



IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O COMPORTAMENTO DOS CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

Ariane Campani Matos (UFRJ, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: ariane.campani@gmail.com

Dra. Chou Sin Chan (DMD/CPTEC/INPE, Orientadora)

E-mail: chou@cptec.inpe.br

COLABORADORA

Dra. Claudine Pereira Dereczynski (IGEO/UFRJ)

E-mail: claudine@acd.ufrj.br

Julho de 2011

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2 – DADOS E METODOLOGIA

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E ETAPAS FUTURAS

- PUBLICAÇÃO EM CONFERÊNCIA

- BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Grandes esforços são empreendidos na compreensão dos fenômenos atmosféricos extremos, que atingem milhões de pessoas em todo planeta. Dentre esses fenômenos de maior impacto sobre a população, os processos ciclogênicos recebem atenção especial devido à possibilidade de formação de intensos vórtices acompanhados de fortes chuvas e ventos intensos. Esses sistemas podem interferir de modo significativo nas condições do mar, aumentando de forma perigosa as ondas junto à costa de diversos países ao redor do mundo. A navegação também fica prejudicada durante a passagem de ciclones, que geralmente possuem grande trajetória marítima.

Em particular, as regiões Sul e Sudeste do Brasil são freqüentemente atingidas por fortes ventos originados por ciclones extratropicais, e as suas áreas costeiras são afetadas pelo fenômeno de ressaca. A agitação marítima desta região deve-se à persistência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que impõe a condição mais freqüente, porém menos energética; por sua vez, os ciclones extratropicais e as altas polares associadas estão ligados aos eventos extremos. Os ciclones apresentam o gatilho para a formação das maiores ondulações enquanto as altas polares funcionam no sentido de manter a persistência e a extensão da pista de vento, permitindo que as ondas cresçam e se propaguem por grandes distâncias.

De acordo com o Quarto Relatório de Avaliação (Fourth Assessment Report – AR4) do Intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC), publicado em 2007 (IPCC, 2007), um significativo aumento no número e na intensidade de ciclones extratropicais tem sido documentado em vários estudos (Lambert, 1996; Gustafsson, 1997; McCabe et al., 2001; Wang et al., 2006), com mudanças associadas em suas trajetórias preferenciais. Para o Atlântico Sul existem poucos trabalhos sobre o assunto.

Neste trabalho, as saídas das integrações do modelo regional Eta (versão climática) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) serão utilizadas para avaliar se o modelo é capaz de reproduzir o clima presente (1960-1990) no que diz respeito a formação dos ciclones. O modelo regional Eta do CPTEC/INPE foi adaptado para realizar integrações de escala de décadas para

estudos de mudanças climáticas utilizando-se como condição de contorno lateral e inferior as as projeções de cenário A1B do IPCC geradas pelo modelo HadCM3 do Hadley Centre (Eta-HadCM3) para o clima futuro (2010-2099), com resolução de 40 km sobre a América do Sul.

O objetivo do trabalho é, através de comparações das saídas do Modelo Eta com a Reanálise 1 do NCEP/NCAR, verificar o potencial do modelo Eta para reproduzir a frequência de ocorrência dos ciclones, suas trajetórias e as tendências de aumento e/ou redução da frequência de ocorrência dos eventos no clima presente, na região do Atlântico Sul. A partir daí serão considerados o uso e as incertezas destas simulações em estudos de projeções para o clima futuro (2011-2099).

O esquema numérico para detecção dos ciclones a ser utilizado neste trabalho, denomina-se CYCLOC (Murray e Simmonds, 1991). Tal esquema, tem a função de procurar por mínimos e máximos num conjunto qualquer de dados, mas foi originalmente desenvolvido para localizar baixas e altas meteorológicas, em médias e altas latitudes por todo globo terrestre.

Neste relatório apresenta-se a descrição dos dados e da metodologia do trabalho no capítulo II, os resultados da climatologia sazonal dos ciclones utilizando-se como dados de entrada a Reanálise 1 do NCEP/NCAR no capítulo III e finalmente as considerações finais e etapas futuras no capítulo IV.

CAPÍTULO 2

DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os conjuntos de dados utilizados neste trabalho, a Reanálise 1 do NCEP/NCAR, as características do modelo regional Eta e do programa CYCLOC.

2.1 Reanálise 1 do NCEP/NCAR

O sistema de assimilação de dados da Reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e do National Center for Atmospheric Research (NCAR) descrito com mais detalhes em Kalnay et al. (1996) inclui o modelo global espectral do NCEP operacional em

1995, com 28 níveis sigma na vertical e truncamento triangular de 62 ondas, equivalente a uma resolução horizontal aproximada de 210 km na horizontal ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude e longitude). As observações assimiladas são radiossondagens; sondagens verticais de temperatura operacional do TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS); ventos determinados a partir de satélites geoestacionários; observações de ventos e temperatura de aeronaves, dados de pressão à superfície de estações meteorológicas em terra; e dados oceânicos de pressão à superfície, temperatura, vento horizontal e umidade específica. As observações de precipitação não são assimiladas pelo sistema da Reanálise, portanto, os dados de precipitação gerados são acumulados a cada 6 horas pelo modelo (Janowiak, 1998).

O modelo parametriza os principais processos físicos, como, radiação (incluindo o ciclo diurno e a interação com as nuvens), convecção, precipitação em grande escala, física da camada limite, entre outros. Os detalhes da dinâmica e física do modelo são descritos em NOAA/NMC Development Division (1988), Kanamitsu (1989) and Kanamitsu et al. (1991). Uma diferença principal no modelo como descrito por Kanamitsu et al. (1991) é o uso de um esquema simplificado da parametrização da convecção de Arakawa-Schubert desenvolvido por Bandeira e Wu (1994), baseados em Grell (1993). Este esquema resulta numa previsão da precipitação melhor do que o esquema anterior (Kuo; 1965,1974), nos Estados Unidos (calculado pelo equitável threat scores) e apresenta resultados mais realísticos nos Trópicos.

As variáveis em pontos de grade (produto da Reanálise mais usado) são classificadas em quatro categorias (A, B, C e D) dependendo da influência relativa do dado observacional e do modelo sobre a variável (Kalnay et al., 1996). A pressão ao nível médio do mar, utilizada neste trabalho é classificada na categoria A, a classe mais confiável, onde a variável analisada é fortemente influenciada pelos dados observacionais.

Neste trabalho são utilizados dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR disponíveis no site <http://www.cdc.noaa.gov> no formato NetCDF. O período a ser utilizado será de janeiro de 1961 até dezembro de 1990.

2.2 O Modelo Eta do CPTEC/INPE

O modelo de mesoescala Eta foi desenvolvido a partir de uma parceria entre a Universidade de Belgrado, Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e o Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP), localizado nos Estados Unidos. Operacionalmente o modelo Eta foi primeiramente implementado no NCEP (Mesinger et al. 1988; Black 1994). No Brasil o modelo Eta está operacional desde 1996, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (Chou, 1996). O modelo regional se propõe a prever com maiores detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisas marítimas, tempestades severas, etc., enfim, sistemas organizados em mesoescala.

O modelo Eta é um modelo em ponto de grade de equações primitivas. A grade horizontal é a grade E de Arakawa e a coordenada vertical é a coordenada Eta. A topografia é representada em forma de degraus. As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, componente zonal e meridional do vento, umidade específica, hidrometeoros da nuvem, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

2.2.1 A versão Eta Climático (Eta)

A versão climática sazonal do modelo Eta foi adaptado para executar as integrações no prazo de tempo decadal, com foco no estudo de cenários de mudanças climáticas relacionadas a diferentes níveis de concentração de CO₂ atmosférico (Chou et al., 2011).

