

Figura 2. Relação entre as anomalias da temperatura superficial do mar (TSM) nos oceanos Atlântico (A) e Pacífico (B) com atividades vulcânicas (C) medidas através da Profundidade Óptica de Aerossóis na Estratosfera (POAE). Fonte: adaptado de Santer et al. (2006).

Relação entre mudança do uso da terra, oceanos e o nível do Rio Paraguai em Ladário

A série histórica do Rio Paraguai em Ladário (MS) vem sendo construída pela Marinha Brasileira desde 1900. Representa hoje o melhor e mais completo registro histórico das flutuações hidrológicas no Pantanal (Galdino e Clarke, 1995, 1997). A oscilação interanual do nível do Rio Paraguai é uma resposta integrada da quantidade de água precipitada na Bacia do Alto Paraguai (Bolívia e Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), da quantidade de água evapotranspirada e da quantidade de água drenada para aquíferos subterrâneos. Portanto, mudanças no regime de chuva e mudanças estruturais na Bacia do Alto Paraguai serão necessariamente refletidas nas oscilações interanuais registradas na série temporal. Entre as mudanças estruturais pode se destacar a mudança do uso da terra na parte alta da Bacia do Rio Taquari (Galdino et al., 2005; Padovani et al., 2005). O crescente aporte de sedimentos (Godoy et al., 2005) levou ao assoreamento do leito do Rio Taquari dentro do Pantanal, com o consequente

rompimento do seu dique aluvial na região do Caronal (Assine, 2005). Assim, boa parte do volume de água do rio tem sido espalhada em vasta área da região do Paiaguás (margem direita), a montante de Ladário (Figura 3). Esse processo pode eventualmente contribuir para a manutenção de níveis máximos elevados no Rio Paraguai em Ladário, uma vez que, até a década de 1980, quase toda água do Rio Taquari era direcionada para a região a jusante de Ladário. Atualmente, um volume de água desconhecido do Rio Taquari está sendo direcionado para o Rio Paraguai à montante de Corumbá, muito possivelmente contribuindo com as mudanças nos padrões hidrológicos medidos pela régua de nível em Ladário. Até 1979 os menores valores observados de nível máximo do rio, isto é, anos mais secos, variavam entre 1,1 e 2,7 metros, enquanto que de 1980 em diante vem variando entre 3,2 e 4,3 metros.

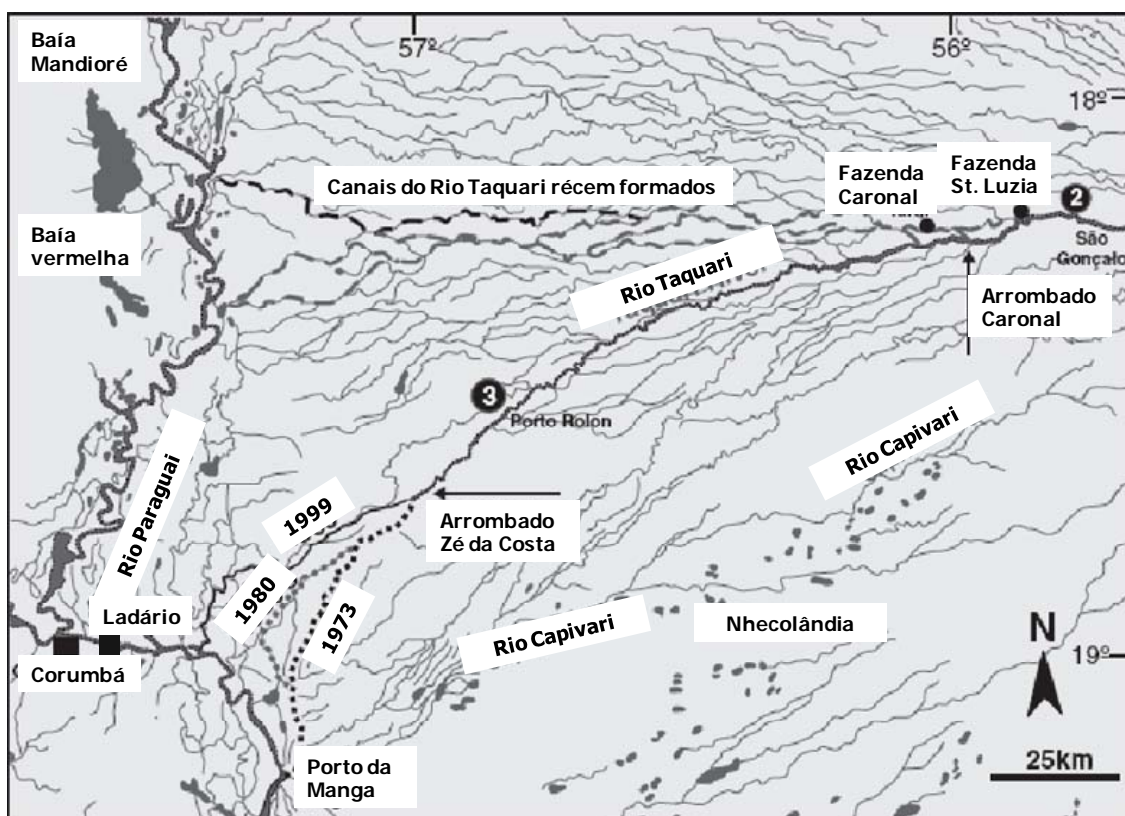


Figura 3. Mudanças do canal principal na planície aluvial do Rio Taquari desde 1973 por causa do aumento da erosão no Planalto (intensificação do uso inadequado da terra) e das chuvas após o longo período seco (1964-1973). Fonte: adaptado de Assine (2005).

A Figura 4 apresenta as variações interanuais do nível máximo do Rio Paraguai em Ladário. Nota-se dois grandes períodos, um de grandes oscilações cheia/seca (1900-1973) e outro de pequenas oscilações (1974-2008). Percebe-se, ainda, um período contínuo de 10 anos de seca (1964-1973). A medida do grau de oscilação pelo coeficiente de variação ($CV \% = \text{desvio padrão} \times \text{média}^{-1} \times 100$) mostra que entre 1974 e 2008 as oscilações caíram mais que a metade em relação a 1900-1973 (Figura 4).

Além das mudanças estruturais do Taquari, a elevação do nível de água em Ladário após 1973 pode ter relação também com o aumento das chuvas na região (Galdino et al., 1997; Soriano et al., 2001; Galdino et al., 2002; Galdino et al., 2005). As chuvas continentais na América do Sul derivam do transporte troposférico (*tropos* =

movimento) de vapor d'água originado no Oceano Atlântico e do processo de evapotranspiração continental, particularmente da Floresta Tropical Amazônica (Salati, 1987; Grootes et al., 1989; Victoria et al., 1991; Vera et al. 2006).

