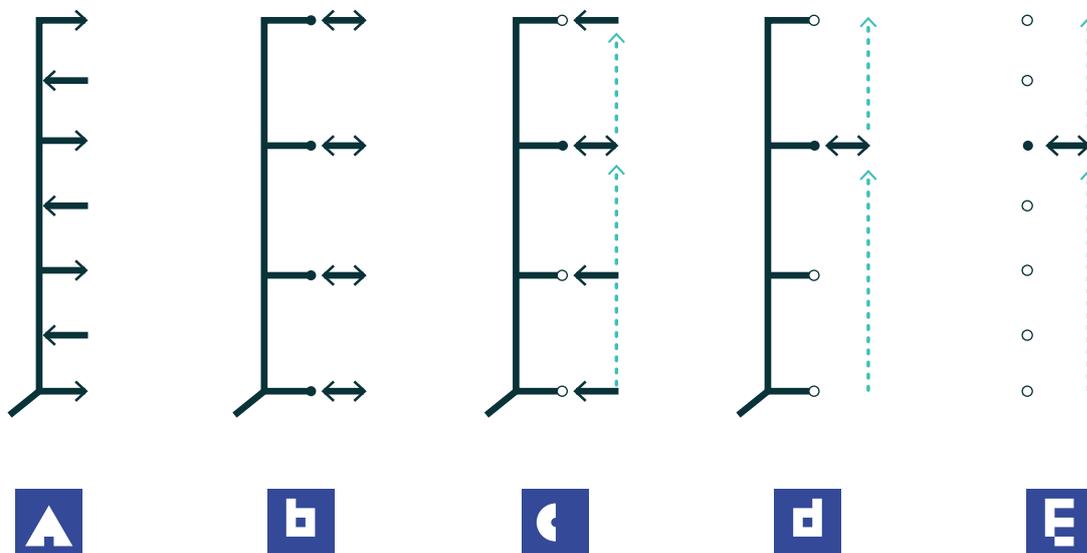
A resolução espacial é a distância mais pequena em que é possível distinguir dois objetos. Caso estes estejam separados por uma distância maior ou igual à resolução do radar, este é capaz de os distinguir e atribui a cada objeto uma célula de informação diferente (píxel). Caso a distância seja menor, a informação que o píxel contém é uma mistura da energia refletida pelos dois (ou mais) objetos refletores.

A resolução dos SAR é conseguida de formas diferentes nas duas direções. Estas podem ser tratadas em separado pois a velocidade de recolha dos dados nas duas direções é significativamente diferente. Na direção de azimute a velocidade de recolha dos dados depende da velocidade do satélite em relação ao solo, enquanto na direção de alcance depende só do tempo decorrido entre a transmissão do pulso e a sua receção. Como estas velocidades diferem em várias ordens de magnitude, também as escalas temporais e espaciais dos ecos para as variações em azimute e alcance são significativamente diferentes. A imagem SAR é o resultado da soma dos sinais recebidos na direção de alcance com os sinais recebidos na direção de azimute.

A elevada resolução dos SAR na direção de alcance depende da precisão com que o sensor consegue medir o tempo entre a emissão do pulso e a receção do seu eco. Esta é tanto maior quanto mais curto for o pulso emitido. Assim, para se obter uma resolução de 10 m no solo é necessário conseguir a emissão de um pulso muito curto, da ordem dos 60 ns (60×10^{-9} s). No entanto, pulsos desta ordem não teriam energia suficiente para serem retrodifundidos de volta para o sensor, pelo que não são viáveis. Os sistemas SAR simulam um pulso curto sob a forma da emissão de pulsos em “chirps” (“*chirp*”) que não utilizam uma frequência única. Um “chirp” varia linearmente a frequência do pulso, decrescendo-a com o tempo de emissão, conseguindo um eco equivalente ao de um pulso curto.

A resolução em azimute depende do comprimento da antena e será tanto maior quanto mais estreito for o feixe de radiação emitido. Um feixe estreito só é conseguido com antenas muito compridas, capazes de focar a radiação. Não é possível enviar para o espaço

antenas com comprimentos de quilômetros que seriam necessárias para se conseguir uma resolução de poucas dezenas de metros. Assim, os SAR, que têm antenas com cerca de 10 m de comprimento, simulam antenas mais compridas usando o processo da abertura sintética esquematizado na Fig. 3, que dá o nome a estes sensores. Para se explicar como funciona a abertura sintética, deve primeiro imaginar-se uma antena com uma abertura muito grande que emite e recebe radiação eletromagnética ao longo de todo o seu comprimento (ver caso A, Fig. 3). Como já se viu, esta terá de ter uma abertura de vários quilômetros para conseguir uma elevada resolução no solo. Esta antena poderia ser substituída por um conjunto de antenas pontuais interligadas distribuídas em linha reta, emitindo e recebendo ao longo de todo o seu comprimento (caso B). No caso C temos um conjunto de antenas pontuais isoladas, a emitirem pulsos idênticos em sequência. O sinal retrodifundido é recebido em todas as antenas pontuais e é reconstruído na soma de todos os ecos, simulando o caso A. Simplificando, podemos considerar que cada antena só iria receber a retrodifusão do sinal que emitiu (caso D), simulando ou sintetizando a antena grande ao somar todos os ecos recebidos. Na realidade uma antena SAR (caso E) é uma só antena pontual que se move em comprimento, emitindo e recebendo em cada lugar e simula uma antena maior ao emitir continuamente e recebendo os ecos à medida que se desloca (Robinson, 2004).



- A) Antena contínua.
 B) Série de antenas pontuais operando em conjunto.
 C) Série de antenas pontuais emitindo em sequência e todas elas recetoras dos pulsos.
 D) Série de antenas pontuais emitindo em sequência, mas recetoras só do pulso que emitiram.
 E) Antena pontual única movendo-se para sintetizar a totalidade da imagem.



Fig. 3 - Simulação de uma abertura sintética. (adaptada de Robinson, 2004)

O tamanho da abertura sintética é determinado pela distância percorrida pelo satélite durante o tempo que demora a receber o eco do primeiro pulso. Desprezando a curvatura da Terra, isto significa que a abertura sintética terá o mesmo tamanho que a largura no solo na direção azimute da pegada. Os dados recebidos ao longo do percurso são gravados a bordo e, devido ao seu tamanho, precisam de ser enviados logo que possível para estações em Terra. Na fase de processamento em Terra os sinais recebidos são tratados como se tivessem sido emitidos de uma antena com alguns quilômetros de comprimento, sintetizando assim a antena maior. No conceito SAR é criada artificialmente uma antena sintética usando o movimento da verdadeira antena, combinando a informação de muitos pulsos recebidos no espaço do comprimento da antena sintética. Esta operação tem a designação de focalização e existem vários algoritmos de focalização: Curlander and McDonough (1991), Massonet *et al.* (1994) e Raney (1994) são alguns exemplos. Esta metodologia tem como consequência um enorme aumento da resolução em azimute. No caso de uma antena de 10 m de comprimento a resolução azimutal é de 5 km na imagem radar e 4 m na imagem SAR. A resolução em alcance mantém-se inalterada.

1.4 O QUE MEDEM OS SAR?

Como já foi visto, os SAR operam nas frequências das micro-ondas, que devido ao seu comprimento de onda, penetram somente na camada superior do oceano. A profundidade de penetração da radiação aumenta com a diminuição da frequência (a 2 GHz a profundidade é de ~1 cm, a 12 GHz é de ~0,2 cm) e com a diminuição da salinidade, sendo maior no caso da água pura. No entanto, devido às propriedades da água do mar a maior parte da radiação é refletida ou retrodifundida de volta para o sensor. É a radiação retrodifundida que é medida pelo SAR.

Existem três mecanismos distintos capazes de retrodifundir o sinal emitido: 1) reflexão especular, 2) difusão de Bragg e 3) difusão de volume (não apresentada na Fig. 4); no entanto só as primeiras duas têm importância para aplicações oceanográficas.

A reflexão especular é dominante quando a radiação é refletida por objetos lisos e é caracterizada por ter um ângulo de reflexão igual ao de incidência (Fig. 4A). No caso dos SAR, que emitem radiação em ângulo sobre os oceanos, a reflexão especular não é dominante visto que é necessária a ausência de vento, e nestes casos a radiação é maioritariamente refletida para fora do ângulo de recepção do sensor. Este mecanismo de retrodifusão é dominante nos casos em que o ângulo de incidência da radiação é baixo (perto do nadir)

e para casos em que o objeto refletor é liso. No caso dos sensores SAR, contribuições por reflexão especular só se tornam importantes na presença de objetos angulares tais como navios. Nestes casos a radiação emitida em ângulo irá ser refletida de volta ao sensor ao encontrar os cantos dos navios, gerando reflexões duplas, podendo deste modo refletir a radiação de volta para o sensor (Fig. 4C), pelo que aparecem nas imagens como pontos com forte intensidade.

