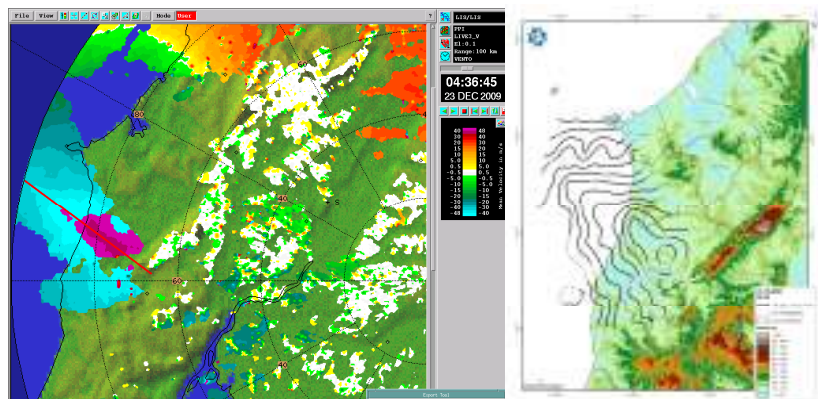




à frente do nosso tempo

Relatório

Situação de vento forte no Oeste em 23 de Dezembro de 2009



Paulo Pinto, DORE, DMC
Álvaro Silva, DOMC, DMC
Instituto de Meteorologia, I. P.

Janeiro 2010



Agradecimentos

É devida uma nota de agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração do presente estudo, que se apresenta sob a forma de relatório.



ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBSERVAÇÕES	4
2.1 OBSERVAÇÕES DE SUPERFÍCIE	4
2.2 OBSERVAÇÕES RADAR	6
2.2.1 O núcleo depressionário	6
2.2.2 Características da corrente de jacto	8
2.3 OUTROS TIPOS DE OBSERVAÇÃO	15
3. ESTIMATIVA DO CAMPO DA INTENSIDADE DO VENTO PARA O NÍVEL DE 10 METROS ...	15
3.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS	15
3.2 ESTUDOS OBSERVACIONAIS DISPONÍVEIS	16
3.3 MÉTODO APLICADO	17
4. MAPAS DE ISOTÁXICAS	20
5. CONCLUSÕES	28
6. BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS	31
7. LISTA DE ACRÓNIMOS	32
ANEXO I - DIAGRAMA DE PROPAGAÇÃO DA RADIAÇÃO RADAR	33
ANEXO II - VELOCIDADE <i>DOPPLER</i>: ESCALA NUMÉRICA E FALSEAMENTO	35
ANEXO III - MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE VENTO INSTANTÂNEO ..	38



1. Introdução

Durante a madrugada de 23 de Dezembro de 2009 a região do Oeste foi particularmente afectada pela ocorrência de ventos muito fortes. Esta situação, pelo seu carácter excepcional, constituiu um acontecimento muito importante do ponto de vista meteorológico.

Naquela região, em particular durante o período compreendido entre as 0 e as 6 UTC do referido dia, as condições meteorológicas foram condicionadas pela aproximação e passagem, de sudoeste para nordeste, de um núcleo depressionário muito cavado, com o registo de um valor mínimo de pressão ao nível médio do mar de 969.4 hPa pelas 4:20 UTC, na estação do Cabo Carvoeiro.

O IM dispôs, entre outras, de observações das estações da rede de superfície instaladas na região e também das efectuadas pelo radar *Doppler* da banda C de Coruche/Cruz do Leão (C/CL). No entanto, veio a verificar-se que apenas estes dois meios observacionais permitiram o desenvolvimento de um método de estimativa do campo do vento instantâneo ao nível de 10 m da superfície. Este documento destina-se, fundamentalmente, a diagnosticar o fenómeno de vento forte com base nas observações efectuadas pelo radar *Doppler*, explicitar o método adoptado e apresentar os respectivos mapas de isotáxicas.

2. Observações

2.1 Observações de superfície

Na área da região do Oeste mais afectada pelo fenómeno o IM dispõe das estações de Dois Portos/Torres Vedras e Cabo/Carvoeiro.

Os valores das grandezas rumo/intensidade do vento médio e rumo/intensidade do vento máximo instantâneo (rajada) a 10 metros e para períodos de 10 minutos, observados em cada uma das estações referidas para os períodos de interesse, encontram-se dispostos nas tabelas seguintes:



Tabela 1 – Rumo/intensidade do vento médio (Vm) e do vento máximo instantâneo (rajada), a 10 metros, entre as 3:50 e 5:00 UTC de 23 de Dezembro de 2009, Estação de Dois Portos/Torres Vedras (cota da estação: 110m)

Hora (UTC)	Rumo Vm (°)	Intensidade Vm (km/h)	Rumo rajada (°)	Intensidade rajada (km/h)
3:50	205	53.3	208	71.6
4:00	215	72.4	197	110.5
4:10	228	68.0	225	111.6
4:20	226	81.4	225	123.8
4:30	230	74.9	208	138.2
4:40	262	87.8	264	141.8
4:50	271	67.3	270	106.6

Tabela 2 – Rumo/intensidade do vento médio (Vm) e do vento máximo instantâneo (rajada), a 10 metros, entre as 4:00 e 5:10 UTC de 23 de Dezembro de 2009, Estação de Cabo Carvoeiro (cota da estação: 32m)

Hora (UTC)	Rumo Vm (°)	Intensidade Vm (km/h)	Rumo rajada (°)	Intensidade rajada (km/h)
4:00	166	83.9	163	127.8
4:10	184	68.6	169	97.9
4:20	236	67.7	259	108.0
4:30	273	79.9	270	125.6
4:40	280	88.9	293	119.5
4:50	296	81.0	298	140.4
5:00	336	70.6	332	122.8
5:10	345	53.3	338	79.6

Fora destes períodos, os valores observados para o vento médio e rajada foram ainda elevados e consistentes com a intensa circulação ocorrida, mas notoriamente inferiores aos apresentados.



Reconhecendo-se o interesse em observar o fenómeno numa malha mais apertada do que a imposta pela distância de cerca de 40 km entre as referidas estações do IM na região, procurou obter-se informação complementar junto de outros organismos.

O INAG explora estações meteorológicas das quais foram seleccionadas as de Pragança (39.1990°N, 9.0640°W) e Sobral da Abelheira (38.9980°N, 9.3290°W), por se encontrarem instaladas na área de interesse. No entanto, as observações de vento disponibilizadas por ambas as estações (que se encontram vocacionadas para fins hidrológicos) não incluem as grandezas atrás referidas com uma discretização temporal de 10 minutos, mas apenas horária. Este facto inviabilizou a sua desejável utilização no presente trabalho, por impossibilidade comparativa com as observações radar, disponíveis com periodicidade de 10 minutos.

2.2 Observações Radar

O radar *Doppler* de C/CL permitiu seguir a perturbação que afectou a região do Oeste. Encontrando-se em regime de exploração operacional, disponibilizou observações em bruto correspondentes a Z (reflectividade radar) e V (velocidade *Doppler*¹), com as quais foi possível gerar produtos do tipo MAXZ (com periodicidade de 10 minutos e *time stamp*² de H+00 minutos, num total de 6/hora), PPIV e PPIZ (com periodicidade de 10 minutos e *time stamp* de H+06 minutos, num total de 6/hora). Faz-se notar que os produtos PPIV e de PPIZ a que se recorreu foram obtidos a partir de observações simultâneas. Foram também executados cortes verticais sobre os campos de Z e de V a fim de completar o estudo desenvolvido.

2.2.1 O núcleo depressionário

Uma análise com base no produto MAXZ, de alcance limitado a 300 km, permitiu retirar as conclusões que se apresentam:

¹ projecção azimutal do vector vento observado com radar

² hora da observação



1. O núcleo depressionário tornou-se identificável a partir das 2:30 UTC, quando se localizava cerca de 180 Km a sudoeste do Cabo Carvoeiro e em evolução muito rápida para nordeste. Esta advecção, consistente com a elevada baroclinicidade da perturbação e com o intenso cavamento observado, foi estimada subjectivamente com recurso às observações radar em cerca de 76 km/h de 248°.
2. O núcleo depressionário atingiu e atravessou a costa ocidental portuguesa numa região compreendida entre Ribamar e um pouco a norte da lagoa de Óbidos, pelas 4:20UTC; a definição do referido núcleo começou a perder nitidez nas imagens de MAXZ após as 4:30UTC, evidência do início da fase de enchimento da depressão e consequente desintensificação do vento em níveis baixos.
3. A região da atmosfera situada nas vizinhanças dos bordos oeste, sul e sueste da depressão encontrava-se sem reflectividade, durante todo o período em que o respectivo núcleo foi identificável com radar; este aspecto foi concordante com a assinatura visível nas imagens do canal do vapor de água (satélite MSG), que mostra na referida região uma clara assinatura de intrusão de ar seco durante o mesmo período.
4. Foi identificado no bordo sul do núcleo depressionário, entre as 2:30 e as 4:00 UTC, um padrão no campo da reflectividade que se admite como relevante; o referido padrão, visível apenas com recurso a uma escala de reflectividade não operacional e criada para este estudo, foi notório apenas enquanto a depressão se encontrou sobre o mar e consistiu numa assinatura com forma semelhante a um gancho (ver Figura 1); esta assinatura (Young and Browning, 1987) tem vindo a ser relacionada com a presença de uma corrente de jacto em níveis baixos denominada por *sting jet*. No entanto, há que ressaltar que a discussão sobre a génese e características desta estrutura sai fora do âmbito do presente relatório técnico e que ainda hoje uma e outra constituem objecto de debate por parte da comunidade científica.

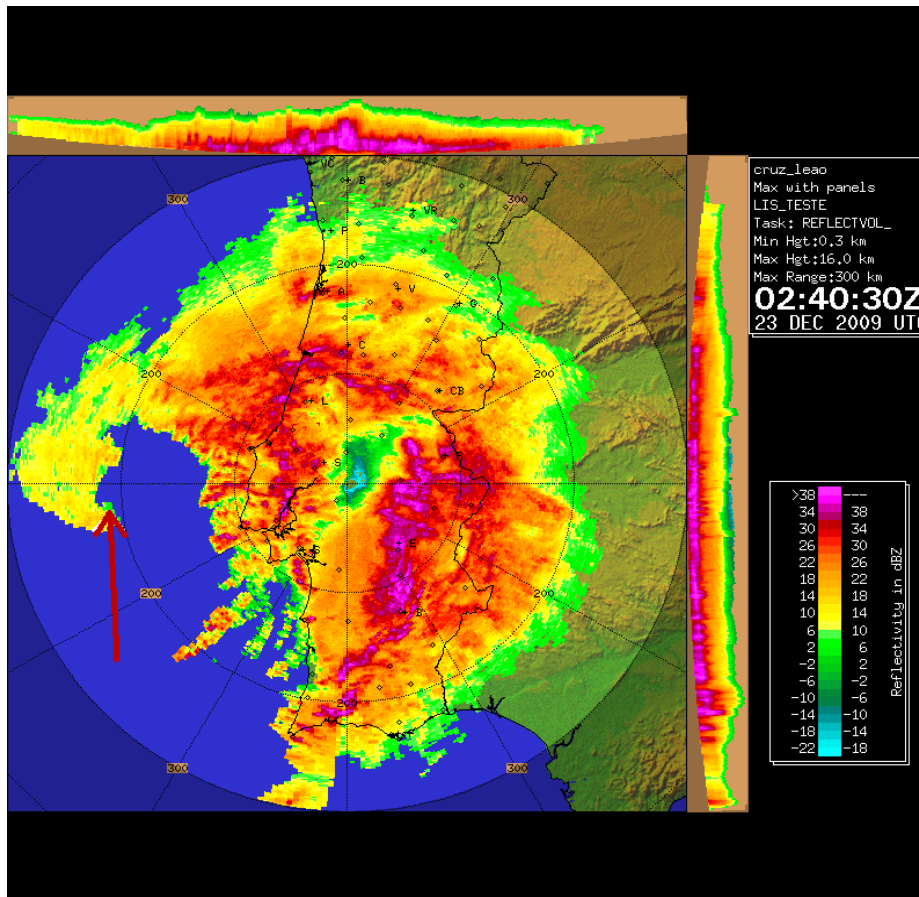


Figura 1 - MAXZ gerado pelo radar de C/CL (dBZ), 2:40UTC de 23 de Dezembro de 2009. Sete a vermelho indica uma assinatura do tipo *hooked cloud head* (“em forma de gancho”, do inglês).

