

A inusual atividade ciclogénica explosiva no Atlântico Norte extratropical no inverno boreal de 2013/14

The unusual explosive cyclogenesis activity in the extratropical North Atlantic in the 2013/14 boreal winter

Nuno Ganho

Departamento de Geografia e Turismo. Faculdade de Letras. Universidade de Coimbra.
Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT)
nganho@netvisao.pt

Resumo:

O inverno de 2013/14 foi particularmente tempestuoso no Atlântico Norte extratropical, com recorrentes episódios de vento muito forte e forte ondulação, com efeitos destrutivos, especialmente nas áreas costeiras atlânticas da Europa Ocidental. A causa direta foi uma forte atividade ciclogénica traduzida em sucessivos fenómenos de ciclogénese explosiva que, neste artigo, se inventariam e analisam nas suas relações com a dinâmica troposférica dos níveis altos, nomeadamente, do traçado do *jet-stream* polar, da velocidade do *jet-streak* e da decorrente divergência e atividade convectiva.

Palavras-chave: Atividade ciclogénica. Ciclogénese explosiva. Atlântico extratropical. Inverno 2013/14.

Abstract:

The winter of 2013/14 was particularly stormy in the extratropical North Atlantic, with recurrent episodes of strong winds and strong swell, with destructive effects, especially in the Atlantic coastal areas of Western Europe. The direct cause was a strong cyclogenesis activity translated into successive explosive cyclogenesis phenomena which are listed and analysed in this paper, exploring their relations with the tropospheric dynamics of the high levels, in particular the polar jet-stream track, the jet-streak speed and the resulting divergence and convective activity.

Keywords: Cyclogenesis activity. Explosive cyclogenesis. Extratropical Atlantic. 2013/14 winter.

Introdução

O inverno de 2013/14 ficou marcado, especialmente no Atlântico Norte extratropical e com repercussões na Europa Ocidental, por paroxismos climático-meteorológicos, nomeadamente frequentes e sucessivos episódios tempestuosos de vento e de ondulação marítima, e precipitações intensas e prolongadas, repercutindo ondas de frio particularmente intenso e persistentes no continente Norte Americano. Este conturbado Inverno foi genericamente analisado, em anteriores trabalhos, na perspetiva das suas relações com alterações nos padrões da dinâmica atmosférica de escala sinóptica em (potencial) cenário de “mudanças climáticas” (Ganho, 2014; Moreira, 2014; Santos, 2014; Viterbo, 2014).

Independentemente das suas causas, mais ou menos estreitamente relacionadas com o comportamento do vórtice polar boreal em função da Amplificação Ártica, o caráter tempestuoso do Inverno de 2013/14 foi consequência direta de intensa atividade ciclogénica nas médias e altas latitudes do Atlântico Norte, percorrido por sucessivas perturbações (ou sistemas depressionários) frontais, profundas e cavadas, recorrentemente evoluindo em processo de ciclogénese explosiva.

A atividade ciclogénica extratropical exige sempre condições de baroclinicidade troposférica, implicando marcados contrastes termohigrométricos entre massas de ar, especialmente no plano horizontal no caso da ciclogénese frontal (perturbações da frente polar ou ártica) e na estrutura vertical no caso da ciclogénese, originalmente, de caráter não frontal (perturbações frias isoladas). A eficiência ciclogénica da estrutura baroclínica da atmosfera impõe-se quando em fase com uma dinâmica divergente nos níveis altos da troposfera que desencadeie e alimente a atividade convectiva e a convergência nos níveis baixos, o que é determinado pelo traçado e variações acentuadas na velocidade interna do *jet-polar* (Ganho, 2013).

Ao meteorologista sueco Tor Bergeron é atribuída, pela primeira vez, a utilização do termo «ciclogénese explosiva» para designar o aprofundamento rápido de um sistema depressionário, à superfície (nmm), de pelo menos 1hPa por hora, durante um período de 24 horas, ou seja, de 24hPa em 24 horas (Sanders e Gyakum, 1980). Atendendo a que o critério de Bergeron se aplica à latitude de Bergen (60°N), na Noruega, Sanders e Gyakum (1980) definiram uma relação geostrófica equivalente para marcar o limiar de descida de pressão atmosférica,

à superfície, por intervalo de tempo, a partir do qual uma ciclogénese é classificada de “explosiva” (ou de “bomba” como a designaram, também, os autores), em função da variação da latitude, a saber: $24(\sin\theta/\sin 60^\circ)$, sendo θ =latitude. A este limiar atribuíram a designação de “1 *bergeron*”. Através da consulta de uma tabela trigonométrica, para a latitude de 40° , sendo $\sin 40^\circ=0,642$ e $\sin 60^\circ=0,866$, 1 *bergeron*= $24(0,642/0,866)$, ou seja, 1 *bergeron*=17,79, o que significa, então, que a esta latitude uma ciclogénese é considerada explosiva quando a diminuição da pressão atmosférica, à superfície, no centro da perturbação é de, pelo menos, 17,79hPa em 24 horas. De acordo com esta mesma relação, para a latitude de 50° ($\sin 50^\circ=0,766$) 1 *bergeron*=21,23hPa/24h e para a latitude de 60° , então, 1 *bergeron*=24hPa/24h. O valor de 1 *bergeron* aumenta, assim, com o aumento da latitude.

Utilizando uma metodologia alicerçada nestes critérios, inventariaram-se os episódios de ciclogénese explosiva ocorridos no Atlântico Norte no inverno boreal de 2013/2014 e analisam-se nas suas relações com a dinâmica divergente do *jet-stream* polar nos níveis altos da troposfera.

Metodologia

Para o período de 23 de dezembro de 2013 a 20 de março de 2014, aquele em que se verificou a totalidade dos episódios significativos de ciclogénese explosiva, procedeu-se ao cálculo do aprofundamento da pressão atmosférica, à superfície, no centro de cada sistema depressionário extratropical que iniciava o seu processo de ciclogénese no Atlântico Ocidental, frente à fachada oriental do continente Norte Americano, em períodos consecutivos de 12 horas, entre as 00h e as 12h UTC de um dia e entre as 12h e as 00h UTC do dia seguinte. O motivo pelo qual se optou por períodos de 12 horas e não apenas de 24 horas, resultou da intenção de, para além de inventariar episódios de ciclogénese explosiva (descida de pressão superior a 1 *bergeron*, referente, por definição, a 24 horas), inventariar também episódios a que se atribuiu a designação de ciclogénese “semi-explosiva”, neste caso e seguindo o mesmo critério, implicando uma descida de pressão superior a $\frac{1}{2}$ *bergeron* num período de 12 horas.

