

**ANÁLISE OBSERVACIONAL DA INTERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE MODOS HORIZONTAIS:
ESTUDO DE CASO DE PASSAGEM DE FRENTE FRIA SOBRE O BRASIL**

José Paulo Bonatti

Divisão de Modelagem e Desenvolvimento – DMD
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / MCT
bonatti@cptec.inpe.br

ABSTRACT

It is analysed the role of resolution and horizontal mode energy interaction using NCEP analysis for a case study of a cold front over Brazil during 24 to 27 September 2001. It is found that major resolution contributes in general to more detailed structures, in particular at the region of cold front. In general for all the interactions the magnitude of the T126L28 resolution is greater than the T170L42 resolution. The sum of percentages for all horizontal modes interactions shows a wave train crossing south of South America for the first category. It has constructive interference over NW region of the Pacific pressure high and over the SW region of the Atlantic pressure high, and intense destructive interference over the pressure high over south of South America. This destructive interference is mainly due to interaction between Rossby and Westward Gravity modes. The second category presents destructive interference over all the tropical region is mainly due to the interaction between Rossby and Kelvin modes. It is also found that the interaction between Rossby and Westward Gravity modes and between Kelvin and Westward Gravity modes shows a constructive interference at the north side and destructive at the south side of the cold front over sea, mainly for the second category. The reverse is obtained for the interaction between Rossby and Eastward Gravity modes and between Kelvin and Eastward Gravity modes. The interaction between Westward and Eastward Gravity modes shows a tendency to has destructive interference at the north side and constructive at the south side of the cold front over sea.

INTRODUÇÃO

Um fenômeno freqüente sobre o Brasil é a passagem de sistemas frontais. Muitos estudos têm sido realizados para seu entendimento, bem como sobre a energética de tais sistemas. Porém, restam questões relevantes sobre a partição de energia entre modos, tanto verticais quanto horizontais, bem como a importância da resolução de análises e de modelos que simulam esses fenômenos. A formação ou intensificação de um sistema frontal normalmente é precedida pela ocorrência de ciclogênese. A ciclogênese é a formação ou intensificação de um sistema de baixa pressão em superfície, geralmente provocada por perturbações em médios e altos níveis. O desenvolvimento de um ciclone inicia-se quando uma perturbação ondulatória leva ar quente para as altas latitudes e ar frio para as baixas latitudes, proporcionando uma troca de calor entre regiões quentes e frias. Os ventos associados contribuem para a formação de duas zonas frontais, uma frente fria e outra quente e na vanguarda da frente fria ocorre queda de pressão. Os principais fatores que favorecem o desenvolvimento e a intensificação dos ciclones extratropicais são: o aquecimento nos níveis baixos da atmosfera, os movimentos verticais adiabáticos, a advecção de vorticidade e a advecção térmica. A presença de uma montanha provoca intensificação do ciclone quando desce a montanha e vice-versa. Então, a Cordilheira dos Andes na América do Sul fornece condições para que a leste desta haja uma região ciclogênica. Na costa leste da América do Sul, a maior freqüência das ciclogêneses ocorre nos meses de inverno (Gan, 1992).

Os modelos atuais utilizam as equações primitivas. Tais equações podem ser escritas em forma espectral tanto na horizontal quanto na vertical, resultando em um sistema de equações tal que a estrutura vertical forma, juntamente com as condições de contorno um problema de Sturm-Liouville, enquanto que a estrutura horizontal, fazendo-se uso das funções vetoriais de Hough, é um problema de um oscilador harmônico acoplado forçado. Muitos artigos trazem esse tipo de decomposição e análise, mas em Andrade (1994) há uma descrição bastante detalhada desse procedimento. Os autovalores da solução vertical são conhecidos como alturas equivalentes e os autofunções dão a estrutura vertical dos campos, separando-as em um modo externo (barotrópico equivalente) e os demais sendo modos internos (baroclínicos). A solução linearizada das equações horizontais, que são formalmente idênticas às da água rasa linearizadas, levam aos chamados modos horizontais: de Rossby, de Kelvin, misto Rossby-gravidade e de gravidade inercial com propagação para leste e para oeste. As estruturas horizontais associadas a esses modos são as funções vetoriais de Hough, enquanto que os autovalores do problema correspondem às respectivas freqüências

de oscilação. Essas funções podem ser utilizadas na análise de campos tridimensionais (Kashara e Puri, 1981) e também no estudo da partição de energia entre os modos verticais e horizontais, como mostra Andrade (1994). Recentemente Nunes (2002) utilizou essa metodologia para analisar o efeito da inicialização física sobre a partição de energia em modos verticais e horizontais.