2.2.2 Características da corrente de jacto

Os produtos do tipo PPIV e PPIZ, de alcance limitado a 100 km (por questões operacionais e de qualidade do processamento *Doppler*), estiveram disponíveis para todo o período de interesse, tal como os produtos de corte vertical. Uma análise sumária revelou a existência de 6 instantes de observação com relevância para o presente estudo, num total de 24 observações efectuadas (6 PPI de velocidade *Doppler* e 6 PPI de reflectividade, para cada uma das elevações de interesse, a 0.1° e 1.5° de elevação), entre as 4:06 e as 4:56 UTC. Para além destas, foram efectuados inúmeros cortes verticais a fim de avaliar tridimensionalmente os campos observados.



A análise baseada nestes produtos permitiu retirar as seguintes conclusões:

1. Foi claramente identificado um padrão de ventos máximos no campo de V, particularmente bem definido após as 4:16 UTC, e revelador da presença de uma corrente de jacto; este padrão foi especialmente visível na elevação de 0.1°, correspondente aos níveis mais baixos observados com radar e inclui a evidência da presença de um eixo de ventos máximos correspondente ao *jet-streak* – região do máximo da intensidade do vento na corrente de jacto. Os níveis mais baixos que foi possível observar com radar situaram-se entre 450 m e 950 m de altitude, sendo as menores altitudes correspondentes às menores distâncias à estação de C/CL (ver Anexo I). Na Figura 2 é representada a identificação do padrão de ventos máximos observado na região, a título exemplificativo para as 4:36UTC, sendo a linha sobreposta a vermelho a da orientação do eixo do *jet-streak*, que permitiu aliás identificar a orientação da própria corrente de jacto.

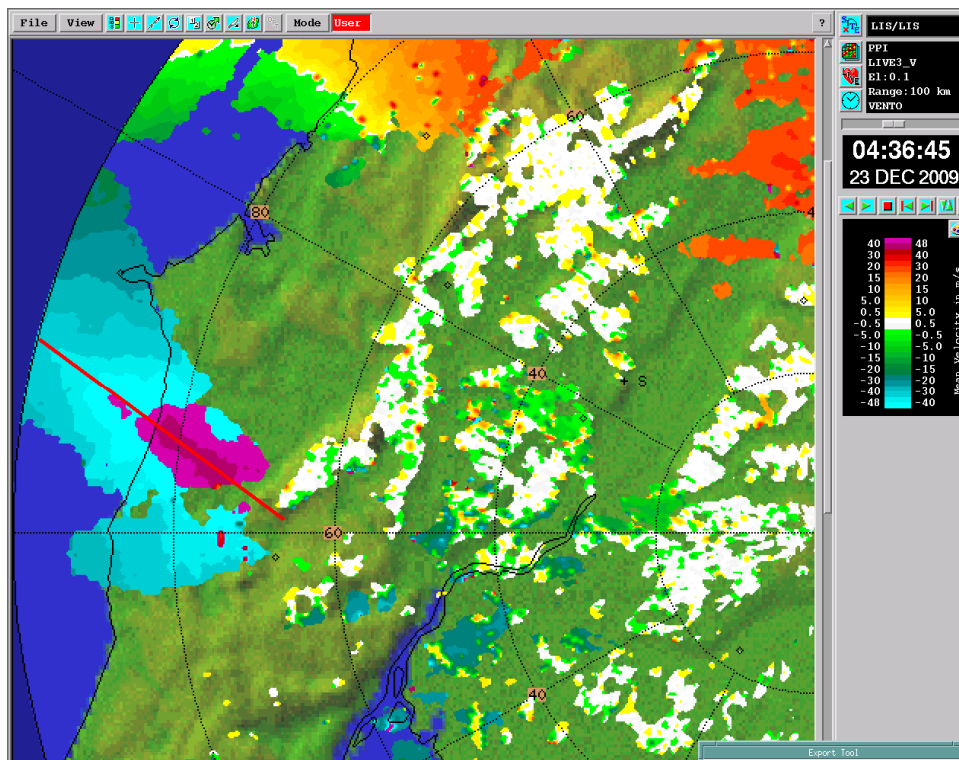


Figura 2 – PPIV gerado pelo radar de C/CL (m/s), 4:36UTC de 23 de Dezembro de 2009. O segmento a vermelho identifica o eixo de ventos máximos observado naquele instante (*jet-streak*) e a orientação da corrente de jacto.

2. O padrão de ventos máximos identificado no campo de V, foi sempre coincidente com o bordo sul do núcleo depressionário, visível no campo de Z, como a Figura 3 documenta, a título exemplificativo, para as observações das 4:46UTC. Esta região particular do núcleo depressionário tem sido referida pelos investigadores (Shapiro and Keiser, 1990) como a zona esperada para a ocorrência de ventos máximos à superfície, no caso de a corrente de jacto se instalar em níveis baixos. O próprio padrão do campo de Z, em forma de ferrão como a Figura 3 ilustra, é consistente com a designação pela qual este tipo de corrente de jacto é referida (*sting*, “ferrão” em inglês).

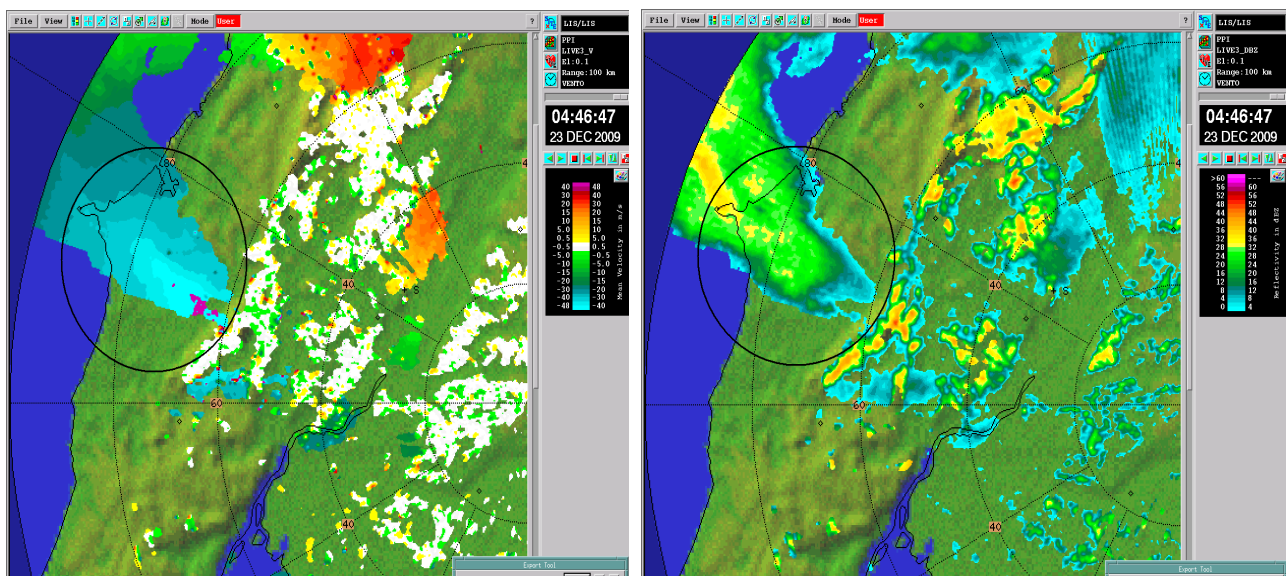


Figura 3 – PPIV (m/s), à esquerda e PPIZ (dBZ), à direita, gerados pelo radar de C/CL, 4:46UTC de 23 de Dezembro de 2009. Circulo a preto à esquerda assinala a região de ventos máximos observados naquele instante, sendo evidente a coincidência com o bordo sul do núcleo depressionário, no campo da reflectividade, à direita.

3. A assinatura do *jet-streak* visível durante o período de observação, mostrou a corrente de jacto com uma orientação (ver Tabela 3) e movimento relativos à localização da estação de radar de C/CL, propícios ao cálculo do valor da intensidade do vento a partir da respectiva projecção azimutal - campo de velocidade Doppler (ver Anexo II). A orientação estimada para a corrente de jacto diz respeito ao seu posicionamento observado na elevação mais baixa (0.1°), a que observa mais próximo do solo e em que a assinatura foi mais nítida.



Tabela 3 – Orientação da corrente de jacto obtida a altitudes compreendidas entre 450 e 950 m, para o período 4:06 – 4:56 UTC, 23 de Dezembro de 2009

Hora (UTC)	Orientação do jacto na elevação 0.1° (°)
4:06	235
4:16	250 – 273
4:26	310
4:36	305
4:46	310 – 327.5
4:56	324

A Tabela 3 mostra o facto de, nas observações radar das 4:16 e 4:46 UTC, se considerar uma gama de rumos e não apenas um rumo para o vento, dadas as heterogeneidades observadas na direcção do escoamento, em função da localização.

Faz-se notar que o cálculo do valor da intensidade do vento a partir do valor *Doppler* se restringiu às regiões em que foi inequivocamente identificada a assinatura do *jet-streak*. Este facto deveu-se à incerteza de que se reveste a identificação do rumo do vento observado pelo radar, fora daquelas áreas; no entanto, tal restrição não foi penalizadora para o presente estudo, uma vez que foi exactamente nas regiões ocupadas pelo *jet-streak* que o fenómeno de vento muito forte afectou a superfície devido à presença da corrente de jacto.

Como a Tabela 3 documenta, a corrente de jacto foi inicialmente observada com uma orientação de sudoeste, pelas 04:06 UTC, tendo pelas 04:16 UTC adoptado uma orientação geral de oeste, em acordo com a orientação do bordo sul do núcleo depressionário. Pelas 4:26UTC o jacto orientou-se finalmente em 310°, orientação que manteve sem grandes alterações até ao final do período considerado neste estudo. A orientação do jacto corresponde à orientação dos ventos máximos observados no *jet-streak*.



4. A intensidade da velocidade *Doppler* associada a esta perturbação foi extremamente elevada. De facto, em 5 das 6 observações *Doppler* avaliadas e efectuadas na elevação mais baixa, a velocidade de *Nyquist* (ver Anexo II) foi largamente excedida. Tendo em atenção que o valor de *Nyquist* é de 48 m/s (172.8 Km/h), faz-se notar que foram observados valores equivalentes aos da classe 48-52 m/s (172.8-187.2 km/h) e até aos da classe 52-56 m/s (187.2-201.6 km/h) em diversos instantes, obviamente denotando a típica assinatura de falseamento (ver Anexo II). Estes valores são considerados muito elevados por corresponderem a observações efectuadas numa camada da troposfera compreendida entre 450 m e 950 m de altitude, relativamente baixa portanto, e também por corresponderem apenas a projecções azimutais e não ao módulo do vector vento.

5. A análise das imagens PPIV das observações das 4:36 e 4:46 UTC, por exemplo, mostra claramente que embora o padrão de ventos máximos observado pelo radar na elevação de 0.1° esteja presente numa área que abrangeu ambas as estações, o *jet-streak* afectou particularmente uma região compreendida entre as duas estações de superfície do IM (ver Figura 4). A título ilustrativo, compara-se a intensidade do vento instantâneo medido com radar sobre a vertical de cada uma das estações com o valor medido num ponto intermédio, também com radar, indicando-se a altitude a que cada valor foi observado (ver tabela 4).