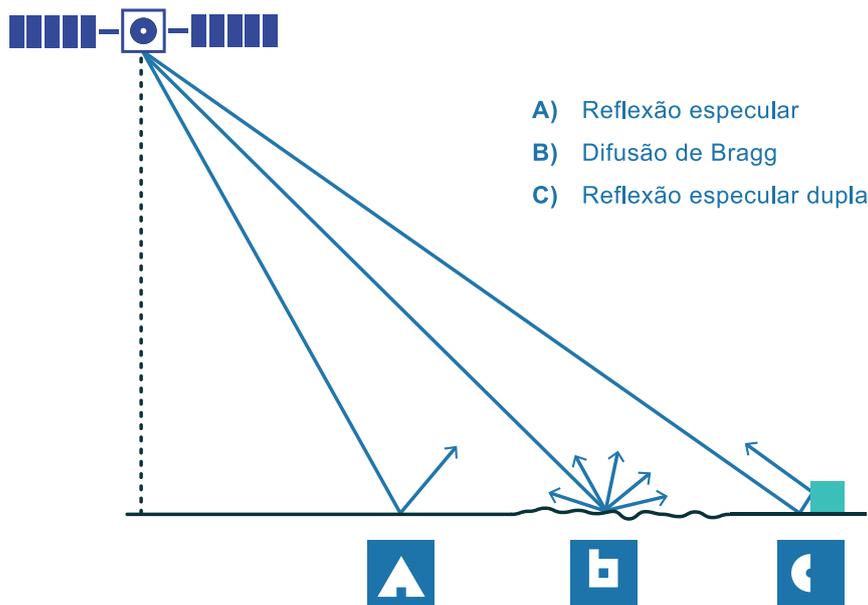


Fig. 4 - Mecanismos de retrodifusão do sinal emitido.

Para ângulos de radiação incidente entre os 20° e os 70° , que são os ângulos de incidência da maioria dos SAR, o mecanismo dominante é o chamado mecanismo de Bragg: a radiação incidente é difundida radialmente pela superfície do oceano majoritariamente na direção de incidência, i.e., de volta para o sensor (Fig. 4B). São condições necessárias para a ocorrência da difusão de Bragg que o comprimento de onda da superfície do mar seja semelhante ao comprimento de onda do sinal emitido e que as ondas de superfície tenham uma componente na direção de alcance do sensor (Fig. 5). Dada a natureza da rugosidade da superfície do oceano, esta última condição é quase sempre obtida já que as ondas de pequena escala, geradas pelo vento, têm uma distribuição contínua nos comprimentos de onda. Na presença das condições para a ocorrência da difusão de Bragg, o sinal retrodifundido interage de forma construtiva, i.e., entra em ressonância com a ondu-

lação da superfície do oceano com escala semelhante (ordem dos cm), resultando num aumento da energia do sinal recebido (Fig. 5). Assim, existem condições para a ocorrência da difusão de Bragg quando:

1.1

$$\lambda_B = \frac{\lambda_r}{2 \sin \theta} ,$$

em que λ_B é o comprimento de onda de Bragg (comprimento de onda que a rugosidade da superfície do mar terá de possuir para haver difusão de Bragg), λ_r é o comprimento de onda da radiação incidente e θ é o ângulo de incidência da radiação, medido do nadir. No caso de um SAR a operar na banda C, com $\lambda_r = 5,7$ cm e com ângulos de incidência entre 20° e 50° , para haver difusão de Bragg a rugosidade da superfície do mar terá de ter comprimentos de onda entre $3,7 < \lambda_B < 8,3$ (cm).

As imagens de radar adquiridas sobre o oceano são o resultado da modelação da radiação refletida por fenómenos que causem variações na rugosidade da superfície do mar. Estes fenómenos tanto podem ser oceânicos como atmosféricos.

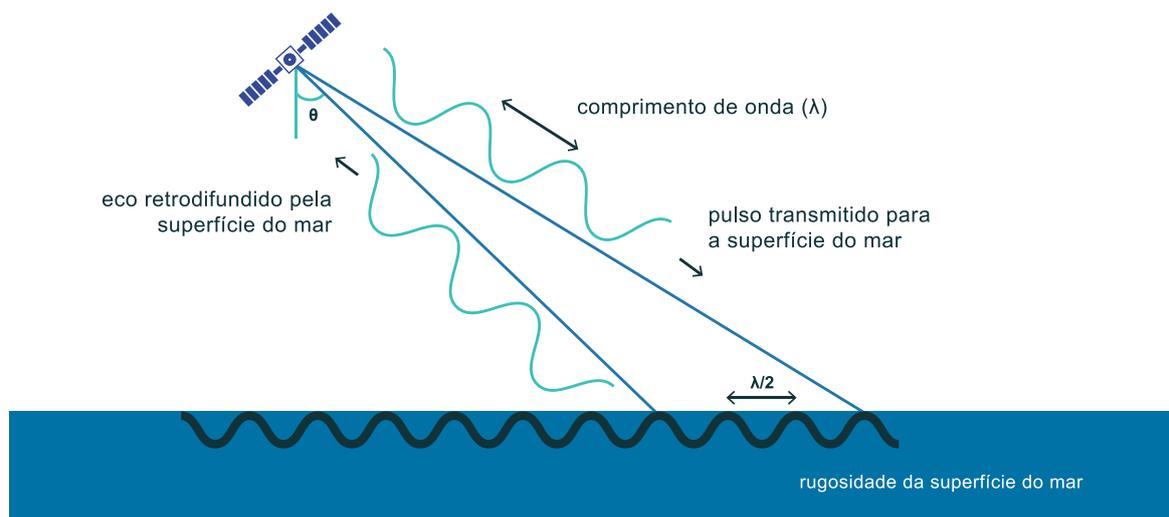


Fig. 5 - Esquema das condições necessárias para a ocorrência do mecanismo de retrodifusão de Bragg em que λ_r é o comprimento de onda da radiação emitida pelo SAR e θ é o ângulo de incidência da radiação.

A medida da radiação difundida é designada por *normalised radar backscatter*, σ_0 , ou a medida normalizada da radiação refletida ou coeficiente de retrodifusão, normalmente expressa em decibéis (dB), e é a medida que vem associada a cada píxel numa imagem SAR calibrada. Como já se viu, a retrodifusão só ocorre quando a superfície do mar tem

rugosidade com escala semelhante à da radiação do SAR que, por sua vez, só ocorre na presença de vento. Na ausência de vento a retrodifusão será nula pois o mar irá comportar-se como uma superfície lisa, promovendo desta forma a reflexão especular.

A intensidade do sinal retrodifundido medido pelo SAR irá aumentar com o aumento do vento, e logo, com o aumento da rugosidade do mar (Fig. 6). Como se pode ver na Fig. 6, a intensidade do sinal também depende do ângulo de incidência da radiação, sendo maior para ângulos menores.

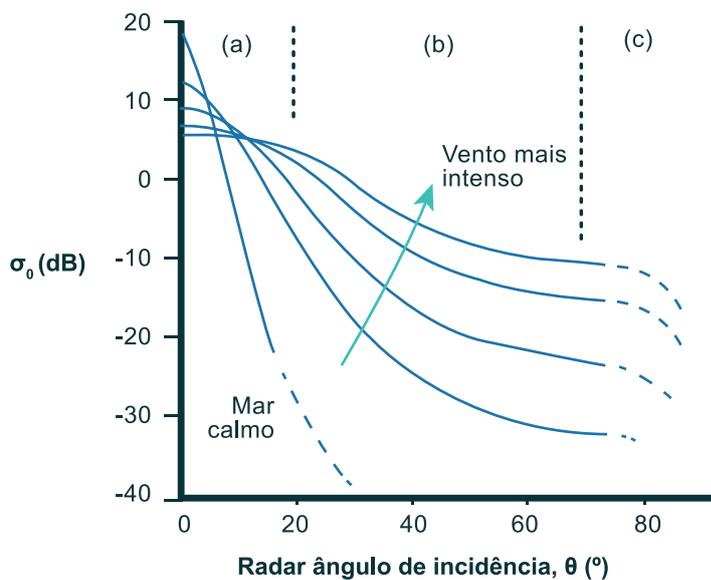


Fig. 6 - Variação da intensidade do coeficiente de retrodifusão, σ_0 , com o ângulo de incidência, θ , e a velocidade do vento, que aumenta na direção da seta. A difusão de Bragg é dominante nos ângulos contidos na secção assinalada por (b). (adaptada de Robinson, 2004)

A rugosidade da superfície do mar e por consequência, a intensidade do sinal retrodifundido, podem ser moduladas por fenómenos que ocorram no mar ou na atmosfera. Os mecanismos que provocam a modulação da rugosidade estão esquematizados na Fig. 7. que mostra como a rugosidade da superfície do mar pode aumentar e diminuir com a presença de ventos, de ondas de maior escala e de correntes à superfície. Estas últimas podem ser geradas por fenómenos a ocorrer dentro do oceano que assim poderão ter uma assinatura em imagens SAR. Em locais de convergência a rugosidade e logo a intensidade da retrodifusão aumentam e em locais de divergência, diminuem. Os mecanismos de modelação irão ser explorados com maior pormenor no capítulo seguinte.