Para estudos do clima presente, a concentração de CO₂ foi definida em um valor constante de 330 ppm. O modelo Eta foi configurado para ter um calendário de 360 dias em um ano a fim de seguir o calendário do modelo HadCM3. As condições de contorno para a execução do modelo Eta foram retiradas do conjunto do modelo HadCM3 (Eta-HadCM3), escolhido de forma a incluir o intervalo de incerteza descrita pelas variantes do modelo. As condições HadCM3 foram inseridas a cada 6 horas. Assim, três membros foram selecionados, que mostraram alta sensibilidade, médio e baixo em resposta à temperatura média global. Juntamente com a versão não perturbada do modelo, estes dados fornecem as condições de contorno para as múltiplas execuções do Modelo Eta-CPTEC, daqui por diante designados como membros de alta, média, baixa e não-perturbada. A temperatura da superfície do mar foi retirada do modelo acoplado oceano-atmosfera (médias mensais), os valores são atualizados diariamente e de forma linear com os valores mensais no dia 15 de cada mês. Interpolação linear semelhante é aplicada para o estado verde da vegetação que

é fixo em valores médios mensais. A integração do modelo foi iniciada em 01 de janeiro de 1960 e um ano de tempo de spin-up foi incluída. Portanto, os resultados baseiam-se no período compreendido entre 01 de janeiro de 1961 até 30 de dezembro de 1990. As integrações foram contínuas durante 31 anos. A umidade do solo inicial partiu de uma climatologia mensal e albedo a partir de uma climatologia sazonal. O modelo foi configurado com 40 km de resolução horizontal, 38 camadas verticais e passo de tempo de 90 seg.

2.3 O Programa CYCLOC

O esquema numérico utilizado neste trabalho, denominado CYCLOC, foi desenvolvido por Murray e Simmonds (MS) (1991) do Departamento de Meteorologia da Universidade de Melbourne na Austrália.

O esquema é totalmente automatizado de forma que nenhuma intervenção manual é necessária depois que uma série de parâmetros de procura e rastreio for especificada. Sua função é procurar por mínimos e máximos num conjunto qualquer de dados, mas foi originalmente desenvolvido para localizar baixas e altas meteorológicas, em médias e altas latitudes por todo globo terrestre.

Cedido pelo Dr. Ross J. Murray, o CYCLOC está totalmente em linguagem Fortran e foi originalmente desenvolvido pelos autores em ambiente UNIX/Sun e foi adaptado para ser compilado em LINUX/Intel com o compilador Intel Fortran Compiler 6.0 (ifc) disponível gratuitamente no endereço <http://www.intel.com>.

Existem três estágios principais no esquema: localização, rastreamento e análises estatísticas. Inicialmente há uma série de parâmetros essenciais que devem ser escolhidos de forma definitiva antes de cada rodada, referentes ao tempo (tempo inicial, final e intervalo de tempo entre os campos sucessivos), área de interesse (limites em latitude e longitude), informações relacionadas à projeção (número de pontos de grade, tamanho latitudinal e longitudinal da matriz de dados e hemisfério de interesse), tipo e característica do sistema a ser procurado (altas ou baixas, fechadas e/ou abertas, fortes e/ou fracas), além de informações referentes aos próprios dados (quantidade, unidade, fonte, resolução da grade).

Basicamente, a técnica de procura envolve uma comparação de pressões com pontos vizinhos, ou seja, um ciclone (anticiclone) é pré-definido num ponto no qual a

pressão seja menor (maior) do que em qualquer um dos pontos a sua volta. Embora seja possível considerar até 24 pontos nas redondezas, os autores sugerem que normalmente seja usado um número entre 4 e 8 pontos para esta análise. Após alguns testes com este parâmetro, foi estabelecido o uso de 8 pontos vizinhos para varredura em todas as simulações realizadas neste estudo.

Primeiro, o esquema varre o conjunto de dados à procura dos 'possíveis' sistemas pela comparação com os pontos de grade vizinhos. Contudo, para evitar a inclusão de sistemas mais fracos, é utilizado um critério conhecido como teste de curvatura mínima que requer o cálculo de um valor médio mínimo do Laplaciano da pressão sobre uma pequena área em torno do centro analisado. Isso assegura que cada sistema possua um mínimo de vorticidade ciclônica (ou anticiclônica) geostrófica (dada pela equação 1) que é diretamente proporcional ao Laplaciano da pressão.

$$\zeta_g = \frac{1}{\rho f} \nabla^2 p \quad (1)$$

Este procedimento é aplicado no esquema através dos parâmetros relacionados aos

critérios de intensidade. Dentre esses parâmetros, o principal é o que quantifica o mínimo Laplaciano mediado numa área para sistemas fechados, cujo valor utilizado foi de 0,5 calculado num raio de 3° de latitude. Foram feitos vários testes de sensibilidade para determinar esses valores, bem como aqueles relacionados aos principais parâmetros que comandam o esquema na primeira etapa do programa. No entanto, para a maior parte dos parâmetros foram considerados os valores predeterminados pelos próprios autores do esquema.

Contudo, a técnica ainda não é satisfatória quando o objetivo é identificar sistemas cujas dimensões são da mesma ordem que o espaçamento entre pontos de grade, ou quando o espaçamento não é tão pequeno se comparado ao deslocamento esperado entre os tempos de análises. Com o intuito de amenizar estes problemas, o método usado torna-se um pouco mais complexo do que o descrito, já que envolve o uso de uma rotina diferencial, com pressões e derivadas da pressão sendo definidas por interpolação bicúbica. Esse esquema ainda permite a possibilidade da inclusão ou não de sistemas fechados (com pelo menos uma isóbara fechada) ou abertos (sem nenhuma isóbara fechada). Os centros de ciclones (anticiclones) fechados são localizados pela minimização (maximização) da pressão,

enquanto os ciclones (anticiclones) abertos são identificados através de pontos de inflexão na superfície de pressão interpolada, e localizados minimizando-se (maximizando-se) o valor absoluto do gradiente de pressão. Neste trabalho são consideradas apenas as isóbaras fechadas.

A Figura 3.1, feita para sistemas de baixa pressão, esquematiza de modo mais claro o procedimento de procura em apenas uma dimensão (x). As curvas representam, respectivamente, a função de pressão $p(x)$, o módulo da primeira derivada $p_x(x)$, e a segunda derivada $p_{xx}(x)$ ou Laplaciano da função.

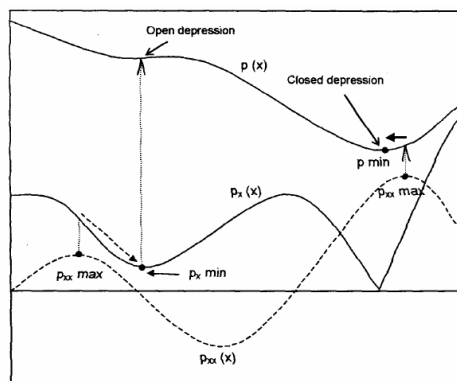


Figura 2.1 – Seção transversal da pressão e suas derivadas mostrando como o máximo de p_{xx} (ou o Laplaciano de p em duas dimensões) pode ser usado como pontos iniciais na pesquisa por ambas depressões abertas e fechadas. Um centro de baixa ficará normalmente próximo a seu associado máximo do Laplaciano, mas não será necessariamente coincidente com ele, salvo o caso de um sistema exatamente simétrico. Pra mostrar este princípio, o laplaciano aqui é representado como uma função contínua: na prática isto é suficiente para maximizar a partir dos valores dos pontos de grade.