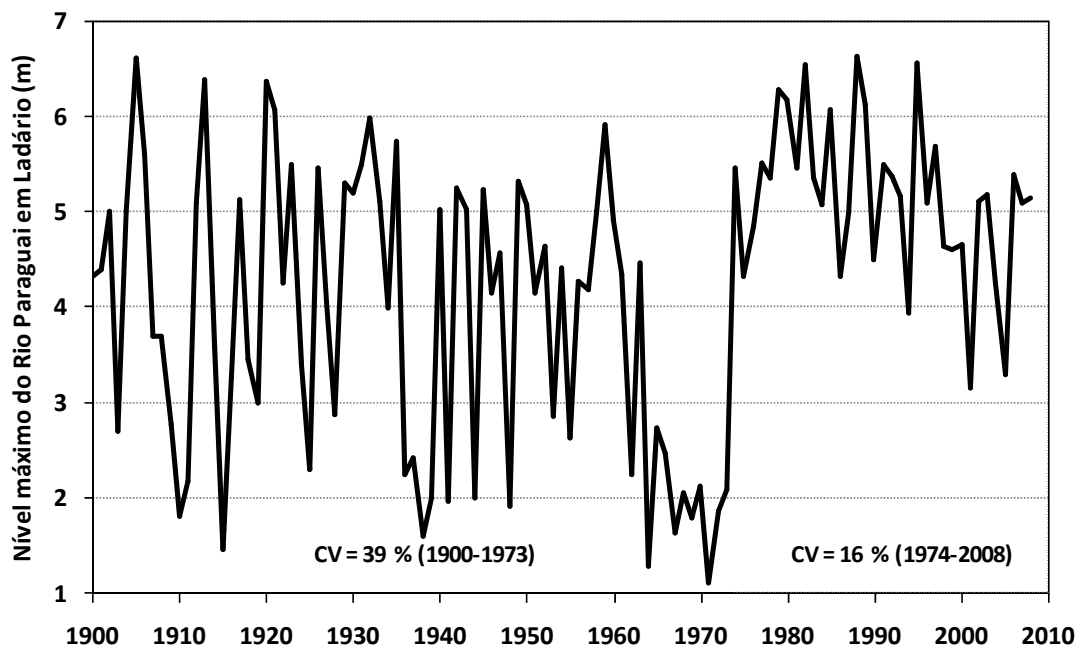


Figura 4. Variação interanual do nível máximo do Rio Paraguai em Ladário (MS) entre 1900 e 2008. Em branco (1900-1973) e em cinza (1974-2008) são apresentados dois períodos distintos com seus respectivos coeficientes de variação (CV). Em azul claro destaca-se o prolongado período seco entre 1964 e 1973.

Por outro lado, é provável que a variabilidade do máximo anual do nível do Rio Paraguai seja modulada, em grande parte, pela variação da temperatura oceânica global, que por sua vez é modulada pela energia do sol e pelo balanço entre GEE antrópicos e aerossóis originados de eventos extremos de erupção vulcânica (Levitus et al., 2000, 2005; Church et al., 2005; Santer et al., 2006; Domingues et al., 2008). Entretanto, os mecanismos geofísicos que explicam a relação entre o nível máximo do Rio Paraguai e a temperatura oceânica global não são muito evidentes. De todo modo, a maior parte da chuva no Pantanal origina-se da evaporação do Oceano Atlântico Equatorial e da evapotranspiração da Floresta Tropical Amazônica. Um mecanismo plausível seria, portanto, o aumento do transporte de umidade dessas regiões para o centro-sul do continente sul-americano. Tal transporte, condicionado em parte pela barreira dos Andes (chuva de monções da América do Sul), tem se intensificado em função das mudanças na interação oceano-atmosfera (Marengo et al., 2004) e tem resultado no aumento da precipitação e da vazão de rios no centro-sul do continente sul-americano desde meados da década de 1970 (Dai et al., 2002; Liebmann et al., 2004; Vera et al., 2006). Simulações calibradas para o século 20 indicam que na Bacia do Rio Paraguai pode haver aumento de 5 a 10 % na vazão de rios entre 2041-2060 (Milly et al., 2005).

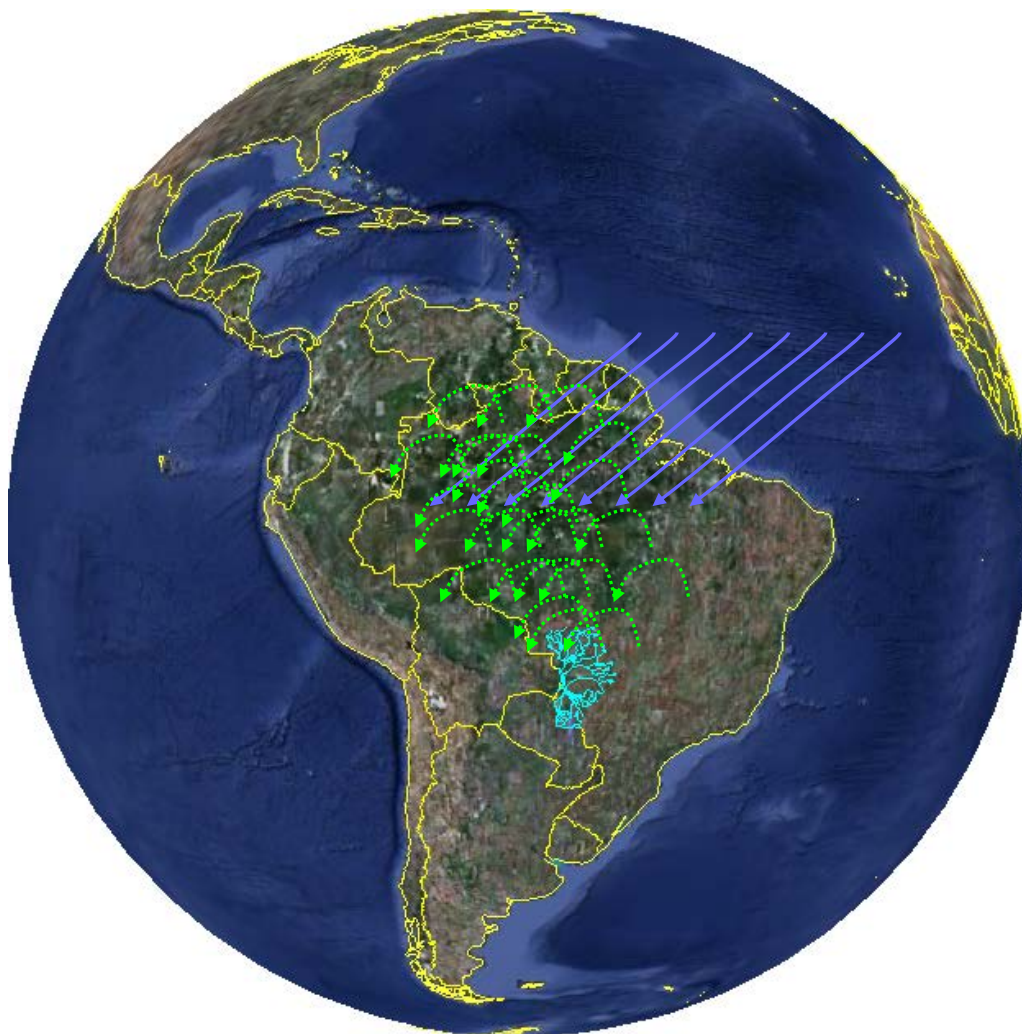


Figura 5. Representação esquemática dos fluxos (alísios) de umidade do Oceano Atlântico Equatorial (setas em azul escuro), da recirculação (evapotranspiração/chuva) de umidade na Floresta Tropical Amazônica e do transporte latitudinal em direção ao sul do continente latino-americano (ciclos tracejados em verde). A rede hidrográfica do complexo do Pantanal na Bacia do Alto Paraguai é representada em azul claro. Fonte: imagem adaptada do *Google Earth*, baseado em Grootes et al. (1989).

A seca de 1964 a 1973 pode também ter relação com a erupção extrema do vulcão Agung na Indonésia (Bali), em fevereiro de 1963. Tal hipótese pode ser verificada traçando-se um paralelo entre as anomalias térmicas do oceano global e a TSM com a anomalia do nível do Rio Paraguai e eventos vulcânicos extremos (Figura 6). As anomalias de 1950 a 2003 foram filtradas por uma média móvel de 3 anos e são referenciadas a 1961. A concordância entre a anomalia térmica do oceano global e a anomalia do nível máximo do Rio Paraguai é evidente em todo o período analisado, inclusive no período de seca. Após as erupções dos vulcões Chichon (México) e Pinatubo (Filipinas), a anomalia do nível do Rio Paraguai descolou-se da anomalia térmica do oceano, mas manteve padrões oscilatórios compatíveis. A partir do ano 2000, há uma tendência de aumento tanto da temperatura (calor) dos oceanos, como do nível máximo do Rio Paraguai em Ladário (Figura 6).