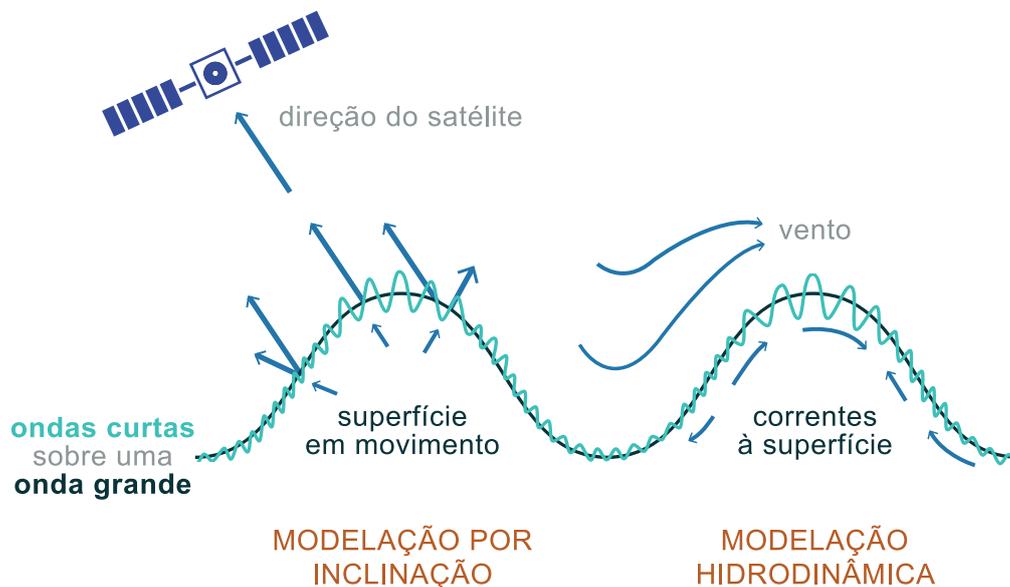


Fig. 7 - Esquema da modelação da rugosidade da superfície do mar por inclinação e por correntes. (adaptado de www.sarusersmanual.com)

1.5 FASE E POLARIZAÇÃO

Uma onda eletromagnética é definida pela sua amplitude, comprimento de onda, fase e polarização. Visto que o SAR produz a sua própria radiação eletromagnética, um elemento chave reside no radar coerente no qual a fase e a amplitude são recebidos e registados para posterior processamento. Acresce que o comportamento da fase deve ser estável no curto período entre a emissão e receção do sinal. Conhecidas a fase e polarização do sinal emitido pode comparar-se com a fase e polarização do sinal recebido e conseguir-se mais informação sobre o objeto refletor. Diferenças de fase entre duas imagens SAR obtidas sobre o mesmo local com ângulos diferentes podem ser usadas para determinar mudanças na posição de objetos sobre a Terra, pelo que esta aplicação, a interferometria, é maioritariamente terrestre. A interferometria SAR resulta da combinação de duas imagens SAR adquiridas em simultâneo por duas antenas, ou imagens adquiridas em diferentes tempos em condições geométricas semelhantes. Combinando coerentemente os sinais de duas antenas, a diferença de fase interferométrica entre os sinais recebidos pode ser calculada para cada píxel da imagem ou ponto do terreno. Neste cenário, a diferença de

fase é relacionada com a diferença da distância geométrica para o ponto imagem, o que depende da elevação. Conhecendo a geometria da aquisição interferométrica a diferença de fase pode ser convertida em altitude para cada ponto imagem. A primeira e principal aplicação da interferometria SAR foi a cartografia da elevação do terreno.

A onda eletromagnética pode ter quatro polarizações que são determinadas pela orientação do campo elétrico. Uma onda eletromagnética, como o seu nome indica, tem campo elétrico e magnético, que se propagam com a onda fazendo um ângulo de 90° entre si. A polarização das ondas eletromagnéticas refere-se à direção do campo elétrico. Quando a direção do campo elétrico é vertical à superfície da Terra a polarização diz-se vertical e quando a sua direção de propagação é horizontal a polarização diz-se horizontal (Fig. 8).

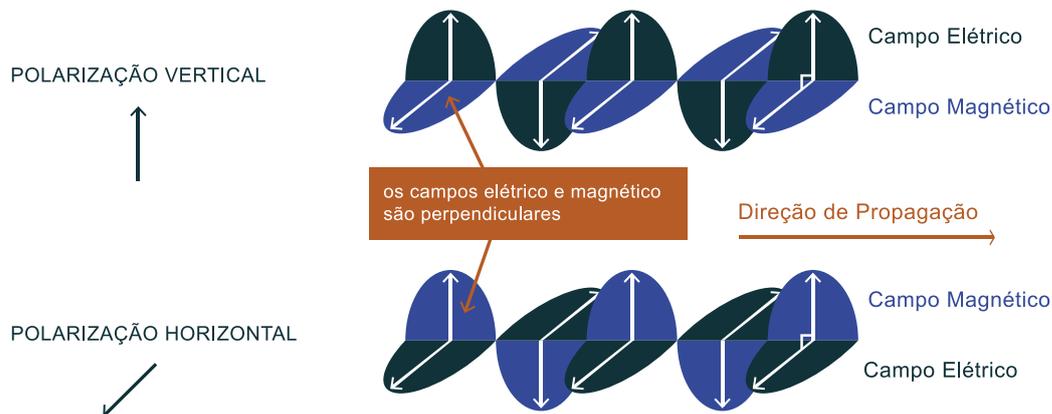


Fig. 8 - Esquema de uma onda eletromagnética com polarização vertical (topo) e polarização horizontal (em baixo).

Assim, o sinal pode ser transmitido pelo sensor em várias polarizações: num plano vertical ou horizontal, respetivamente, plano paralelo ou perpendicular ao plano de incidência. Podem ser recebidos 4 tipos distintos de ecos: HH, HV, VH e VV, em que a primeira letra se refere ao tipo de polarização emitida e a segunda à polarização recebida.

A polarização da onda pode ser alterada pela superfície do mar pois ondas com polarização diferente são refletidas com intensidades diferentes. Esta informação pode ser usada para caracterizar o estado do mar, sendo que objetos com maior variação na vertical irão induzir uma maior retrodifusão na polarização vertical e objetos com maior escala horizontal irão resultar numa maior retrodifusão da polarização horizontal.

1.6

SPECKLE/GRANULOSIDADE DA IMAGEM

É necessário algum cuidado na interpretação das imagens SAR já que existem alguns artefactos que são resultado do método de construção destas imagens.

Como se pode ver na Fig. 9, uma imagem SAR tem um aspeto granuloso. Isto deve-se à resolução elevada das imagens: as medidas de retrodifusão são recolhidas sobre uma área pequena (geralmente 25 m x 25 m) e durante um curto intervalo de tempo (menos de 1 s). Assim, a retrodifusão resulta da soma da energia refletida nessa área, que é baixa por ter sido refletida por poucos elementos à superfície. O sinal refletido pode combinar-se aleatoriamente gerando variações na intensidade que não correspondem a difusão por um objeto. Por esta razão existe maior contaminação do sinal, ou seja, mais ruído no sinal, que se reflete como granulosidade da imagem. Quanto maior a quantidade de elementos refletores dentro da área iluminada, menor será o *speckle*. No entanto, dada a necessidade de alta resolução nas imagens SAR, este será sempre um fator presente. É possível reduzir-se a granulosidade da imagem usando filtros que, no seu mais simples, tomam a média da retrodifusão sobre alguns pixéis, aumentando a resolução radiométrica à custa da resolução espacial.

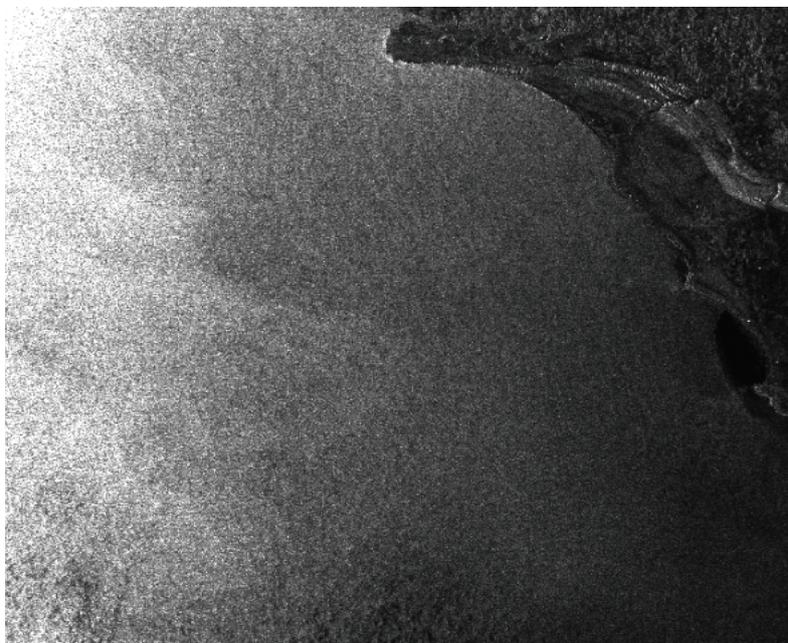


Fig. 9 - Imagem SAR de 31 de março de 2005, 07:59 UTC. (processada pela FCUL utilizando dados de deteção remota do satélite ENVISAT da ESA)

1.7

MISSÕES ESPACIAIS SAR: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

O primeiro sistema SAR espacial foi transportado a bordo do satélite SEASAT lançado em 1978 para estudos do oceano (Fu e Holt, 1982). Embora esta missão tenha durado apenas 105 dias, e apesar de problemas com a calibração do sensor, as imagens SAR permitiram mapear com sucesso a ondulação do oceano. O sucesso desta missão teve como consequência a inclusão de sistemas SAR nas missões Space Shuttle dos anos 80 e na primeira missão espacial SAR exterior à Terra ao planeta Vénus em 1989 chamada Magellan (Ford et al., 1993). Esta missão cartografou 98% de Vénus em dois anos de missão com uma resolução de 150 m (Curlander and McDonough, 1991).

Um dos problemas dos dados gerados por sensores ativos é o facto de terem um elevado número de bytes, o que gera dificuldades no armazenamento a bordo. Em 1990 iniciou-se a montagem de uma rede de estações recetoras de dados de satélite que tornou possível a transmissão da informação obtida pelo SAR. A elevada quantidade de dados recolhida por estes sensores ativos tornava essencial a existência de uma estação recetora que estivesse visível ao sensor na altura da recolha de dados para que estes pudessem ser imediatamente transmitidos. O problema do armazenamento de dados a bordo tem vindo a ser minorado com a evolução da tecnologia.