O segundo estágio do MS consiste em traçar a trajetória de cada sistema desde o instante de seu primeiro aparecimento até sua dissipação. No entanto, esse procedimento não é tão simples quanto possa parecer, pois muitas vezes num período de 24 horas os centros de sistemas viajam distâncias cuja ordem é comparável as suas separações, e com isso, não se pode ter total certeza para onde o centro foi durante este período.

Para construir trajetórias, o programa estima a nova posição e a mudança de pressão de cada sistema em cada tempo de análise. O deslocamento é baseado numa

ponderação do movimento durante o intervalo de tempo anterior e as velocidades médias climatológicas dos sistemas, ou seja,

$$r_{est}(t + \delta t) = r(t) + w_m \{r(t) - r(t - \delta t)\} + (1 - w_m) v_{av}(\phi(t)) \delta t + r_k \quad (2)$$

onde r é a posição estimada, t é o tempo, δt é o intervalo de tempo, v_{av} é a velocidade média climatológica do sistema, Φ é a latitude e r_k é um termo de pequena magnitude que depende da trajetória do sistema. A Figura 3.2 esquematiza essa ponderação.

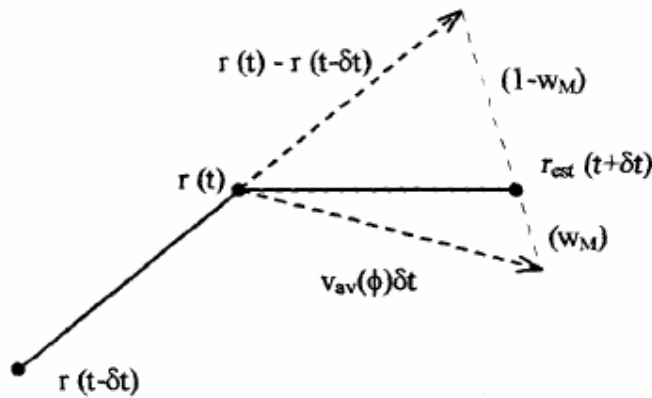


Figura 2.2 - Estimativa de uma nova posição ($r_{est}(t+\delta t)$) baseada nos pesos w_m do deslocamento prévio, $r(t)-r(t-\delta t)$, e $(1-w_m)$ do deslocamento baseado nas velocidades médias dos ciclones $v_{av}(\Phi)\delta t$ (Fonte: MS).

A estimativa da mudança de pressão é baseada na ponderação de tendência prévia e persistência, ou seja,

$$p_{est}(t + \delta t) = p(t) + w_p [p(t) - p(t - \delta t)] \quad (3)$$

Os fatores de ponderação (w_m e w_p) quantificam a “memória” do movimento passado e da tendência de pressão incorporadas na estimativa. Em todas as simulações deste trabalho considerou-se $w_p=0,0$ e $w_m=1,0$.

Em seguida, são calculadas as probabilidades de associação entre as posições previstas (**m**) e as atuais no novo período de análise (**n**), separadas por uma distância $r_{mn} < r_c$ (r_c é o raio crítico cujo valor escolhido foi 12°). A probabilidade de cada par baseia-se numa função de decréscimo da separação entre eles e a diferença de pressão central, ou seja, envolve a inclusão de uma componente de diferencial de pressão no raio:

$$r'_{mn} = \sqrt{r_{mn}^2 + \left(\frac{\delta p_{mn}}{k_{rp}}\right)^2} \quad (4)$$

onde k_{rp} é uma constante de ajuste.

Agora basta encontrar a combinação de associações mutuamente exclusivas para a qual o produto das probabilidades seja máximo. Na prática, as combinações mais prováveis de associação são encontradas maximizando-se a soma das funções das probabilidades, isto é,

$$P_{mn} = (P_{\max})_{mn} - \frac{r_{mn}^2}{r_c^2} \quad (5)$$

Essa função é máxima quando os sistemas são coincidentes ($r_{mn} = 0$) e zero quando eles estão deslocados por um raio igual ou maior que o raio crítico. **P_{máx}** assume um valor unitário para a associação envolvendo um sistema fechado, forte e não novo, mas emprega-se um valor menor de **P_{máx}** para associações que incluem sistemas novos (**P_{new}**), abertos (**P_{open}**), ou ambos (**P_{new} x P_{open}**) com a finalidade de minimizar a probabilidade de suas ocorrências nas trajetórias.

Essa maximização é alcançada pela escolha de associações de sistemas previstos/novos em grupos. Um exemplo destas associações é ilustrado na Figura 3.6. Os valores de probabilidade são dados para os possíveis ajustes (setas) de posições previstas e novas. Em cada grupo a combinação de associações com a maior ΣP_{mn} , é selecionada. No Grupo 1 existem apenas dois ajustes possíveis, Ac+Ee ($\Sigma P_{mn} = 0,6+0,5 = 1,1$) e Ec ($\Sigma P_{mn} = 0,8$). A combinação que tiver a mais alta probabilidade é então selecionada (no caso Ac+Ee). A combinação resultante para o Grupo 2 é Ba+Cb+Fd ($\Sigma P_{mn} = 1,9$). Depois de selecionar esses ajustes, conclui-se que os ciclones D e G são extintos e f constitui um novo elemento.

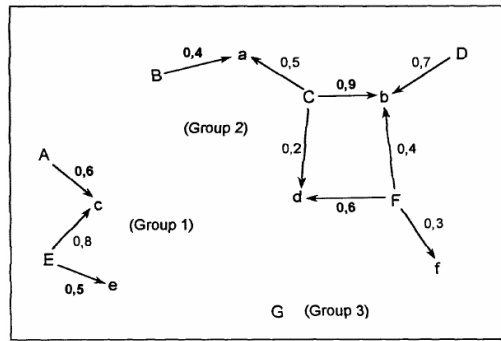


Figura 2.3 – Grupo de posições previstas (maiúsculas) e novas (minúsculas) de ciclones. Os valores entre os pares indicam a probabilidade de associação (Fonte: MSA).

Quanto às análises estatísticas de trajetórias (terceiro estágio), o programa tem ainda a habilidade de calcular médias zonais e regionais da frequência (i.e., densidade e fluxo), velocidade, pressão central e tendência de pressão dos ciclones, e a frequência de ciclogêneses. A inclusão de um sistema nas estatísticas foi condicionada a sua sobrevivência para um período de vida mínimo de 24 horas e os cálculos das frequências foram feitos para faixas de latitude de 5°.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se uma avaliação do modelo Eta Climático (40 km) na simulação dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul no clima presente (1961-1990), a fim de considerar o uso e as incertezas destas simulações em estudos de projeções para o clima futuro (2011-2099). As integrações no clima futuro foram elaboradas no INPE, usando o Modelo Eta do INPE e as projeções de cenário A1B do IPCC geradas pelo modelo HadCM3 do Hadley Centre como condição de contorno lateral e inferior, doravante denominado Eta-HadCM3. A detecção de ciclogêneses e análise das trajetórias dos ciclones são elaboradas utilizando-se o esquema numérico de Simmonds e Murray (1999) que utiliza como dados de entrada a pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM). A avaliação dos ciclones no clima presente do modelo Eta climático foi feita em relação aos resultados obtidos com os dados de Reanálise 1 do NCEP/NCAR para o mesmo período (janeiro de 1961 a dezembro de 1990).

3.2 Clima Presente

Neste item apresenta-se a comparação dos resultados obtidos com o modelo Eta-HadCM3 e os obtidos com os dados da Reanálise 1 para o período do clima presente (1961-1990). Tais resultados foram apresentados na IV Conferência Regional sobre Mudanças Globais – IV CRMG (Campani et al., 2011).