Embora a Península Ibérica se localize, na sua quase totalidade, entre os paralelos terrestres de 37°N e 43°N , a maioria dos centros dos sistemas depressionários com episódios de ciclogénese semi-explosiva e explosiva gerou-se a latitudes superiores a 45°N ou 50°N , e o seu aprofundamento e cavamento mais rápidos, como consequência dos seus percursos para ENE ou NE, a latitudes superiores, de 55°N a 65°N , salvo raras exceções. Nestas circunstâncias considerou-se o limiar de ciclogénese explosiva de 1 *bergeron* para latitudes de 60° , correspondente a uma descida de pressão no núcleo da perturbação, à superfície, de 24hPa em 24 horas e, de acordo com o mesmo raciocínio, pelo limiar de ciclogénese semi-explosiva de $\frac{1}{2}$ *bergeron*, também para latitudes de

60° , o que corresponde a 12hPa de descida de pressão em 12 horas. Porém, a documentação cartográfica utilizada como fonte de informação da evolução espacial e temporal dos campos de pressão, à superfície, no Atlântico Norte e áreas continentais adjacentes, apresenta as isobáricas cotadas em múltiplos de 5 e uma equidistância de 5hPa, pelo que, por excesso, para minorar margens de erro, a opção foi a de considerar os seguintes limiares mínimos de aprofundamento de um sistema depressionário, por intervalo de tempo: pelo menos 15hPa em 12 horas para uma ciclogénese semi-explosiva e pelo menos 25hPa em 24 horas para uma ciclogénese explosiva.

A quantificação da intensidade da ciclogénese fez-se com base em cartografia sinóptica de superfície, disponível em arquivo *online*, em dois diferentes sítios da *internet*. No *Meteociel* (www.meteociel.com), recorreu-se às reanálises NCEP (1 e 2) $2,5^\circ$, das 00 e 12h UTC, do campo de pressão à superfície (nmm) e do geopotencial a 500hPa, e do traçado e velocidade do *jet-stream* a 300hPa. Esta informação, porque para dois momentos do dia, permite detetar os episódios de ciclogénese semi-explosiva, mas porque os campos de pressão são representados por isobáricas com uma equidistância de 5hPa e não são apresentados, nem as descontinuidades frontais, nem os valores exactos dos mínimos de pressão dos núcleos depressionários, restringe assim a análise desta variável a múltiplos de cinco hectopascas e não à unidade. Para mitigar esta limitação recorreu-se, também, ao *Wetter3* (www1.wetter3.de) onde, da base de dados do UK-Met, se extraiu a informação cartográfica do campo de pressão à superfície (nmm) e do traçado frontal para as 00 e 12h UTC. Esta cartografia contempla os sistemas frontais, apresenta as isobáricas com uma equidistância de 4hPa e apresenta o valor mínimo de pressão atmosférica no centro de cada sistema depressionário, à unidade, o que permite uma análise mais fina. Mas não dispõe, em arquivo, de cartografia do traçado e velocidade do *jet-stream* na alta troposfera, fundamental para a análise de fatores indutores da convecção, como a divergência e a advecção de vorticidade. Por isso, a informação veiculada pelo *Wetter3* foi aqui utilizada de forma complementar à do *Meteociel*.

O Instituto de Meteorologia da Universidade de Berlim (www.fu-berlin.de) atribui um nome a cada perturbação extratropical que percorre o Atlântico Norte e atinge a Europa e o Mediterrâneo, o que facilita o acompanhamento da sua evolução no tempo, especialmente no caso de correntes perturbadas muito dinâmicas. Neste trabalho é indicado o nome e o número, por ordem cronológica, correspondente de cada sistema depressionário que, ao longo da sua evolução contemple um episódio de ciclogénese semi-explosiva ou explosiva e que, por isso, tenha sido inventariado (Quadro I). Considerou-se o seu percurso e evolução evidenciados através da localização do centro e da pressão atmosférica mínima no centro do sistema depressionário de 12 em 12 horas, o seu aprofundamento (ou enchimento, em alguns casos) em cada período consecutivo de 12 horas e

de 24 horas, e a pressão mínima atingida no centro da perturbação ao longo da sua evolução.

Também foram consideradas a direção do segmento do *jet-stream* polar e a sua velocidade máxima (*jet-streak* ou *jet-maximum*) na alta troposfera (300hPa) na proximidade (em projeção à superfície) do centro do sistema depressionário, e a posição do centro da perturbação relativamente aos setores, divergentes ou convergentes, do *jet-streak* (Ahrens, 2007), nomeadamente à direita/montante (divergente), esquerda/jusante (divergente), esquerda/montante (convergente) ou direita/jusante (convergente). Na presença de circulações marcadamente meridia-

nas, com ondulações do *jet-stream* de grande amplitude, impondo forte advecção meridional de vorticidade e consequente divergência (Hufty, 2001), conjugadas com intensas variações internas da velocidade do fluxo, podem sobrepor-se as influências conjuntas de dois setores divergentes de dois *jet-streak*, concorrendo para uma potencial intensificação da divergência superior e da convecção. Estas situações, no período analisado, foram raras e limitaram-se a coincidências esquerda/jusante com esquerda/jusante (forte divergência) ou esquerda/jusante com direita/montante (forte divergência) de *jet-streak*.

Quadro I

Designação, trajeto, intensidade da ciclogénese (ΔP) e relação com o jet-polar e com o jet-streak, de cada perturbação inventariada, de 12 em 12 horas.