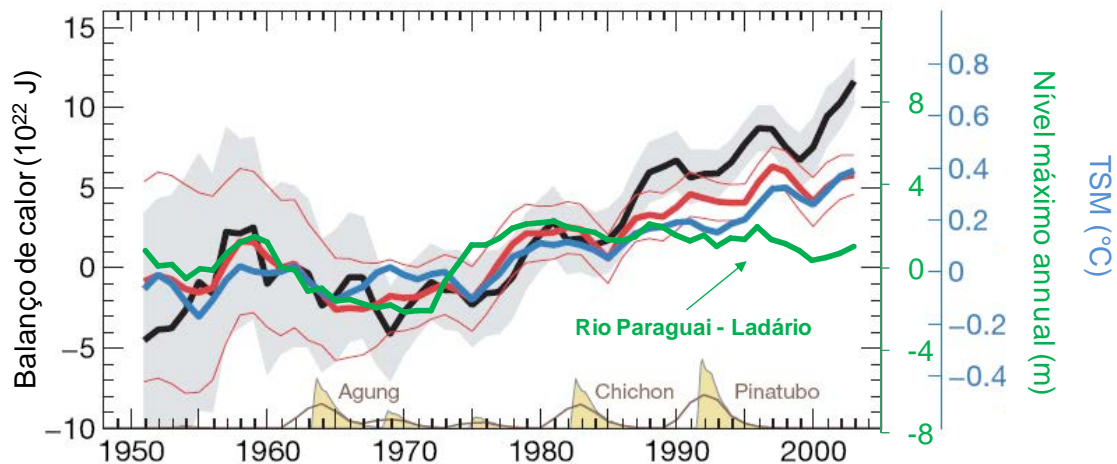


Figura 6. Anomalias da quantidade média de calor nos oceanos nas profundidades de 700 (linha preta, \pm desvio padrão em cinza) e 100 (linha vermelha, \pm desvio padrão em linhas vermelhas finas) metros, comparadas às anomalias da temperatura superficial do mar (em azul) e do nível máximo do Rio Paraguai em Ladário (em verde). Todas as séries compreendem o período 1951-2003 (média móvel de três anos) relativo a 1961. As curvas preenchidas em amarelo denotam a Profundidade Óptica de Aerossóis na Estratosfera (POAE) em unidade arbitrária. Fonte: adaptado de Domingues et al. (2008).

Nota-se alguma correspondência entre as emissões de aerossóis na estratosfera (POAE) com períodos de diminuição termal dos mares e de redução do nível máximo do Rio Paraguai. O efeito de emissões extremas de aerossóis foi particularmente evidente nas décadas de 1960 e 1970, quando a quantidade de GEE na atmosfera era bem inferior aos níveis atuais. A quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera é atualmente bem mais elevada, e pode atenuar a influência de eventos extremos vulcânicos sobre a temperatura do mar e, conseqüentemente, sobre o nível máximo do Rio Paraguai. Os efeitos destes (e outros) fatores de dinâmica climática precisam ser elucidados, especialmente no que tange à biota e à sócio-economia do Pantanal.

Cenários hidroclimáticos e desenvolvimento sustentável no Pantanal

Pela complexidade do clima planetário, é improvável o desenvolvimento de um modelo seguramente capaz de prever o estado futuro de médio prazo do Pantanal face à mudança do clima. Entretanto, existem forçantes de larga escala (baixa frequência) que guiam o estado climático futuro para cenários plausíveis e tangíveis. No presente estudo consideram-se como principais forçantes os GEE antrópicos, os aerossóis vulcânicos e as mudanças no uso da terra. Nesse sentido, é factível o contínuo aquecimento do planeta, tendo em vista as mínimas ações desempenhadas por nações em todo o mundo para a redução efetiva das emissões ou para a remoção de GEE da atmosfera. Considerem-se, ainda, os efeitos de longo prazo dos GEE já presentes na atmosfera. Portanto, se estiverem corretas as premissas de que i) oceanos mais quentes (ou frios) refletem em níveis máximos elevados (ou reduzidos) no Rio Paraguai, e que ii) emissões estratosféricas de aerossóis vulcânicos reduzem a temperatura dos oceanos, é muito provável que os níveis máximos de água em Ladário se situem em média entre 4 e 6 metros no médio prazo. Níveis máximos abaixo de 4 metros podem eventualmente

ocorrer na medida em que emissões massivas de aerossóis vulcânicos (ou outros fenômenos) superem o efeito de aquecimento promovido pelos GEE presentes na atmosfera, resfriando os oceanos e diminuindo o transporte de umidade do norte do continente sul-americano para a região da Bacia do Alto Paraguai. Essa prospecção de cenários tangíveis é representada por um modelo simplificado na Figura 7.

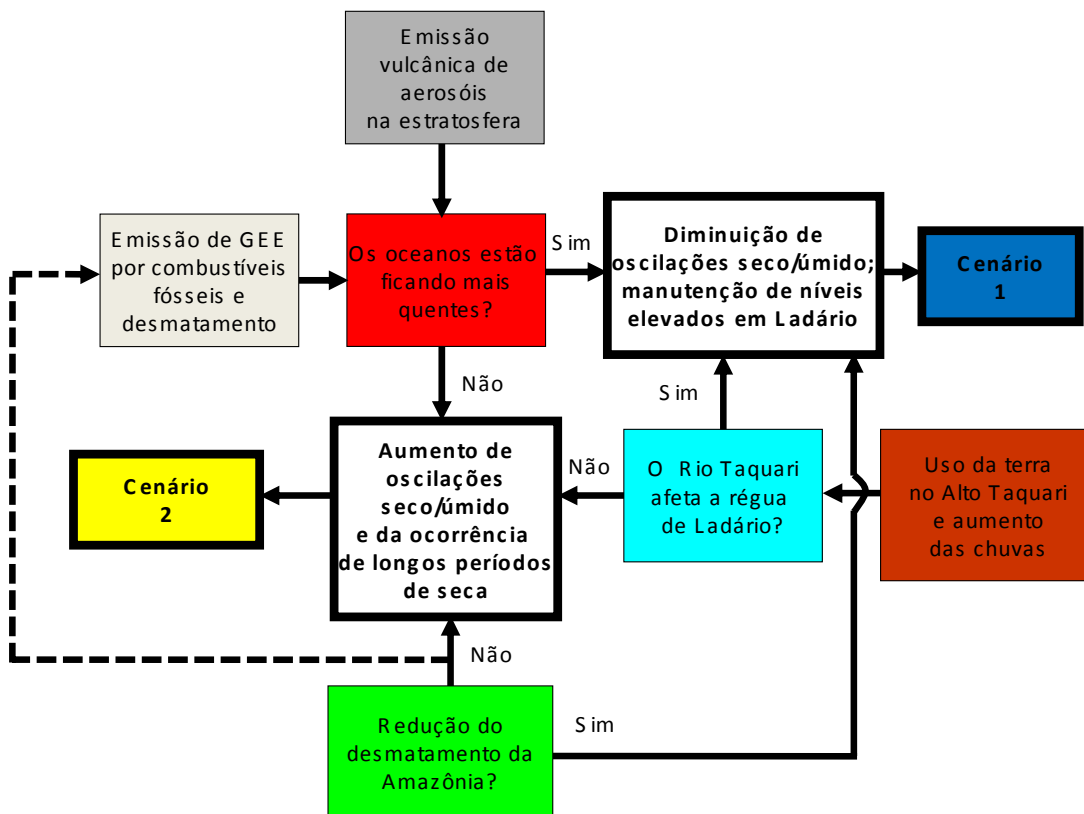


Figura 7. Prospecção de cenários tangíveis com relação ao nível máximo do Rio Paraguai em função de forçantes globais e regionais.