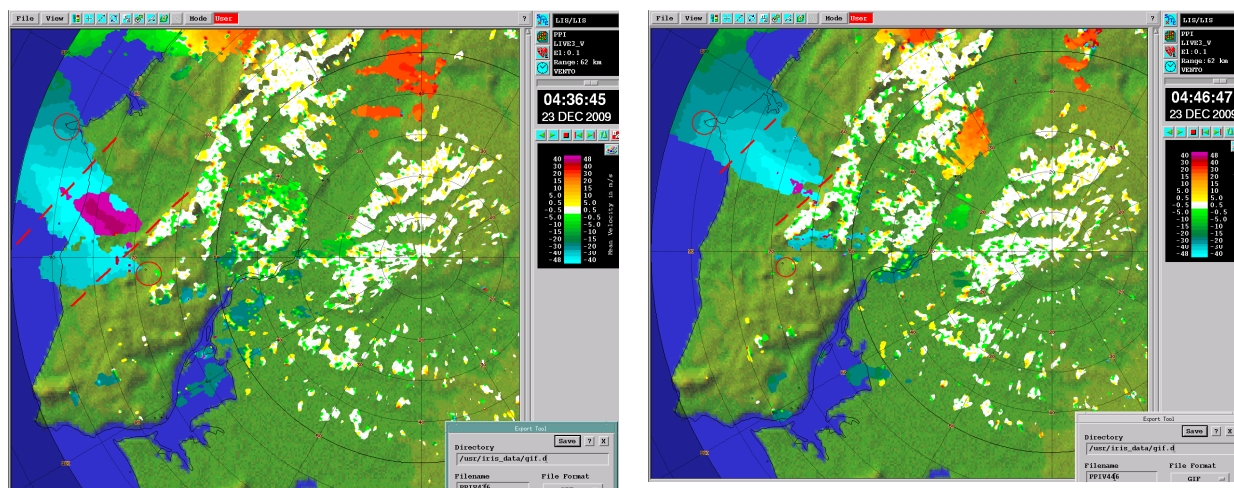


Figura 4 - Imagens de PPIV (m/s), das 4:36 UTC (à esquerda) e 4:46 UTC (direita), geradas pelo radar de C/CL, 23 de Dezembro de 2009. Círculos a vermelho assinalam a localização das duas estações de superfície do IM na área; os segmentos a tracejado delimitam a região onde o *jet-streak* foi mais intenso naqueles instantes.



Tabela 4 - Intensidade do vento instantâneo medida com radar, sobre a vertical dos pontos P₁ (coordenadas da estação do C. Carvoeiro), P₂ (ponto intermédio de coordenadas 39.1323 N / 9.2626 W às 4:36UTC e 39.2090 N / 9.1322 W às 4:46UTC) e P₃ (coordenadas da estação de Dois Portos/Torres Vedras), às altitudes e horas indicadas, 23 de Dezembro de 2009

Hora (UTC)	V _{inst} P ₁ (km/h)	Alt (m)	V _{inst} P ₂ (km/h)	Alt (m)	V _{inst} P ₃ (km/h)	Alt (m)
4:36	102.2	853	226.7	647	155.9	549
4:46	160.7	853	199.6	549	-	-

Torna-se claro que pelas 4:36UTC o valor mais elevado para a intensidade do vento, de 226.7 km/h, foi observado no ponto P₂ não obstante o valor de P₁ ter sido observado a maior altitude; também às 4:46UTC o valor mais elevado, de 199.6 km/h, coube a um ponto situado a menor altitude do que P₁. Estas variações espaciais no campo da intensidade do vento foram identificadas ao longo de todo o período observacional e para a área correspondente à corrente de jacto.

6. De acordo com as observações de PPIV e com os cortes verticais efectuados sobre a região onde a corrente de jacto se propagou, durante o período entre as 4:06 e as 4:56 UTC, foi possível obter os valores máximos da intensidade dos ventos instantâneos associados à mesma, para cada instante de observação; a tabela 5 mostra que o valor mais elevado foi alcançado na observação das 4:26UTC (a cerca de 760m de altitude), instante a partir do qual a corrente de jacto começou a desintensificar-se (ver tabela 5) e a afastar-se da superfície.

Tabela 5 – Valores máximos para a intensidade do vento instantâneo observado pelo radar entre a altitude de 480 m e a de 761m, para cada uma das observações, 23 de Dezembro de 2009

Hora (UTC)	V _{inst} (km/h)
4:06	208.5
4:16	203.3
4:26	253.0
4:36	226.4
4:46	199.5
4:56	151.1



As observações radar disponíveis não permitiram, no entanto, apurar se o axóide do jacto se chegou a situar abaixo de 550m de altitude, por se dispor de poucas observações radar abaixo desta cota, embora os padrões encontrados em imagens de corte vertical não o permitam excluir (ver Figura 5).

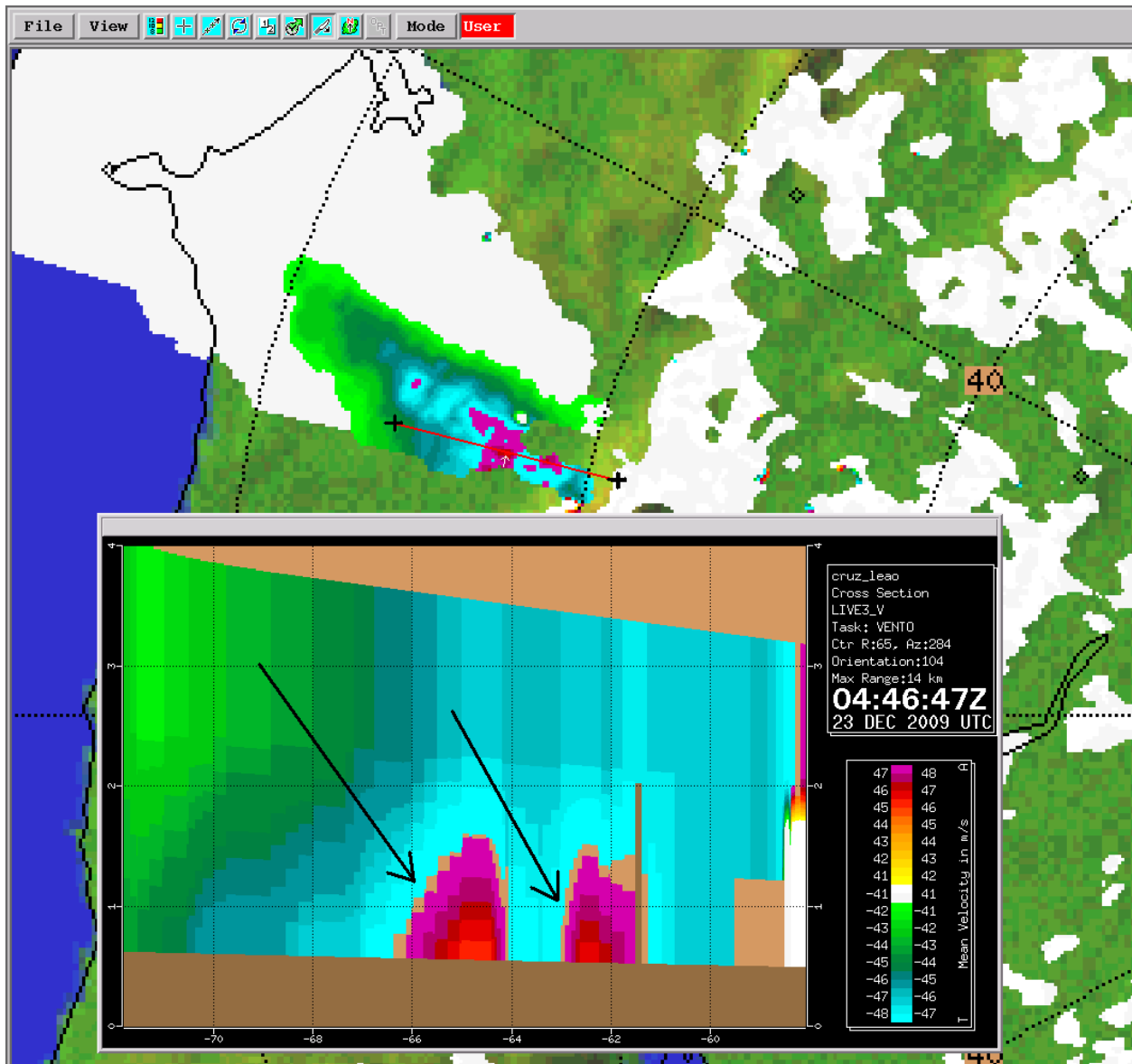


Figura 5 – Corte sobre o campo da velocidade *Doppler*, 4:46 UTC, 23 Dezembro 2009. Secção de corte assinalada em segmento a vermelho sobre imagem de PPIV (em fundo). Setas a preto indicam padrões com sugestão de localização de axóide abaixo de 550m de altitude.



2.3 Outros tipos de observação

Para além dos tipos de observação já mencionados, investigou-se a disponibilidade de outros tipos, designadamente os utilizados no esquema de assimilação do modelo de previsão numérica do ECMWF: SHIP (observação de superfície em navio), TEMP-SHIP (observação aerológica em navio), observações de *scatterometer* (observação remota de vento à superfície dos oceanos a partir de satélite, QuikSCAT e ERS), SATOB (estimativa de vento a partir da nebulosidade) e altímetro.

Infelizmente, não foi possível contar com nenhum destes tipos de observação para o período e área de interesse.

Foram igualmente consultadas as observações efectuadas por uma bóia oceanográfica situada ao largo da Nazaré e explorada pelo Instituto Hidrográfico. Também neste caso não estava disponível qualquer observação de vento que permitisse complementar as existentes em terra.

3. Estimativa do campo da intensidade do vento para o nível de 10 metros

O objectivo central deste estudo foi o de conceber um método que, face às observações de superfície disponíveis para o campo do vento, para a área e período de interesse, e às observações *Doppler* efectuadas a uma certa altitude, permitisse obter uma estimativa realista do campo da intensidade do vento para o nível de 10 metros.

3.1 Técnicas analíticas

A obtenção do campo do vento em níveis próximos da superfície a partir do campo desta mesma grandeza observado em altitudes mais elevadas é uma tarefa extremamente complexa, em particular sobre terra.

As técnicas baseadas no perfil logarítmico do vento médio (Stull, 1988) não se aplicam ao presente caso. Estas técnicas procuram estimar variações na intensidade do vento entre o solo e o topo da camada superficial (na presente situação difícil de avaliar mas provavelmente com menos de 100m de espessura, tipicamente correspondente a cerca de 10% da camada limite); como referido ao longo deste relatório, não dispusemos de quaisquer observações abaixo da cota de 500m de altitude, com excepção das provenientes das duas estações de superfície já apontadas. Por outro lado estas técnicas são válidas para uma atmosfera em equilíbrio neutro,



sendo os desvios a esta condição muito difíceis de traduzir para as condições verificadas no episódio em causa.

Por outro lado, técnicas baseadas em aproximações de semelhança de Rossby (Stull, 1988) - aplicáveis a níveis acima da referida camada superficial – não seriam pertinentes devido quer à manifesta impossibilidade na determinação de diversos parâmetros empíricos envolvidos (Stull, 1988) quer, especialmente, pelo facto de os pressupostos teóricos em que se baseiam se afastarem muito dos inerentes à natureza altamente baroclínica da troposfera no caso em estudo.

3.2 Estudos observacionais disponíveis

Na madrugada de 23 de Dezembro de 2009 uma corrente de jacto com assinatura clara nas observações *Doppler*, afectou a região do Oeste.

O regime turbulento do escoamento observado durante o evento foi comprovado pelos elevados valores no desvio-padrão do vento médio à superfície, observados em 10 minutos (por exemplo: 5.0 m/s às 4:50 UTC na estação de Cabo Carvoeiro e 2.7 m/s às 4:40 UTC em Dois Portos/Torres Vedras). Do ponto de vista teórico, é de admitir que a intensa transferência de momento linear entre o axóide do jacto e níveis inferiores, como resultado da turbulência mecânica, tenha conduzido a uma eficaz mistura nessa região da baixa troposfera. Assim, seria de esperar uma diminuição nos gradientes verticais quer da intensidade do vento médio, quer da intensidade do vento instantâneo, face a uma situação de menor turbulência.