Em 1991 foi lançado pela agência espacial europeia, a ESA, o satélite ERS-1, com uma órbita hélio-síncrona a 785 km de altitude. A bordo do satélite ia instalado um instrumento ativo, o Active Microwave Imager (AMI), que possuía uma antena que transmitia alternadamente no modo SAR a operar na banda C e no modo difusómetro (sensor ativo de micro-ondas que mede ventos). Assim, só se poderiam obter imagens SAR quando outro sensor não estivesse em operação. Apesar desta limitação, o sensor SAR recolheu um vasto conjunto de dados ao longo da sua vida operacional. Este satélite esteve em órbita durante 9 anos, até 2000, muito depois da data prevista para o seu tempo de vida.

Em 1995 lançou-se o satélite ERS-2, para substituir o ERS-1. Houve um período de tempo em que ambos estiveram em órbita, na chamada missão “Tandem”, em que percorriam a mesma órbita com uma diferença de 24 horas. Esta missão durou nove meses e forneceu aos cientistas uma oportunidade única de estudar a evolução de fenómenos durante 24 horas. O ERS-2 esteve em funcionamento até setembro de 2011, vários anos após o tempo operacional inicialmente previsto.

Ambos ERS SAR operavam na banda-C, com frequência de 5,3 GHz, o que corresponde a um comprimento de onda de 5,66 cm. A geometria dos sensores está esquematizada na Fig. 10, que mostra o ângulo de visão entre $17,5^\circ$ e 23° , que se traduz à superfície por um alcance a variar entre 835 km e 873 km dado que o satélite tinha órbita com 785 km de altitude. Aos 23° de ângulo de incidência nominal, o sensor tem uma resolução em alcance inclinado de 8,56 m, o que corresponde a uma resolução em alcance no solo de 22 m. No entanto, na altura de processamento dos dados, a resolução final é de 25 m. Existem dois modos possíveis para a construção de imagens: o modo de imagem (Image Mode, IM) e o modo de ondas (Wave Mode, WM). Para mais informações sobre este sensor: earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar.

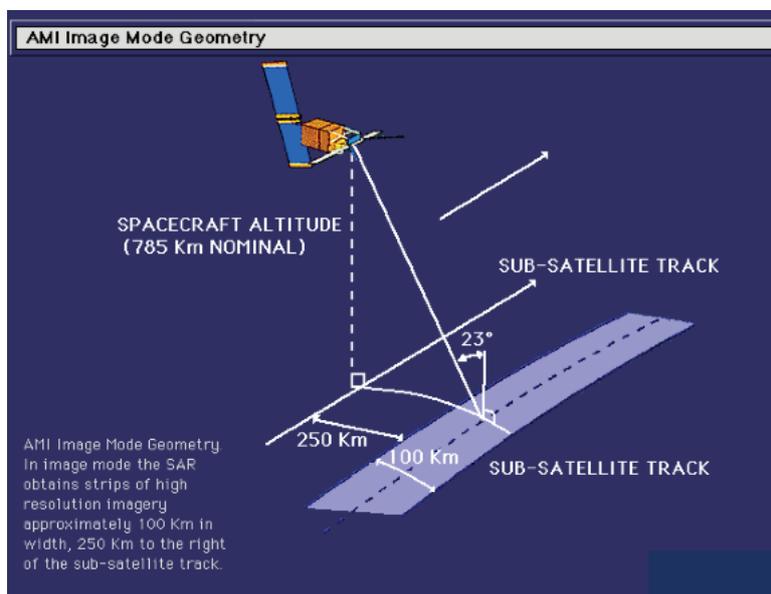


Fig. 10 - Geometria dos sensores SAR a bordo do ERS no modo de imagem. (© ESA)

O sensor sucessor do SAR, o ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), foi lançado pela ESA em março de 2002 a bordo do satélite ENVISAT que esteve em funcionamento até maio de 2012. Tal como os seus predecessores, também operava na banda-C com a frequência de 5,331 GHz. Com este sensor tornou-se possível obter imagens com polarizações HH, VV e polarizações cruzadas HV e VH. Outra melhoria no sensor foi a possibilidade de operar em mais modos:

- *ASAR image mode* (IM): contém informações de amplitude e fase e produz imagens com polarizações HH ou VV. As imagens com resolução espacial de 30 m são compostas por pixels com 12,5 m x 12,5 m elaborados com dados de pelo menos três ângulos de incidência diferentes.
- *Alternating polarisation mode* ou modo de polarização alternada (AP): produz pares de imagens com polarizações diferentes e resolução espacial de 30 m. Os seguintes pares são possíveis: HH/VV, HH/HV ou VV/VH².

² Para mais informações sobre o sensor ASAR e os seus produtos consulte: earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/asar

- *Wide swath mode* ou modo de longo alcance (WS): imagens com largura de varrimento de 400 km, com polarizações de HH ou VV e compostas por pixels com 75 m x 75 m.
- *Global monitoring mode* ou modo de monitorização global (GM): opera do mesmo modo que WS mas obtém imagens com resolução reduzida de 1 km.
- *Wave mode* ou modo de onda (WV): pequenas imagens com informação do espectro do oceano com dimensões que variam entre 10 km e 5 km obtidas com polarização HH ou VV.

A agência espacial Canadiana (CSA) lançou em 1995 o Radarsat-1 que esteve operacional até 2013, seguido do Radarsat-2 em 2007, que ficou operacional em 2008 e ainda está ativo. Os sensores Radarsat-1 e Radarsat-2 operam na banda C, mas enquanto o primeiro só fornecia dados com polarização HH, o segundo oferecia a possibilidade de imagens com polarização HH, VV, HV e VH. Ambos foram lançados em órbitas polares, no entanto, enquanto o Radarsat-1 emitia na lateral para a esquerda, o Radarsat-2 emitia na lateral para ambos os lados. Ambos são capazes de recolher imagens da superfície do oceano em vários modos, mas dado que estas missões foram concebidas para uso comercial, os seus dados não são de livre acesso, pelo que o seu uso é menos comum que os dados dos sensores referidos anteriormente.

O sensor TerraSAR, lançado em junho de 2007, é um sensor que opera nas bandas X, nos 9,65 GHz. O sensor foi desenvolvido para fins científicos e também com fins comerciais, pelo que alguns dos seus dados só são de livre acesso para cientistas registados no site da DLR, Centro Aeroespacial e de Aeronáutica Alemã³. Este sensor traz uma melhoria na resolução espacial, com capacidade de emitir feixes polarizados e operando em três modos esquematizados na Fig. 11:

- *SpotLight*: produz imagens com 10 km x 10 km e resolução de 1-2 m;
- *StripMap*: produz imagens retangulares com 30 km de largura e resolução entre 3-6 m;
- *ScanSAR*: obtém imagens com largura de 100 km e resolução de 16 m.

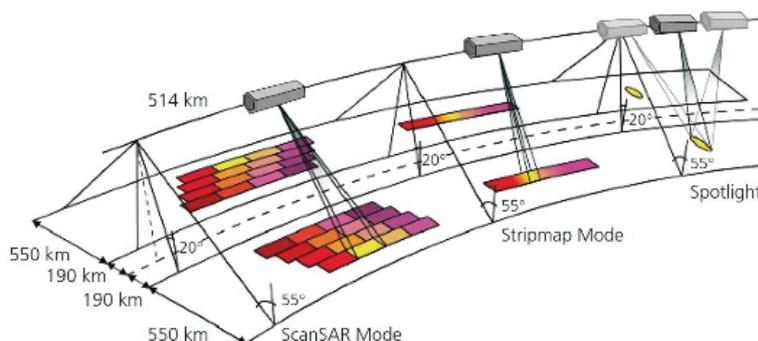


Fig. 11 - Esquema dos três modos de imagem do sensor TerraSAR: Modo ScanSAR, modo Stripmap e modo Spotlight. (© DLR, Centro Aeroespacial e de Aeronáutica Alemã)

³ Para mais informações sobre o sensor TerraSAR consultar: www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#/gallery/350.
Para registos consultar: <http://sss.terrasar-x.dlr.de>

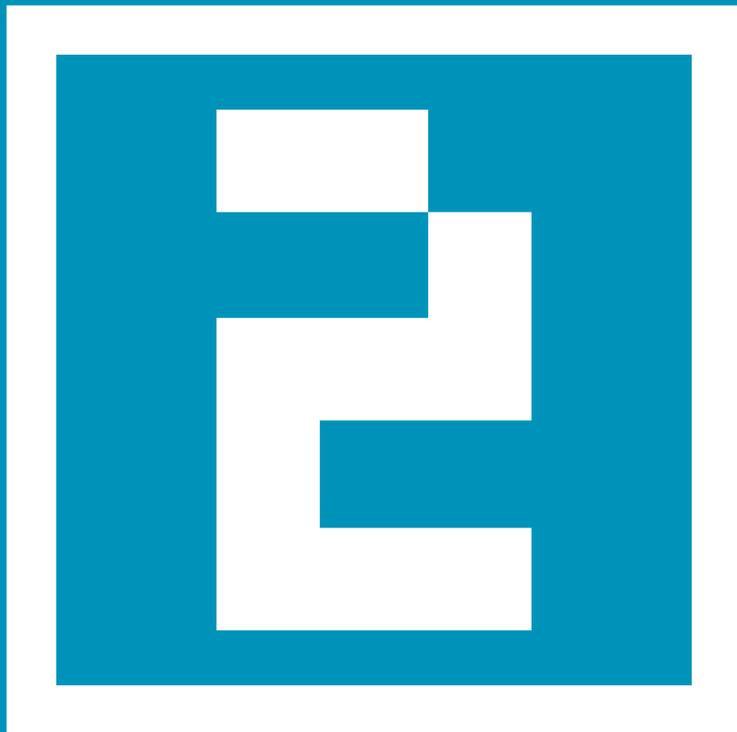
As aplicações deste sensor são maioritariamente para deteção de gelo no mar e aplicações sobre Terra, no entanto, nesta banda a deteção de *slicks* resultantes de derrames de navios é uma aplicação de interesse. A polarização VV é especialmente útil já que é mais sensível à presença de *slicks* e a alta resolução das imagens é uma mais valia importante.