A tendência atual é direcionada ao cenário 1 (em azul na Figura 7), considerando-se, também, os efeitos da mudança na posição de descarga de água do Rio Taquari. O Rio Taquari desemboca regularmente no Rio Paraguai, a jusante de Ladário, mas os arrombados podem mudar definitivamente o curso da calha principal para mais ao norte, na altura das baías Mandioré e Vermelha, a montante da régua de Ladário (Assine, 2005). Portanto, ambos os cenários, global e regional, convergem para o cenário 1 no médio prazo. Se considerarmos um cenário “*business as usual*” (Nepstad et al., 2002), sem controle das taxas de desmatamento (e savanização) da Floresta Tropical Amazônia, é possível que o Pantanal seja pouco a pouco direcionado ao cenário 2 pela perda de fonte importante de umidade, apesar do aporte de GEE na atmosfera (linha tracejada na Figura 7).

Do ponto de vista sócio-econômico, o Pantanal tem passado por transformações e adaptações em função da variabilidade interanual e interdécadas do pulso de inundação. Em épocas mais secas, como entre 1964 e 1973, houve o predomínio da atividade pecuária e em períodos mais úmidos foram também verificadas atividades como a pesca e o turismo (Resende e Galdino, 2001). Na região de Corumbá há ainda a criação e

perspectiva de expansão do pólo Mínero-Siderúrgico, que demandará grandes quantidades de carvão (mineral e vegetal) na produção de ferro gusa e aço.

O Brasil, recuperado da instabilidade econômica inflacionária, passa por uma fase de crescimento econômico, embora ainda haja grandes incertezas e desafios em diferentes esferas que assegurem a sustentabilidade em médio e longo prazo. Dentre as ameaças na esfera econômica pode-se destacar a atual crise dos mercados internacionais. As questões relacionadas à conservação ambiental e uso racional dos recursos naturais ganham extrema relevância em função da mudança do clima. Portanto, é possível traçar um cenário de oportunidades para o desenvolvimento sócio-econômico no Brasil e no Pantanal (Figura 7), tendo em vista o crescimento de economias emergentes, a tendência de auto-regulação (homeostase) da economia mundial através da crescente interdependência econômica dos países e o aumento da demanda por produtos com “valor sócio-ambiental” e energias “verdes”, que promovam a homeostase dos ecossistemas e a manutenção dos serviços ambientais. Atividades econômicas evidentes nesse cenário são: 1) o turismo em suas diversas modalidades (contemplativo, de aventura, entre outros), 2) a pesca esportiva e artesanal, 3) a produção consorciada de carne e pescado na planície inundável, e 3) o aproveitamento racional da biodiversidade em seus mais variados produtos, muitos ainda não revelados, como, por exemplo, fármacos e essências nativas. Outras atividades econômicas promissoras, emergentes da mudança do clima e das crises do petróleo e dos alimentos, são a manutenção da produção de água (crise iminente) e a produção de energia, materiais e fertilizantes derivados de biomassa.

Nos corpos de água da planície de inundação a produção fotossintética é elevada em função da disponibilidade solar e hídrica. Contudo, devido ao pulso de inundação, apenas espécies vegetais adaptadas conseguem colonizar esses ambientes. Tais plantas aquáticas, cujas espécies de maior relevância e de grande potencial de uso sustentável pertencem ao gênero *Eichhornia spp* (camalotes), caracterizam-se pelo rápido ciclo de vida anual, isto é, pela velocidade com que se reproduzem. A produtividade varia de espécie para espécie e em função do ciclo hidrológico (Paula, 1986), mas, em média, pode-se assumir um valor conservativo de 20 ton.ha⁻¹.ano⁻¹. A produção anual dessas plantas, em particular dos camalotes, é tão intensa, que parte significativa da biomassa é carregada pelo Rio Paraguai. Há pouco conhecimento sobre a dinâmica de escoamento e a ciclagem dessas plantas. Uma avaliação preliminar no Rio Paraguai em Corumbá indicou uma exportação de biomassa (seca) de aproximadamente 1,7 milhões de toneladas no ano de 1992 (Ramires, 1993), quando o nível máximo do Rio Paraguai em Ladário atingiu 5,38 m. Essa quantidade representaria cerca de 35% do total de biomassa seca produzida por plantas aquáticas flutuantes, se assumirmos uma área de produção de 240 mil hectares ou 30% da área total do Pantanal do Paraguai em território brasileiro. Tal estimativa pode ser conservativa se considerados ainda os aportes de biomassa vegetal aquática das bacias dos rios Miranda, Aquidauana, Negro, Abobral e Nabileque. No entanto, é importante salientar que estes números são preliminares e há deficiência de conhecimento sobre as funções e impactos ecológicos dessa biomassa exportada nos ecossistemas a jusante. A biomassa vegetal aquática exportada apresenta diversos potenciais econômicos de médio prazo, como a produção de fibras, energia (bio-óleo, biocarvão, etanol celulósico, gás de síntese, hidrocarbonetos renováveis) e fertilizantes orgânicos. Um exemplo bastante atual é a produção de bio-óleo e biocarvão por pirólise. O bio-óleo pode ser convertido (gaseificação) a gás de síntese (CO + H₂), o qual pode ser convertido em

hidrocarbonetos diversos, entre eles o óleo diesel. O biocarvão (finos de carvão) pode ser utilizado de diversas maneiras, desde a substituição de carvão (vegetal e mineral) na siderurgia à produção de fertilizantes mais eficientes e sequestro de carbono (Lehmann, 2007).

O uso da terra no planalto da Bacia do Alto Paraguai também interfere profundamente no funcionamento ecológico da planície pantaneira (Abdon et al., 2005). Os impactos mais evidentes da supressão da vegetação nativa e substituição por culturas agrícolas, especialmente pastagens com baixo nível de manejo, são relacionados à ruptura do equilíbrio dinâmico dos solos, à instalação de processos erosivos e o conseqüente assoreamento de cursos de água que abastecem boa parte do Pantanal. Por este motivo, sistemas de cultivo e manejo que aumentem a resiliência dos sistemas agrícolas devem ser adaptados às condições regionais e monitorados a fim de avaliar a sua eficiência conservativa. Neste sentido, a produção de biomassa vegetal terrestre de espécies nativas que investem energia no acúmulo de biomassa e na produção de frutos, apresenta-se como potencial de uso sustentável para diversos fins, entre eles a manutenção de serviços ambientais (absorção de carbono atmosférico, produção de água, controle de erosão, manutenção da biodiversidade, etc.). Em termos econômicos, a necessidade de reabilitação de áreas agrícolas em diferentes graus de perturbação vem ao encontro da crescente demanda do mercado nacional e internacional por produtos do setor florestal, tais como madeira para uso na construção civil, indústria moveleira, para produção de energia, fibras, frutos, extração de gomas, óleos, essências e demais subprodutos da silvicultura (Balzon et al., 2004). Considerando que o valor econômico dos bens e serviços ambientais oferecidos à sociedade pelo bioma Pantanal é de pelo menos US\$ 8.130 ha⁻¹ano⁻¹ (dólares de 2007) (Moraes, 2008), a manutenção desses serviços, através da recuperação de áreas agrícolas, do uso eficiente da água e da biomassa vegetal, entre outros, se reveste de grande significado.

Atividades econômicas vinculadas ao extrativismo e/ou produção de plantas aquáticas e terrestres podem, desta forma, possibilitar benefícios sócio-ambientais tais como a diversificação da renda, a redução da pressão sobre matas nativas e a manutenção dos serviços ambientais (seqüestro de carbono, redução da emissão de GEE, etc.).

