

# EFEITOS DOS FLUXOS DE CALOR EM SUPERFÍCIE NO DESENVOLVIMENTO DE UMA CICLOGÊNESE EXPLOSIVA SOBRE O SUL DA AMÉRICA DO SUL E OCEANO ATLÂNTICO SUL. PARTE II: EXPERIMENTOS NUMÉRICOS.

*Everson Dal Piva<sup>1</sup>*

*Manoel Alonso Gan<sup>2</sup>*

*Marley Moscati<sup>2</sup>*

## RESUMO

Experimentos (EXP) numéricos foram realizados com um modelo regional para se analisar o impacto dos Fluxos de Calor Latente (FCL) e Sensível (FCS) em superfície no desenvolvimento de uma ciclogênese explosiva observada sobre a costa da América do Sul nos dias 28 a 30 de maio de 1999. Os EXP mostraram que os FCL e FCS têm grande contribuição para a rápida intensificação do ciclone, com o primeiro sendo muito mais importante que o segundo. Quando comparado ao EXP de controle (com fluxos incluídos), a taxa de intensificação do ciclone reduziu em 6hPa/24h no EXP SFCT (sem FCL e FCS), 4hPa/24h no EXP sem FCL e 2hPa/24h no EXP sem FCS. O EXP SFCT gerou um ambiente mais frio e mais seco do que o EXP de controle, principalmente nos níveis mais baixos da troposfera sobre o oceano, gerando assim um ambiente com maior estabilidade atmosférica. Nesta situação, o potencial para precipitação e liberação de calor latente foram reduzidos. O último efeito é forte e torna-se predominante com o aumento do tempo de integração. Conclui-se que os FCL e FCS geraram um ambiente com elevada instabilidade potencial, explicando em parte a intensa intensificação da ciclogênese observada.

## ABSTRACT

Numerical Experiments (EXP) were realized with regional model to analyze the impact of latent (FCL) and sensible (FCS) surface heat fluxes in development of the explosive cyclogenesis observed over South America coast on 28-30 May 1999. The EXP showed that FCL and FCS had large contribution to rapid deepening of the cyclone, with the first much more important than the last. When compared with control EXP (fluxes included), the deepening rate of the cyclone was reduced by 6hPa/24h in the SFCT EXP (without FCL and FCS), 4hPa/24h in the FCL absence EXP and 2hPa/24h in the FCS absence EXP. The SFCT EXP generated the environmental more cold and dry than control EXP, mainly in lower levels over sea and therefore, with increased atmospheric stability. In this situation, the potential for precipitation and the release latent heat associated were reduced. This last effect is strong and become prevailing with the increased of time integration. Were concluded that the FCL and FCS generated the environmental with elevated potential instability and explain part of the intense deepening rate of the explosive cyclogenesis.

Palavras-Chave: ciclogênese explosiva, fluxos de calor, modelo regional.

<sup>1</sup> - Bolsista CAPES na UFSM/CRSPE/INPE (*everson.bento@gmail.com*)

<sup>2</sup> - Pesquisadores do INPE/CPTEC (*alonso@cptec.inpe.br, marley@cptec.inpe.br*)

## **INTRODUÇÃO**

Na costa leste dos continentes é comum se observar rápido desenvolvimento de ciclones extratropicais, sendo este fato associado a processos diabáticos devido a presença de correntes oceânicas quentes e ao contraste térmico entre o continente e o oceano (Sanders e Gyakum, 1980; Fantini, 1990). O escoamento oceânico dos trópicos para o extratropicos na parte oeste dos oceanos são conhecidos como Corrente do Golfo (na costa da América do Norte), Corrente de Kuroshio (na costa da Ásia), Corrente Leste Australiana (na costa da Austrália) e Corrente do Brasil (na costa leste da América do Sul). A instabilidade baroclínica úmida, ou seja, a instabilidade baroclínica seca associada a processos diabáticos como os Fluxos de Calor Latente (FCL) e Sensível (FCS) em superfície e a Liberação de Calor Latente (LCL) podem explicar a rápida intensificação de ciclones extratropicais que ocorrem na costa leste dos continentes (Sanders e Gyakum, 1980; Nuss e Antes, 1987; Davis e Emanuel, 1988; Wash et al., 1992). Este artigo estuda o papel dos FCL e FCS em um caso de ciclogênese explosiva ocorrida no sul da América do Sul a fim de se avaliar se estes fluxos são essenciais para o desenvolvimento e/ou para o rápido desenvolvimento da ciclogênese sobre a região. Trata-se da continuação do artigo Piva et al. (2006).