Data-hora (UTC) 2013/14	Nome da perturbação (nº de ordem) Universidade de Berlim	Localização do centro da perturbação UKMet	P no centro da perturbação (hPa, nmm) Reanálises NCEP (1 e 2)	ΔP em 12h (hPa)	ΔP em 24h (hPa)	P mínima no centro da perturbação (hPa, nmm) UKMet	Direção <i>jet-stream</i> (300hPa) Reanálises NCEP (1 e 2)	Velocidade <i>jet-streak</i> (km/h, 300hPa) Reanálises NCEP (1 e 2)	Posição do centro da perturbação relativamente ao <i>jet-streak</i> Reanálises NCEP (1 e 2)
23.12-00	DIRK	SW Islândia	965						
23.12-12	(1)	W Irlanda	960	-5			W-E	290-300	EJ
24.12-00		NW Irlanda	945	-15	-20		W-E	300-310	EJ
24.12-12		N Irlanda	935	-10		927	W-E	300-310	EJ
25.12-00		N Escócia	940	+5	-5		NW-SE	300-310	EJ
26.12-00	ERICH	NW Açores	985						
26.12-12	(2)	W Irlanda	965	-20			SW-NE	270-280	EJ
27.12-00		NW Irlanda	950	-15	-35	944	SW-NE	240-250	EJ
27.12-12		Sobre Escócia	950	0			SW-NE	240-250	EJ
28.12-00	FELIX	W Terra Nova	995						
28.12-12	(3)	NW Açores	980	-15			SW-NE	260-270	EJ
29.12-00		SW Islândia	970	-10	-25		SW-NE	250-260	EJ
29.12-12		SW Islândia	960	-10			SW-NE	220-230	EJ
30.12-00		SW Islândia	955	-5	-15	956	W-E	280-290	EJ
3.1-00	CHRISTINA	SW Terra Nova	1010						
3.1-12	(4)	S Terra Nova	990	-20			W-E	310-320	DM
4.1-00		SE Terra Nova	975	-15	-35		SW-NE	280-290	EJ
4.1-12		E Terra Nova	955	-20			SW-NE	280-290	EJ
5.1-00		E Terra Nova	945	-10	-30	934	SW-NE	260-270	EJ
10.1-12	FLORA	Vale W Açores	1010						
11.1-00	(5)	NW Açores	995	-15			S-N	170-180	EJ
11.1-12		N Açores	985	-10	-25		S-N	170-180	EJ
12.1-00		S Islândia	975	-10			S-N(E)+NW-SE(W)	180-190/250-260	EJ+EJ
12.1-12		S Islândia	960	-5	-15	959	S-N(E)+NW-SE(W)	180-190/260-270	EJ+EJ
19.1-00	ILONA	SE Terra Nova	1000						
19.1-12	(6)	SE Terra Nova	985	-15			SW-NE	230-240	EJ
20.1-00		E Terra Nova	975	-10	-25		W-E	260-270	EJ
20.1-12		SW Islândia	970	-5		968	W-E	260-270	EJ
21.1-00		S Islândia	970	0	-5		W-E	230-240	EJ
22.1-12	KAAT	SW Terra Nova	1000						
23.1-00	(7)	SW Terra Nova	980	-20			SW-NE	280-290	EJ
23.1-12		E Terra Nova	975	-5	-25		SW-NE	280-290	EJ
24.1-00		S Gronelândia	965	-10			SW-NE	280-290	EM
24.1-12		SW Islândia	955	-10	-20	952	SW-NE	270-280	EJ
25.1-00		SW Islândia	955	0			W-E	280-290	EJ
25.1-12	LILLI	Vale E Terra Nova	1000						
26.1-00	(8)	S Islândia	970	-30			SW-NE	280-290	EJ

26.1-12		NW Irlanda	960	-10	-40	947	W-E	270-280	EJ
30.1-00	NADJA	S Terra Nova	1000						
30.1-12	(9)	E Terra Nova	985	-15			SW-NE	290-300	EJ
31.1-00		SW Islândia	960	-25	-40		W-E	310-320	EJ
31.1-12		S Islândia	945	-15		940	W-E	280-290	EJ
1.2-00		W Irlanda	955	+10	-5		SW-NE	220-230	EJ
3.2-00	PETRA	Sobre Terra Nova	1005						
3.2-12	(10)	E Terra Nova	995	-10			W-E	280-290	EJ
4.2-00		N Açores	975	-20	-30		W-E	280-290	EJ
4.2-12		SW Irlanda	955	-20			SW-NE	280-290	EJ
5.2-00		SW Irlanda	955	0	-20	947	SW-NE	230-240	EJ
6.2-00	RUTH	S Terra Nova	1005						
6.2-12	(11)	SE Terra Nova	980	-25			SW-NE	280-290	EJ
7.2-00		NW Açores	965	-15	-40		W-E	280-290	EJ
7.2-12		W Irlanda	950	-15			W-E	280-290	EJ
8.2-00		W Irlanda	950	0	-15	943	W-E	270-280	EJ
9.2-00	STEPHANIE	Vale sobre Açores	1005						
9.2-12	(12)	W Galiza	990	-15			W-E	280-290	EJ
10.2-00		Golfo da Biscaia	985	-5	-20	983	NW-SE	270-280	EJ
12.2-00	TINI	Vale N Açores	985						
12.2-12	(13)	Sobre Irlanda	965	-20			W-E	260-270	EJ
13.2-00		Sobre Escócia	960	-5	-25	955	W-E	250-260	EJ
13.2-00	ULLA	W Açores	1005						
13.2-12	(14)	NW Açores	985	-20			SW-NE(E)+W-E(W)	250-260/280-290	EJ+DM
14.2-00		NE Açores	975	-10	-30		SW-NE	240-250	EJ
14.2-12		Sobre Irlanda	965	-10		957	SW-NE	250-260	EJ
15.2-00		Sobre Inglaterra	960	-5	-15		SW-NE	240-250	EJ
25.2-00	YVONNE	Sobre Terra Nova	995						
25.2-12	(15)	E Terra Nova	975	-20			SW-NE	230-240	EJ
26.2-00		S Gronelândia	955	-20	-40	951	SW-NE	260-270	EJ
26.2-12		SE Gronelândia	955	0			SW-NE	260-270	EJ
1.3-00	CHRISTINE	E Terra Nova	1000						
1.3-12	(16)	S Gronelândia	975	-25			W-E	280-290	EJ
2.3-00		SE Gronelândia	970	-5	-30	965	W-E	270-280	EJ
2.3-12		S Islândia	970	0			W-E	260-270	EJ
7.3-00	DANLI	NW Açores	1000						
7.3-12	(17)	N Açores	980	-20			W-E(E)+SW-NE(W)	250-260/250-260	EJ+DM
8.3-00		S Islândia	970	-10	-30		S-N(E)+SW-NE(W)	220-230/250-260	EJ+DM
8.3-12		S Islândia	955	-15		950	SW-NE	270-280	EJ
9.3-00		Sobre Islândia	960	+5	-10		SW-NE	270-280	EM
19.3-00	GINA	SW Islândia	985						
19.3-12	(18)	SW Islândia	970	-15			SW-NE	220-230	EM
20.3-00		S Islândia	965	-5	-20		SW-NE	220-230	EM
20.3-12		Sobre Islândia	965	0		959	SW-NE	210-220	EM

Legenda: EJ - esquerda/jusante, DM - direita/montante, EM - esquerda/montante.