O objetivo é, através de um estudo de caso, analisar a passagem de uma frente fria do ponto de vista observacional, para análises de diversas resoluções e a interação de energia entre modos horizontais.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados são análises espectrais (harmônicos esféricos) provenientes do National Centers for Environmental Predictions (NCEP) para as resoluções T062L28, T126L28 e T170L42, onde Ttt significa truncamento triangular na onda zonal ttt e Lll significa ll camadas verticais em coordenadas sigma. Essas análises contêm campos espectrais de topografia, logaritmo natural da pressão à superfície, temperatura virtual, divergência horizontal do vento, vorticidade e umidade específica. O período dos dados é de 24 a 27 de setembro de 2001, para 00, 06 12 e 18 UTC. São também utilizadas análises globais diárias de precipitação provenientes do Global Precipitation Climatology Project (GPCP), disponíveis em <ftp://precip.gcf.nasa.gov/pub/1dd/>. Detalhes sobre a geração dos dados de precipitação do GPCP podem ser obtidos em Huffman e Bolvin (2002).

Para a análise da interação de energia em modos horizontais, é feita a recomposição dos dados espectrais no espaço físico, calculando-se as variáveis vento zonal, vento meridional e geopotencial generalizado e é procedida a decomposição desses campos em modos verticais obtidos em coordenadas sigma, conforme descrito em Kasahara e Puri (1981). Neste caso os modos verticais são os mesmos que os do modelo global do CPTEC. A seguir, os modos verticais são decompostos em modos horizontais seguindo o procedimento descrito em Andrade (1994). A partir daí é calculada a energia total (cinética zonal mais cinética meridional mais potencial disponível) para cada modo horizontal de Rossby, de Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, de Gravidade propagando-se para Oeste e para Leste, suas interações e sua porcentagem em relação à energia total. As interações são definidas como em Andrade (1994), ou seja, considerando apenas a energia cinética zonal total (E_{CZ}) dada por:

$$E_{CZ} = U^2 / 2 = \left(U_{RB} + U_{KV} + U_{MX} + U_{GO} + U_{GE} \right)^2 / 2 = \left(U_{RB}^2 + U_{KV}^2 + U_{MX}^2 + U_{GO}^2 + U_{GE}^2 \right) / 2 + U_{RB} \left(U_{KV} + U_{MX} + U_{GO} + U_{GE} \right) + U_{KV} \left(U_{MX} + U_{GO} + U_{GE} \right) + U_{MX} \left(U_{GO} + U_{GE} \right) + U_{GO} U_{GE} \quad (1),$$

onde U é o vento zonal e os índices RB , KV , MX , GO e GE referem-se, respectivamente, aos modos horizontais de Rossby, de Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, de Gravidade Inercial propagando-se para oeste e de Gravidade Inercial propagando-se para leste. A energia cinética zonal de um determinado modo horizontal (MH) é dada por $U_{MH}^2 / 2$. Os produtos cruzados se anulam se integrados globalmente, porém podem ser interpretados localmente como a interferência construtiva (valores positivos) ou destrutiva (valores negativos) entre os modos que produzem o produto. Então, a interação entre o modo horizontal HA e HB pode ser definida como o produto $U_{HA} U_{HB}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de 24 a 27 de setembro de 2001 foi registrada a passagem de uma frente fria sobre o Brasil cuja discussão observacional e partição de energia em modos verticais encontra-se em Bonatti (2002). Devido às características dos níveis verticais dos máximos, mínimos e zeros, as projeções sobre os modos verticais podem ser divididas em três categorias (Bonatti, 2002): a primeira compreende os modos com alturas equivalentes acima de 500 m, a segunda com modos com alturas entre 100 e 500m e a terceira com alturas entre 10 e 100m. Define-se uma quarta incluindo-se os demais modos com alturas abaixo de 10 m. Essa divisão é baseada e é uma extensão dos resultados de Silva Dias e Bonatti (1986). Os resultados para T062L28 são semelhantes aos da resolução T126L28 e a terceira categoria normalmente apresenta baixos valores de porcentagem e não serão apresentados.

A figura 1 apresenta a porcentagem de energia para a soma de todas as interações definidas na equação 1 para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. Nota-se para a primeira categoria os valores significativos aparecem em latitudes médias, onde há uma alternância entre valores positivos e negativos na região ao sul da América do Sul, caracterizando um trem de ondas. Os valores positivos são sobre o oceano próximo às regiões das altas em pressão (Bonatti, 2002): no Pacífico situa-se a NE da alta e no Atlântico a SO. Os valores negativos ficam sobre a alta em pressão ao sul da América do Sul e ao norte da frente fria oceânica. Para a segunda categoria, a região tropical é dominada por interferência destrutiva e em latitudes subtropicais há alternância entre valores positivos, em áreas maiores e magnitudes menores, com valores negativos, em áreas mais concentradas com magnitudes maiores. A magnitude dos valores é maior para a resolução T126L28 em relação à resolução T170L42, principalmente no mínimo sobre o sul da América do Sul.