## **DADOS E METODOLOGIA**

Os experimentos realizados com o MAL-JAPA são: Controle (EXP CON), Sem Fluxo de Calor Latente (EXP SFCL), Sem Fluxo de Calor Sensível (EXP SFCS) e Sem Fluxo de Calor Total (EXP SFCT). No EXP CON o modelo foi rodado com os FCL e FCS presentes, enquanto nos demais EXP foram retirados os fluxos como indicado pelo nome do EXP. Por exemplo, no EXP SFCL, o FCL esteve desligado e o FCS esteve presente. No EXP SFCT o Fluxo de Calor Total (FCT) foi desligado, sendo este a soma do FCL e FCS. A análise do impacto dos fluxos de calor em superfície foi feita através da diferença entre os campos simulados pelo EXP CON e EXP sem os fluxos. Por exemplo, para se analisar os efeitos dos FCL no campo de temperatura, foram apresentadas diferenças entre campos de temperatura simulados pelo EXP CON menos o campo simulado pelo EXP SFCL, e assim por diante para os outros campos e EXP. Como os impactos da ausência dos fluxos são pequenos no início e aumentam com o tempo de simulação, os campos de diferença são apresentados a partir de 12h ou 24h de simulação em diante. Estas informações estão presentes no campo superior direito das figuras. Por exemplo, uma figura cujo o canto superior direito apresenta a inscrição CON-SFCT e logo abaixo o numero 36h, indica tratar-se da diferença entre o EXP CON e EXP SFCT para 36h de simulação. Todos os EXP foram realizados com as condições de contorno e iniciais fornecidas pelos dados de reanálise do NCEP/NCAR para o

período de 28 a 31/05/1999. As variáveis utilizadas foram a componente zonal e meridional do vento, altura geopotencial, umidade relativa e temperatura nos níveis entre 1000hPa e 100hPa.

## RESULTADOS

O efeito da ausência dos fluxos de calor em superfície no campo de Pressão ao Nível médio do Mar (PNM) está representada na Figura 1. A diferença de PNM entre o EXP CON e SFCT (Figura 1 a-c) na últimas 12h de simulação (24h até 36 h de integração) mostra valores negativos localizados principalmente sobre o oceano. A magnitude da diferença é da ordem de -1hPa as 24h de simulação (Figura 1 a) e atinge -7hPa a sudeste do centro do ciclone na região da frente quente (Figura 1 c). Separando-se o impacto dos FCL e FCS, pode-se notar que a ausência do FCL provocou maior impacto próximo ao centro do ciclone, com valores de -5hPa após 36h de simulação (Figura 1 e), enquanto no caso do FCS, os impactos foram mais expalhados pelo oceano Atântico Sul e atingiram no máximo -3hPa (Figura 1 f). A PNM central do ciclone após 36h de simulação foi de 996hPa para o EXP SFCT (Figura 1 d), 6hPa mais alta do que no EXP CON cujo valor foi de 990hPa (Figura 1 g na Parte I). A taxa de intensificação do ciclone caiu para 16hPa/24h, chegando no limite mas ainda assim sendo classificada como ciclogênese explosiva segundo Sanders e Gyakum (1980). A PNM no EXP SFCL e no EXP SFCS foi de 994hPa (4hPa maior que o EXP CON) e de 990hPa (igual ao EXP CON), respectivamente. Assim, a ausência dos fluxos de calor em superfície gerou um ciclone menos intenso e, como a maior parte do impacto deve-se a ausência do FCL, a discussão será feita exclusivamente com base no EXP SFCT, o qual agrupa os impactos de ambos os fluxos de calor.

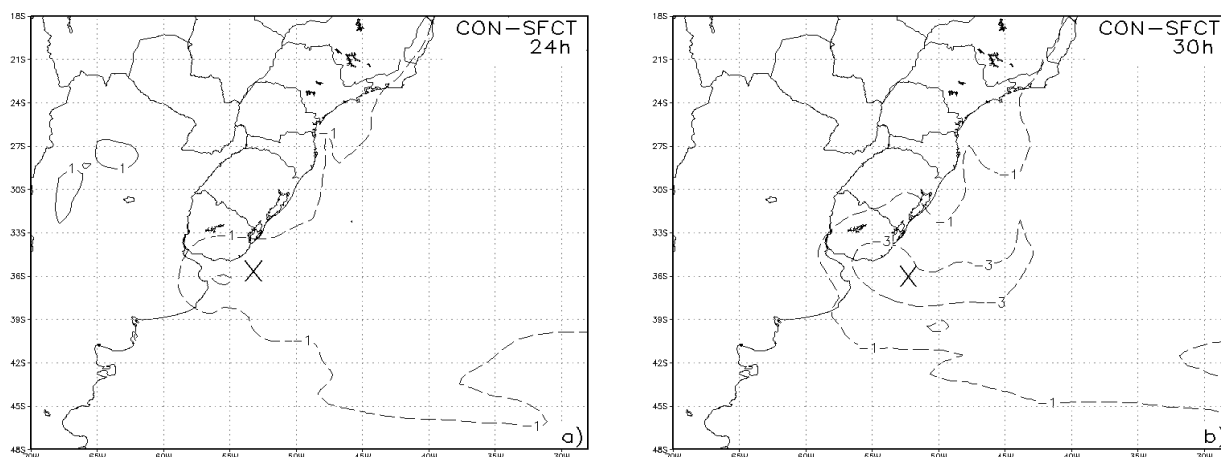


Figura 1- Diferença de PNM (em hPa) entre o EXP CON e EXP SFCT para as 24h (a), 30h (b) e 36h (c) de simulação. Campo de PNM (em hPa) para as 36h de simulação do EXP SFCT (d). Diferença de PNM entre EXP CON e SFCL (e) e entre EXP CON e SFCS (f), ambos para 36h de simulação. Intervalo de contorno de 2hPa com isolinha de 0 omitida. (continua).