Resultados e discussão

Estatística

No período considerado, entre as 00h UTC de 23 de Dezembro de 2013 e as 12h UTC de 20 de Março de 2014, foram inventariados 18 sistemas depressiónários frontais (Quadros I e II), 16 com ciclogénese semi-explosiva e explosiva, e 2 exclusivamente com ciclogénese semi-explosiva (perturbações 1 e 18).

A maior parte das perturbações (10) teve a sua génese nas médias latitudes boreais do Atlântico ocidental ou da fachada oriental do continente Norte Americano (nas imediações da Terra Nova) e,

menos frequentemente (6), mais para Oriente, sobre o médio Atlântico (entre os Açores e a Islândia). A maioria sob a forma de uma depressão pouco profunda, ou apenas de um vale depressiónário - perturbações *Flora* (5), *Lilli* (8), *Stephanie* (12) e *Tini* (13) - mas nalguns casos o aprofundamento rápido ocorreu numa fase já adiantada da evolução do sistema depressiónário - perturbações *Dirk* (1), *Erich* (2), *Tini* (13) e *Gina* (18) - no médio Atlântico Norte, não se podendo, nestes casos, considerar esta área como a de ciclogénese em sentido restrito, mas a de desencadeamento de ciclogénese semi-explosiva ou explosiva.

Todas as perturbações inventariadas seguiram percursos de SW para NE (entre SSW-NNE e WSW-ENE), acabando por entrar em fase de enchimento, ou sobre ou nas proximidades das Ilhas Britânicas ou da Islândia, sempre a latitudes subpolares. Exceção apenas para a perturbação *Stephanie* (12) que evoluiu em ciclogénese semi-explosiva, dos Açores para a Galiza, atingindo de forma mais direta o território de Portugal Continental. Mas não com maior virulência das condições de tempo (vento e, principalmente, ondulação) do que outros sistemas depressionários, com evolução mais distante, mas mais extensos, profundos e cavados, como foi o caso das tempestades *Dirk* (1) e *Christina* (4) - também denominada pelos *mídia* de *Hércules* - cujos consequentes *swell* se fizeram sentir de forma muito violenta no litoral ocidental da Europa, de Portugal à Escócia e Noruega (Viterbo, 2014).

Muitas destas perturbações, como já foi referido, começaram por ser uma ondulação de vortacidade ciclónica (vale) ou um vórtice ciclónico (sistema depressionário) subsidiários de uma vasta depressão complexa, evoluindo em rápido aprofundamento e cavamento no flanco meridional desta depressão, tornando-se depois, frequentemente, no sistema depressionário principal, em fase com um acentuado desenvolvimento latitudinal, sobre o Atlântico Norte, do sector oriental de um amplo vale do vórtice polar, e em condições de intensa, persistente e recorrente baroclinicidade da troposfera, de base frontal, conjugada com forte atividade divergente do *jet*-polar.

As 18 perturbações consideradas englobam um conjunto de 63 intervalos de tempo de 12 horas, ou de 29 intervalos de tempo de 24 horas, para os quais se analisam as frequências de ocorrência de variações de pressão no centro dos sistemas depressionários (Quadro III). Neste contexto ocorreram 28 episódios de ciclogénese semi-explosiva, variando quase equitativamente por descidas de pressão entre 15 e 29hPa

e entre 20 e 24hPa em 12 horas. Por três vezes a descida de pressão variou entre 25 e 29hPa em 12 horas e por uma vez a descida superou 30hPa em 12 horas. Entre os 16 episódios de ciclogénese explosiva observados, destacam-se dois em que a descida de pressão em 24 horas foi de 35 a 39hPa e quatro em que o aprofundamento do sistema depressionário foi além dos 40hPa em 24 horas. Somente por duas vezes - perturbações *Dirk* (1) e *Gina* (18) - a evolução em ciclogénese semi-explosiva não progrediu para ciclogénese explosiva.

Quadro II
Frequências absolutas das regiões de ciclogénese.

Génese da perturbação	
SW Terra Nova	2
W Terra Nova	1
Sobre Terra Nova	2
S Terra Nova	2
SE Terra Nova	1
E Terra Nova	2
SW Islândia	2
NW Açores	2
N Açores	1
Sobre Açores	1
Total:	18 perturbações

A evolução destes sistemas depressionários depende de uma multiplicidade de fatores, mas é sempre indissociável das suas relações com a dinâmica dos níveis altos da troposfera, nomeadamente com o *jet*-stream polar.

Entre os 28 episódios rastreados de ciclogénese semi-explosiva (Quadro IV), a quase totalidade desenvolveu-se em fase com segmentos do *jet*-polar com direção SW-NE (15) ou W-E (10), tal como no caso dos 16 episódios de ciclogénese explosiva, que também evoluíram em fase com segmentos do *jet*-

Quadro III
Frequências absolutas (n) e relativas (%) da variação da pressão atmosférica (ΔP) por intervalo de tempo.