Estas considerações teóricas são sustentadas por diversos estudos observacionais, em particular por um estudo recentemente desenvolvido e publicado no Reino Unido (Parton, G. A. et al, 2009). Neste estudo foram efectuadas observações de uma corrente de jacto junto à superfície com recurso a perfiladores de vento, mastros e observações de superfície. O estudo mostrou claramente que quer para a intensidade do vento médio, quer para a do vento máximo instantâneo (rajada), se verificava uma diminuição no gradiente vertical observado entre a superfície e o nível de 400m de altitude, na região e período em que a referida corrente de jacto se aproximou do solo.

Por outras palavras, as observações disponibilizadas no citado estudo mostraram que, tal como se poderia esperar teoricamente, a diferença entre os valores da intensidade do vento



(médio e rajada) observados entre um nível mais elevado e um nível próximo do solo, não era tão elevada na zona mais afectada pela corrente de jacto, como em geral ocorria. Esta conclusão foi relevante para sustentar o método aplicado no presente estudo.

3.3 Método aplicado

As considerações teóricas de carácter mais geral e os resultados do estudo referido em 3.2 do presente relatório, permitiram admitir que, também no presente caso – com absoluta evidência da presença de uma corrente de jacto a muito baixa altitude - o valor do gradiente vertical da intensidade do vento instantâneo se deva ter reduzido em regiões mais afectadas pela corrente de jacto face a regiões vizinhas menos afectadas por este.

Para o estudo deste episódio dispusemos da grandeza vento instantâneo observada pelo radar *Doppler* e das grandezas vento médio e vento máximo instantâneo para períodos de 10 minutos observados pelas estações de superfície. Tendo em atenção que os únicos valores de vento instantâneo disponíveis observados à superfície corresponderam ao valor máximo instantâneo (rajada), foram consideradas as observações de superfície das 4:40 e 4:50 UTC e as das 4:37 e 4:47 UTC de radar, a fim de se dispor de grandezas fisicamente comparáveis entre ambos os meios observacionais e, desse modo, calcular o respectivo gradiente vertical. De facto, foi nestes instantes que, simultaneamente, a assinatura das observações *Doppler* garantiu a presença da linha de ventos máximos nas vizinhanças de cada uma das estações do IM (ver Figura 6) e em que a rajada máxima absoluta em cada estação, correspondente à influência da corrente de jacto, foi observada em cada estação (ver tabelas 1 e 2); para cada um destes casos, foi calculado o gradiente vertical da intensidade de vento instantâneo (ver tabela 6), tendo em atenção os desníveis entre as altitudes das observações radar na vertical de cada estação e as cotas das mesmas.

Tabela 6 – Gradiente vertical do vento máximo instantâneo obtido para a vertical de cada uma das estações assinaladas

Estação	Gradiente vertical (km/h/km)
Cabo Carvoeiro	24.7
Dois Portos	32.0



Foi utilizado o valor médio deste gradiente vertical na estimativa do vento instantâneo ao nível de 10 metros para a área e período de interesse. Reafirma-se, uma vez mais, que estes cálculos se limitaram à zona do *jet-streak* e suas vizinhanças, áreas nas quais o vento instantâneo observado com radar se aproximou do vento máximo, à altitude a que foi observado.

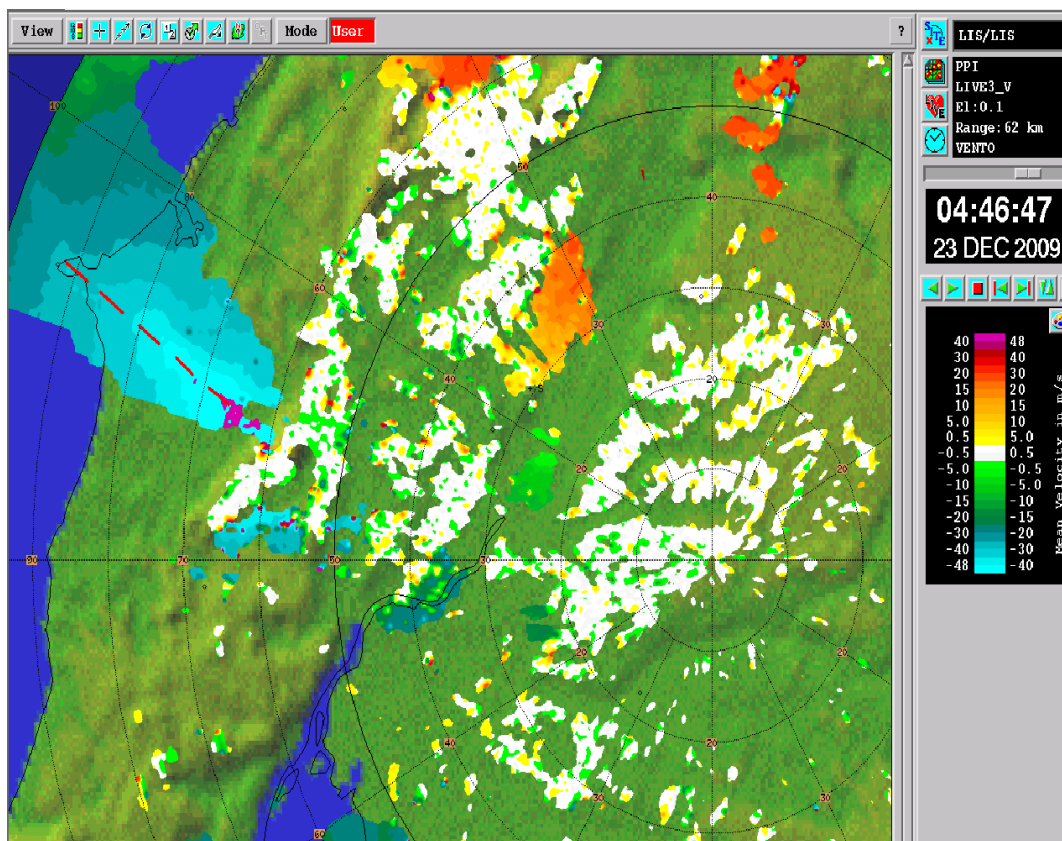


Figura 6 - Imagem de PPIV (m/s), das 4:46 UTC, gerada pelo radar de C/CL, 23 Dezembro 2009. Assinalado a tracejado vermelho o posicionamento da linha de ventos máximos sobre a estação de Cabo Carvoeiro, como exemplo.

Foi considerada uma malha cartesiana regular, fixa, com espaçamento de 3 km, geograficamente orientada e com integração das altitudes do terreno, de acordo com um modelo digital do terreno (ver Anexo III) e apresentada na Figura 7. Para cada ponto utilizado da malha e durante o período 4:06 - 4:56 UTC, foi aplicado o conjunto de procedimentos:

- a) Identificação do azimute do ponto em relação à estação radar;



- b) Estimativa do rumo do vento para as coordenadas do ponto da malha, à altitude da observação radar;
- c) Leitura do valor da velocidade *Doppler* para as coordenadas do ponto da malha;
- d) Cálculo do valor do vento instantâneo observado com radar;
- e) Identificação da altitude da observação radar, para as coordenadas do ponto da malha;
- f) Identificação da altitude do terreno nas coordenadas do ponto da malha;
- g) Cálculo do valor da intensidade do vento instantâneo para o nível de 10 metros.

Uma vez estimados os valores da intensidade do vento instantâneo para o nível de 10 metros, exclusivamente para os pontos da malha nos quais se dispunha de observação *Doppler*, foi aplicado um método de interpolação sobre estes valores estimados, cujos detalhes figuram em anexo (ver Anexo III).

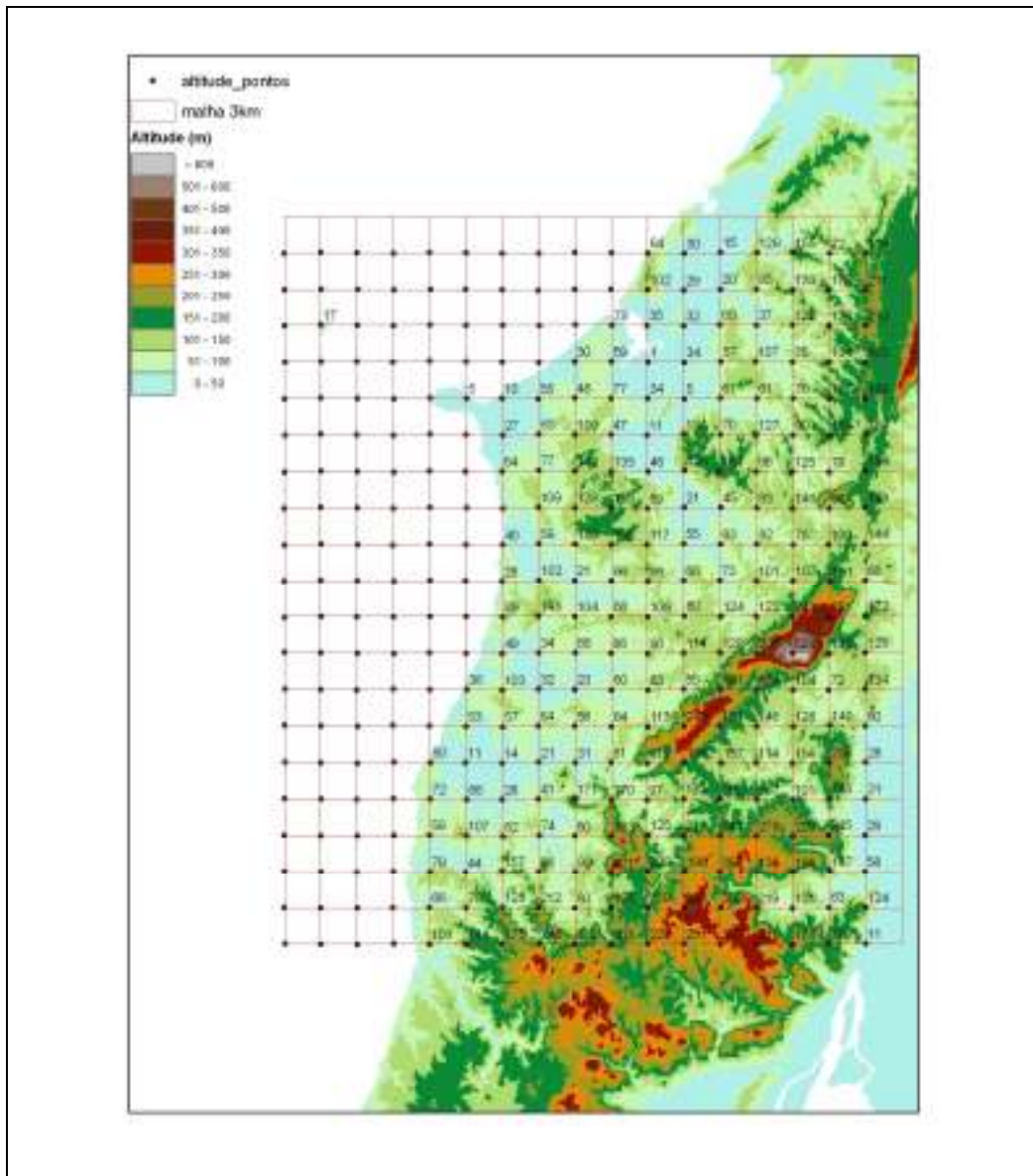


Figura 7 – Malha cartesiana regular de 3 km com integração da altitude do terreno (m), obtida a partir do modelo digital do terreno SRTM4.

4. Mapas de isotáxicas

Com base no método anteriormente descrito foi gerado, para cada instante de observação radar disponível para o período em análise, um mapa contendo as isotáxicas que exprimem o campo da intensidade do vento instantâneo estimado para o nível de 10 metros.