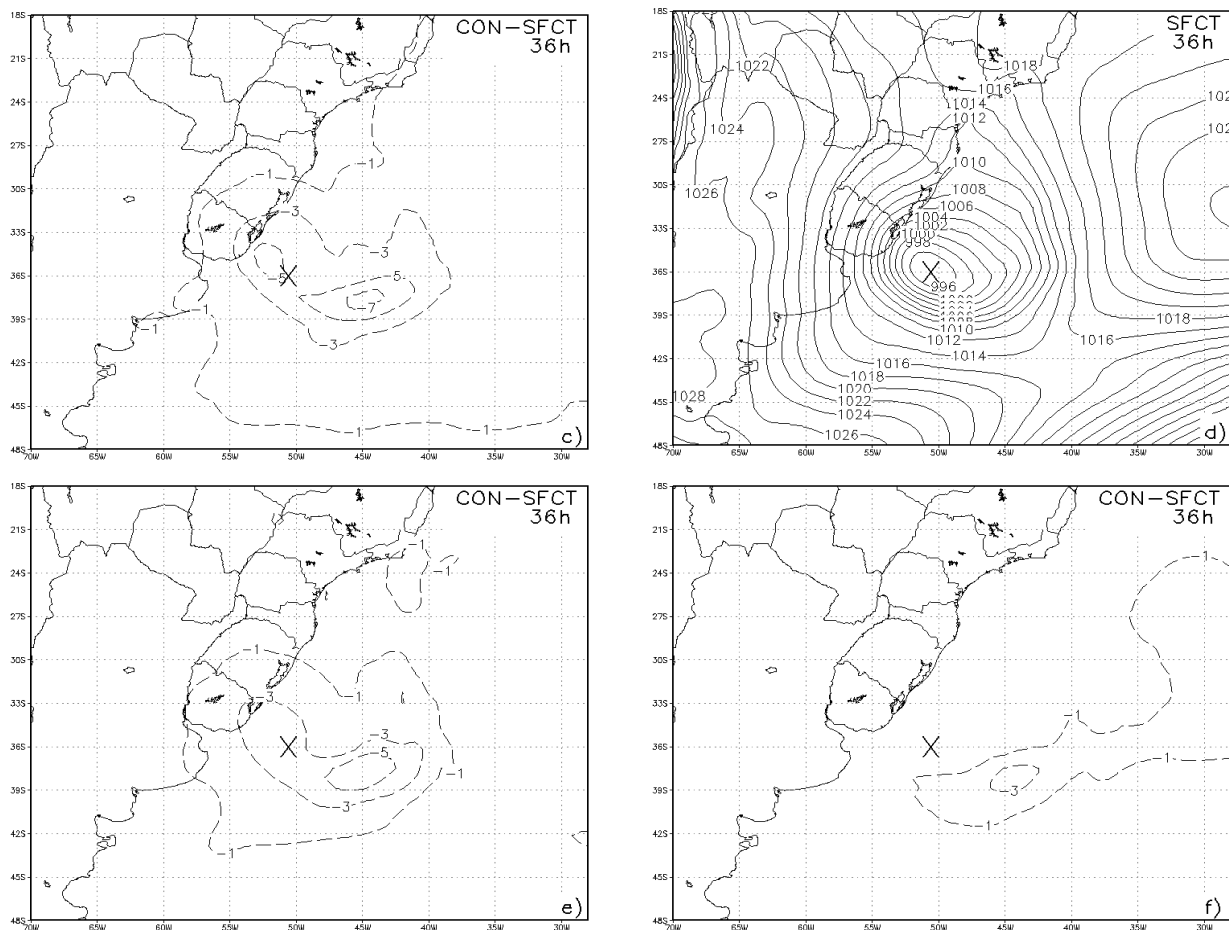


Figura 1- Conclusão.

No campo da diferença de temperatura potencial, o impacto da ausência do FCT pode ser visto na Figura 2 no nível de 950hPa (a esquerda) e no perfil vertical (a direita). Em 950hPa os valores foram positivos na região do ciclone e após 36h de simulação atingiram 9K na região da frente quente a sudeste do centro do ciclone (Figura 2 a,b). No perfil vertical, pode-se ver que o impacto da ausência do FCT surge abaixo de 900hPa próximo a superfície oceânica (Figura 2 c) e se estende para níveis médios no decorrer da simulação, porém o valor máximo de 10K é observado próximo a superfície (Figura 2 e). A ausência do FCS fez com que as águas mais quentes do oceano não aquecessem os níveis mais baixos da troposfera. O impacto da ausência do FCT aumentou com o tempo e se espalhou verticalmente devido a 3 mecanismos principais, são eles: a) ocorreu um processo cumulativo da ausência do FCT devido ao aumento do tempo de simulação sem o FCT; b) com o desenvolvimento do ciclone, os movimentos verticais tornaram-se mais intensos, espalhando verticalmente os efeitos da falta do FCT; e c) a LCL diminuiu e provocou alterações também em níveis médios. Assim, na ausência do FCT, a troposfera tornou-se mais fria, especialmente a camada mais próxima da superfície oceânica.