O programa Sentinel está a ser desenvolvido pela ESA para aplicações de monitorização dos Oceanos e da Terra, pelo que o objetivo é proporcionar uma cobertura global. O primeiro de uma série de satélites (Sentinel-1) foi lançado em abril de 2014 e a bordo carrega um sensor SAR a operar na banda C, centrado nos 5,405 GHz. Desenvolvido com vista a melhorar os sensores passados (ERS-1,2 e ENVISAT-ASAR), emitem radiação com todas as polarizações já referidas e operam em quatro modos de imagem⁴:

- *Modo Stripmap (SM)*: obtém imagens com 80 km de largura e resolução de 5 m;
- *Modo Interferometric Wide Swath (IW)*: imagens com largura de 250 km e resolução de 5 m x 20 m;
- *Modo Extra Wide Swath (EW)*: com largura de 400 km e resolução de 25 m x 100 m;
- *Modo Wave (WV)*: imagens de 20 km x 20 km e resolução de 5 m x 20 m;

Os satélites Sentinel-1B e Sentinel-1C irão melhorar a cobertura temporal deste sensor e têm datas de lançamento previstas para o final de 2016 e para 2019, respetivamente.

⁴ Para informação sobre a missão e o sensor: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1>.
Para informação mais detalhada sobre esta missão e sensor, consultar: https://earth.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook.



CAPÍTULO 2

CAPACIDADE DE DETECÇÃO, INTERPRETAÇÃO E APLICAÇÕES DAS IMAGENS SAR

Ana Sutcliffe, João Catalão



2.1

VENTO E ONDAS DE BRAGG

São os aumentos e diminuições na amplitude das ondas de Bragg que assinalam a presença de fenômenos que causem a sua variação. Uma diminuição da amplitude da onda de Bragg é traduzida por um sinal com uma intensidade mais fraca (que tem uma assinatura mais escura na imagem) e o aumento da amplitude da onda de Bragg é traduzido por um aumento na intensidade do eco, que aparece na imagem com uma assinatura mais clara.

A amplitude das ondas de Bragg pode ser modulada⁵ de várias maneiras:

1. Por uma variação no campo do vento à superfície do oceano,
2. Por uma variação na diferença de temperatura entre a água e o ar,
3. Por uma variação da intensidade das correntes à superfície,
4. Por uma variação na inclinação da superfície do mar induzida pela passagem de ondas superficiais mais longas,
5. Pela presença de petróleo ou *slicks* orgânicos à superfície do oceano,
6. Pela existência de turbulência na camada superficial do oceano.

As variações na amplitude das ondas de Bragg causadas por: 1), 2) e 6) permitem que sejam visíveis nas imagens SAR os fenômenos atmosféricos. Os fenômenos oceânicos tornam-se visíveis por causa das variações causadas por: 2), 3), 4), 5) e 6).

A rugosidade da superfície do mar é gerada pelo vento que lhe fornece energia. As condições ótimas de vento para a geração de ondas de Bragg são ventos com intensidades entre os 2 e 12 m/s. Para ventos com intensidades abaixo dos 2 m/s o sinal retrodifundido não revela modulações e aparecem nas imagens como zonas escuras, logo com baixa intensidade de sinal retrodifundido. Acima dos 12 m/s a intensidade do sinal é demasiado alta para refletir a presença de quaisquer fenômenos que possam modular a superfície do oceano e aparecem nas imagens como zonas claras.

As imagens SAR contêm informação sobre o vento visto que existe uma dependência do sinal retrodifundido na intensidade e direção do vento. A direção do vento pode ser retirada de uma imagem de SAR caso exista a assinatura de linhas induzidas por ventos fortes, visíveis como locais com maior intensidade na imagem. No entanto, é necessária uma fonte de informação extra que forneça o sentido do vento.

⁵ Aqui o termo modulação refere-se a alterações na amplitude das ondas de Bragg induzidas ou causadas pela ocorrência ou passagem de um fenómeno que não o vento.

2.2

ASSINATURAS DE FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS

Como já foi visto no capítulo anterior, um fenómeno só terá uma assinatura em imagens SAR se provocar variações na rugosidade da superfície do mar que terão por consequência uma variação na intensidade do sinal retrodifundido.

É importante ter presente que as variações da rugosidade da superfície do mar podem ser causadas por fenómenos que tanto podem ser de origem oceânica como atmosférica. Por esta razão é importante conhecer os vários mecanismos que podem gerar uma assinatura em imagens SAR, bem como ter um conhecimento do local de obtenção da imagem e as condições locais de vento para garantir uma correta interpretação das assinaturas.

As assinaturas de origem atmosférica estão associadas a modificações no campo do vento à superfície do oceano, que provocam uma modulação na rugosidade da superfície do mar. Estas modificações no campo do vento podem ser provocadas por três tipos de processo:

1. Processos de escala sinótica: estes estão geralmente associados a frentes atmosféricas que estão associadas a uma súbita mudança na intensidade do vento à superfície do oceano, que resulta numa mudança da intensidade da imagem. Esta assinatura é geralmente quase reta ou ligeiramente curva com uma extensão de dezenas a centenas de quilómetros.
2. Processos criados por topografia: nestes casos a topografia local afeta o campo do vento à superfície e são fenómenos locais conhecidos. Um exemplo deste tipo de processos é o da presença de ilhas que criam uma assinatura gerada pelos ventos a sotavento. Na imagem a assinatura é semelhante à de uma esteira que, por estar a sotavento, é indicativa da direção do vento. Um segundo exemplo resulta da interação da topografia junto à costa, podendo criar uma zona abrigada do vento, que se traduz na imagem como uma zona mais escura, ou na existência de ventos catabáticos ou por brisa terrestre, criando uma zona com maior intensidade de imagem, associada ao aumento do vento na zona costeira.
3. Processos de instabilidade atmosférica: estes processos estão associados a ventos verticais podendo gerar células de convecção ou vórtices tubulares. Estes últimos alinham-se com a direção do vento.

2.3 SLICKS OCEÂNICOS

As ondas de Bragg são sensíveis à presença de qualquer fenómeno que cause uma diminuição da rugosidade da superfície do mar. Além da diminuição da intensidade do vento, outro processo que provoca a diminuição da rugosidade do mar é a existência de películas ou *slicks* sobre a superfície do mar. A sua presença na superfície do mar provoca um aumento da tensão superficial e reduz a fricção por ventos, resultando numa diminuição da radiação difundida para o SAR que na imagem aparece como uma zona mais escura. As ondas de comprimento de onda da ordem dos centímetros, tais como a rugosidade da superfície do mar e a radiação das bandas C e X, são muito sensíveis à presença de *slicks*. A polarização do sinal recebido também pode ajudar na deteção, sendo que a polarização VV é a mais sensível à presença de *slicks* já que estes irão causar uma variação na altura da superfície do mar na direção vertical.

Os *slicks* podem ser de origem orgânica ou não orgânica, sendo que a sua distinção pode não ser sempre simples. *Slicks* não orgânicos são compostos de petróleo que podem ter origem natural, resultante de descargas naturais do fundo do mar, ou de origem não natural, resultando neste último caso do derrame de petróleo de navios ou plataformas petrolíferas.

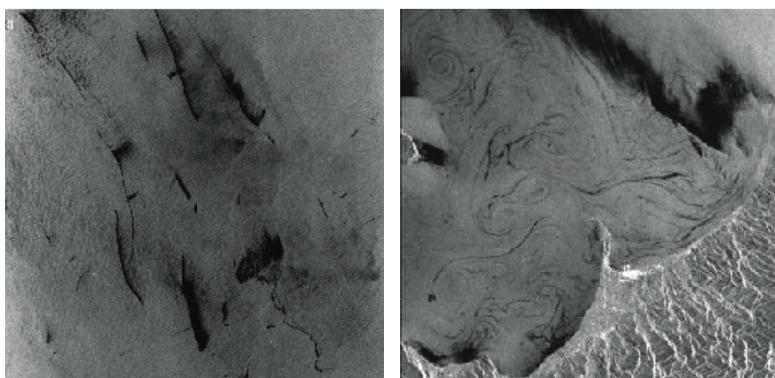


Fig. 12 - imagens SAR com exemplos de assinaturas de *slicks*.

À direita, imagem ERS-2 SAR de 4 de abril, 1997, ao largo de Singapura com assinaturas de *slicks* de origem não orgânica.

À esquerda, imagem ERS-2 SAR ao longo da Sicília com assinatura de *slicks* de origem orgânica.

(processada pela FCUL utilizando dados da ESA)

Os *slicks* de origem orgânica são camadas monomoleculares finas, podendo ser produtos de animais ou plantas marinhas ou produtos de origem terrestre resultantes da descarga de rios ou de transporte atmosférico. Graças à sua fina camada, estes *slicks* são facilmente transportáveis por advecção horizontal gerada por correntes ou ventos. Por esta razão podem ter assinaturas que revelem a presença de *eddies* ou meandros nas correntes oceânicas, como se pode ver na imagem da direita na Fig. 12. Estes *slicks* podem ser facilmente dissipados por ventos, que por sua vez irão provocar processos de mistura na camada su-

perior do oceano, pelo que não será provável a sua presença em imagens SAR sucessivas. Os *slicks* de origem não orgânica diferem dos acima referidos por serem mais espessos. Por esta razão são necessários ventos mais fortes para causar a sua dispersão. Estas assinaturas podem também conter informação da direção do vento, já que óleos mais pesados irão ser empurrados pelo vento, acumulando no sentido de sopro, aparecendo na imagem como uma zona mais escura, e deixando para trás um rasto mais fino que irá aparecer na imagem como uma zona menos escura (ver imagem da esquerda na Fig. 12).