Tendo em atenção que o gradiente vertical utilizado na estimativa da intensidade do vento a partir do vento *Doppler* observado com radar, deverá ser superior ao gradiente presente na zona em que, manifestamente, a corrente de jacto foi mais intensa (de acordo com considerações teóricas formuladas no ponto 3.2 deste relatório e resultados de um estudo observacional publicado, referido no mesmo ponto) considera-se que a aplicação deste método conduziu a estimativas razoáveis. Note-se que uma vez que apenas se considerou o desnível entre a altitude da superfície e a da observação radar suprajacente, também se reconhece que os valores ocorridos possam ter sido, por vezes, alterados pelos efeitos de disposição da topografia local.

Uma leitura dos mapas, apresentados nas páginas que seguem, permite concluir que uma área relativamente limitada e caracterizada por cotas relativamente baixas, esteve sujeita a ventos instantâneos extremamente intensos, com valores que oscilaram entre 100 km/h e mais de 230 km/h, consoante a hora e a região. O padrão de ventos instantâneos muito fortes evoluiu de sudoeste para nordeste, sendo notório que o eixo de ventos máximos se orientou inicialmente (4:06 e 4:16 UTC) de oeste, adoptando posteriormente uma orientação de oeste/noroeste.

O escoamento muito intenso associado à corrente de jacto já estava presente sobre o mar, como é visível no mapa das 4:06 UTC. Por outro lado, também se admite que áreas localizadas um pouco a nordeste da região sobre a qual o fenómeno foi observado pelo radar de C/CL pelas 4:56 UTC tenham sido sujeitas a ventos muito fortes, embora se reconheça que após as 4:26 UTC se entrou numa fase de decaimento da intensidade do escoamento.

De seguida figuram os 6 mapas de isotáxicas (Figuras 8 a 13) obtidos com base no método anteriormente descrito. Estes mapas foram gerados com recurso a sistemas de informação geográfica e poderão ser visualizados em qualquer aplicação desse tipo.

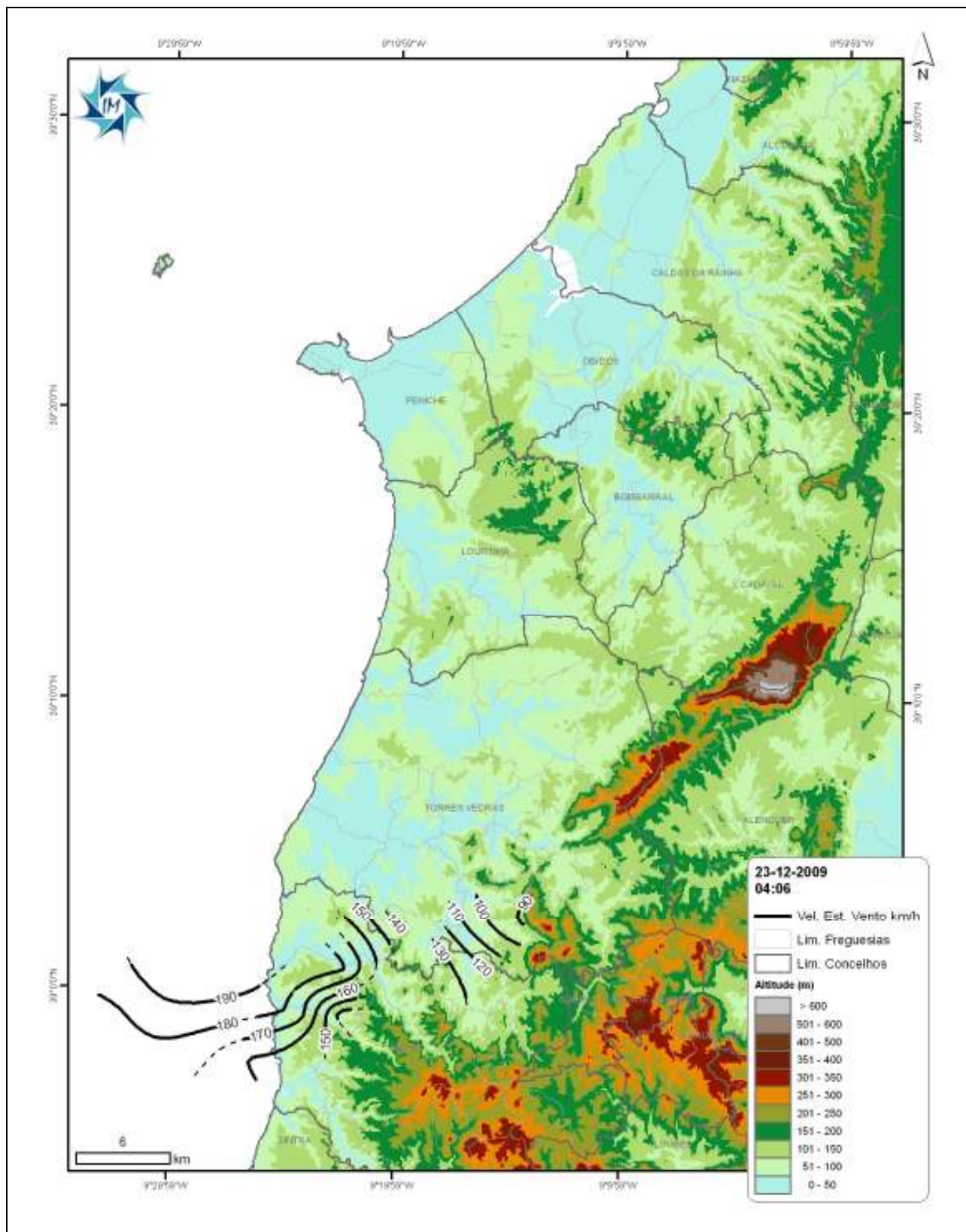


Figura 8 – Isotáxicas do vento instantâneo (km/h) estimado para o nível de 10 metros, 4:06 UTC, 23 de Dezembro de 2009.

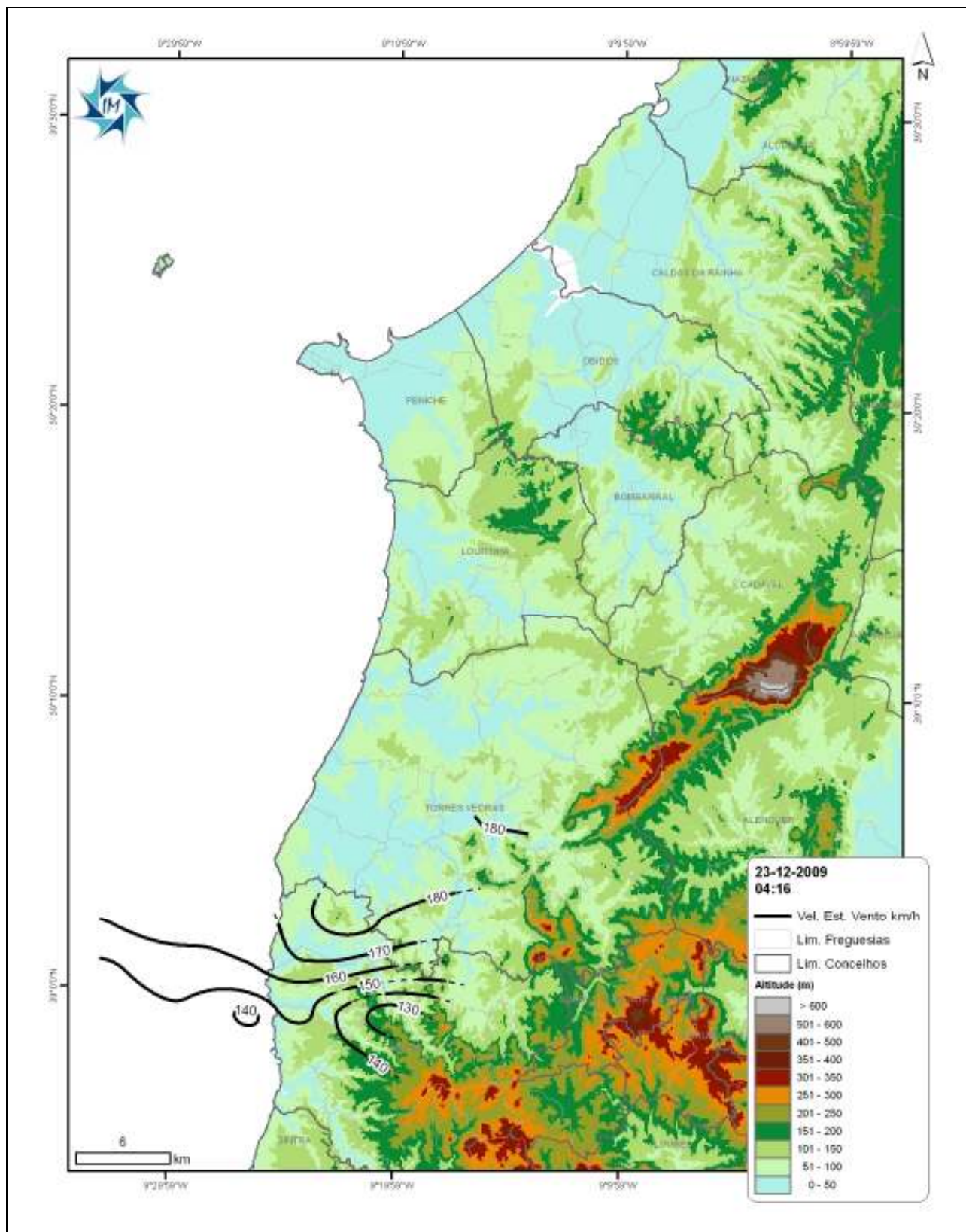


Figura 9 - Isotáxicas do vento instantâneo (km/h) estimado para o nível de 10 metros, 4:16 UTC, 23 de Dezembro de 2009.

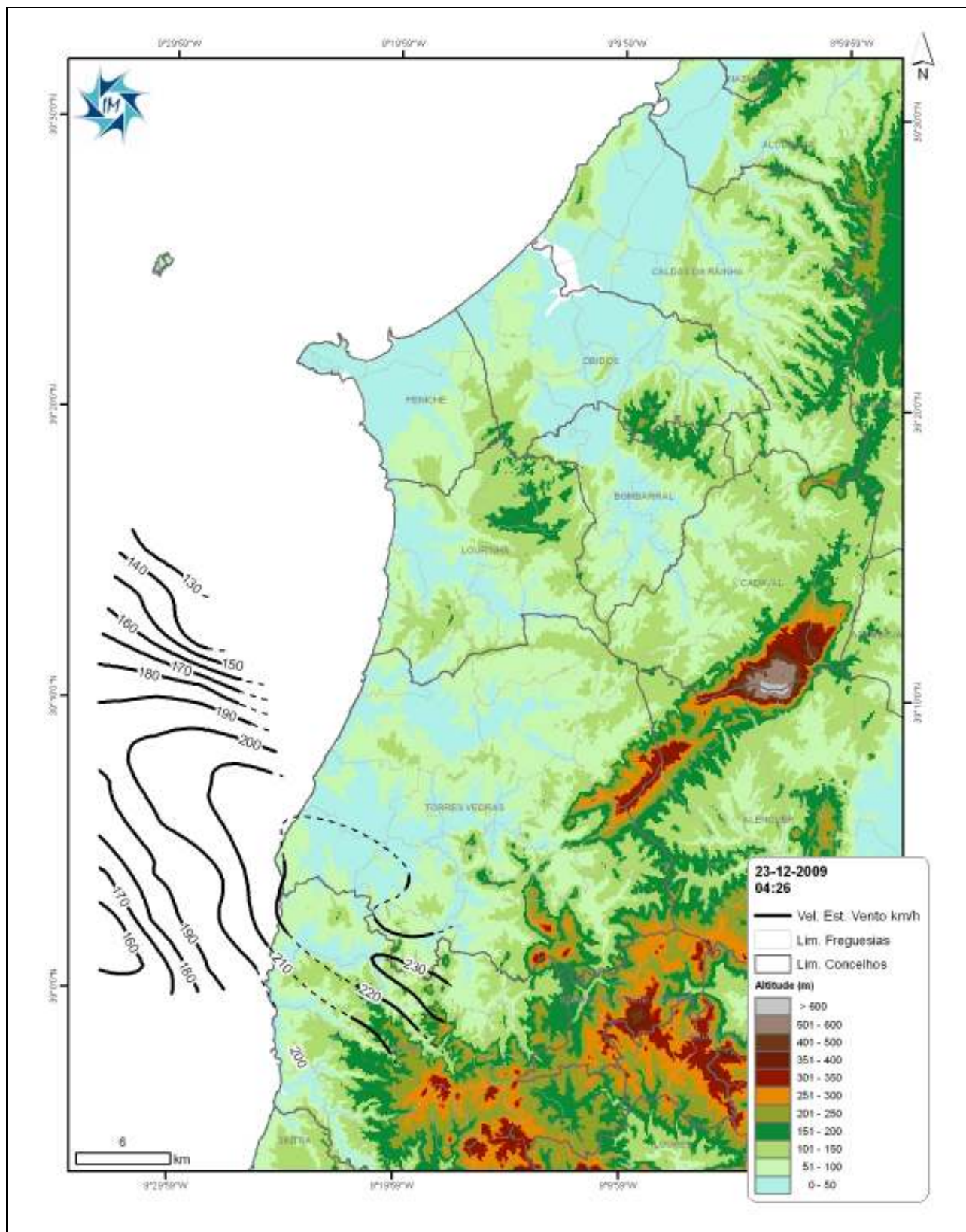


Figura 10 - Isotáxicas do vento instantâneo (km/h) estimado para o nível de 10 metros, 4:26 UTC, 23 de Dezembro de 2009.