3.2.1 Climatologia Sazonal dos Ciclones

Inicialmente foram elaboradas tabelas e gráficos com o número de ciclogêneses a cada ano desde 1961 até 1990 para os 2 conjuntos de dados e para as 4 estações do ano. Para o período do verão a série se estendeu desde o verão de 1962 (dez/1961, jan e fev/1962) até o verão de 1990 (dez/1989, jan e fev/1990). Na análise foram contabilizados somente os ciclones que permaneceram em quatro horários seguidos, ou seja, os ciclones que permaneceram configurados pelo menos 18h após sua formação.

A Tabela 3.1 apresenta o total de ciclogêneses por faixa de latitude e por estação do ano no período analisado (1961-1990) para a Reanálise 1 do NCEP/NCAR. Nota-se que a maior frequência de ocorrência de ciclogêneses ocorre no inverno, seguido da primavera, depois outono e finalmente o verão. A frequência de ocorrência da ciclogênese aumenta em geral com aumento da latitude.

Tabela 3.1 – Total de ciclogêneses no período 1961-1990 para as quatro estações do ano, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

Estação/Latitude	50°S - 45°S	45°S - 40°S	40°S - 35°S	35°S - 30°S	30°S - 25°S	25°S - 20°S	Total
Primavera	129	114	146	112	29	1	531
Verão	142	104	70	37	6	1	360
Outono	156	131	85	73	11	0	456
Inverno	207	163	138	111	15	1	635
Total	634	512	439	333	61	3	1982

Na Tabela 3.2 estão os mesmos resultados da Tabela 3.1, exceto para os dados do modelo Eta-HadCM3. Os valores médios apresentados nas duas tabelas anteriores (Tabelas 3.3 e 3.4) são apresentados na Figura 3.1

Tabela 3.2 – Total de ciclogêneses no período 1961-1990 para as quatro estações do ano, a partir dos dados do modelo Eta-HadCM3.

Estação/Latitude	50°S - 45°S	45°S - 40°S	40°S - 35°S	35°S - 30°S	30°S - 25°S	25°S - 20°S	Total
Primavera	19	45	80	88	43	7	282
Verão	2	28	54	77	63	10	234
Outono	19	59	106	106	29	14	333
Inverno	39	95	113	126	39	3	415
Total	79	227	353	397	174	34	1264

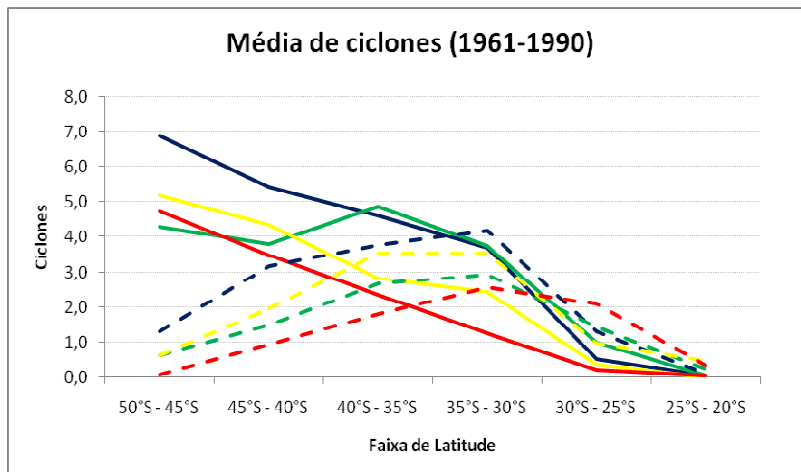


Figura 3.1 – Número médio de ciclogêneses durante o período de 1961-1990 por faixa de latitude para inverno (azul), primavera (verde), verão (vermelho) e outono (amarelo), obtido a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR (linha contínua) e os dados do modelo Eta (linha tracejada).

A partir da Figura 3.1 fica aparente o aumento na frequência de ocorrência de ciclogêneses das baixas para as altas latitudes nos dados da Reanálise (linhas cheias). Este aspecto não é representado adequadamente pelo modelo Eta-HadCM3 (linhas tracejadas), que apresenta um máximo de ciclogênese entre 30 e 35°S. Isto pode estar relacionado com o fato do limite inferior do modelo ocorrer na latitude de 50,2°S, o que poderia impedir o desenvolvimento de ciclones próximo às suas fronteiras. Por outro lado, o modelo Eta-HadCM3 superestima o número de ciclogêneses nas baixas latitudes, principalmente no verão e outono.

As direções das trajetórias, consideradas a partir da posição inicial e final do ciclone, foram avaliadas por faixas de latitude agrupando todas as estações, para os resultados da Reanálise 1 e do modelo Eta-HadCM3 (Figura 3.2).

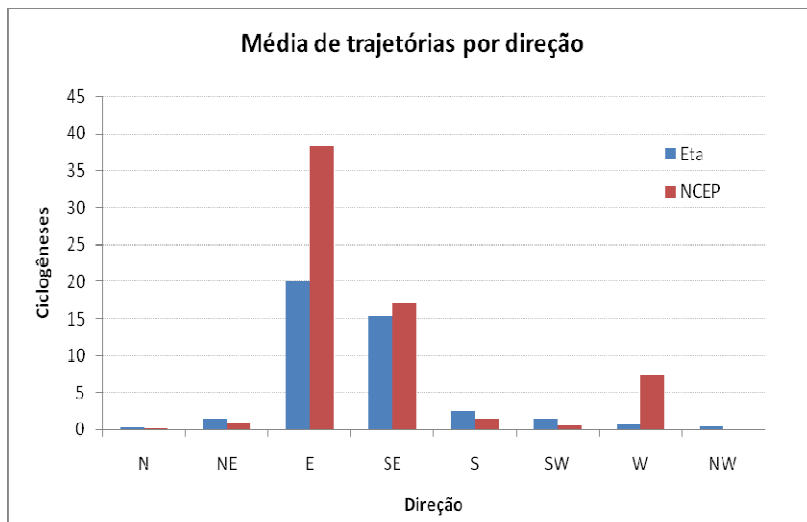
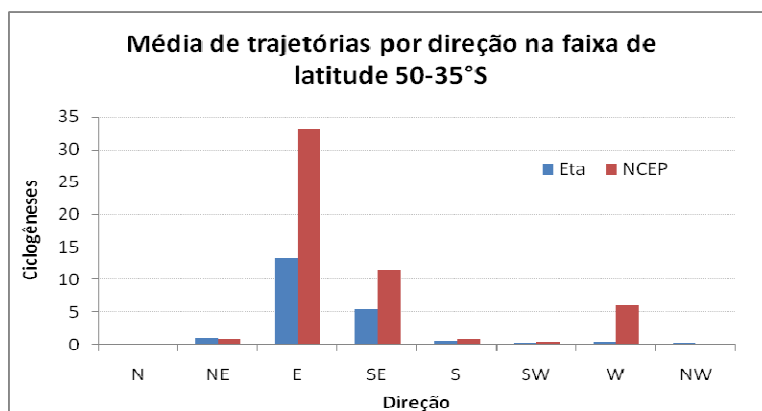


Figura 3.2 – Média de trajetórias dos ciclones por direção 1961 a 1990, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR (vermelho) e do modelo Eta (azul)

Verifica-se que a trajetória predominante dos ciclones é preferencial para leste, e a seguir para sudeste e tal aspecto é corretamente representado pelo modelo Eta_HadCM3.