2.4 ONDAS OCEÂNICAS

As ondas oceânicas também podem ter uma assinatura nas imagens SAR através dos processos de modelação hidrodinâmica ou por inclinação.

A assinatura de ondas oceânicas depende da escala das ondas. As mais pequenas, a chamada rugosidade da superfície ou ondas de capilaridade, são necessárias para a criação de uma imagem SAR. Ondas com maior escala, as chamadas ondas de superfície, são geradas pelo vento, pelo que têm direção de propagação alinhada com a do vento. Poderão ter uma assinatura nas imagens SAR caso se propaguem numa direção que tenha componente na direção de alcance. A assinatura destas ondas de maior escala pode ser criada por modelação por inclinação da superfície. Neste caso a passagem das ondas irá provocar uma inclinação da superfície que irá modular a intensidade do eco,

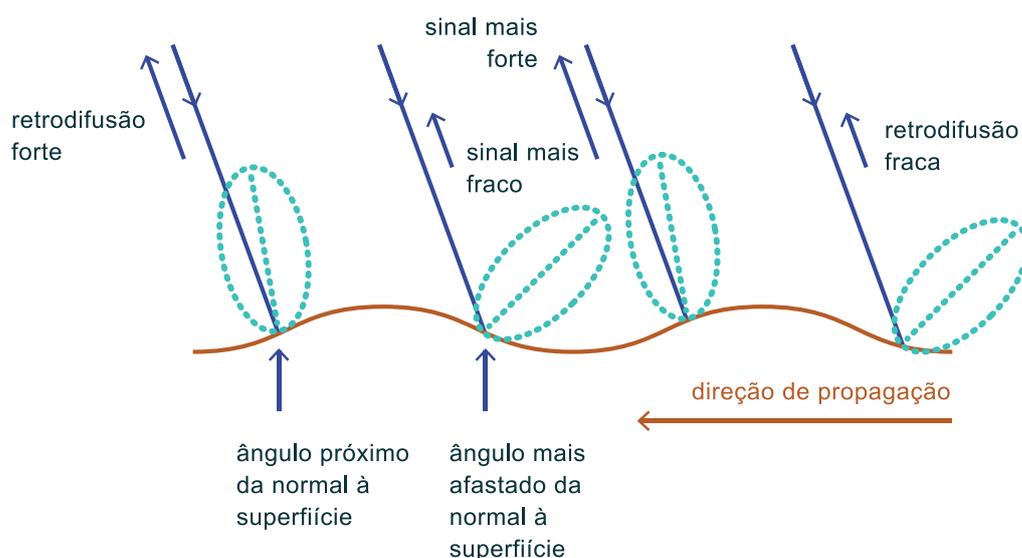


Fig. 13 - Esquema da modelação por inclinação. A intensidade do sinal retrodifundido é tanto maior quanto menor for o ângulo entre a direção de incidência e a normal à superfície. (adaptada de Robinson, 2004)

sendo que a intensidade do sinal retrodifundido aumenta com a diminuição do ângulo de incidência, i.e., quando o ângulo de incidência da radiação está próxima da perpendicular à superfície do mar. Como se pode ver no esquema da Fig. 13, quanto menor o ângulo θ , maior a intensidade do sinal retrodifundido, o que acontece na face da onda mais próxima do sensor. Assim, ondas capazes de gerar este tipo de assinaturas são visíveis em imagens SAR como linhas alternadamente mais claras e mais escuras. Este tipo de modulação não depende da rugosidade da superfície do mar, podendo gerar uma assinatura em imagens SAR mesmo com ausência de vento. É por esta razão que é possível retirar de uma imagem SAR informação do campo de agitação marítima ou *swell*.

A modelação hidrodinâmica pode ser gerada por qualquer tipo de onda que com a sua passagem gere correntes à superfície, sendo que a escala da assinatura será relacionável com a escala da onda. A Fig. 14 esquematiza as correntes geradas pela passagem de uma onda de superfície e consequente modulação da rugosidade da superfície do mar, mostrando que em zonas de convergência das correntes a intensidade do sinal retrodifundido aumenta e em zonas de divergência o sinal diminui. De novo as ondas terão de ter uma direção que tenha uma componente na direção de alcance do sensor para poderem ter assinatura na imagem SAR. Um outro exemplo de ondas capazes de gerar este tipo de correntes à superfície são as ondas internas. De uma forma sucinta, estas são ondas que se propagam no interior de um fluido ao longo de uma descontinuidade. Assim, podem propagar-se dentro do oceano ou na atmosfera ao longo de uma descontinuidade gerada por diferenças de temperatura (no oceano propagam-se ao longo da termoclina). Estas ondas terão assinaturas cuja escala é geralmente muito superior caso sejam de origem atmosférica, podendo ser esta uma possível ajuda na distinção das ondas internas oceânicas, visíveis na zona a azul da Fig. 15, cujas escalas variam entre as centenas de metros e as dezenas de quilómetros.



Fig. 14 - Esquema da modulação hidrodinâmica. As zonas de convergência de correntes causam um aumento da rugosidade à superfície, resultando num aumento da intensidade do sinal retrodifundido. (adaptada de Robinson, 2004)

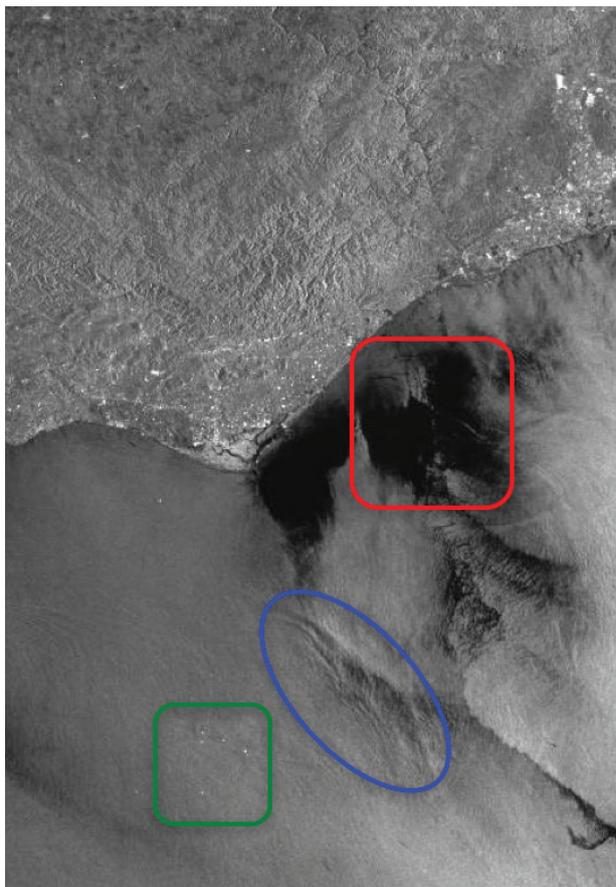


Fig. 15 - Imagens ENVISAT ASAR de dia 14 de outubro, às 10:43 UTC, recolhidas ao largo da costa algarvia com assinaturas de vários fenómenos.

A **vermelho** está assinalada uma zona com baixa intensidade de sinal retrodifundido, que deverá corresponder a uma zona com vento abaixo dos 2m/s.

Dentro da **zona a azul** é visível a assinatura de ondas que se propagam no interior do oceano.

Os **pontos claros** dentro da zona verde são causados por objetos altamente refletivos, presumivelmente embarcações.

(processada pela FCUL utilizando dados da ESA)

2.5 DETEÇÃO DE NAVIOS E ESTEIRAS

Os navios podem ter uma assinatura nas imagens SAR já que partes da sua estrutura provocam um aumento significativo da intensidade da radiação retrodifundida, como foi explicado na secção 1.4, resultando em assinaturas que se assemelham a pontos brancos (ver zona rodeada a verde na Fig. 15 e pontos na Fig. 16). No entanto, sob certas condições, também é possível que as esteiras dos navios tenham uma assinatura em imagens SAR. Uma esteira de navio é caracterizada por uma faixa turbulenta que se alarga com o aumento da distancia ao navio, em que a zona central da esteira tem um aspeto menos turbulento à superfície, contornada por uma zona com maior ondulação, causada pela propagação de ondas geradas pela passagem do navio. A zona central da esteira do navio pode ter uma assinatura que é caracterizada por uma diminuição da intensidade da imagem. Em casos em que a passagem do navio causa o levantamento para a superfície

de *slicks*, que irão continuar a causar uma diminuição da rugosidade da superfície, esta assinatura pode continuar visível por algumas horas. As ondas da esteira também poderão ter uma assinatura, no entanto é menos frequente.



Fig. 16 - Imagem SAR TerraSAR-X, banda X, com resolução de 3 m sobre Singapura em que são visíveis vários navios. (processada pela FCUL utilizando dados da DLR)

2.5.1 O EFEITO DE DOPPLER

O processamento SAR assume alvos estacionários pois posiciona os alvos no centro do feixe da antena, ou seja, na posição Doppler Zero.



O Efeito de Doppler é a alteração aparente da frequência das ondas (radiação eletromagnética, som, etc.) que se gera quando o objeto que as produz se move em relação ao recetor. O exemplo mais simples é do som de um comboio: ao aproximar-se de um observador o som parece ter uma frequência maior (o que se traduz num tom mais agudo) e ao afastar-se a frequência do som parece diminuir (tom mais grave).