Aprofundamento (ou enchimento) da perturbação (hPa)					
	ΔP 12h		ΔP 24h		
	n	%	n	%	n
[+10, +5[	1	1,6			Enchimento
[+5, 0[	2	3,2			ΔP 12h= 3; ΔP 24h= 0
[0, -5[	8	12,7			Ciclogénese
[-5, -10[	10	15,9	3	10,4	não explosiva
[-10, -15[	14	22,2	1	3,5	ΔP 12h= 32; ΔP 24h= 13
[-15, -20[	13	20,6	4	13,8	Ciclogénese
[-20, -25[	11	17,4	5	17,2	semi-explosiva
[-25, -30[	3	4,8	5	17,2	28
[-30, -35[	1	1,6	5	17,2	Ciclogénese
[-35, -40[			2	6,9	explosiva
[-40, -45[			4	13,8	16
Total:	63	100	29	100	Ciclogénese semi-explosiva sem completar ciclogénese explosiva 2

-polar de SW-NE (7) ou W-E (7). Estas relações são explicadas pela forte divergência associada a advecção meridional de vorticidade, fomentadora de ciclogénese. Porém, nestas mesmas condições, encontraram-se igualmente a quase totalidade dos episódios de ciclogénese, nem explosiva, nem semi-explosiva: num total de 25, 12 em fase com direcções do *jet*-polar de SW-NE e 9 em fase com direcções do *jet*-polar de W-E, demonstrando a relevância convectiva das variações internas da velocidade do *jet*.

Atendendo à posição do centro dos sistemas depressionários, à superfície, relativamente ao *jet-streak* na alta troposfera (Quadro V), tanto no caso da ciclogénese semi-explosiva como no caso da ciclogénese explosiva, a quase totalidade das ocorrências corresponde ao quadrante esquerdo/jusante da velocidade máxima do *jet*, nomeadamente em 24 dos 28 episódios semi-explosivos e em 15 dos 16 episódios explosivos, coincidindo com o setor de maior divergência e onde a divergência é acrescida pelo trajecto meridional do fluxo. As ocorrências de ciclogénese nem explosiva nem semi-explosiva, também apresentam uma estreita relação com o quadrante

esquerdo/jusante do *jet-streak*, nomeadamente em 19 dos 25 episódios rastreados. As situações de justaposição de quadrantes divergentes do *jet-maximum*, por terem sido tão raras no período considerado (5 em 63) - perturbações *Flora* (5), *Ulla* (14) e *Danli* (17) - nada permitem concluir quanto à sua potencial capacidade de reforço da ciclogénese.

As relações entre a velocidade do *jet-streak* e a intensidade da ciclogénese (Quadro VI), por si só, também não são muito relevantes, uma vez que a maioria de qualquer dos “graus” de ciclogénese (semi-explosiva, explosiva e não explosiva) ocorre para velocidades máximas do *jet* de 260 a 290km/h ou, menos frequentemente, para 230 a 269km/h, e no caso da ciclogénese semi-explosiva, também para 290 a 320km/h. Ou seja, para a ciclogénese contribui, mais do que elevadas velocidades do fluxo, fortes variações internas na velocidade do fluxo, mas sem uma clara diferenciação entre intensidades do *jet-streak* e gradações da ciclogénese.

Uma visão de conjunto da intervenção relativa destes parâmetros considerados na ciclogénese explosiva será mais objetiva se baseada na análise casuística.

Quadro IV

Frequências absolutas (n) e relativas (%) da direcção do segmento do *jet*-polar em fase com a perturbação, por intensidade da ciclogénese.

Direção do segmento do <i>jet</i> -polar (300hPa) em fase com a perturbação						
CSExpl.: ciclogénese semi-explosiva						
CEExpl.: ciclogénese explosiva						
CNEExpl.: ciclogénese não explosiva						
	CSExpl.		CEExpl.		CNEExpl.	
	n	%	n	%	n	%
W-E	10	35,7	7	43,7	9	36,0
NW-SE					2	8,0
SW-NE	15	53,5	7	43,7	12	48,0
S-N	1	3,6	1	6,3		
S-N/NW-SE					2	8,0
S-N/SW-NE			1	6,3		
SW-NE/W-E	1	3,6				
W-E/SW-NE	1	3,6				
Total:	28	100	16	100	25	100

Quadro V

Frequências absolutas (n) e relativas (%) da localização do centro da perturbação relativamente ao *jet-streak*, por intensidade da ciclogénese.

Localização do centro da perturbação (nmm) relativamente ao <i>jet-streak</i> (300hPa)						
CSExpl.: ciclogénese semi-explosiva						
CEExpl.: ciclogénese explosiva						
CNEExpl.: ciclogénese não explosiva						
	CSExpl.		CEExpl.		CNEExpl.	
	n	%	n	%	n	%
Esquerda/Jusante (EJ)	24	85,7	15	93,7	19	76,0
Direita/Montante (DM)	1	3,6				
Esquerda/Montante (EM)	1	3,6			4	16,0
EJ/EJ					2	8,0
EJ/DM	2	7,1	1	6,3		
Total:	28	100	16	100	25	100

Quadro VI

Frequências absolutas (n) e relativas (%) da velocidade do *jet-streak*, por intensidade da ciclogénese.

Velocidade do <i>jet-streak</i> (km/h) CSEspl.: ciclogénese semi-explosiva CEspl.: ciclogénese explosiva CNEspl.: ciclogénese não explosiva						
	CSEspl.		CEspl.		CNEspl.	
	n	%	n	%	n	%
[170-200]	1	3,6	1	6,3		
[200-230]	1	3,6			4	16,0
[230-260]	4	14,3	4	25,0	5	20,0
[260-290]	16	57,0	9	56,1	11	44,0
[290-320]	4	14,3	1	6,3	3	12
[180-190]/[250-260]					1	4
[180-190]/[260-270]					1	4
[220-230]/[250-260]			1	6,3		
[250-260]/[250-260]	1	3,6				
[250-260]/[280-290]	1	3,6				
Total:	28	100	16	100	25	100

Casuística

No conjunto das perturbações inventariadas, por terem ultrapassado limiares de aprofundamento de ciclogénese semi-explosiva ou explosiva, no Inverno de 2013/14 (Quadro I), *Dirk* (1), que ocorreu entre as 00h UTC do dia 23 e as 00h UTC do dia 25 de Dezembro, no seu trajeto entre o SW da Islândia e o Norte da Escócia, foi o sistema depressão que atingiu o menor valor de pressão atmosférica no centro, à superfície, de 927hPa às 12h UTC do dia 24 (Figura 1). Esta perturbação, no entanto, só apresenta um período de ciclogénese semi-explosiva de 15hPa em 12 horas, coincidente com o quadrante esquerdo/jusante de um *jet-streak* zonal (W-E) muito rápido (300-310Km/h).