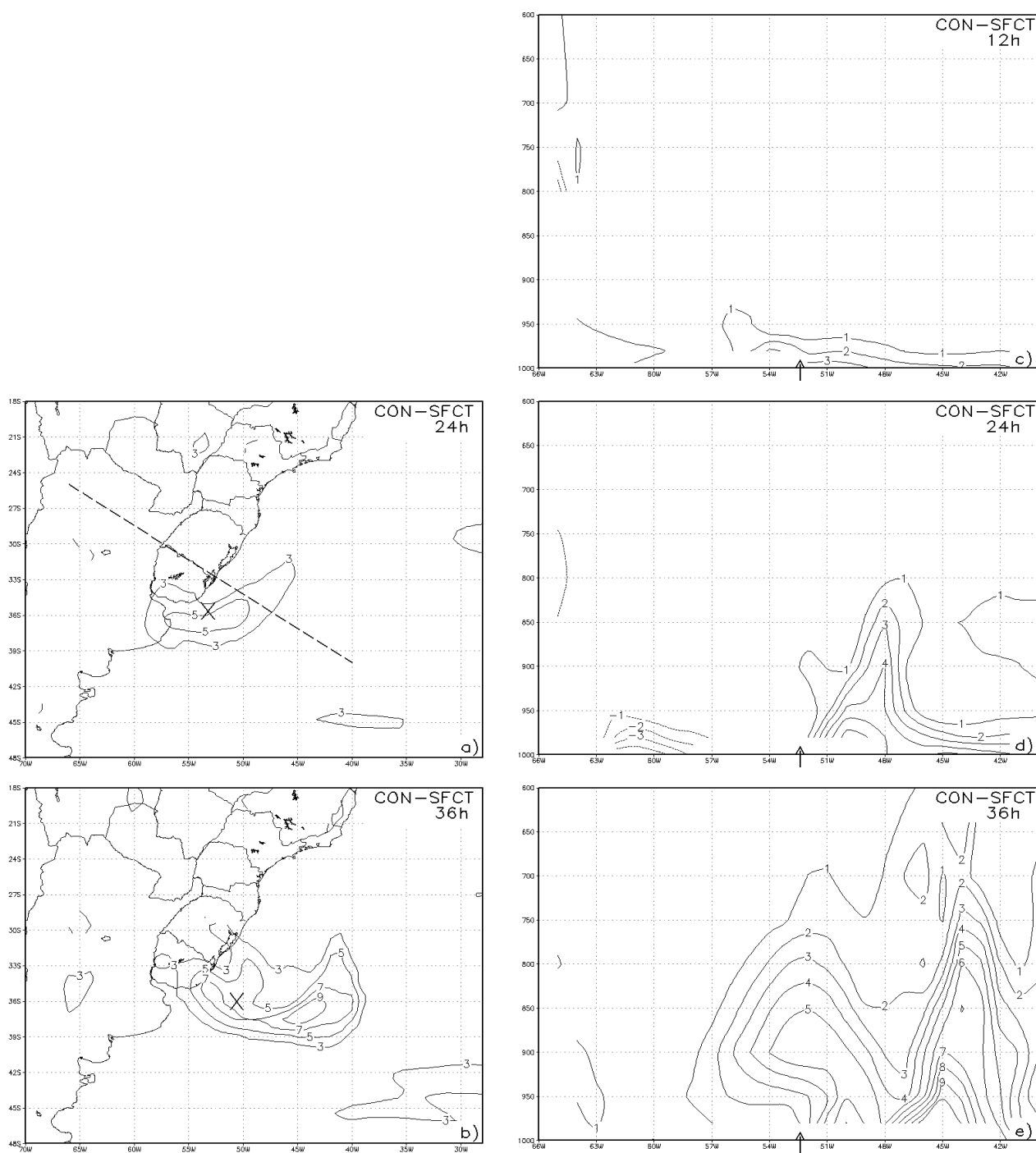


Figura 2- Diferença de temperatura potencial (em K) entre o EXP CON e SFCT. Diferença no nível de 950hPa para as 24h (a) e 36h (b) de simulação. Perfil vertical da diferença para as 12h (c), 24h (d) e 36h (e) de simulação, cuja orientação é mostrada pela reta tracejada em (a). Em 950hPa, o intervalo de contorno é de 2K iniciando-se em 3K, enquanto no perfil vertical o intervalo de contorno é 1K com isolinha de 0 omitida.