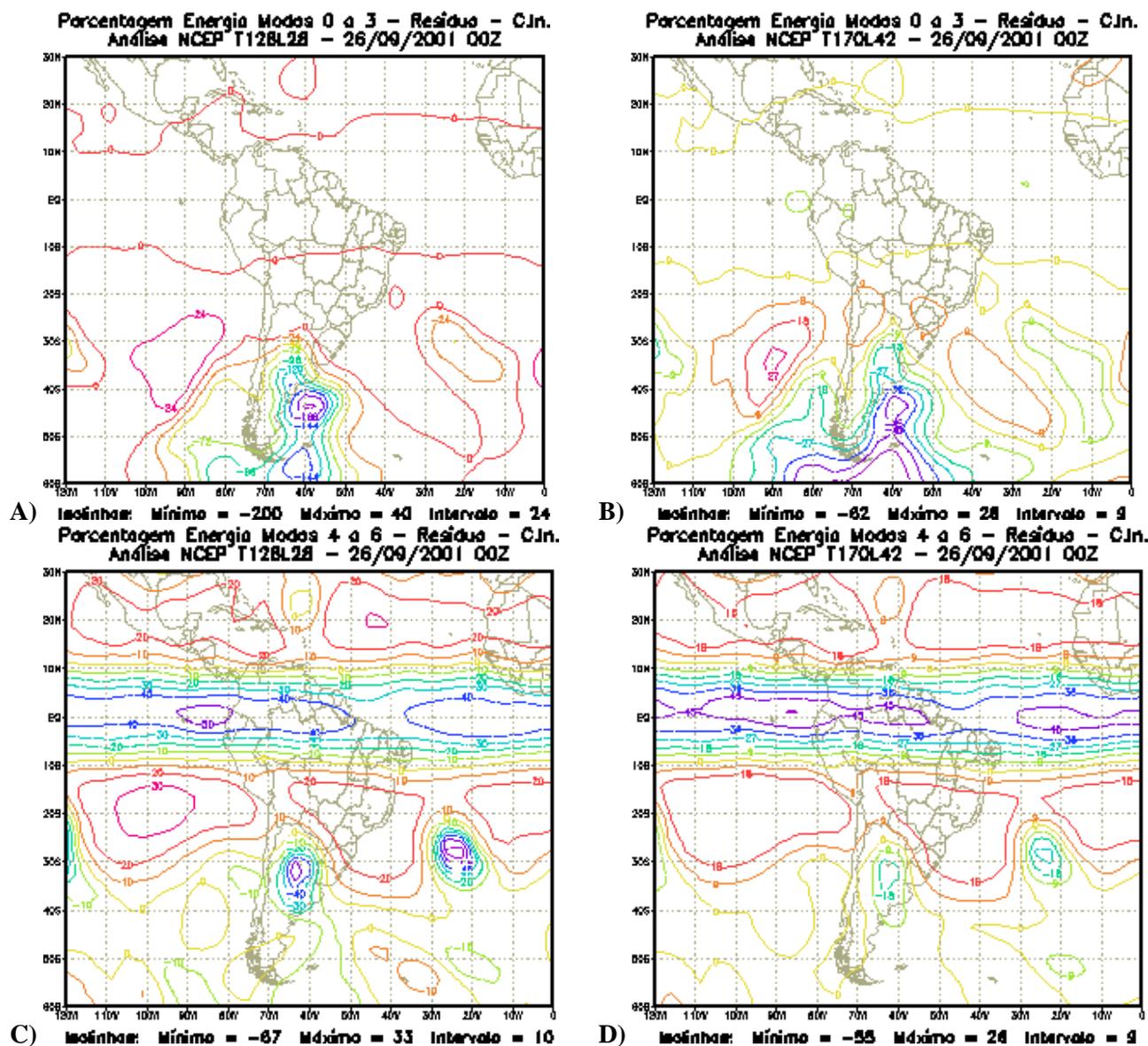


Figura 1 – Porcentagem de energia para a soma de todas as interações para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