A segunda perturbação mais profunda foi *Christina* (4) - ou *Hércules* - que se fez sentir das 00h UTC de 3 de Janeiro às 00h UTC de 5 de Janeiro e que, nesta última data, apresentou 934hPa no centro (Figura 2), depois de três períodos consecutivos de ciclogénese semi-explosiva ou de dois períodos seguidos de ciclogénese explosiva, totalizando descidas de pressão de, respetivamente, 55hPa em 36 horas e 65hPa em 48 horas. A fase embrionária deste sistema depressão ocorreu com fluxo zonal (W-E) coincidente com o setor direito/montante de um violento *jet-streak* de 310-320km/h que, não obstante tenha perdido velocidade, foi ganhando meridionalidade (inflexão para SW-NE) e advecção de vorticidade no quadrante esquerdo/jusante do *jet*, mantendo-se ou intensificando-se, assim, a dinâmica divergente nos níveis altos da troposfera necessária para a sustentação do carácter explosivo da ciclogénese que marcou a evolução desta vasta e cavada perturbação no seu percurso, quase estacionário, de SW para Este da Terra Nova.

Entre as 00h UTC do dia 31 de janeiro e as 00h UTC do dia 1 de Fevereiro, num percurso muito rá-

pido entre o Sul da Terra Nova e o Oeste da Irlanda, o sistema depressão *Nadja* (9), animado pela divergência do setor esquerdo/jusante de um segmento do *jet-streak*, meridional (SW-NE) e rápido (290-300km/h), com inflexão zonal (W-E) e aceleração (310 a 320km/h), depois de três períodos consecutivos de semi-ciclogénese explosiva, totalizando uma descida de pressão de 55hPa em 36 horas, ou de um período de ciclogénese explosiva de 40hPa em 24h horas, atinge um valor mínimo de pressão de 940 hPa às 12h UTC do dia 31 de janeiro (Figura 3), constituindo-se como a terceira mais profunda perturbação do Inverno.

Em condições análogas de traçado do *jet-streak*, meridional (SW-NE) ou zonal (W-E), de elevadas velocidades máximas do fluxo (280-290km/h) e de posição relativa do centro da perturbação em relação aos setores do *jet* (à esquerda/jusante), outras perturbações evoluíram com semelhantes valores de intensidade da ciclogénese semi-explosiva e explosiva. É o caso da perturbação *Ruth* (11) que, das 00h UTC de 6 de fevereiro às 00h UTC de 8 de fevereiro, contou com uma sequência de períodos de semi-ciclogénese explosiva de 55hPa em 36 horas e de ciclogénese explosiva de 40hPa em 24 horas, atingindo 943hPa no centro às 00h UTC do dia 8 de fevereiro (Figura 4), a Oeste da Irlanda. E da tempestade *Lilli* (8) que, entre as 12h UTC de dia 25 e as 12h UTC de dia 26 de Janeiro, sofreu um processo de ciclogénese explosiva de 40hPa em 24h. E dos sistemas depressão *Petra* (10) e *Yvonne* (15), ambas com ciclogénese explosiva de 40hPa em 24 horas. Entre outras em que a ciclogénese, apesar de semi-explosiva ou explosiva, comparada com as restantes, não foi tão marcada.

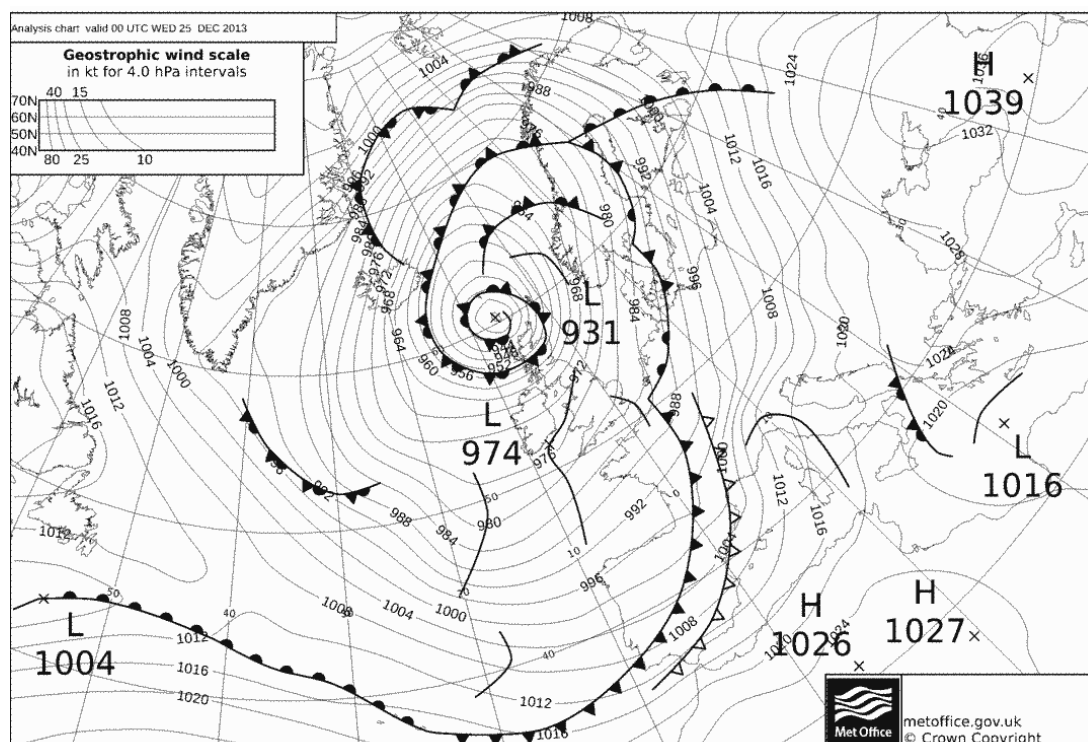


Figura 1
Carta sinóptica de superfície (nmm), 24/12/2013, 12h UTC - Perturbação Dirk.