No caso da umidade específica em 950hPa, os maiores valores de diferença não foram observados próximo ao ciclone, mas sim mais sobre a região central do Oceano Atlântico Sul (Figura 3 a,b). Próximo ao ciclone, os maiores valores de diferença foram de 3g/kg após 24h de simulação (Figura 3 a) e de 5g/kg após 36h de simulação a sudeste do centro do ciclone (Figura 3 b).

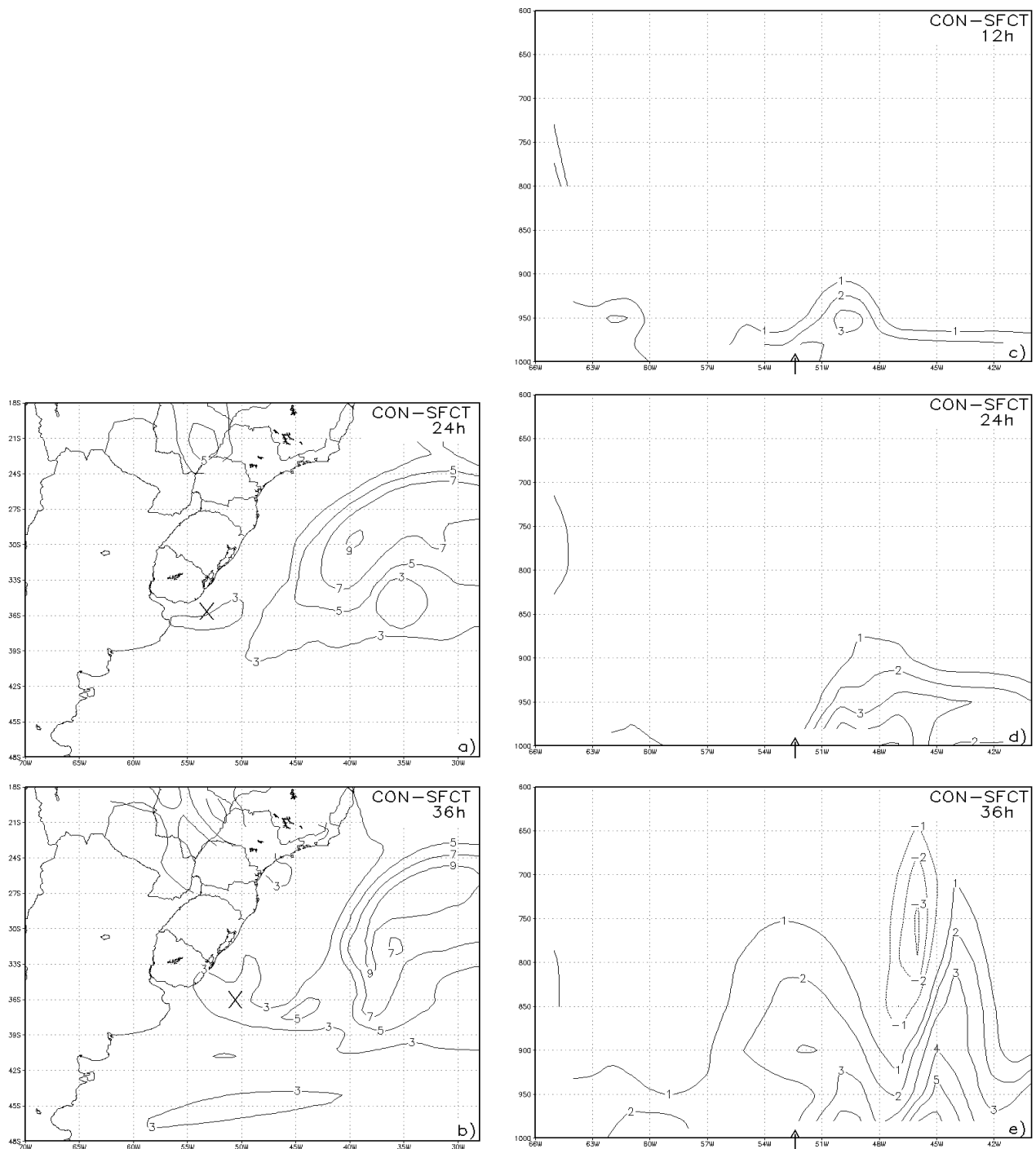


Figura 3- Como na Figura 2, mas para a umidade específica (em g/kg).

Em termos de perfil vertical, a diferença de umidade específica apresentou características similares ao comportamento da temperatura potencial (Figura 3 c-e). Ou seja, os valores positivos de diferença surgiram na camada mais baixa da troposfera sobre o oceano (12h de simulação Figura 3 c) e se espalharam verticalmente até médios níveis (Figura 3 d, e), sendo o máximo de 6g/kg observado na camada inferior da troposfera sobre o oceano no fim da simulação (Figura 3 e). É interessante notar, nesse horário, que em torno de 750hPa ocorreram valores negativos de diferença de umidade específica da ordem de -3g/kg (Figura 3 e), ou seja, houve maior quantidade de

umidade no EXP SFCT do que no EXP CON. Tal configuração ocorreu porque no EXP SFCT houve menor precipitação, ou seja, menos mudança de fase da água do estado gasoso para o estado líquido, sendo assim, mais umidade permaneceu na atmosfera entre os níveis de 800hPa e 700hPa, gerando valores negativos. Assim, a ausência do FCT reduziu a quantidade de umidade disponível na troposfera, principalmente na camada mais próxima a superfície, mas em algumas áreas em camadas mais elevadas (em torno de 750hPa) a quantidade de umidade foi maior devido a menor precipitação.