CONCLUSIONES

A Hidrologia no Pantanal parece relacionar-se à temperatura dos oceanos, que por sua vez aquecem ou esfriam em função do balanço radiativo promovido pelas quantidades de GEE e aerossóis vulcânicos presentes na atmosfera. A seca prolongada (menos chuva) entre 1964 e 1973 pode ter sido disparada pela liberação de grandes quantidades de aerossóis do vulcão Agung em 1963 nas Filipinas. Por outro lado, o aumento das chuvas a partir de meados da década de 70, possivelmente em função da emissão antrópica de GEE, e a coincidente intensificação do uso do solo no planalto, vem atuando sinergicamente na mudança dos padrões de escoamento superficial no leque aluvial do Rio Taquari e no Rio Paraguai. Até 1979, os níveis máximos do Rio Paraguai em Ladário em anos mais secos variaram entre 1,1 e 2,7 metros, enquanto que desde a década de 80 vem variando entre 3,2 e 4,3 metros. Em linhas gerais, a tendência verificada no médio prazo aponta para a manutenção de níveis máximos atuais no Rio Paraguai em Ladário, isto é, níveis máximos anuais superiores a 3 metros, considerando-se que o desmatamento da Floresta Tropical Amazônia seja controlado. Nessa perspectiva, e diante dos cenários nacional e internacional de médio prazo, o Pantanal apresenta oportunidades tais quais o uso racional de biomassa vegetal aquática

e terrestre para diversas finalidades. A priori, é necessário conhecer a capacidade de suporte ambiental e a dependência de demais organismos sobre tal biomassa, para que seja utilizado somente o “excedente ecossistêmico” visando sempre produtos competitivos (menor uso de insumos fósseis e maior responsabilidade sócio-ambiental) a fim de criar mecanismos de desenvolvimento sustentável dos países que partilham o Pantanal.

BIBLIOGRAFIA

- ABDON, M.M.; SOUZA M.P. y SILVA J.S.V. 2005. Identificação de impactos ambientais no meio físico subsidiada por banco de dados georreferenciados. *Anais. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia*, 16-21 abril, INPE, p. 2793-2798.
- ALEXEEV, V.A. 2007. Some features of climate change on Earth and its possible relation to solar-activity variations. *J. Solar System Res.*, 41:527-534.
- ASSINE, M.L. 2005. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal Wetland, Brazil. *Geomorphology*, 70: 357-378.
- BALZON, D.R.; SILVA, J.C.G.L. y SANTOS, A.J. 2004. Aspectos mercadológicos de produtos florestais não madeireiros - Análise retrospectiva. *Floresta*, 34: 363-371.
- CAZENAVE, A. 2005. Global change: sea level and volcanoes. *Nature*, 438: 35-36.
- CHURCH, J.A.; WHITE, N.J. y ARBLASTER, J.M. 2005. Significant decadal-scale impact of volcanic eruptions on sea level and ocean heat content. *Nature*, 438: 74-77.
- DAI, A.; TRENBERTH, K.E. y QIAN, T. 2002. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorology*, 5: 1117-1130.
- DOMINGUES, C.M.; CHURCH, J.A.; WHITE, N.J.; GLECKLER, P.J.; WIJFFELS, S.E.; BARKER, P.M. y DUNN, J.R. 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 453: 1090-1093.
- GALDINO, S. y CLARKE, R.T. 1995. Levantamento e estatística descritiva dos níveis hidrométricos do Rio Paraguai em Ladário, MS - Pantanal - Período 1900/1994. Corumbá: Embrapa-CPAP, 71 pp. (Embrapa-CPAP. Documentos, 14).
- GALDINO, S. y CLARKE, R.T. 1997. Probabilidade de ocorrência de cheia no rio Paraguai, em Ladário, MS - Pantanal. Corumbá: Embrapa-CPAP, 58 pp. (Embrapa-CPAP. Circular Técnica, 23).
- GALDINO, S.; CLARKE, R.T.; PADOVANI, C.R.; SORIANO, B.M.A. y VIEIRA, L.M. 1997. Evolução do regime hidrológico na planície do baixo curso do Rio Taquari - Pantanal. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 7. Vitória. *Anais. Vitória: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*: 383-390.
- GALDINO, S.; PADOVANI, C.R.; SORIANO B.M.A. y VIEIRA L.M. 2002. Mudanças do regime hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Taquari – Pantanal. Corumbá: Embrapa-CPAP, 24pp. (Embrapa-CPAP. Boletim de Pesquisa, 26).
- GALDINO, S.; PADOVANI, C.R.; SORIANO, B.M.A y VIEIRA, L.M. 2005. Alterações no regime hidrológico da planície do Baixo Taquari. In: S GALDINO; LM VIERA; LA PELLEGRIN (Org.). Impactos ambientais e socioeconômicos nas Bacia do Rio Taquari - Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal: 175-181.

- GODOY, J.M.; PADOVANI, C.R.; VIEIRA, L.M. y GALDINO, S. 2005. Geocronologia do assoreamento e níveis de mercúrio em lagos marginais do Rio Taquari no Pantanal. In: S GALDINO; LM VIEIRA; LA PELLEGRIN (Org.). Impactos ambientais e socioeconômicos na Bacia do Rio Taquari - Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal: 163-173.
- GROOTES P.M.; STUIVER, M.; THOMPSON, L.G. y MOSLEY-THOMPSON, E. 1989. Oxygen isotope changes in tropical ice, Quelccaya, Peru. *J. Geophys. Res.*, 94: 1187-1194.
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers. In: S SOLOMON; D QIN; M MANNING; Z CHEN; M MARQUIS; KB AVERYT; M TIGNOR; HL MILLER (eds.). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- LEHMANN, J. 2007. A handful of carbon. *Nature*, 447: 143-144.
- LEVITUS, S.; ANTONOV, J.I.; BOYER, T.P. y STEPHENS, C. 2000. Warming of the world ocean. *Science*, 287: 2225-2229.
- LEVITUS, S.; ANTONOV, J.I. y BOYER, T. 2005. Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophys. Res. Letters*, 32: 2604, doi:1029:2004GL021791
- LIEBMANN, B.; VERA, C.S.; CARVALHO, L.M.V.; CAMILLONI, I.A.; HOERLING, M.P.; ALLURED, D.; BARROS, V.R.; BAEZ, J. y BIDEGAIN, M. 2004. An observed trend in central South American precipitation. *J. Clim.*, 17: 4357-4367.
- NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; ALENCAR, A.; BARROS, A.C.; CARVALHO, G.; SANTILLI, M. y VERA-DIAZ, M.C. 2002. Frontier governance in Amazonia. *Science*, 295: 629-631.
- MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; VERA, C.; NOGUÉS-PAEGLE, J. y BAEZ, J. 2004. Low frequency variability of the SALLJ. *CLIVAR Exchanges*, 9: 26-27.
- MILLY, P.C.D.; DUNNE, K.A. y VECCHIA, A.V.. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438: 347-350.
- MORAES, A.S. 2008. Pecuária e conservação do Pantanal: análise econômica de alternativas sustentáveis – o dilema entre benefícios privados e sociais. 2008. 265 p. Tese (Doutorado em Economia). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- PADOVANI, C.R.; GALDINO, S. y VIEIRA, L.M.. 2005. Dinâmica hidrológica e de sedimentação do Rio Taquari no Pantanal. In: S GALDINO; LM VIEIRA; LA PELLEGRIN (Org.). Impactos ambientais e socioeconômicos na Bacia do Rio Taquari - Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal: 153-162.
- PAULA, J.E. 1986. Sugestões para o equilíbrio entre a exploração de recursos renováveis do Pantanal e preservação dos respectivos ecossistemas. *Ciência e Cultura*, 38: 817-828.
- RAMIRES, J.R.S. 1993. Transporte de bancos de macrófitas flutuantes em função do nível hidrométrico no rio Paraguai, Pantanal-MS. 31pp Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Corumbá.
- RESENDE, E.K. y GALDINO, S. 2001. O Pantanal está secando? Corumbá: Embrapa-CPAP: 2pp. (Artigo de Divulgação na Mídia, 06).