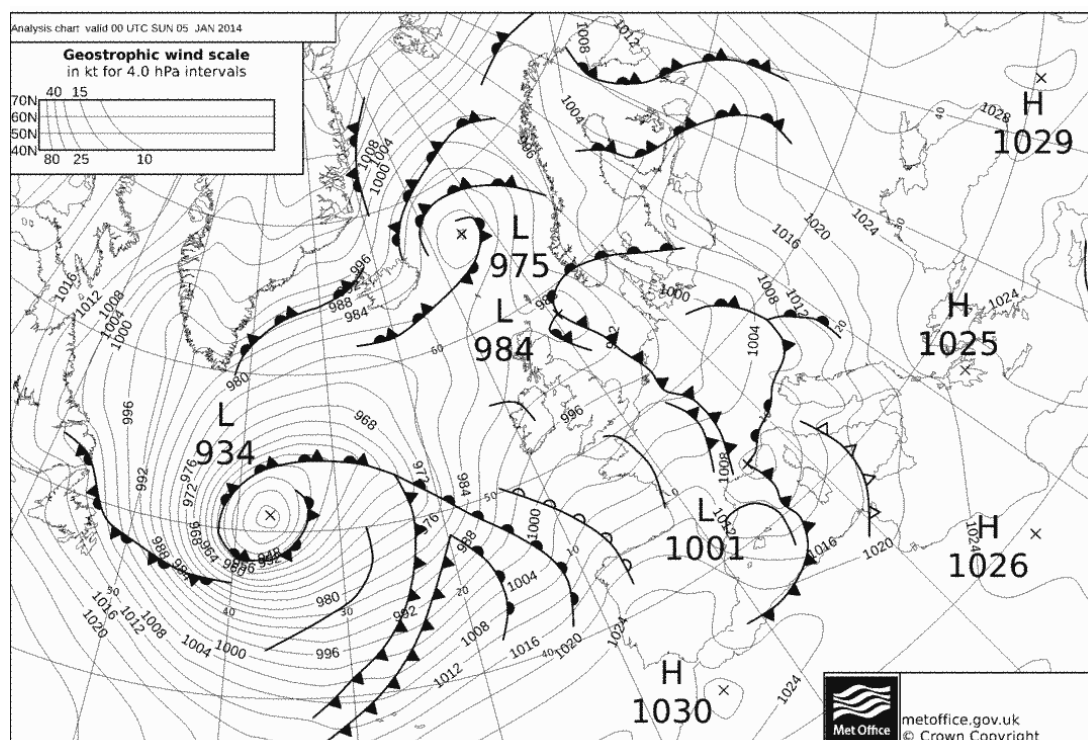


Figura 2
Carta sinóptica de superfície (nmm), 5/1/2014, 00h UTC - Perturbação Christina.

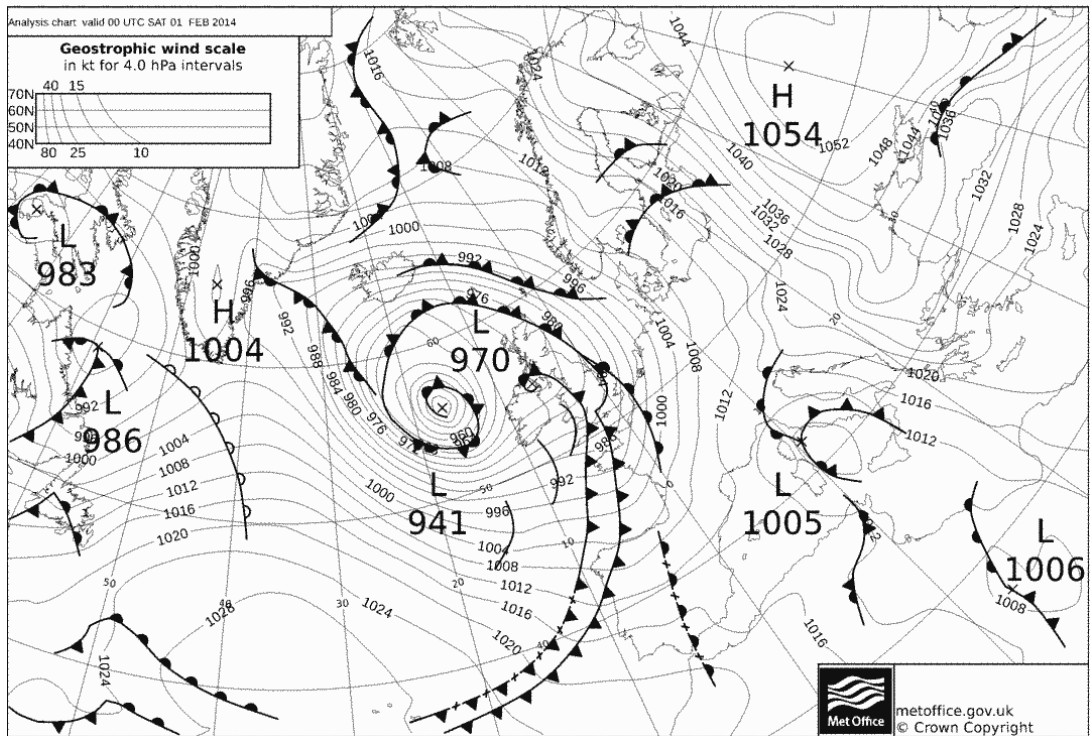


Figura 3
Carta sinóptica de superfície (nmm), 31/1/2014, 12h UTC - Perturbação Nadja.