Os resultados até aqui analisados mostraram o impacto da ausência do FCT nos campos de temperatura potencial e umidade específica, o que em outras palavras significa analisar o impacto da ausência do FCS e FCL, respectivamente. Observou-se que sem o FCT, a troposfera fica mais fria e mais seca, principalmente na camada mais baixa da troposfera, significando que o ambiente tornou-se mais estável, como de fato é verificado através da figura 4 em que se apresenta o perfil vertical da diferença de estabilidade estática.

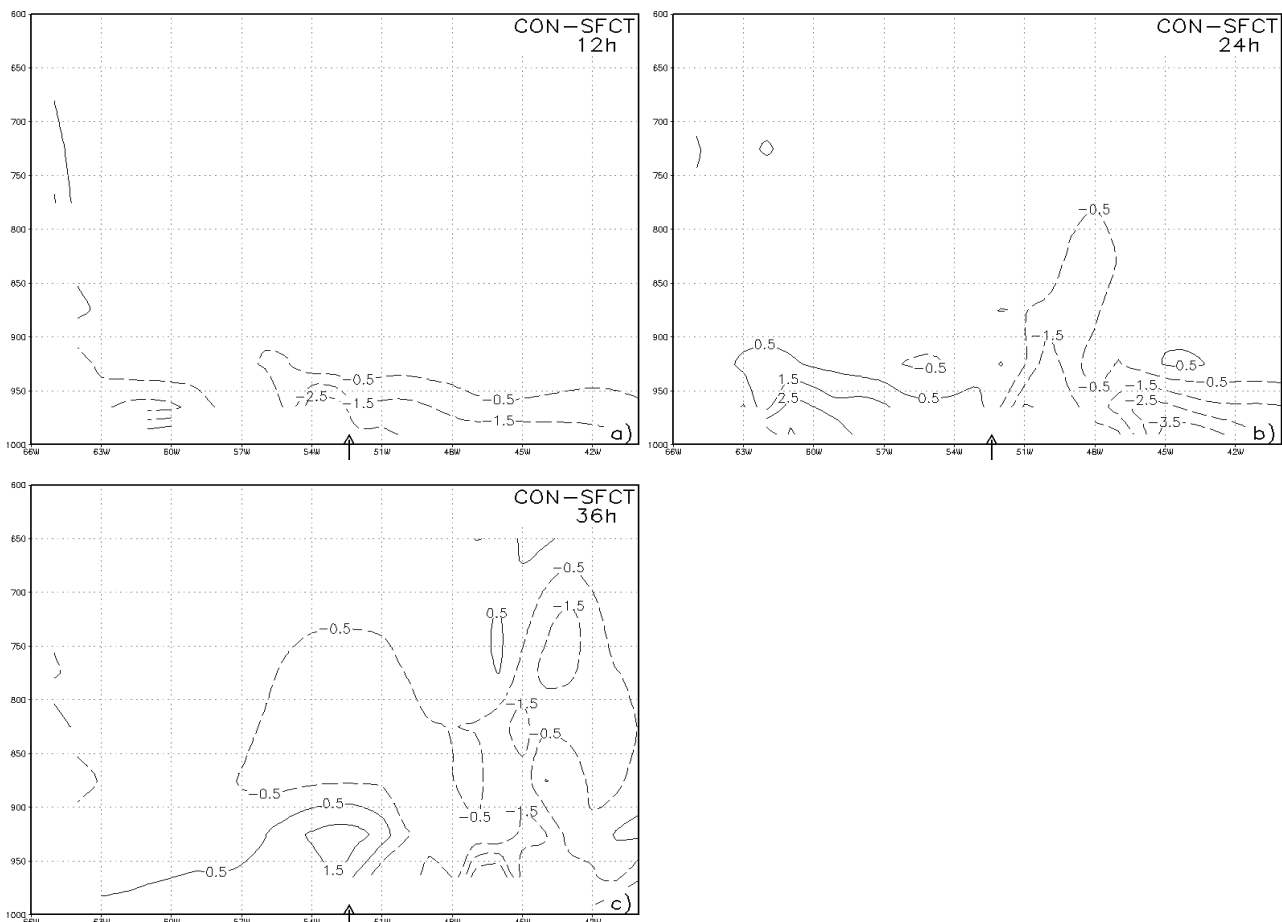


Figura 4- Perfil vertical da diferença de estabilidade estática (em  $\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{Pa}^{-2}$ ) entre EXP CON e EXP SFCT para as 12h (a), 24h (b) e 36h (c) de simulação. Intervalo de contorno de  $0,5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{s}^{-2} \text{Pa}^{-2}$  (isolinha de 0 omitida). Seta na base da figura separa o continente (a esquerda) do oceano (a direita).