- SALATI, E. 1987. The forest and the hydrological cycle. In: RE Dickinson (ed.). The Geophisiology of Amazonia: vegetation and climate interactions. New York, John Wiley & Sons, 1987. 526pp.
- SANTER, B.D.; WIGLEY, T.M.L; GLECKLER, P.J.; BONFILS, C.; WEHNER, M.F.; ACHUTARAO, K.; BARNETT, T.P.; BOYLE, J.S.; BRÜGGEMANN, W.; FIORINO, M.; GILLET, N.; HANSEN, J.E.; JONES, P.D.; KLEIN, S.A.; MEEHL, G.A.; RAPER, S.C.B.; REYNOLDS, R.W.; TAYLOR, K.E.; WASHINGTON, W.M. 2006. Forced and unforced ocean temperature changes in Atlantic and Pacific tropical cyclogenesis regions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103:13905-13910.
- SOLANKI, S.K. y KRIVOVA, N.A. 20.3. Can solar variability explain global warming since 1970? *J. Geophys. Res.*, 108:1- 1200.
- SORIANO, B.M.A; CLARKE, R.T. y GALDINO, S. 2001. Evolução da erosividade das chuvas na bacia do alto Taquari. Corumbá: Embrapa Pantanal, 18pp. (Embrapa Pantanal. Boletim de Pesquisa, 25).
- VERA, C.; HIGGINS W.; AMADOR, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C.; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P.L. y ZHANG, C. 2006. Toward a unified view of the American Monsoon Systems. *J. Clim.*,19:4977-5000.
- VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A.; MORTATTI, J. y RICHEY, J. 1991. Mechanisms of water recycling in the Amazon basin: isotopic insights. *Ambio*, 20: 384-387.

CAMPOS DIARIOS DE ALTURA GEOPOTENCIAL DE 500 hPa EN LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL

Daily fields of 500 hPa geopotential height in the Global Circulation Models

Maria Laura Bettolli*^{1,2} y Olga Clorinda Penalba ¹

¹Laboratorio de Extremos Climáticos, Departamento de Ciencias de la
Atmósfera y los Océanos. FCEN. UBA, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas,
CONICET, Argentina. Ciudad Universitaria, Pabellón II, Piso 2
bettolli@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

En los estudios de cambio climático, los modelos de circulación global (MCGs) juegan un rol fundamental dado que proporcionan una representación del sistema climático, describiendo los principales procesos dinámicos y físicos, sus interacciones y retroalimentaciones. Los MCGs muestran una alta capacidad para simular características de la climatología de la circulación en la región de Sudamérica en escalas de tiempo que van desde la mensual a la decadal. Sin embargo, su capacidad para representar patrones de tiempo en términos de la climatología sinóptica ha sido poco explorada aún. En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de los modelos de circulación global en reproducir la circulación diaria en el sur de Sudamérica representada, en este caso, por los campos de altura geopotencial de 500 hPa. Se utilizan campos diarios de dicha variable de los Reanálisis 2 NCEP provenientes del NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center como representativos de la circulación observada. Conjuntamente se utilizan campos diarios de la misma variable de las salidas de los MCGs para el siglo XX (escenario 20C3M), generadas para el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC-AR4, por sus siglas en inglés).

La comparación se realiza en base a los patrones obtenidos del análisis de componentes principales. Las características más importantes de los patrones espaciales son reproducidas por los MCGs, con varianzas explicadas de similar magnitud a las observadas. La representatividad de los mismos depende del modelo analizado. Los modelos tienden a representar una menor presencia del campo medio dando lugar a una mayor presencia de perturbaciones, especialmente durante el invierno.

Palabras clave: altura geopotencial, modelos de circulación global, sur de Sudamérica.

SUMMARY

Global atmospheric models (GCMs) play a key role in climate change studies due to they properly represent the climate system by describing the main dynamic and physical processes, their interaction and feedbacks. The GCMs accurately describe climatic features in South America at monthly to decadal scales. However, their capacity to represent synoptic weather patterns has been little explored yet. In this context, the capability of the GCMs in reproducing daily atmospheric circulation in the south of

South America for the period 1979-1999 was explored in this study. Daily fields of 500 hPa geopotential heights from NCEP reanalyses 2 dataset were used as representative of observed circulation. Model outputs from the climate of the 20th century (20C3M) were also used. The set of climate simulations was generated for the IPCC Fourth Assessment Report (AR4).

The comparison between reanalyses and GCMs was performed by means of the principal component analysis. Results show that the main characteristics of synoptic patterns are reproduced by the GCMs, explaining similar percentage of variance. However, their performance depends on the model analysed and the season of the year. GCMs tend to represent a lesser presence of the time mean pattern giving rise to a more disturbed flow, especially during winter.

Key words: geopotential height, global circulation models, southern South America

INTRODUCCIÓN

En los estudios de cambio climático, los modelos de circulación global (MCGs) juegan un rol fundamental dado que proporcionan una representación del sistema climático, describiendo los principales procesos dinámicos y físicos, sus interacciones y retroalimentaciones. Los MCGs muestran una alta capacidad para simular características de la climatología de la circulación en la región de Sudamérica en escalas de tiempo que van desde la mensual a la decadal (Gulizia *et al.*, 2009; Silvestre y Vera, 2008; Vera *et al.*, 2006; Solman y Le Treut, 2006; Solman y Pessacg, 2006; Di Luca *et al.*, 2006). Sin embargo, su capacidad para reproducir patrones de tiempo en términos de la climatología sinóptica ha sido poco explorada aún. La importancia de este tipo de análisis radica en que la utilidad de los MCGs se ve restringida para estudios de escalas locales debido a su baja resolución espacio-temporal. Las técnicas de reducción de escala o “downscaling” se han desarrollado como puentes entre la información generada por los modelos de gran escala y la información en escala local, con el fin de realizar pronósticos a corto-mediano plazo y de estudiar los potenciales impactos del cambio climático futuro. De manera tal que, la utilización de las salidas diarias de los MCGs para estudios de clima local estará supeditada a la aptitud de los mismos para representar los sistemas atmosféricos de escala regional.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de un conjunto de modelos de circulación global en reproducir los campos de altura geopotencial de 500 hPa en el sur de Sudamérica durante el siglo XX.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este trabajo se utilizaron campos diarios de altura geopotencial de 500 hPa de los Reanálisis 2 NCEP provenientes del NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center como representativos de la circulación observada en el período 1979-1999. El dominio elegido se extiende de 15°S a 60°S de latitud y de 40°O a 90° O de longitud.

Conjuntamente se utilizaron campos diarios de la misma variable de las salidas de cinco MCGs para el siglo XX (escenario 20C3M), generadas para el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC-AR4, por sus siglas en inglés). Las salidas utilizadas en este trabajo corresponden a los siguientes modelos: ECHAM5/MPI-OM (Roeckner, 2007), FUB-EGMAM (Niehoerster, 2008), IPSL-CM4 (Dufresne, 2007), BCCR-BCM2.0 (Drange, 2006) y UKMO-HadCM3 (https://esg.llnl.gov:8443/metadata/showObject.do?id=pcmdi.ipcc4.ukmo_hadcm3.20c3

m). Estos modelos fueron seleccionados debido a que son los únicos modelos donde se encuentran disponibles las salidas diarias de la variable altura geopotencial en las bases de datos del World Data Center for Climate (WDCC) y del World Climate Research Programme - Coupled Model Intercomparison Project (WCRP-CMIP3).