Analisando-se por faixas de latitude, 50°S-35°S e 35°S-20°S, verifica-se que os ciclones que se formam nas altas latitudes deslocam-se preferencialmente para leste (Figura 3.3 a) e os ciclones das baixas latitudes (Figura 3.3 b) movem-se em geral para sudeste. E este aspecto também é bem representado pelo modelo Eta-HadCM3.

(a)



(b)

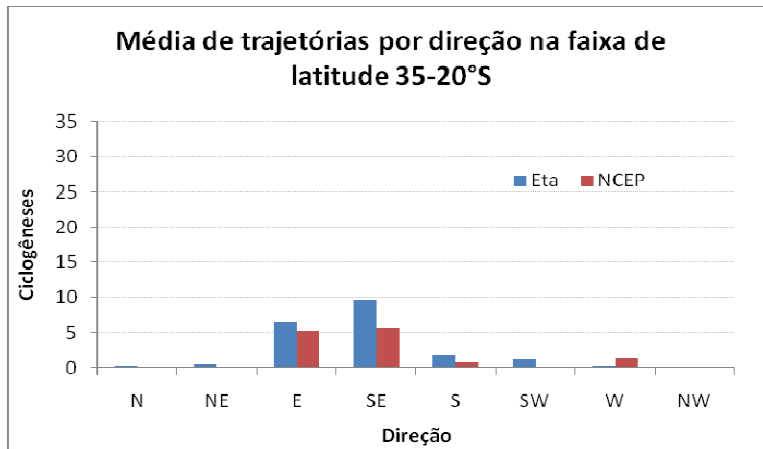
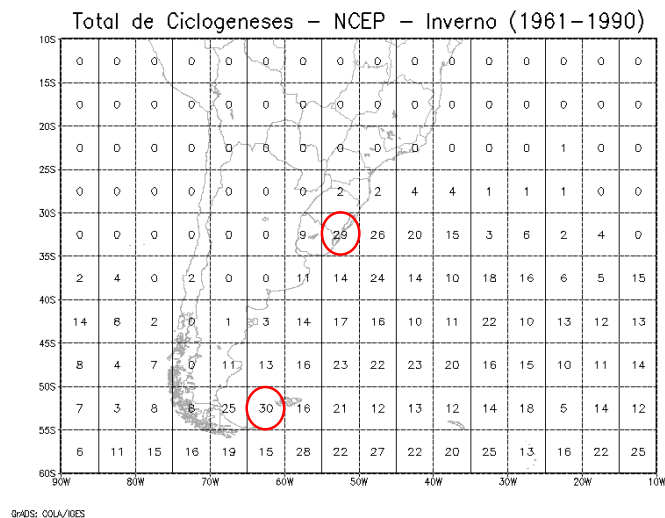


Figura 3.3 – Média de trajetórias dos ciclones por direção no período de 1961 a 1990, a partir de dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR (vermelho) e dos dados do modelo Eta (azul) para as faixas de latitude: (a) 50-35°S e (b) 35-20°S.

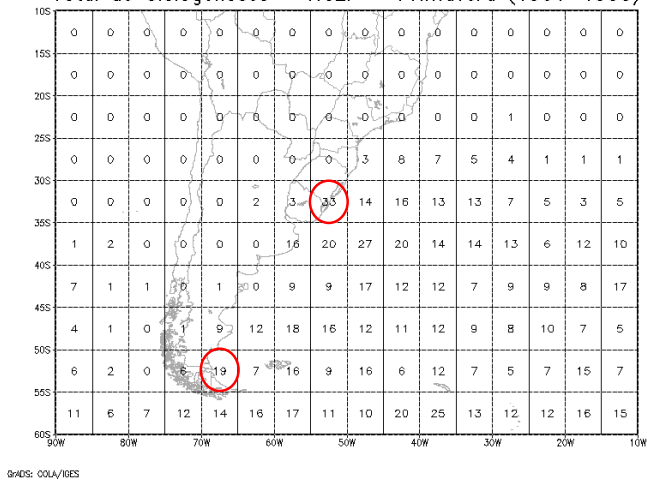
A Figura 3.4 apresenta a distribuição espacial do número total de ciclogêneses por grade de 5°x5° (latitude x longitude) obtidas com os dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR para as quatro estações do ano. Nota-se que existem dois máximos, um no sudeste do Rio Grande do Sul e oceano adjacente e outro no sul da Argentina e Oceano Adjacente. O máximo no Rio Grande do Sul é mais pronunciado na primavera e o outro é mais pronunciado no outono.

(a)



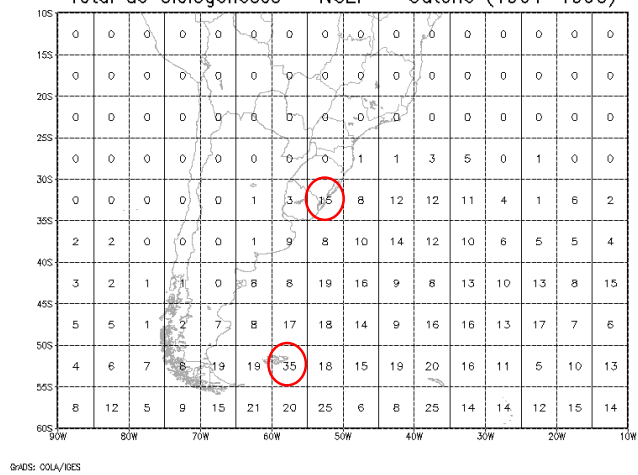
(b)

Total de Ciclogeneses – NCEP – Primavera (1961–1990)



(c)

Total de Ciclogeneses – NCEP – Outono (1961–1990)



(d)

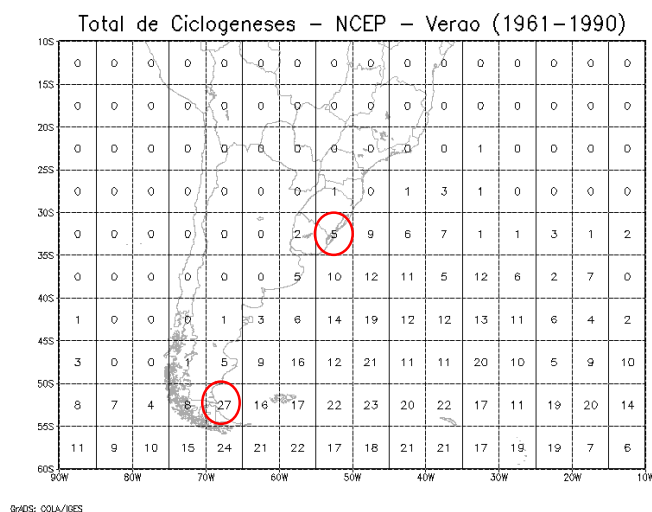


Figura 3.4 – Total de ciclones formados em cada grade de 5°x 5° (latitude x longitude) para o período de 1961-1990, utilizando os dados da Reanálise 1 para (a) inverno, (b) primavera, (c) outono e (d) verão.

A Figura 3.5 apresenta resultados semelhantes à Figura 3.4, exceto para os dados do modelo Eta-HadCM3. É importante ressaltar que apesar do mapa se estender de 10°S a 60°S e de 10°W a 90°W, só existem dados do modelo Eta na área 15-50.2°S e de 25.8-83°W. Desta forma, todas as grades fora deste intervalo estão com valores nulos. Devido à esta configuração do modelo, estendendo-se até 50.2°S, o núcleo da Argentina não aparece, mas o núcleo do Uruguai é configurado. Este núcleo localiza-se ligeiramente à leste de sua posição na Reanálise, ou seja, mais para o interior do Oceano Atlântico. No outono o centro do núcleo é mais intenso, seguido do verão, inverno e primavera.