Esta figura mostra diferenças negativas sobre o oceano e diferenças positivas sobre o continente, indicando que a estabilidade estática foi maior no EXP SFCT do que no EXP CON sobre o oceano e o contrário sobre o continente (Figura 4 a-c). Sobre o continente era esperado que sem o FCT a troposfera fosse menos estável pois houve períodos em que o FCS foi negativo, ou seja, houve resfriamento da troposfera inferior devido a troca de calor da atmosfera para o solo. A evolução no tempo da diferença de estabilidade estática foi similar a evolução das variáveis anteriores, ou seja, o impacto começou na troposfera inferior e se espalhou verticalmente com aumento do tempo de simulação. Assim, na ausência do FCT a troposfera inferior sobre o oceano torna-se mais estável.

Em um ambiente mais frio, mais seco e mais estável, o potencial para geração de precipitação torna-se menor como pode ser visto na Figura 5, a qual mostra a diferença de Precipitação Acumulada Total (PAT, Figura 5 a-b), Precipitação Acumulada Convectiva (PAC, Figura 5 c-d) e a Precipitação Acumulada de Grande Escala (PAGE, Figura 5 e-f), sendo que a primeira representa a soma das duas últimas. A diferença de PAT na região do ciclone foi de 5mm/12h após 24h de simulação (Figura 5 a) e atingiu 35mm/12h no fim da simulação (Figura 5 b). Interessante é a análise da precipitação quando se separa em precipitação convectiva (PAC, parametrizada) e estratiforme (PAGE, resolvida pela grade). A diferença de PAC alcançou valores de 35mm/12h com 24h de simulação ao sul do centro do ciclone (Figura 5 c) e a nordeste do ciclone no fim da simulação (Figura 5 d). Chama a atenção que na região do ciclone nas primeiras 24h de simulação, a diferença de PAC foi muito superior a diferença de PAT (compare a Figura 5a com 5c). Esta aparente inconsistência é esclarecida com a análise do campo de diferença de PAGE e com o conhecimento da física do modelo utilizado. Os valores de diferença de PAGE foram de 5mm/12h no ciclone e de -25mm/12h ao sul do centro do ciclone (Figura 5 c), ou seja, houve maior precipitação de grande escala no EXP SFCT do que no EXP CON. Isto se deve ao fato de que o modelo utilizado calcula primeiramente a PAC e depois a PAGE. As condições necessárias para a ocorrência da PAC são, convergência de umidade na camada e instabilidade atmosférica. A precipitação gerada nesta fase é a quantidade suficiente para levar o ambiente a uma estratificação neutra. Logo após, é calculada a PAGE a qual depende somente da supersaturação do ambiente. Desta forma, com o ambiente mais estável, houve menor geração de PAC (Figura 5 c), permitindo assim maior possibilidade de se encontrar condição de supersaturação no ambiente e gerando, por consequência, uma maior quantidade de PAGE (Figura 5 e). Estas considerações aplicam-se também para a região nordeste do ciclone no fim da simulação (Figura 5 d,f). Em termos práticos,



menor quantidade de precipitação implica em menor LCL, e deve-se levar em consideração que o grau de impacto da LCL é muito superior ao dos FCL e FCS, além de ser mais distribuído verticalmente. Assim, verifica-se que a ausência do FCT reduz a precipitação gerada pelo ciclone.