Este é um efeito aparente já que a frequência emitida pelo apito do comboio não varia. O efeito só é gerado pelo facto de variar a distância entre o comboio e o observador.

Quando um alvo tem uma componente de velocidade na direção do alcance a posição correspondente ao Doppler Zero já não é no centro do feixe, mas sim deslocada em azimute. No entanto o SAR posiciona sempre os objetos na posição Doppler zero, isto é, no centro do feixe, pelo que qualquer objeto que se mova em relação ao sensor aparece na imagem desviado da sua localização verdadeira.

Devido ao efeito de Doppler, um navio que se esteja a dirigir para o sensor irá aparecer deslocado em relação à sua esteira na direção do sensor e vice-versa (Fig. 17). Caso existam assinaturas de esteira e navio e se o navio se estiver a propagar numa direção que tenha componente na direção de alcance do sensor é possível determinar a velocidade de propagação do navio. É possível determinar a velocidade do navio, $|u|$, através da medição da distância, d , medida na direção de azimute, entre a assinatura da esteira e o local da assinatura do navio, usando:

$$2.1 \quad |u| = \frac{V}{h} \frac{d}{\tan \theta \cdot \sin \alpha} ,$$

em que V é a velocidade do satélite relativa ao solo, h é a altitude do satélite, α é o ângulo da esteira em relação à direção de azimute, e θ é o ângulo de incidência.

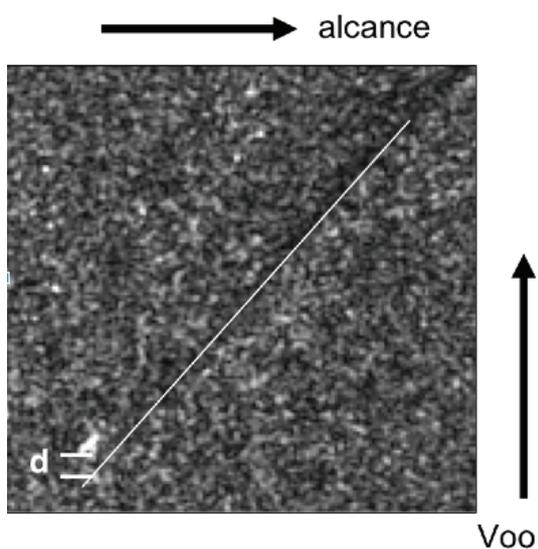


Fig. 17 - Esquema do efeito de Doppler associado ao movimento do navio em relação ao sensor, cuja assinatura aparece desviada com uma distância, d , da sua esteira. (imagem arquivo MARE, produzida a partir de dados ESA)

2.6

TOPOGRAFIA DO FUNDO EM LOCAIS POUCO PROFUNDOS

Em locais pouco profundos é possível obter-se a assinatura da topografia de fundo por processos de modelação hidrodinâmica (Fig. 18). A assinatura é gerada pelas marés que ao passarem por cima de topografia com profundidade variável modificam a rugosidade à superfície. Por exemplo, uma corrente ao aproximar-se de um local com menor profundidade irá acelerar na presença de um fenómeno que cause obstrução à sua passagem. Este aumento da velocidade traduz-se numa divergência de correntes à superfície que por sua vez provocam uma diminuição do sinal retrodifundido. Do mesmo modo, ao passar para águas mais profundas a corrente em profundidade irá desacelerar, provocando uma convergência das correntes à superfície e um aumento do sinal retrodifundido. No entanto é necessário que a corrente tenha velocidade suficiente para causar esta alteração, pelo que a assinatura da topografia do fundo pode não ser sempre visível.

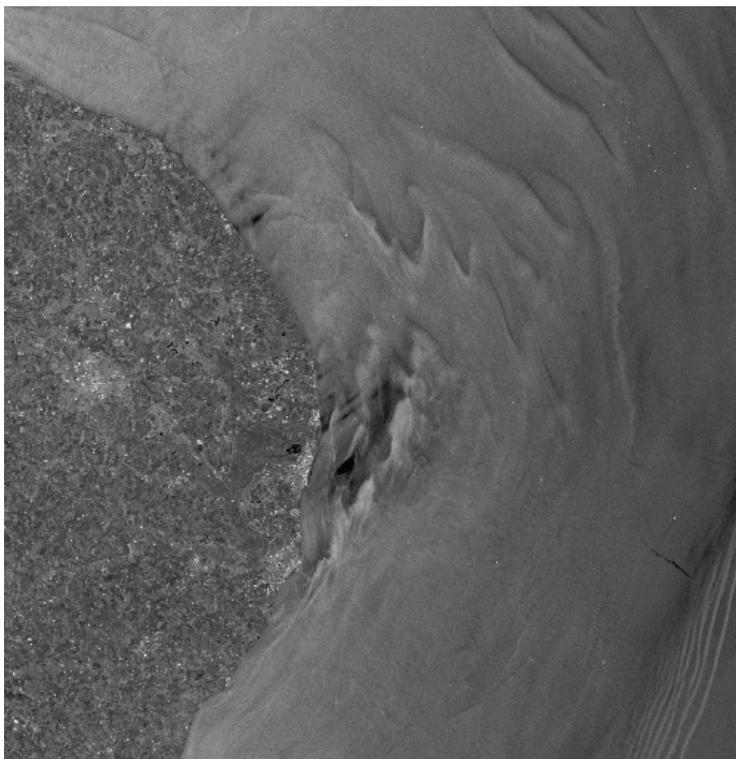


Fig. 18 - Imagem ERS-2 SAR de dia 21 de abril, às 21:55 UTC, com assinatura da topografia do fundo ao longo da costa leste do sul de Inglaterra. **(processada pela FCUL utilizando dados da ESA)**

Outra precaução a ter na interpretação destas assinaturas é o facto do seu posicionamento depender da direcção das marés. Direcções ligeiramente diferentes já irão causar assinaturas em locais diferentes na imagem, pelo que as imagens não podem ser usadas como identificador absoluto da localização da topografia de fundo do mar.

2.7 SINERGIAS COM IMAGENS DA COR DO OCEANO

Como ferramenta adicional, apresentam-se aqui algumas possibilidades de uso de sinergia com imagens de satélite obtidas no espectro do visível. Os sensores que operam na região do visível, localizada sensivelmente entre os 400 e os 750 nm, permitem a quantificação da concentração de clorofila na superfície dos oceanos. São sensores passivos, pelo que se limitam a receber a radiação dos comprimentos de onda acima referidos. As imagens que produzem diferem das SAR já que têm uma resolução espacial mais baixa, tipicamente de 1 km. Acresce que nestas bandas a atmosfera absorve muita radiação, pelo que é necessária uma boa correção para se determinar a radiação retrodifundida pela superfície do mar. No caso da presença de nuvens ou durante a noite não é possível obterem-se imagens da cor do oceano. Apesar de todas estas limitações, as imagens obtidas por sensores a operar no visível contêm uma vasta quantidade de informação e a possibilidade de sinergia com imagens SAR é muito interessante. Apresentam-se aqui alguns exemplos de sinergia entre estes dois sensores.

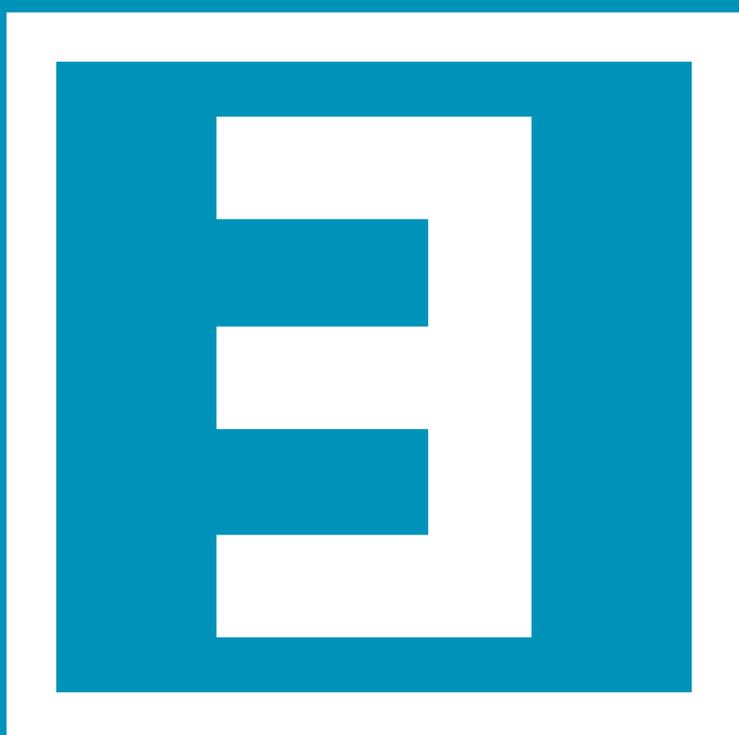
2.7.1 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE SLICKS

Uma forma de distinguir *slicks* orgânicos de *slicks* não orgânicos é procurar assinaturas em imagens no visível de aumentos de concentração de clorofila na zona do slick. Caso existam áreas com maior concentração de clorofila na zona do *slick* é mais provável que os *slicks* sejam de origem orgânica (Bentz *et al.*, 2004). Lin *et al.* (2002) determinaram que existe uma relação entre a concentração de clorofila e a redução na intensidade do sinal retrodifundido, em que 1 mg/m³ de clorofila está associada a uma redução de 5 dB do sinal retrodifundido.