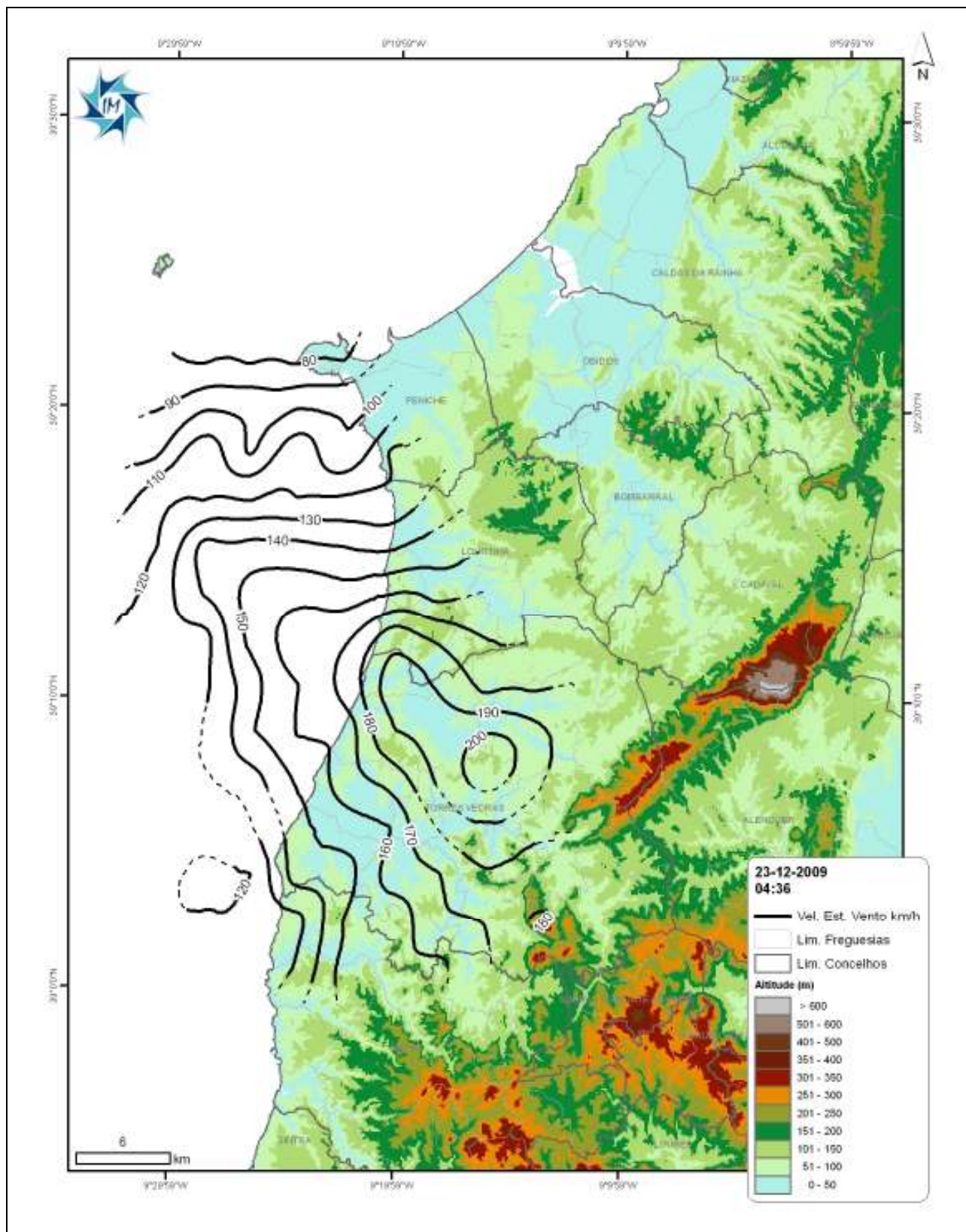


Figura 11 - Isotáxicas do vento instantâneo (km/h) estimado para o nível de 10 metros, 4:36 UTC, 23 de Dezembro de 2009.

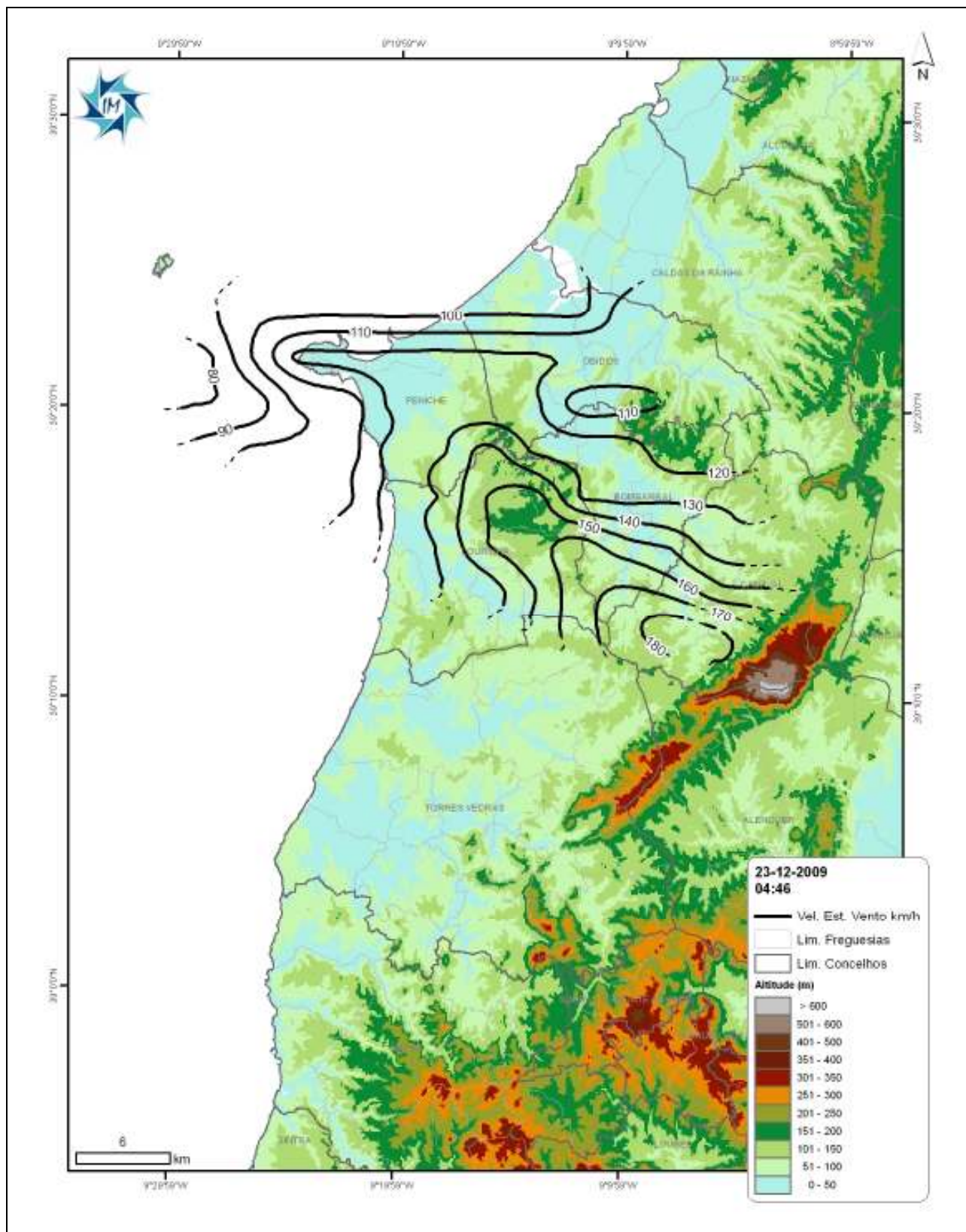


Figura 12 - Isotáxicas do vento instantâneo (km/h) estimado para o nível de 10 metros, 4:46 UTC, 23 de Dezembro de 2009.

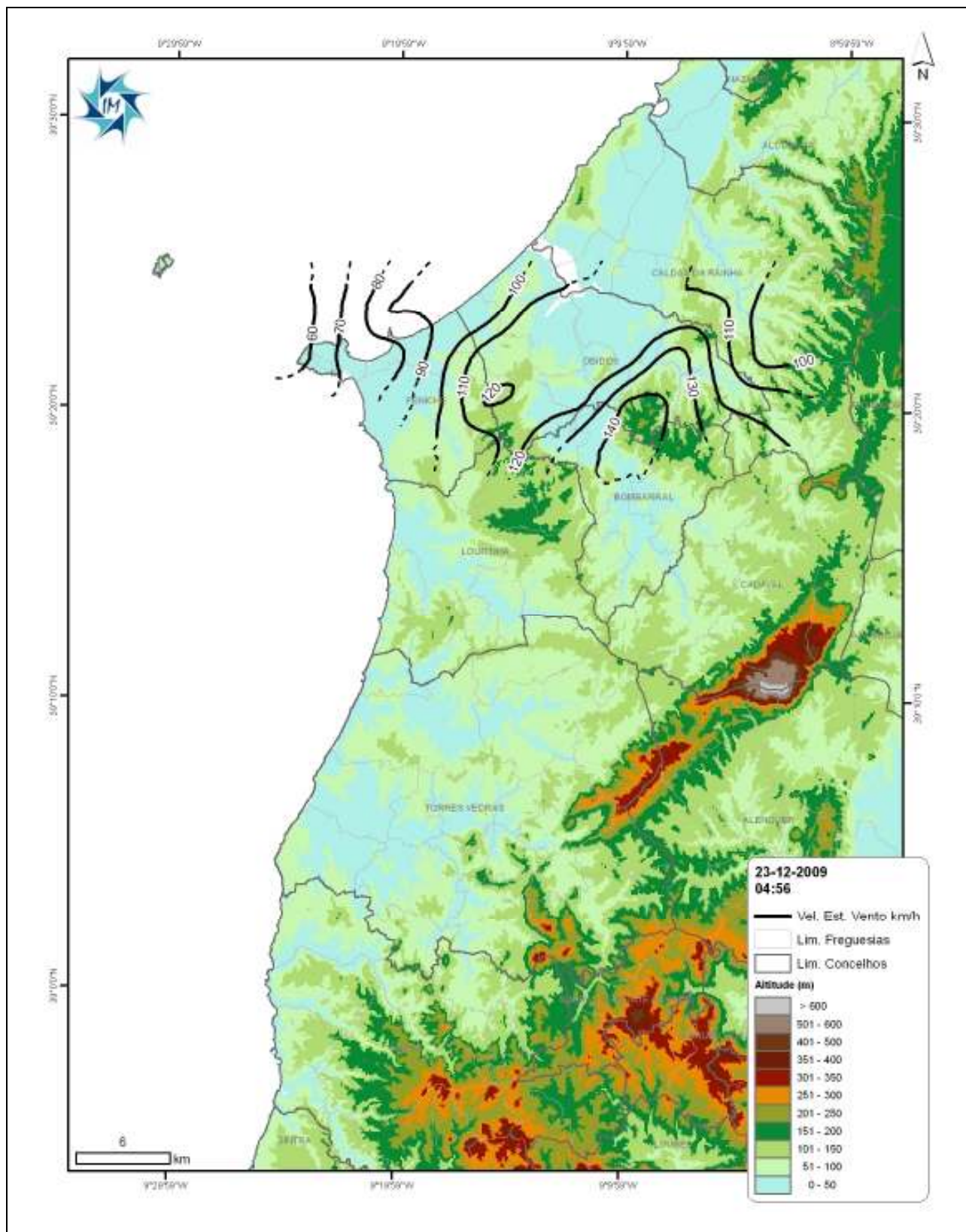


Figura 13 - Isotáxicas do vento instantâneo (km/h) estimado para o nível de 10 metros, 4:56 UTC, 23 de Dezembro de 2009.