(a)

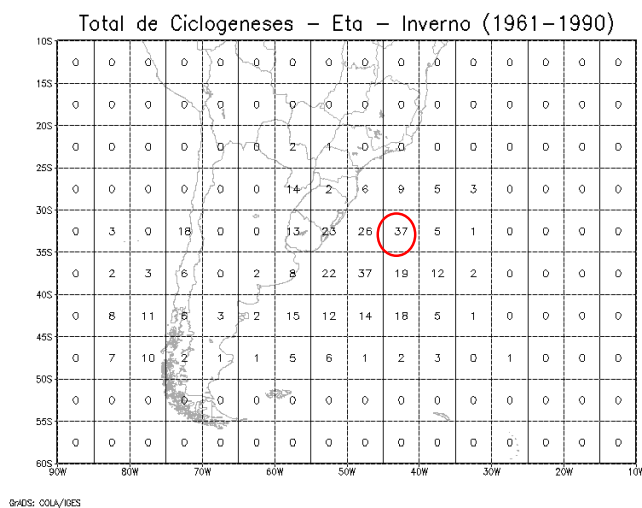
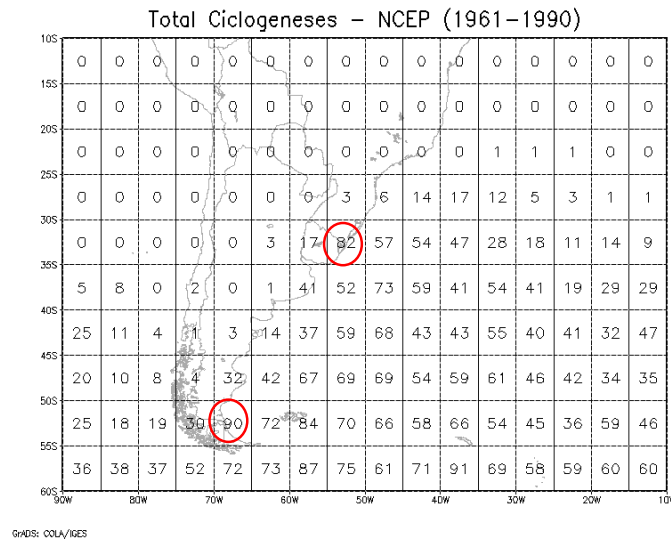


Figura 3.5 – Total de ciclones formados em cada grade de 5°x 5° (latitude x longitude) para o período de 1961-1990, utilizando os dados do modelo Eta-HadCM3 para (a) inverno, (b) primavera, (c) outono e (d) verão.

Na Figura 3.6 apresentam-se os mesmos resultados das Figuras anteriores, exceto para todo o período analisado para (a) Reanálise 1 do NCEP/NCAR e (b) Eta-HadCM3, onde nota-se que o modelo Eta-HadCM3 superestima o núcleo de máxima ciclogênese no Uruguai.

(a)



(b)

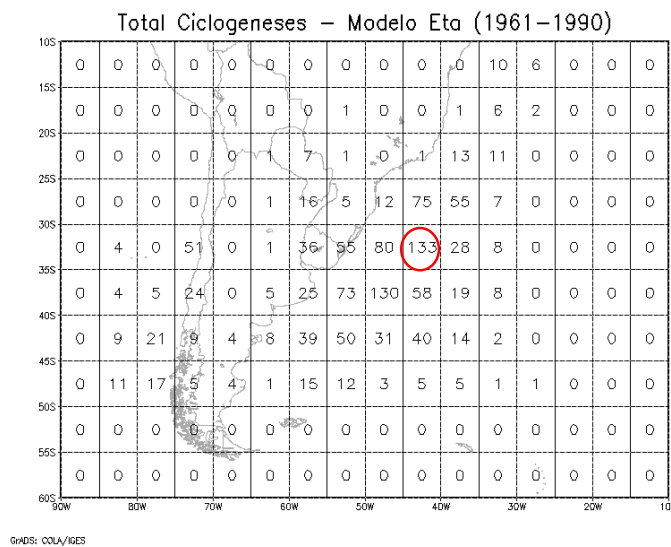


Figura 3.6 – Total de ciclones formados em cada grade de 5°x 5° (latitude x longitude) para todo o período de 1961-1990, utilizando os dados (a) da Reanálise 1 (b) do modelo Eta-HadCM3

3.2.2 Evolução Temporal das Ciclogêneses

A análise da evolução temporal das ciclogêneses foi realizada utilizando o total de ciclogêneses por ano para o período considerado (1961-1990) para o modelo Eta-HadCM3 e para Reanálise 1, para as faixas de latitude de 45-50°S e 20-45°S (Figura 3.7)

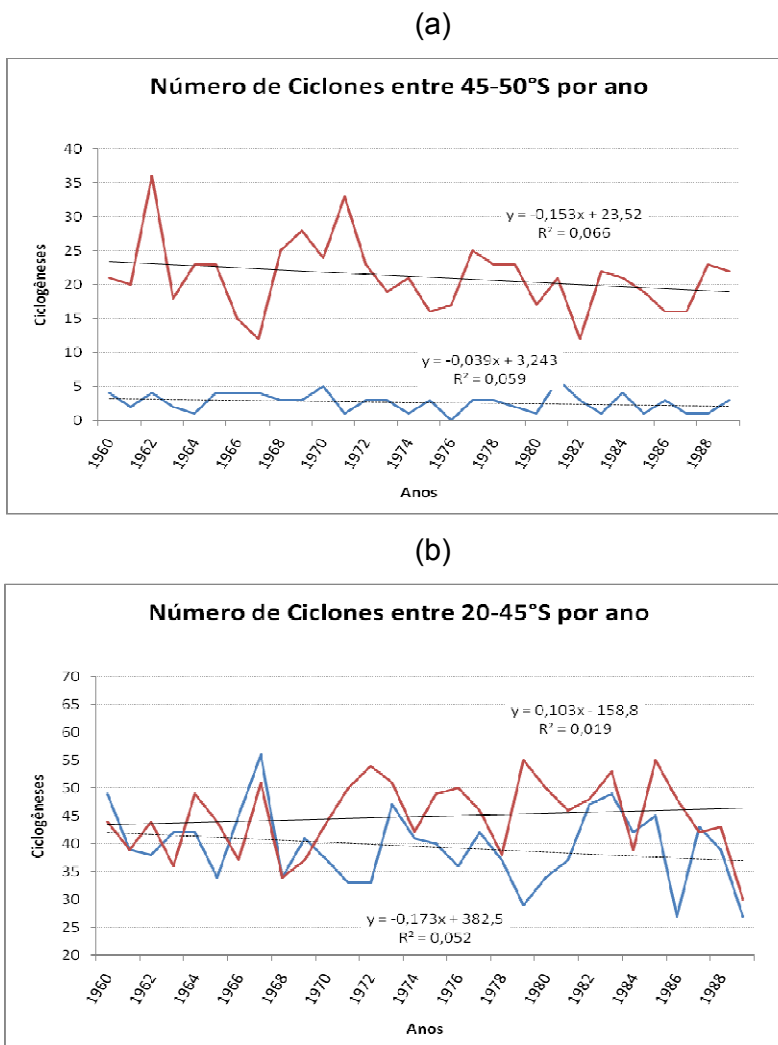


Figura 3.7 – Total de ciclones anualmente para o período de 1961 a 1990, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR (vermelho) e do modelo Eta-HadCM3 (azul) para as faixas de latitude (a) de 45-50°S e (b) 20°S a 45°S.