2.7.2 DISTINÇÃO DE ONDAS INTERNAS

Foi visto na seção 2.4 que as ondas internas oceânicas são capazes de gerar assinaturas em imagens SAR. No entanto também é possível que estas ondas se propaguem na atmosfera com assinaturas semelhantes, pelo que é importante a sua distinção.

Sob determinadas condições, é possível ver-se a assinatura de onda internas oceânicas em imagens da cor do oceano. Isto só será possível caso exista um máximo de concentração de clorofila sub-superficial, geralmente associado a eventos de blooms de primavera já passados. Nestes casos a passagem das ondas internas oceânicas irá causar um levantamento para a superfície da clorofila, tornando-a visível em imagens no visível com a forma da frente das ondas (da Silva *et al.*, 2003). Assim, caso exista uma assinatura de ondas internas em imagens no visível é possível determinar que as ondas com assinatura em imagens SAR no mesmo local serão de origem oceânica.



CAPÍTULO 3

DISCUSSÃO DOS MÉTODOS SAR E INTEGRAÇÃO NA DIRETIVA QUADRO DA ESTRATÉGIA MARINHA (DQEM)

Ana Sutcliffe, Ana C. Brito



A importância dos oceanos e da sua sustentabilidade, tem vindo a ser cada vez mais reconhecida pela população em geral e pelos governantes dos diversos países do Mundo. O meio marinho é uma inquestionável fonte de riqueza, fornecendo recursos vivos e não vivos, assim como energia que pode ser aproveitada de diversas formas. É também o maior reservatório de água do planeta e desempenha uma série de outros serviços, como os culturais (e.g. turismo) e de regulação (e.g. clima).

As ferramentas de gestão existentes, entre as quais a Diretiva Quadro Estratégia Marinha (DQEM) são peças fundamentais e estão cada vez mais direcionadas para uma estratégia de gestão integrada à escala do ecossistema. Várias evidências têm demonstrado a necessidade de assegurar a saúde do ecossistema, como um todo, avaliando não só os elementos de estrutura, mas também todas as relações existentes, i.e., o seu funcionamento. Esta filosofia está bem presente na forma como a DQEM foi concebida, ao contrário da Diretiva Quadro da Água (DQA). A DQA foca-se principalmente nos elementos estruturais dos ecossistemas para avaliar o bom estado ecológico. A DQEM estabelece vários descritores do bom estado ambiental que por si só já são mais dirigidos para avaliar o funcionamento dos ecossistemas, como a eutrofização ou as teias tróficas.

Cada um dos descritores da DQEM tem de ser avaliado com recurso a uma série de **indicadores** desenvolvidos e testados para cada situação, i.e. para cada habitat, ecossistema, etc.

A deteção remota tem um contributo muito importante ao fornecer dados com uma relação custo-benefício muito boa, e que podem ser utilizados para o desenvolvimento de indicadores. As imagens obtidas a partir de dados de satélite poderão ter grande utilidade na gestão do meio marinho já que permitem uma elevada cobertura espacial e temporal.



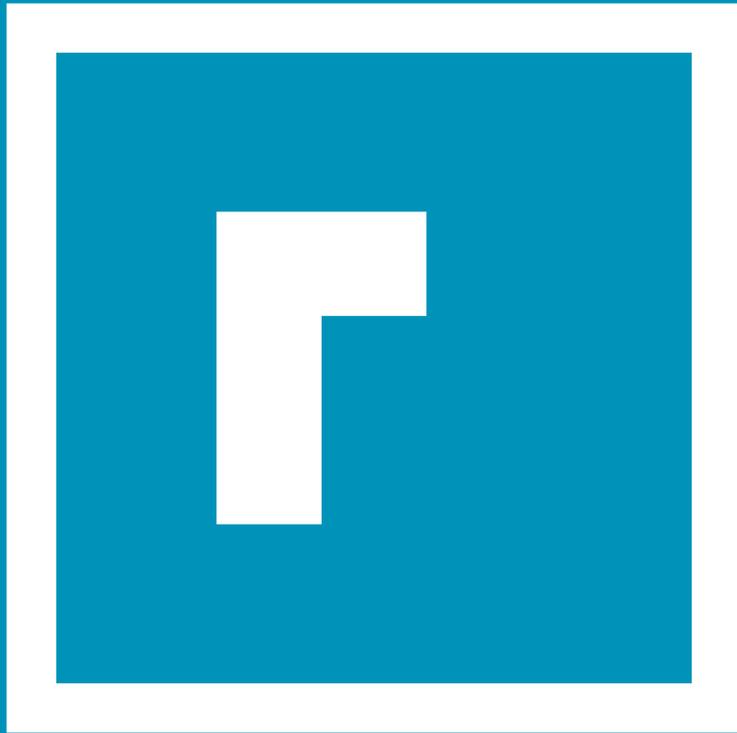
A DQEM é composta por 11 descritores que devem ser considerados para avaliação do estado ambiental.

Uma das principais preocupações da DQEM é a contaminação das águas marinhas (descritor 8), na qual se podem inserir os derrames de petróleo e poluentes de navios. Estes derrames podem ser controlados com recurso a imagens SAR. Para tal, é necessário um conhecimento da área analisada, uma vez que a assinatura de derrames de óleo pode facilmente ser confundida com outros processos que causem a diminuição na intensidade do sinal retrodifundido, como por exemplo a presença de películas de origem orgânica,

zonas de ventos baixos ou mesmo zonas de frentes oceânicas. Feita a determinação de uma descarga de petróleo, uma imagem SAR fornece informação sobre a área geográfica de cobertura, o tamanho do derrame, potenciais fontes da descarga e estado do mar. Existem já sistemas de aviso para eventuais descargas (CLS – *Collecte Localisation Satellites*) detetadas por imagens de SAR recolhidas a bordo de satélites, que depois são usadas em conjunto com informação obtida por aviões e informação meteorológica e oceanográfica local, permitindo assim responder o mais rapidamente possível à situação e ativar os meios necessários para resolver o problema.

Outro modo de responder às necessidades da DQEM com imagens SAR é através do controlo do tráfego marinho cujo impacto direto no ruído subaquático (descriptor 11 da DQEM) pode ser relevante. As imagens SAR oferecem também a possibilidade de controlo da passagem de embarcações em locais não permitidos. Desta forma, são uma ferramenta importante para a gestão de áreas marinhas protegidas (AMPs), assim como para a monitorização de atividades pesqueiras em locais não autorizados, permitindo uma avaliação das atividades ilegais, o que contribui para uma melhor avaliação do descriptor 3 da DQEM (controlo da saúde das espécies de peixes comercializáveis).

Apesar da independência da cobertura de nuvens e da alta resolução espacial serem vantagens no uso de imagens SAR, uma das desvantagens atuais destas imagens é a frequência com que se obtêm. A alta resolução é em parte conseguida à custa da resolução temporal das imagens, o que significa que a obtenção de dados SAR é feita com maior espaçamento temporal (no Sentinel-1 é feita com 12 dias de intervalo). Só com o lançamento de constelações de satélites que contenham sensores SAR é que irá ser conseguida uma melhoria na resolução temporal. Um exemplo destas constelações é o projeto Sentinel da ESA que apesar de já iniciado ainda demorará até ao lançamento do Sentinel-1B, previsto para 2016, para se poder obter uma maior resolução temporal nas imagens (datas de lançamento a ser atualizadas no site).



Referências

Bentz, C.M., J.A. Lorenzetti and M. Kampel, 2004. Multi-sensor synergistic analysis of mesoscale oceanic features. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (21), pp 4835-4841.

Curlander, J.C. and McDonough, R.N., 1991. *Synthetic aperture radar: systems and signal processing*. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Ford, J. P., Plaut, J. J., Weitz, C. M., Farr, T.G., Senske, D. A., Stofan, E. R., Michaels, G., Parker, T.J., 1993. *Guide to Magellan Image Interpretation*. JPL Publication 93-24, NASA, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Graham, L.C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *Proceedings of IEEE*, 62 (6), pp 763-768.

Lin, I.-I., L.-S. Wen and K.-K. Liu, 2002. Evidence and quantification of the correlation between radar backscatter and ocean colour supported by simultaneously acquired in situ sea truth. *Geophysical Research Letters*, 26 (10), pp 1464.

Massonet, D., Adragna, F. and Rossi, M., 1994. CNES general-Purpose SAR correlator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32 (3), pp 636-643.

Raney, R.K., Runge, H., Bamler, R., Cumming, I.G., Wong, F.H., 1994. Precision SAR processing using chirp scalling. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, 32 (4), pp 786-799.

Robinson, I.S., (2004). *Measuring the Oceans from Space: The principles and methods of satellite oceanography*. Springer Praxis Books / Geophysical Sciences, 669 pp.

da Silva, J.C.B., S. Correia, S.A. Ermakov, L.A. Sergievskaya and I.S. Robinson, 2003. Synergy of MERIS/ASAR for observing marine film slicks and small scale processes. *Proc. MERIS user Workshop*. Frascati, Italy, 10-13 November 2003 (ESA SP-549, May 2004)

Wiley, C.A. , 1954. *Pulsed Doppler Radar Methods and Apparatus*,. United States Patent, No 3196436.

LISTA DE REFERÊNCIAS DAS FIGURAS

Figura 10

ESA, Schematic view of AMI SAR image mode geometry [ONLINE]. Disponível em: https://earth.esa.int/image/image_gallery?img_id=24626 [acedida a 19 de novembro de 2015].

Figura 11

DLR (2011), SAR modes [ONLINE]. Disponível em: http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10382/570_read-431/#/gallery/356 [acedida a 15 de novembro de 2015].

Promotores e Parceiros



Financiamento



Entidades Participantes



Apoios e Colaborações





CONHECIMENTO PARA A GESTÃO DO AMBIENTE MARINHO