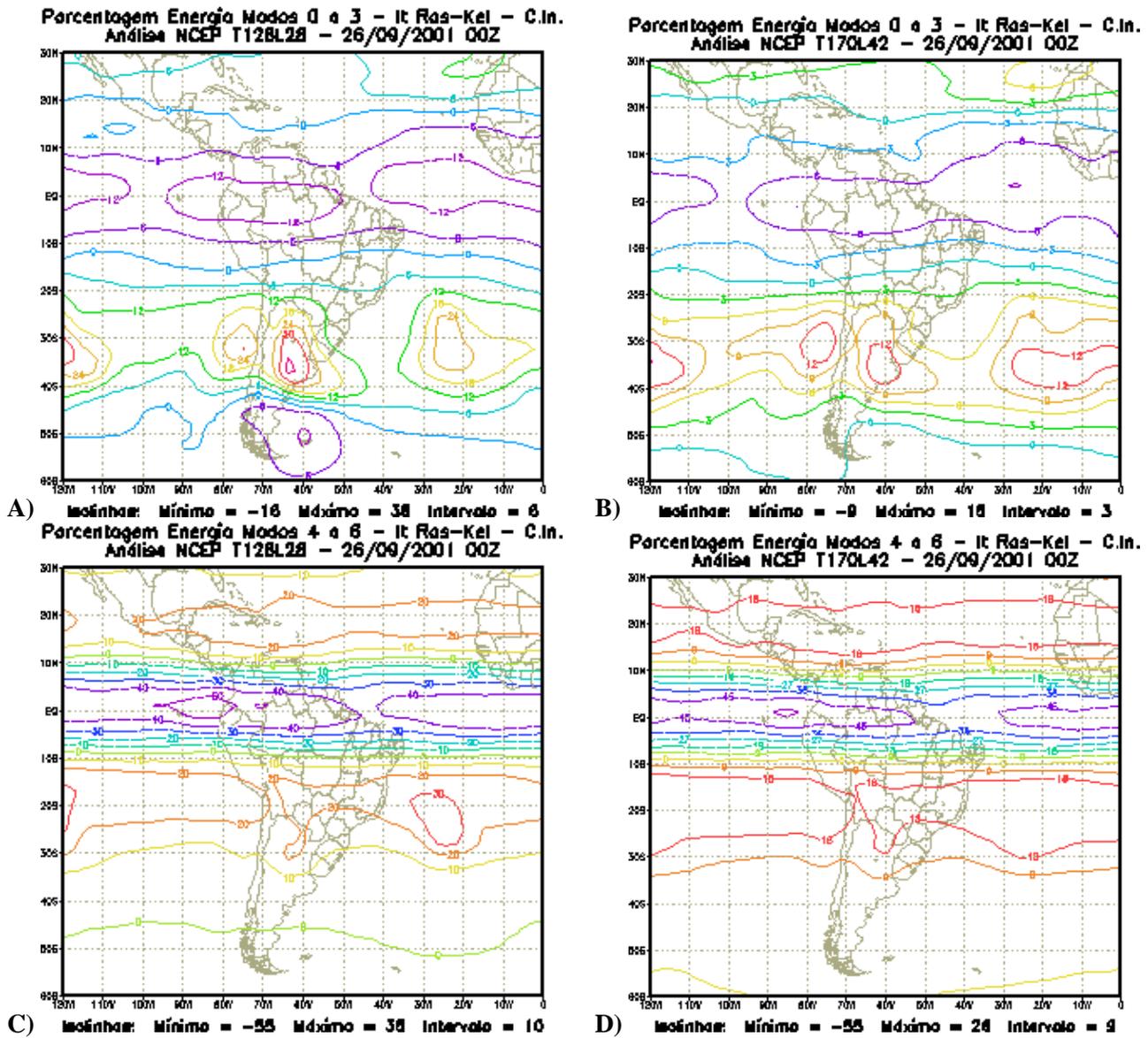
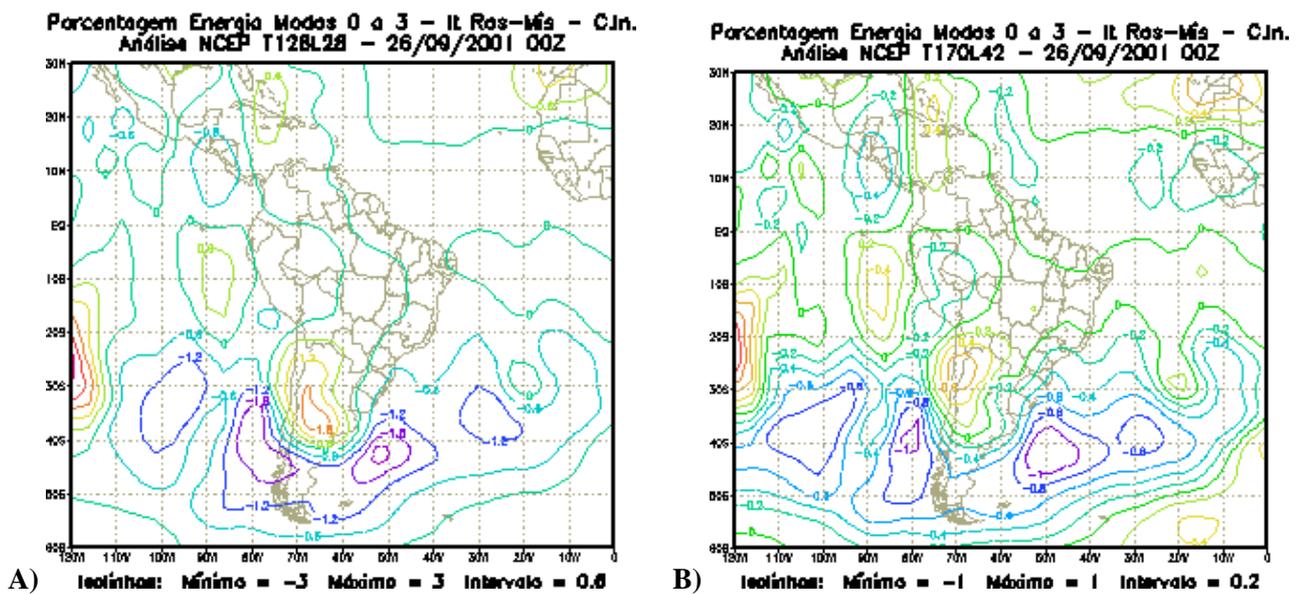