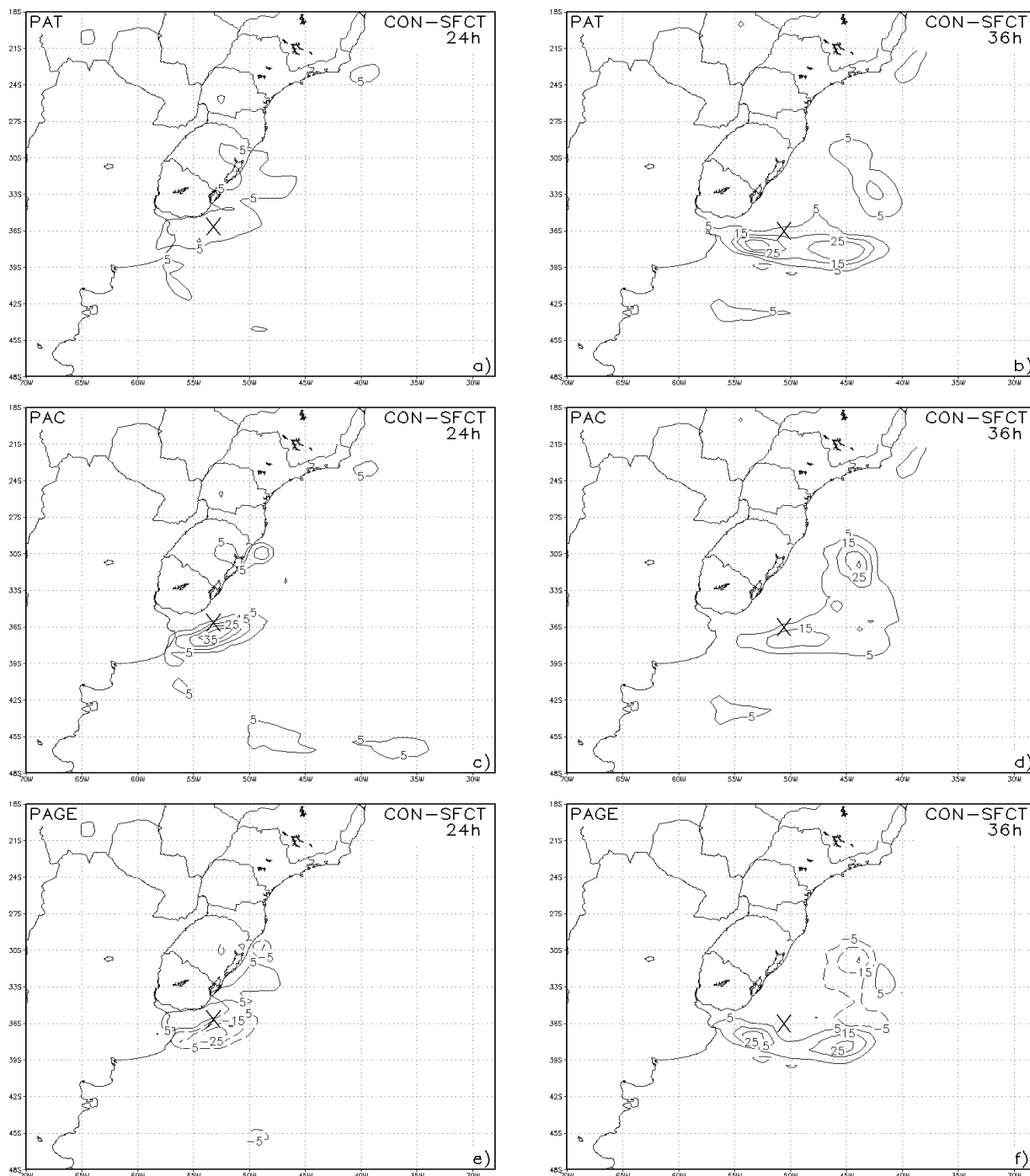


Figura 5- Diferença de precipitação acumulada (em mm/12h) entre os EXP CON e EXP SFCT. Diferença de PAT as 24h (a) e as 36h (b); diferença de PAC as 24h (c) e as 36h (d); diferença de PAGE as 24h (e) e as 36h (f) de simulação. Intervalo de contorno de 10mm/12h iniciando-se em 5 mm/12h.

## CONCLUSÕES

Foram realizados experimentos numéricos com um modelo regional a fim de avaliar o impacto dos fluxos de calor latente e sensível em superfície no desenvolvimento de uma ciclogênese explosiva sobre a América do Sul. A ausência dos fluxos gerou um ambiente mais frio e mais seco, principalmente sobre o oceano. Nesta situação, a camada inferior da troposfera torna-se mais estável, diminuindo a geração de precipitação. A liberação de calor latente associada a formação de precipitação tem um grau de impacto muito superior aos fluxos de calor em superfície e passa a dominar a termodinâmica envolvida no desenvolvimento do ciclone. Ressalta-se que o ciclone extratropical se desenvolveu com ou sem fluxos de calor em superfície, isto porque o mecanismo dominante é a instabilidade baroclínica seca, ou seja, os fluxos de calor em superfície e a liberação de calor latente de condensação tornam o ciclone mais intenso, mas a formação ou não do ciclone é determinada pela instabilidade baroclínica. Assim, conclui-se que os fluxos de calor latente e sensível em superfície tornam a troposfera mais úmida e instável permitindo o desenvolvimento intenso de ciclones extratropicais que passam do continente para o oceano sobre a América do Sul.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor e à FAPESP pelo financiamento do Projeto ATLASUL (Processo 95/4573-5).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Davis, C.A.; Emanuel, K.A. Observational evidence for the influence of surface heat fluxes on rapid marine cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, 116(12):2649-2659, Dez. 1998.
- Fantini, M. The influence of heat and moisture fluxes from the ocean on the development of baroclinic waves. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 47(7):840-855, Abr. 1990.
- Nuss, W.A.; Anthes, R.A. A numerical investigation of low-level processes in rapid cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, 115(11):2728-2743, Nov. 1987.
- Sanders F.; Gyakum, J. R. Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. **Monthly Weather Review**, 108(10):1589-1606, Out. 1980.
- Wash, C.H. Halo, R.A., Dobos, P.H.; Wright, E.J. Study of explosive and nonexplosive cyclogenesis during FGGE. **Monthly Weather Review**, 120:40-51, Jan. 1992.