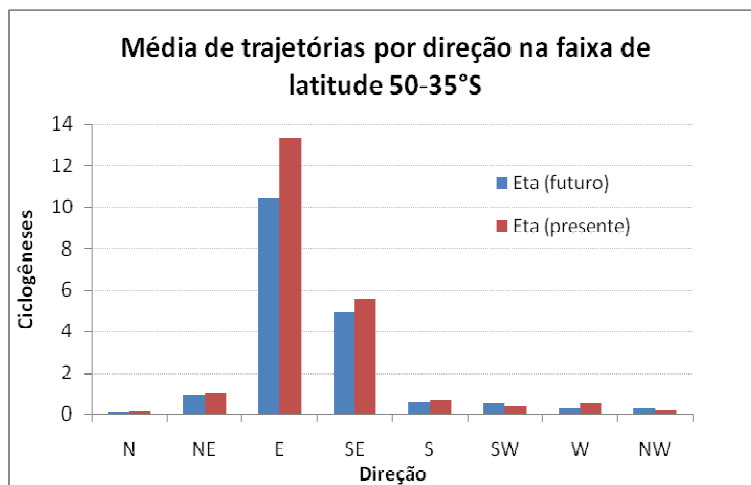
Na Figura 3.7 verifica-se que os resultados a partir da Reanálise indicam uma tendência de redução (aumento) para a latitude de 45-50°S (20-45°S). Os resultados do modelo Eta_HadCM3 mostram tendência correta de redução na quantidade de ciclones nas altas latitudes, porém mostram tendência contrária nas latitudes mais baixas (redução na frequência de ocorrência de ciclogênese entre 20-45°S).

3.3 Clima Futuro

Neste item são mostrados os resultados para o clima futuro, onde foram utilizados como dados de entrada a rodada do modelo Eta-HadCM3 para o período de 2011 a 2099.

A Figura 3.8 mostra a média de trajetória predominante dos ciclones para o período de 2011 a 2099 (clima futuro) combinado com o total de trajetórias para o período de 1961 a 1990 (clima presente) para 50-35°S e para 35-20°S. Percebe-se que a predominância de trajetórias sendo verificada para o clima futuro para leste nas altas latitudes e para sudeste nas baixas latitudes.

(a)



(b)

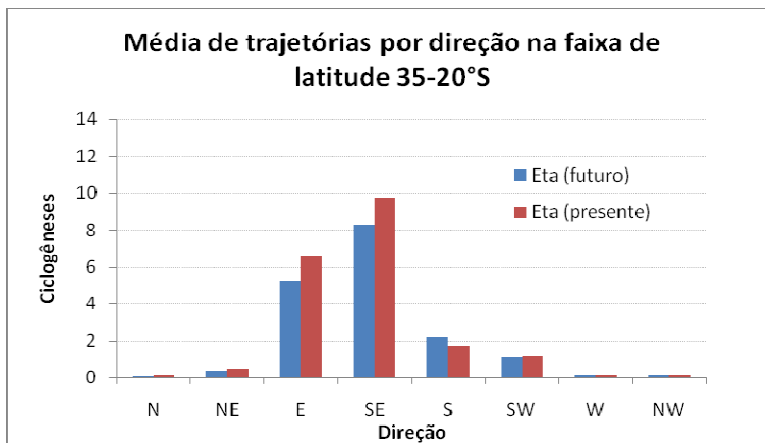


Figura 3.8 – Média de trajetórias predominantes por direção dos ciclones para o período de 1961-1990 (Eta presente) e de 2011-2099 (Eta futuro) para as faixas de latitude: (a) 50-35° S e (b) 35-20°S.

A distribuição espacial do total de ciclogêneses para o período do clima futuro (2011-2099) foi esquematizada na Figura 3.9, onde se observa a quantidade de ciclogêneses que ocorreu em cada grade de 5°x 5° (latitude e longitude) no período de 90 anos. Nota-se que o núcleo configurado entre 35-40°S/45-50°W, de acordo com as projeções do modelo, sofreria uma redução no futuro, uma vez que o modelo configura 133 ciclogêneses em 30 anos no clima presente (4,4 sistemas/ano em média) e 253 ciclogêneses em 89 anos no clima futuro (média de 2,8 ciclogêneses/ano).

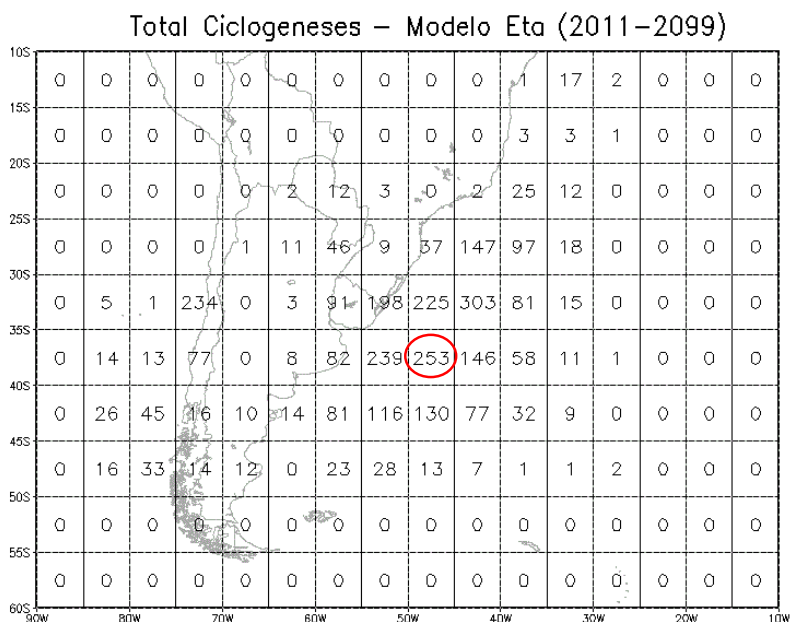
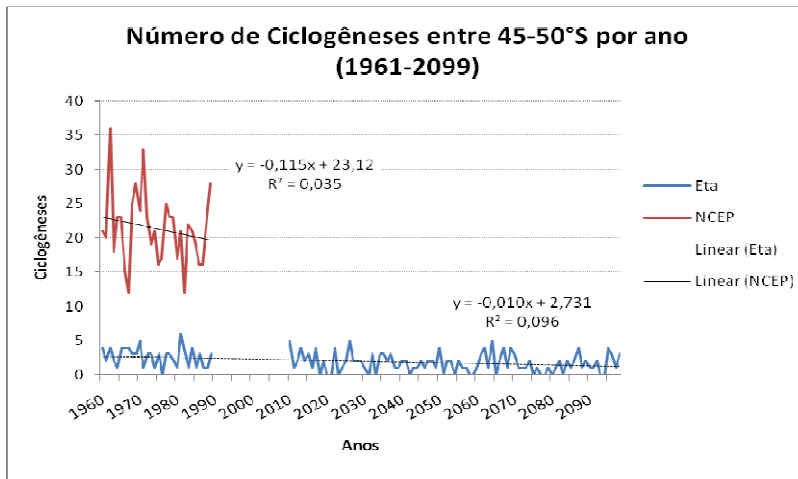


Figura 3.9 - Total de ciclones formados em cada grade de 5°x 5° (latitude x longitude) para todo o período de 2011-2099, utilizando os dados do modelo Eta-HadCM3.

A Figura 3.10 mostra a evolução temporal da quantidade de ciclones por ano para a faixa entre 45-50°S (Figura 3.10 a) e entre 20-45°S (Figura 3.10 b), para o clima presente da Reanálise 1 do NCEP/NCAR e para o modelo Eta-HadCM3 no clima presente e futuro.