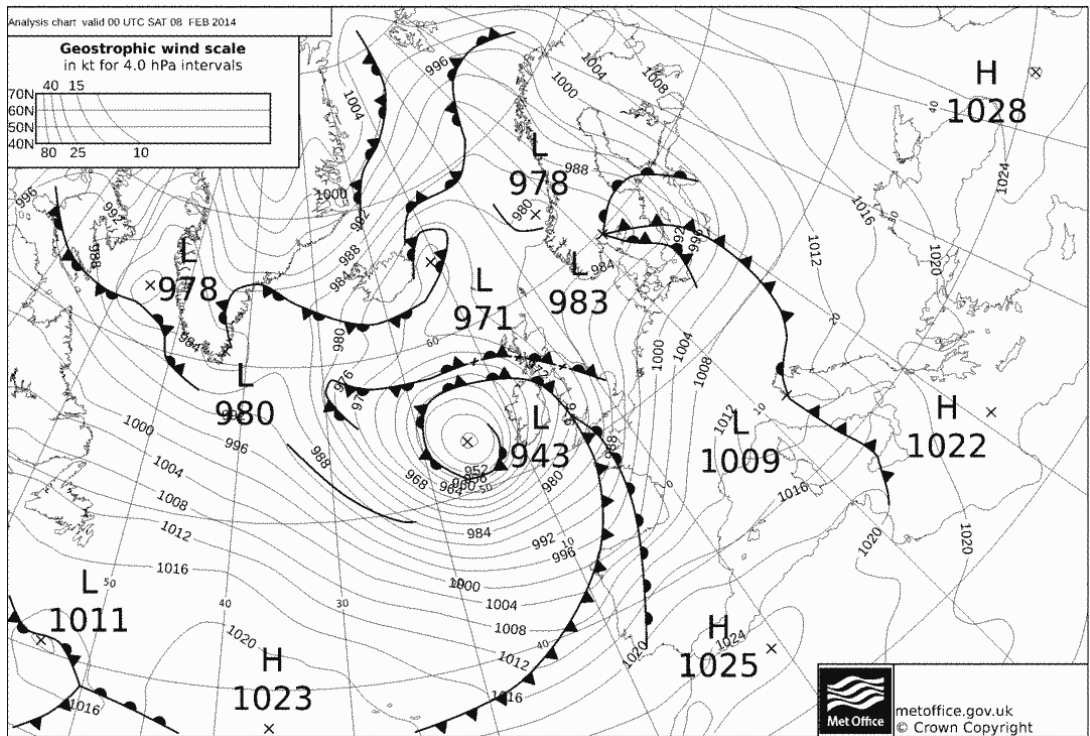


Figura 4
Carta sinóptica de superfície (nmm), 8/2/2014, 00h UTC - Perturbação Ruth.

Conclusão

Ficou demonstrado neste artigo que, do ponto de vista estatístico, no Inverno boreal de 2013/14, o campo perturbado da bacia do Atlântico Norte foi particularmente rico em sistemas depressionários frontais com evolução em ciclogénese explosiva ou semi-explosiva, no seu trajeto zonal (W-E) ou meridional (SW-NE), entre a fachada oriental do continente Norte Americano e a Europa Ocidental, com consequências do ponto de vista de paroxismos climático-meteorológicos, nomeadamente de quantitativos pluviométricos extremos nas Ilhas Britânicas, e ventos particularmente violentos, bem como forte ondulação, no oceano e nas áreas costeiras europeias, de Portugal à Escócia e Noruega (Ganho, 2014).

As causas, múltiplas e interligadas, têm como denominador comum uma dinâmica da circulação nos níveis altos da troposfera marcadamente divergente, determinada quer por elevadas velocidades do fluxo em percurso meridional, fomentando assim forte advecção de vortacidade, quer por intensas variações na velocidade interna do *jet-stream* polar, com *jet-streak* muito acentuados, embebidos num vórtice polar com forte distensão latitudinal sob a forma de um vasto e amplo vale, com o flanco ocidental sobre o interior e o Leste do continente Norte-Americano e o flanco oriental sobre todo o Atlântico Norte extratropical. A advecção consecutiva de massas de ar ártico sobre a América do Norte e a decorrente persistência de temperaturas excecionalmente baixas neste continente, em confronto permanente com massas de ar tropical, mais quentes, de origem meridional, alimentou condições de forte baroclinicidade da troposfera atlântica o que, em fase com dinâmicas fortemente divergentes nos níveis troposféricos superiores, constitui as condições energéticas necessárias à alimentação de fenómenos de ciclogénese explosiva.

As tendências futuras da intensidade da ciclogénese no Atlântico Norte, nas suas relações com mudanças climáticas de Amplificação Ártica, no contexto da Oscilação Norte Atlântica (ONA) e da Oscilação Ártica (OA), e em teleconexão com a Oscilação Decenal do Pacífico (ODP) e com a Oscilação Austral (OA), são uma temática que urge clarificar em prol da mitigação dos riscos climáticos.

Bibliografia:

- Ahrens, C. D. (2007). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, (8ª ed.). Thomson, USA: International Student Edition, 537 p.
- Ganho, N. (2013) - Risco de ventos tempestuosos de escala sinóptica em Portugal Continental: análise causal. *Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo*, Coordenação L. Lourenço e M. Mateus, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra, 251-266. Disponível: http://www.uc.pt/fluc/depgeo/Publicacoes/livro_homenagem_FRebelo
- Ganho, N. (2014). Mudanças climáticas e riscos climático-meteorológicos na perspectiva da dinâmica atmosférica de escala sinóptica - o caso do inverno boreal de 2013/2014. *Cadernos de Geografia*, 33, 27-36. Disponível: http://www.uc.pt/fluc/depgeo/Cadernos_Geografia/Numeros_publicados/CadGeo33
- Hufty, A. (2001). *Introduction à la Climatologie*. Bruxelles : De Boeck Université, 542 p.
- Sanders, F. & Gyakum, J. R. (1980). Synoptic-Dynamic Climatology of the "Bomb". *Monthly Weather Review*, 108, MIT, Cambridge, 1589-1606. Disponível: <http://i.imwx.com/web/multimedia/images/blog/bomb.pdf>
- Moreira, N. (2014). Excepcionalidade do Inverno 2013/2014? O ponto de vista sinóptico. *Colóquio Inverno de 2013/14: Excepcionalidade?* Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica (APMG), Lisboa. Disponível: http://www.apmg.pt/wp-content/uploads/2014/05/APMG-Inverno2013_14-Nuno-Moreira.pdf
- Santos, F. D. (2014). O Ártico, o aumento da "storminess" e o litoral de Portugal. *Colóquio Inverno de 2013/14: Excepcionalidade?* Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica (APMG), Lisboa. Disponível: http://www.apmg.pt/wp-content/uploads/2014/05/APMG-Inverno2013_14-Filipe-Santos.pdf
- Viterbo, P. (2014). Um Inverno particular. *Colóquio Inverno de 2013/14: Excepcionalidade?* Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica (APMG), Lisboa. Disponível: http://www.apmg.pt/wp-content/uploads/2014/05/APMG-Inverno2013_14-Pedro-Viterbo.pdf

Texto recebido em/Text submitted on: 18/03/2016
Texto aprovado em/Text approved on: 01/06/2016