5. Conclusões

Durante a noite e madrugada de 22 e 23 de Dezembro de 2009, um núcleo depressionário caracterizado por extrema baroclinicidade e em rápida progressão de sudoeste para nordeste sofreu um processo de ciclogénese explosiva sobre o Atlântico, a oeste do território do continente. Este mecanismo, causado por um processo de intrusão de ar extremamente seco que carece ainda de adequada caracterização, traduziu-se por um brusco e intenso cavamento, tendo sido observado um valor mínimo de pressão de 969.4 hPa na estação do Cabo Carvoeiro, pelas 4:20UTC.

Este núcleo atravessou a costa ocidental portuguesa numa região compreendida entre Ribamar e a lagoa de Óbidos, tendo causado a ocorrência de ventos extraordinariamente intensos à superfície que, nas estações do Cabo Carvoeiro e Dois Portos/Torres Vedras, se traduziram por rajadas de 140.4 km/h e 141.8 km/h. Uma análise do campo da velocidade *Doppler* (V) obtido pelo radar de Coruche/Cruz do Leão (C/CL) veio revelar, no entanto, que estes valores de vento instantâneo - já de si extremamente elevados – haviam sido largamente excedidos numa região compreendida entre as estações de superfície.

O método referido neste estudo, baseado em observações de superfície e do radar *Doppler* de Coruche/Cruz do Leão, apoiou-se em considerações teóricas, nas observações disponíveis e nos resultados de um estudo observacional efectuado no Reino Unido, publicado em revista científica internacional. As considerações que se seguem, resumem as conclusões alcançadas:

- O núcleo depressionário que afectou a região do Oeste, atravessou a linha de costa pelas 4:20 UTC, havendo evidência observacional de que tenha iniciado a fase de enchimento após as 4:30 UTC;
- As observações de radar e satélite foram concordantes ao sugerirem uma assinatura de intrusão de ar seco durante o período de cavamento e início da fase de enchimento;
- As observações *Doppler* permitiram identificar, de modo inequívoco e durante todo o período entre as 4:06 e as 4:56 UTC, um padrão de ventos máximos no campo de V, revelador da presença de uma corrente de jacto próxima da superfície; foi particularmente relevante a evidência de um eixo de ventos máximos correspondente ao *jet-streak*, o qual



se observou sobre uma região compreendida entre as duas estações de superfície do IM na região;

- As observações *Doppler* revelaram ventos máximos na região do *jet-streak* que, frequentemente, excederam o limite máximo não ambíguo detectável; pelas 4:26 UTC foi atingido, a cerca de 760m de altitude, um valor de vento instantâneo superior a 250 km/h;
- As observações *Doppler* não permitiram excluir a hipótese de o axóide da corrente de jacto se ter instalado abaixo de 550 m de altitude;
- Foi aplicado um gradiente vertical para estimar o vento instantâneo a 10 m para toda a área em que se dispôs de observações radar. Admite-se que este gradiente possa ter sido menor na área mais afectada pelo *jet-streak*, o que leva a considerá-lo como razoável face aos constrangimentos observacionais existentes e ao sofrível desempenho dos modelos operacionalmente disponíveis;
- Admite-se que as estimativas de vento instantâneo a 10 metros se aproximem substancialmente dos valores máximos instantâneos, por terem sido efectuadas sempre para áreas vizinhas do eixo de ventos máximos;
- Uma área relativamente limitada foi sujeita a ventos instantâneos extremamente intensos, com valores que oscilaram entre 100 km/h e mais de 230 km/h, consoante a hora e o local considerados (ver ponto 4 deste relatório). O padrão de ventos instantâneos muito fortes evoluiu de sudoeste para nordeste, sendo notório que o eixo de ventos máximos se orientou inicialmente (4:06 - 4:16 UTC) de oeste, adoptando posteriormente uma orientação de oeste/noroeste; foi igualmente notório que o escoamento muito intenso em níveis baixos já se encontrava estabelecido sobre o mar e que após as 4:26 UTC, sobre terra, entrou numa fase de decaimento gradual;
- O método seguido teve em atenção o desnível entre o terreno e a observação radar suprajacente. Admite-se que os valores ocorridos possam ter sido, em alguns locais, particularmente condicionados pelos efeitos da topografia local que o método, obviamente, não esteve em condições de considerar;



- Sobre áreas não abrangidas pelo traçado das linhas isotáxicas não houve observação de velocidade *Doppler* e, conseqüentemente, não foi aplicado o método para efectuar a estimativa.



6. Bibliografia e Referências

Burrough, P., MCDonnell, R. (2000): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, U.S.A., 333 p

G. A. Parton, G. Vaughan, E. G. Norton, K. A. Browning and P. A. Clark (2009): Wind profiler observations of a sting jet, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135, 663-680

Goovaerts, P.G. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New-York, U.S.A., 483 p

Holton J. R. (1992): An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press, Inc., 511 p

Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., Guevara, E. (2008): Hole-filled SRTM for the globe version 4, CGIAR-CSI SRTM 90m Database, (<http://srtm.csi.cgiar.org>.)

Johnston, K. et al (2001): Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, U.S.A., 300 p

Shapiro, M. A. and D. Keyser (1990): Fronts, Jet Streams and the Tropopause. Extra-tropical Cyclones: The Eric Palmen Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopaine Eds. American Meteorological Society, 167-191

Soares, A. (2000): Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. IST Press, Lisboa, 206 p

Sousa, A. (1988): Análise de Dados e Geoestatística Multivariada. Aplicação à tipologia de minérios. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa

Stull, R. B. (1988): An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, 670 p

Young, M. V. G. A. Monk and K. A. Browning (1987): Interpretation of satellite of a rapidly deepening cyclone. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113, 1089-1115



7. Lista de acrónimos

CGIAR-CSI	Consortium for Spatial Information
ECMWF	Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
ERS	European Remote Sensing Satellite
ETRS89/PT-TM06	European Terrestrial Reference System 1989
IM	Instituto de Meteorologia, I P
INAG	Instituto da Água, I P
MAXZ	Projecção horizontal de valores máximos de reflectividade
MSG	Meteosat Second Generation
PPIV	Indicador de Posição Plana de Velocidade
PPIZ	Indicador de Posição Plana de Reflectividade
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission (modelo digital do terreno)
SRTM4	Shuttle Radar Topographic Mission (versão nº 4)
USGS	United States Geological Survey
WGS84	World Geodetic System 84



ANEXO I

Diagrama de propagação da radiação radar

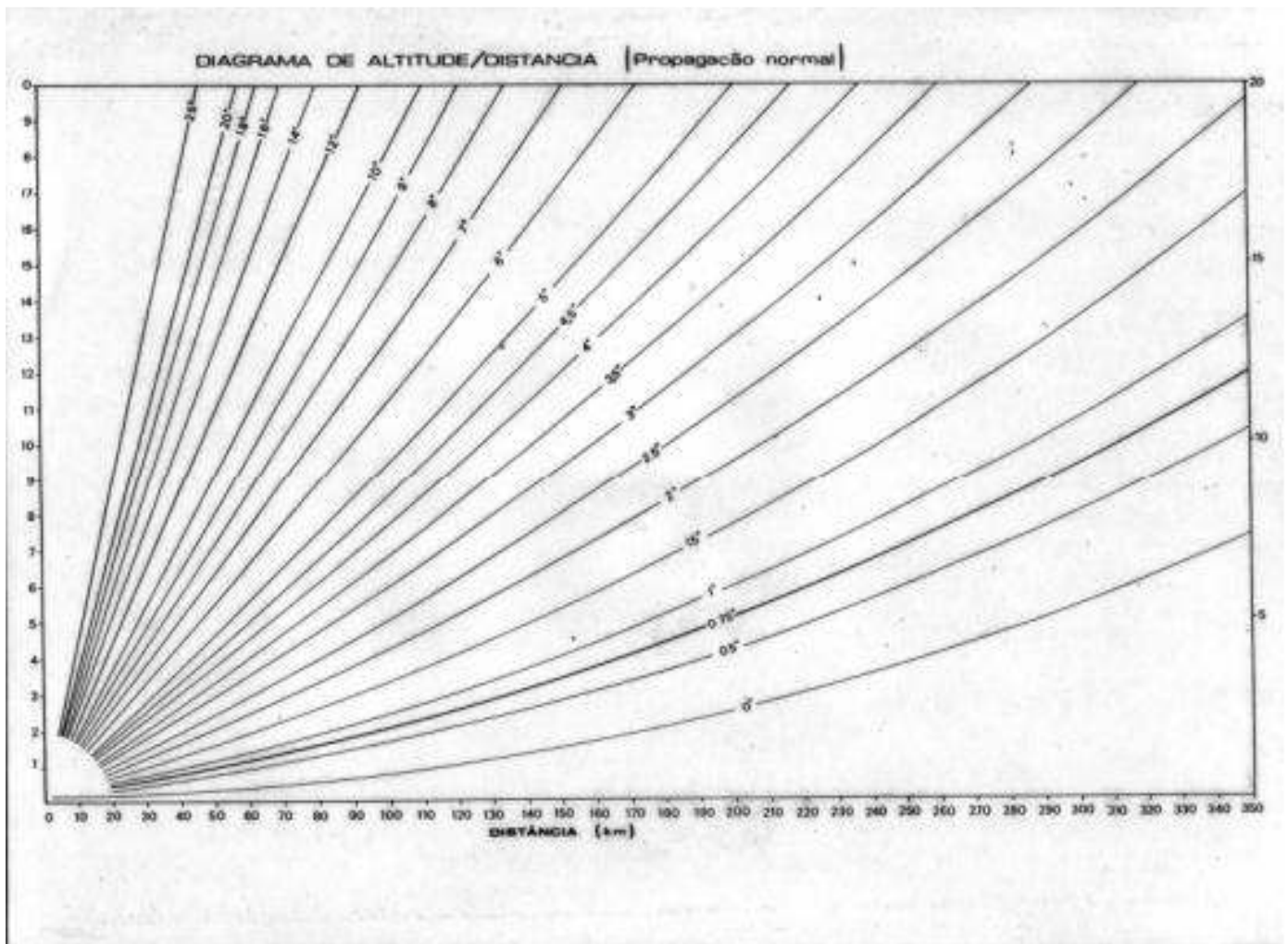


Diagrama de altitude (eixo vertical, km) versus distância horizontal (eixo horizontal, km) em condições de propagação normal, para uma terra planificada.