(a)



(b)

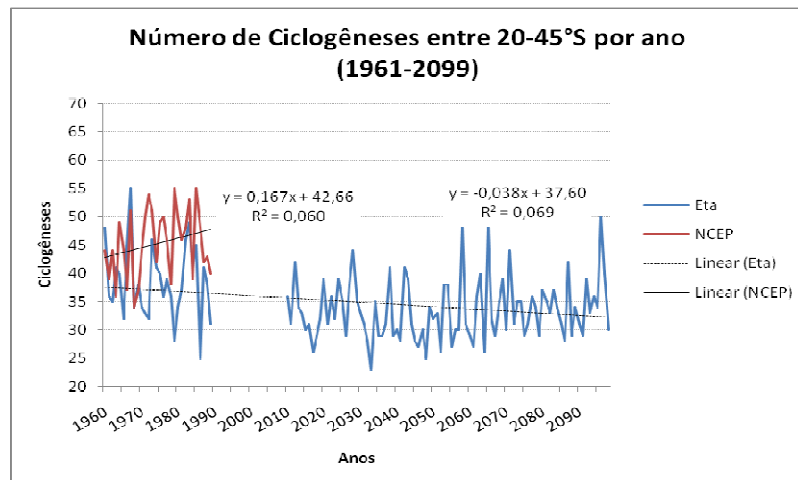


Figura 3.9 – Evolução temporal da frequência de ocorrência de ciclones para o modelo Eta-HadCM3 (clima presente e futuro) e para os dados da Reanálise 1 (período de 1961-1990) para (a) 45-50°S e (b) 20-45°S.

Nota-se que na Figura 3.9 (a), para ambas as séries, uma tendência de redução na ocorrência de ciclones. Contudo na Figura 3.9 (b), o aumento no clima presente indicado pelos resultados da Reanálise não se projeta para o futuro a partir das saídas do modelo Eta-HadCM3.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E ETAPAS FUTURAS

Neste trabalho foi elaborada uma avaliação da frequência de ocorrência de ciclogêneses e das direções das trajetórias dos ciclones na região do Atlântico Sul produzidas pelo modelo Eta-HadCM3 no clima presente (1961-1990), a partir dos dados gerados pela Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

A maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogêneses, indicada pela Reanálise ocorre no inverno (verão) e tal aspecto é corretamente representado pelo modelo Eta_HadCM3. Os resultados a partir da Reanálise indicam que a frequência de ocorrência da ciclogênese aumenta em geral com aumento da latitude, porém o modelo Eta não consegue perceber o maior número de ciclones nas altas latitudes. No modelo Eta-HadCM3 ocorre um máximo de ciclogênese entre 35-30°S e um decaimento em direção as bordas sul e norte. Este problema pode estar relacionado com o fato do modelo ter sido configurado apenas até a latitude 50,2°S. Por outro lado o model Eta_HadCM3 superestima o número de ciclogêneses nas baixas latitudes e esta superestimativa é mais pronunciada no verão e outono do que no inverno e primavera.

Com relação a direção das trajetórias dos ciclones, tanto o modelo Eta quanto os dados da Reanálise indicaram que a direção predominante para todas as estações, considerando-se todas as faixas de latitude, é de leste (E), ou seja, os ciclones dirigem-se para leste, e em segundo lugar para sudeste (SE). Entre 20 e 35°S os ciclones em geral movem-se para SE e nas latitudes mais altas (entre 35 e 50°S) a direção predominante é E. Nota-se baixíssima frequência de ocorrência de ciclones dirigindo-se para noroeste (NW), norte (N), oeste (W) e sudoeste (SW).

A análise da quantidade de ciclogêneses ao longo dos anos analisados (1961 a 1990) indica tendência de aumento entre 20 e 45°S e nas latitudes mais altas (entre 45 e 50°S) há uma tendência de redução da ciclogênese. No entanto o modelo Eta-HadCM3 não conseguiu representar bem a tendência de aumento da ciclogênese nas baixas latitudes.

Sobre o clima futuro, nota-se que há uma tendência para a trajetória predominante dos ciclones continuar sendo para leste entre 35-50°S e para sudeste entre 20-35°S.

Com relação à tendência nas frequências de ocorrências das ciclogêneses do modelo Eta_HadCM3 para o futuro nota-se a mesma tendência observada no clima presente, de redução tanto para baixas quanto para altas latitudes. Contudo, como o modelo não está captando corretamente a tendência de aumento da ciclogênese nas altas latitudes, tal resultado para o futuro deve ser utilizado com cautela.

Nas etapas futuras do trabalho serão utilizadas as outras três integrações do modelo Eta-HadCM3 a fim de incluir a informação sobre a incerteza nos resultados encontrados neste relatório obtidos apenas com a rodada controle. Além disso, será investigada a tendência de aumento/redução na intensidade dos ciclones no clima presente e futuro.

PUBLICAÇÃO EM CONFERÊNCIA

Foi apresentado trabalho na IV Conferência Regional de Mudanças Climáticas Globais:

- CAMPANI, A. M, DEREZYNSKI, C.P., CHOU S.C. 2011: Impacto das mudanças climáticas sobre o comportamento dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Anais da IV Conferência Regional Sobre Mudanças Globais. São Paulo, SP. Abril 2011.

BIBLIOGRAFIA

- ARAKAWA, A. LAMB, V. R., 1977: Computational design of the basic dynamical process of the UCLA generation circulation model. *Methods in Computational Physics*, v. 17, p. 173-265.
- BLACK, T. L., 1994: The new NMC mesoscale Eta model. Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 265-278.
- CAMPANI, A. M. ET AL. 2011: Impacto das mudanças climáticas sobre comportamento dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Resumo apresentado nos Anais da IV Conferência Regional Sobre Mudanças Globais. São Paulo.
- CHOU, S. C., 1986: Modelo regional Eta. *Climanálise Especial Edição Comemorativa de 10 anos*. São José dos Campos.
- CHOU, S. C. ET AL. 2011: Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8.
- GRELL, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121, 764-787.
- GUSTAFSSON, M.E.R., 1997: Raised levels of marine aerosol deposition owing to increased storm frequency: A cause of forest decline in southern Sweden? *Agric. For. Meteorol.*, 84, 169-177.
- IPCC, 2007: CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GADIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JONAWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWISK, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLD, R.;

JENNE, R.; JOSEPH, D., 1996: The NCEP/NCAR 40- Year Reanalysis Project. Bulletin of the Meteorological Society, v.77, p. 437-471.

KANAMITSU, M., J.C. ALPERT, K. A. CAMPANA, P. M. CAPLAN, D. G. DEAVEN, M. IREDELL, B. KATZ, H. L. PAN, J. SELA E G.H. WHITE, 1991: Recent changes implemented into the global forecast system at NCEP. Weather and Forecasting, 6, 1-12.

LAMBERT, S. J., 1996: Intense extratropical Northern Hemisphere winter cyclone events: 1989-1991. Journal of Geophysical Research, 101, 21319-21325.

MCCABE, G. J., M. P. CLARK, M. C. SERREZE, 2001: Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity. J. Clim., 14, 2763-2768.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G., 1988: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. Monthly Weather Review, v. 116, p. 1493-1518.

WANG, X. L., V. R. SWAIL, F. W. ZWIERS, 2006: Climatology and changes of extratropical storm tracks and cyclone activity: Comparison of ERA-40 with NCEP/NCAR Reanalysis for 1958-2001. J. Clim., 19, 3145-3166.