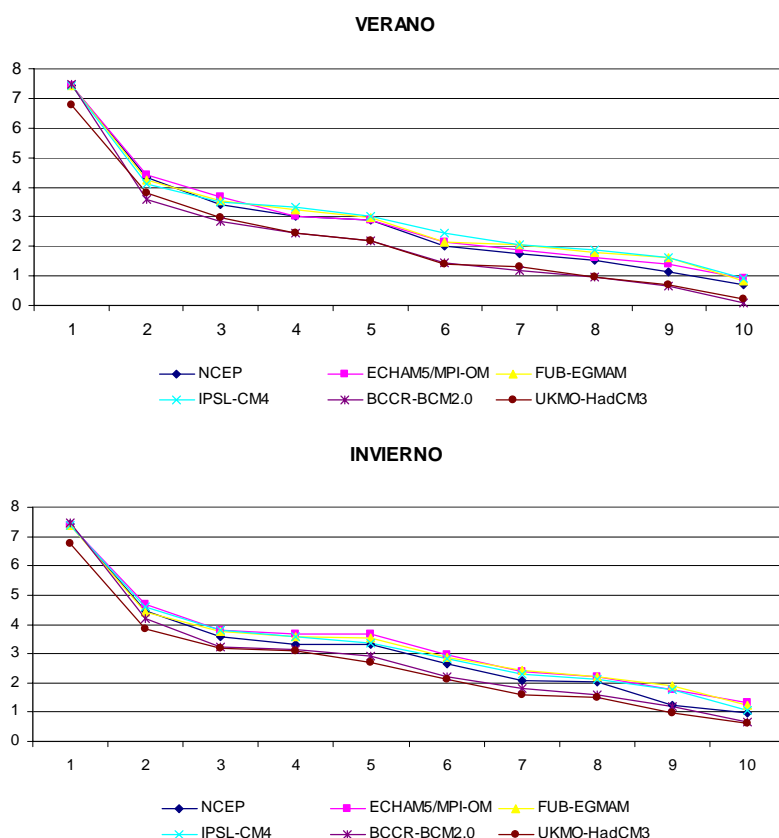
El período analizado en los modelos es coincidente con el de los reanálisis 1979-1999, excepto para el modelo UKMO-HadCM3 donde se analizaron los únicos datos disponibles de salidas diarias de altura geopotencial de 500 hPa (1979-1989).

La metodología utilizada para estudiar las estructuras espaciales de los campos y su evolución temporal, tanto en los reanálisis como en las salidas de los MCGs fue el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Jolliffe, 1986; Richman, 1986). La matriz de correlación fue utilizada como matriz de similitud entre campos. La selección de las bases de componentes principales (CP) retenidas se realizó en base al criterio desarrollado por Craddock y Flood (1969) que consiste en graficar el logaritmo de autovalor (diagrama de LEV) en función del orden de las CP y buscar el punto a partir del cual la curva se aproxima a una recta.

Las estaciones del año analizadas en este trabajo corresponden al verano (diciembre-enero-febrero) e invierno (junio-julio-agosto).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bases de CPs



La separación de los sucesivos autovalores determina el número de CPs a retener en el análisis.

En los diagramas de LEV del NCEP (Figura 1) puede observarse que, en ambas estaciones del año, la separación entre la quinta y la sexta CP es mayor que las subsiguientes separaciones.

Figura 1. Diagramas de LEV (logaritmo del autovalor) para las 10 primeras CPs.

Esto sugiere que cinco es el número más apropiado

de CPs a retener tanto en verano como en invierno.

Las curvas de los diagramas de LEV correspondientes a los MCGs acompañan, en términos generales, a las curvas del NCEP. En particular, los quiebres y saltos se muestran bien representados por los MCGs. Las excepciones más evidentes se

presentan durante el verano en el modelo IPSL-CM4, donde no se observan quiebres o saltos importantes.

La primera CP no rotada puede identificarse con el patrón del campo medio (Compagnucci y Vargas, 1986; Huth, 1996). Por lo tanto, la varianza explicada por la primera CP se aproxima a la varianza explicada por el campo medio, mientras que las varianzas explicadas por las CPs restantes corresponden a patrones que pueden interpretarse como desviaciones respecto de la media temporal.

El porcentaje de varianza explicada por la primera CP se muestra en la Figura 2. La CP1 del verano en NCEP explica un 90.1% de la varianza total.

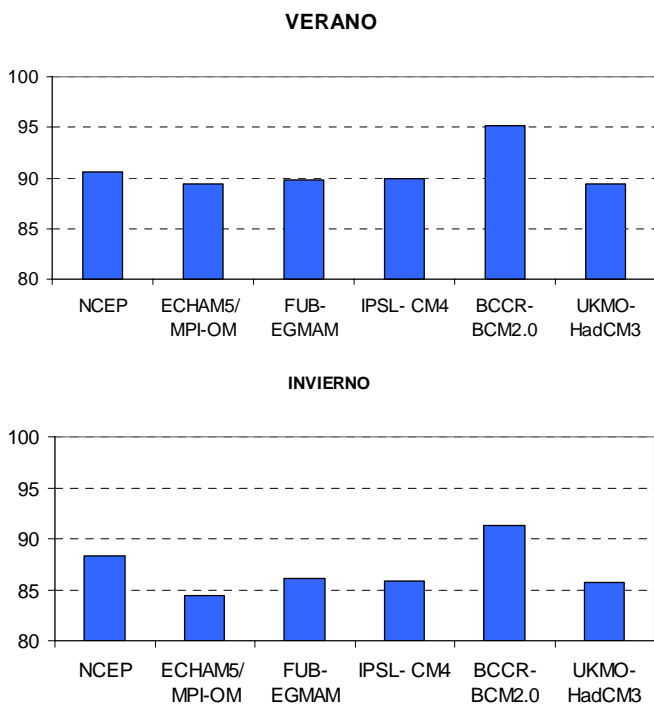


Figura 2. Porcentajes de Varianza Explicada por la primera CP según el NCEP y los MCGs analizados para la altura geopotencial de 500 hPa, en verano e invierno.

Los MCGs explican porcentajes similares con la excepción del modelo BCCR-BCM2.0 que sobrestima dicho porcentaje. En cambio, durante el invierno, el porcentaje de varianza explicada por la primera CP de los MCGs es inferior al correspondiente valor en el conjunto de NCEP (88.4%).

La excepción la presenta nuevamente el modelo BCCR-BCM2.0 sobreestimando el valor del porcentaje.

Tanto en invierno como en verano, los campos medios de altura geopotencial de 500 hPa son aproximadamente zonales (no mostrado). De forma tal que, a mayor varianza explicada por la primera CP, relativamente menor es la circulación meridional y viceversa. En este sentido, los resultados indican que durante el invierno los modelos tienden a representar una menor presencia del campo medio y una mayor presencia de perturbaciones. Es decir, los MCGs reproducen inviernos más perturbados que lo observado. El modelo BCCR-BCM2.0, por el contrario, mantiene la circulación más cercana al campo medio con un debilitamiento de las perturbaciones en ambas estaciones del año.

Los porcentajes de varianza explicada por las restantes CPs de los conjuntos de datos analizados se muestran en la Figura 3.