O diagrama acima mostra que as trajectórias do feixe portador da radiação electromagnética emitida pelas antenas dos sistemas de radar, são ligeiramente ascendentes em condições de atmosfera padrão. Para cada elevação seleccionada, observações a menor distância corresponderão a menor altitude e, para a mesma distância à antena, observações de elevações mais baixas corresponderão igualmente a menor altitude.



ANEXO II

Velocidade *Doppler*: escala numérica e falseamento

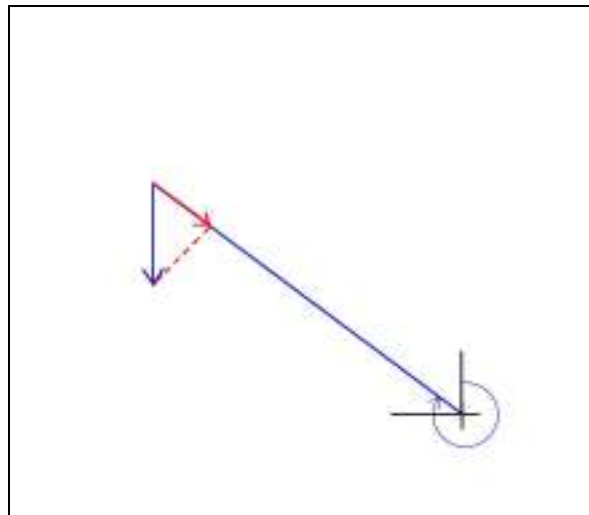


Velocidade *Doppler*

Os sistemas de radar meteorológico medem a amplitude e a fase dos sinais retrodifundidos pelos alvos. Têm, em particular, a capacidade de medir a variação de frequência que o sinal retrodifundido sofre entre dois impulsos sucessivos, pelo facto de o alvo se encontrar em movimento durante esse período. Esta variação de frequência que surge devida ao movimento do alvo, designa-se por frequência *Doppler*. Na prática, para ser assegurada coerência à observação, o processamento de sinal efectuado inclui a execução de médias sobre um espectro de frequências *Doppler*, ou seja, sobre uma sequência de N frequências devidas a N impulsos retrodifundidos, para um certo volume de observação (N é tipicamente da ordem de 100).

A velocidade correspondente a esta frequência média designa-se por velocidade *Doppler*. Face à reduzida escala temporal associada às medições (muito inferior a 1s), estas podem ser consideradas instantâneas.

A velocidade *Doppler* corresponde à projecção do vector vento observado, segundo o azimute do volume de observação relativo à antena, ou seja, é uma grandeza escalar (ver Figura abaixo).



A velocidade *Doppler* corresponde ao módulo do vector a vermelho, o qual constitui a projecção do vento (vector a azul) segundo o azimute representado pelo segmento azul.



Escala numérica de velocidade *Doppler* e assinatura de falseamento

Por convenção universal, o escalar velocidade *Doppler* considera-se negativo para movimentos de aproximação ao radar e positivo para movimentos de afastamento. A configuração de processamento de sinal impõe, em todos os casos, um limite para o valor da velocidade *Doppler* que pode ser medido sem ambiguidade, por parte do sistema de radar. No caso do radar de C/CL, cujas observações foram utilizadas no presente estudo, o valor limite (designado por velocidade de *Nyquist*) é de 48 m/s (172.8 km/h). Nas regiões em que o valor de *Nyquist* seja excedido, aparece nas imagens processadas uma assinatura de falseamento (ver Figura abaixo). Esta assinatura traduz-se pela transição directa do extremo da gama de valores positivos para o extremo da outra ou o inverso. A recuperação dos valores reais da velocidade *Doppler* é efectuada pela aplicação de uma equação simples sobre os valores falseados.

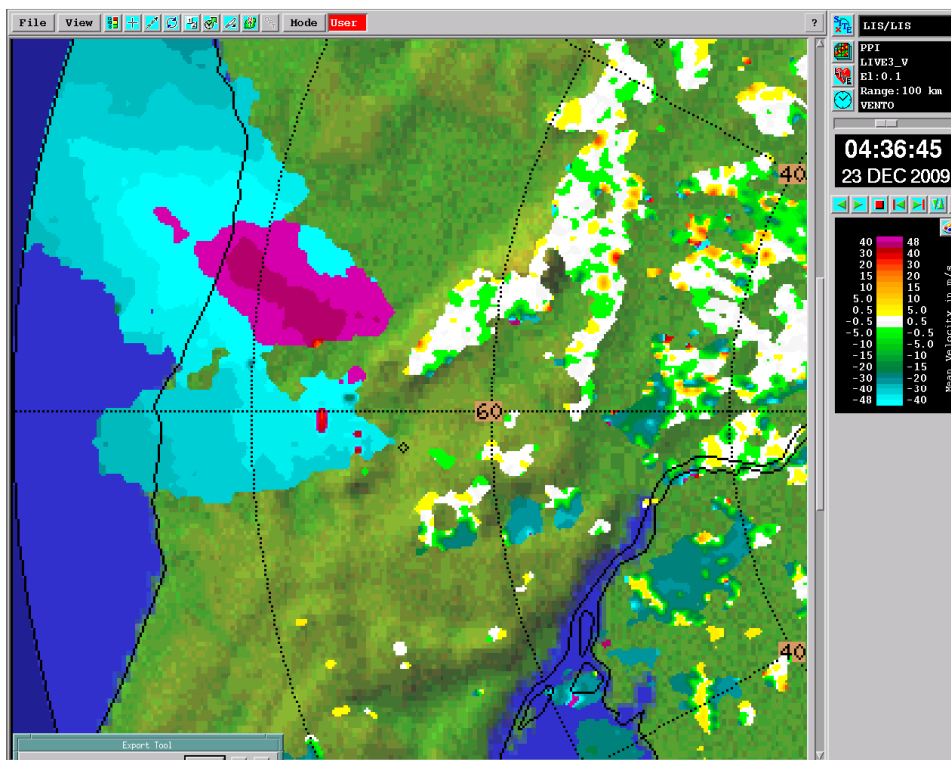


Imagem de PPIV (m/s), das 4:36 UTC, gerada pelo radar de C/CL, 23 Dezembro 2009. Na região central da imagem é visível uma transição directa do extremo da gama negativa para o extremo da gama positiva, clara assinatura de falseamento.



ANEXO III

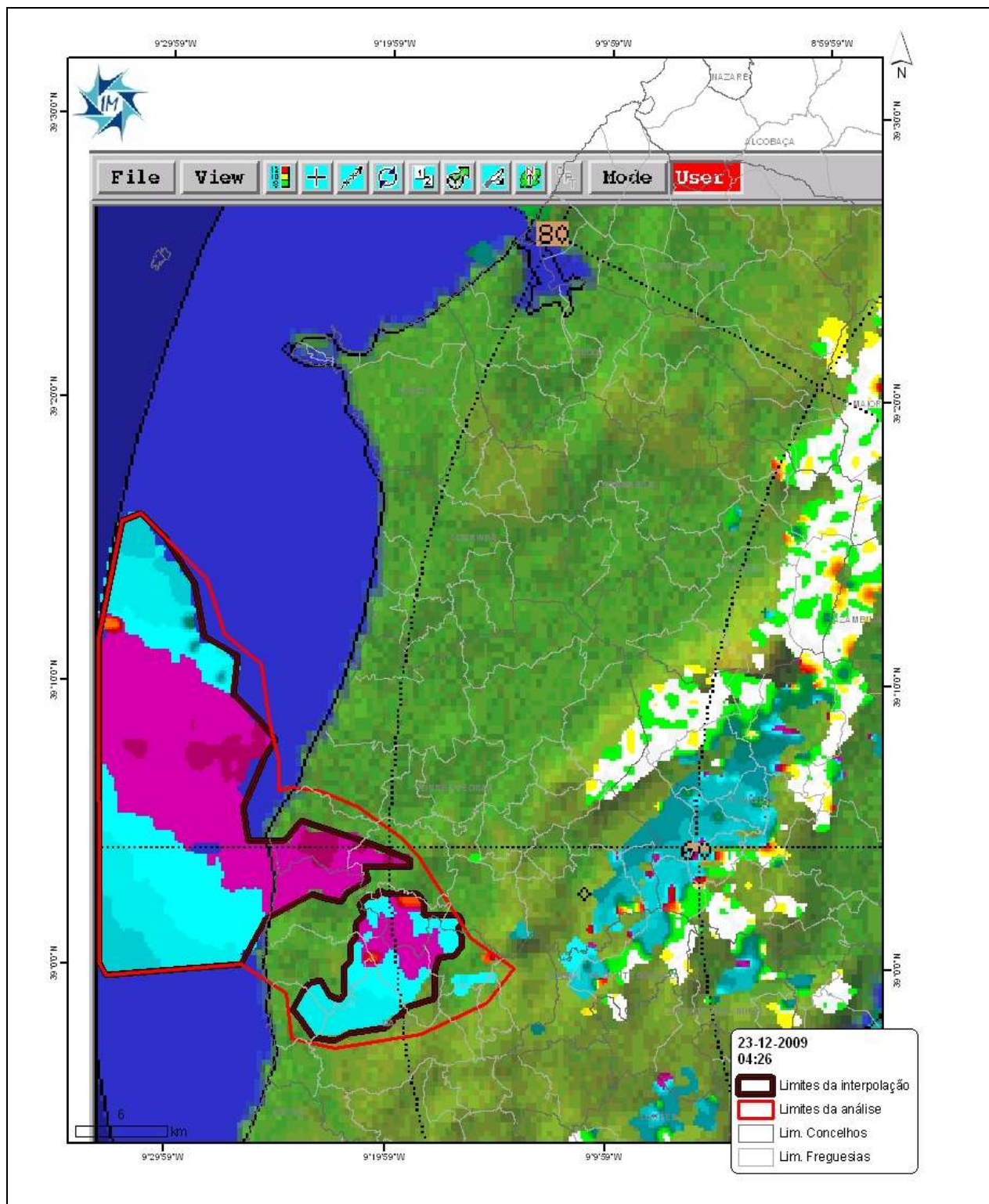
Método de interpolação das estimativas de vento instantâneo



Para cada observação *Doppler* disponível foram obtidas as superfícies de interpolação dos valores estimados para a intensidade do vento instantâneo, seguindo uma malha regular com espaçamento de 3 km previamente definida. A interpolação dos valores estimados para o vento foi baseada em krigagem normal (Burrough, P., McDonnell, R., 2000; Goovaerts, P. G., 1997; Soares, A., 2000; Sousa, A., 1988).

Relativamente aos valores de altitude, recorreu-se ao modelo digital do terreno SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission, NASA) da USGS (United States Geological Survey), na versão 4 reprocessada e corrigida pelo consórcio internacional de informação geográfica CGIAR-CSI (JARVIS *et al*), com uma resolução de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 metros à latitude de 40°). Como o SRTM é disponibilizado numa grelha de latitude/longitude - tendo como *datum* horizontal o WGS84 e como *datum* vertical o EGM96 -, houve a necessidade de o projectar, através de convolução cúbica, para o sistema de referência utilizado ETRS89/PT-TM06, tendo-se optado por uma resolução final de 100 metros.

Previamente à aplicação do método de interpolação de krigagem normal, foram delimitadas as áreas nas quais se tomou a decisão de interpolar; de facto, só em áreas onde se dispôs de um campo contínuo de observações *Doppler* (definidas a preto como limites da interpolação que a Figura seguinte exemplifica), foi efectuada a interpolação, sendo as isotáxicas representadas a cheio nos respectivos mapas. Fora destas áreas apenas se extrapolou onde a distribuição espacial do campo *Doppler* sugeriu continuidade (delimitação a vermelho na mesma Figura) embora não se dispusesse de observações; neste último caso, as isotáxicas foram representadas a tracejado nos mapas, para sugerir prolongamento do campo.



Delimitação das áreas de interpolação, exemplo da observação das 04:26 UTC. Contornos a preto assinalam os limites da interpolação; contornos a vermelho assinalam limites de extrapolação.