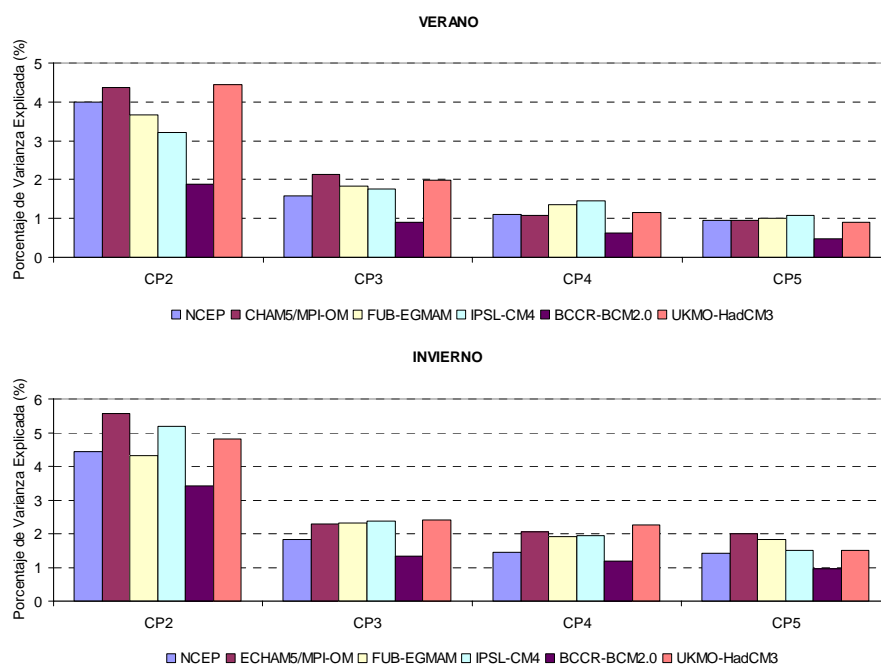


Figura 3. Porcentajes de Varianza Explicada por las restantes CPs retenidas para la altura geopotencial de 500 hPa en el NCEP y los MCG en ambas estaciones del año.

En todos los casos, se puede observar que las varianzas explicadas por las CPs de los MCGs superan en su mayoría a las varianzas explicadas por las CPs del NCEP. La excepción la presenta el modelo BCCR-BCM2.0. Estos resultados confirman la hipótesis de que aquellos modelos que tienden a reproducir en menor medida el campo medio, aumentan su representación de las perturbaciones del flujo y viceversa.

Con el fin de evaluar la variabilidad interanual de la CP1 representada por los MCGs, se calcularon las series temporales de varianza explicada por la primera CP para el verano e invierno. En la Tabla 1 se muestran los desvíos estándares de dichas series temporales.

Tabla 1. Desvíos estándares las series temporales de varianza explicada por la primera CP en verano e invierno.

| | NCEP | MPI- ECHAM5 | FUB- EGMAM | IPSL- CM4 | BCCR- BCM2.0 | UKMO- HADCM3 |
|---------------------|-------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Verano 500 hPa | 1.6 | 1.7 | 1.6 | 1.1 | 0.8 | 1.3 |
| Invierno 500 hPa | 1.6 | 2.0 | 2.4 | 1.8 | 1.3 | 2.2 |

La variabilidad interanual de la primera CP de verano está mejor reproducida por los modelos ECHAM5/MPI-OM y FUB-EGMAM, mientras que los demás modelos analizados subestiman dicha variabilidad. Durante el invierno, los modelos tienden a sobrestimar la variabilidad del campo medio (representado por la CP1), siendo el modelo IPSL-CM4 el que mejor la representa.

Patrones espaciales

Otro aspecto de importancia a tener en cuenta en la comparación con los MCGs es la representación de los patrones espaciales de las CPs. En las Figuras 4 y 5 se muestran los patrones espaciales de las primeras 5 CPs del NCEP y de los MCGs para ambas estaciones del año.

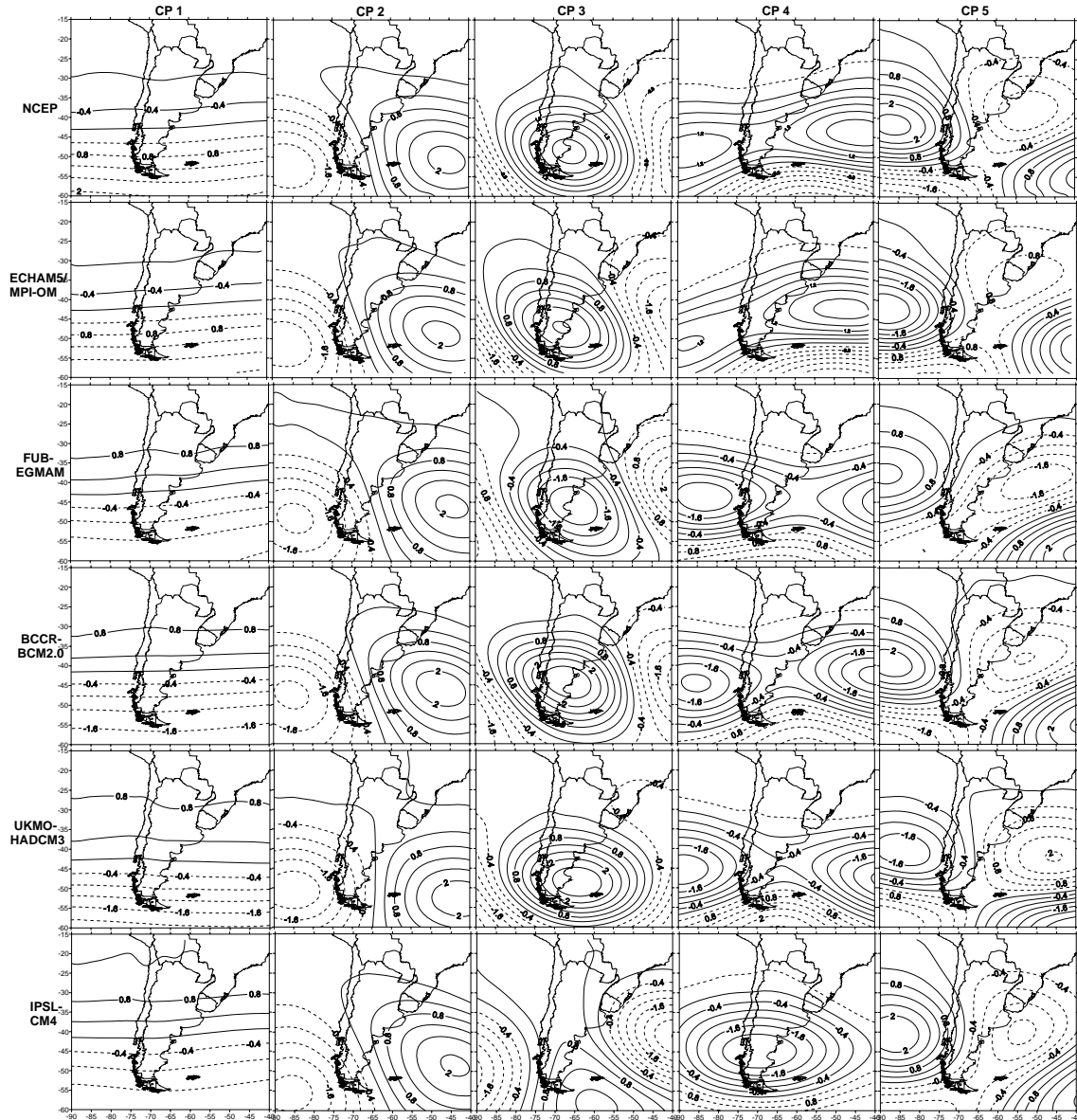


Figura 4. Patrones espaciales de las 5 primeras CPs para el NCEP y los MCGs analizados para el verano.

En estas figuras se verifica la propiedad de que la primera CP no rotada de los datos originales se asemeja al campo medio de la variable en cuestión. En ambas estaciones, puede observarse que la estructura espacial de la primera CP del NCEP representa al campo medio de la altura geopotencial de 500 hPa que corresponde a un flujo zonal, extendido más hacia el norte durante el invierno. Tanto el patrón espacial del campo medio, así como también su variación estacional son capturados por los MCGs (estructuras de la primera CP para los MCGs).