Figura 2 – Percentagem de energia para a interação entre as ondas de Rossby e de Kelvin para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).



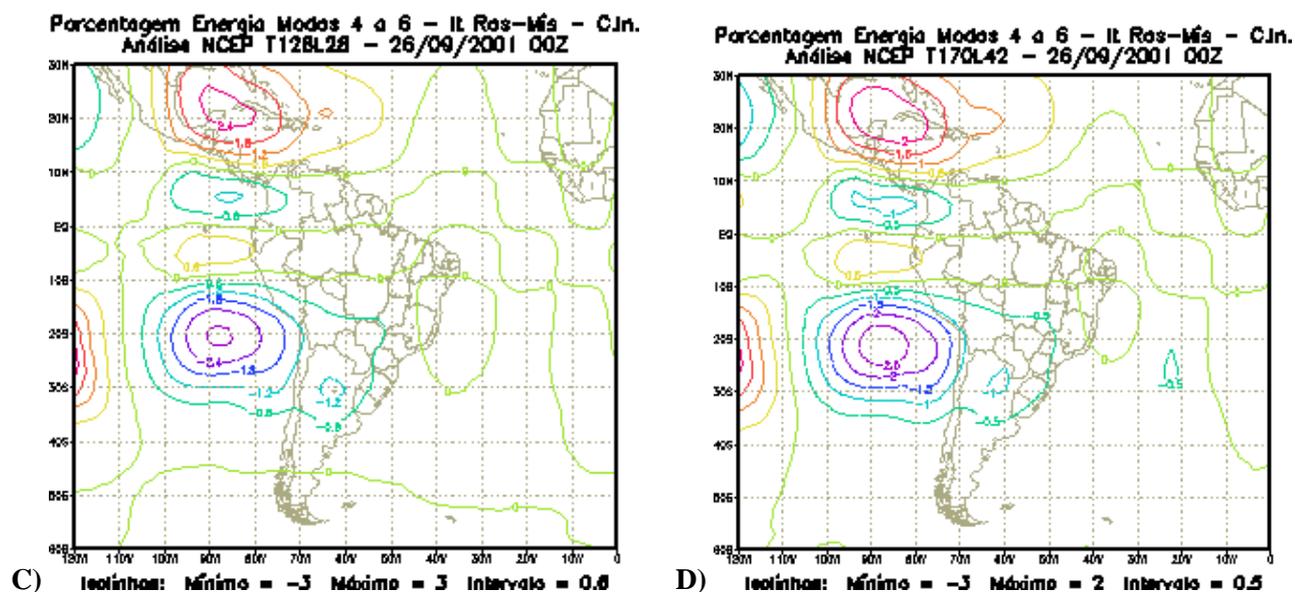


Figura 3 – Porcentagem de energia para a interação entre as ondas de Rossby e Mista Rossby-Gravidade para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

A seguir serão analisadas as interações mais relevantes em magnitude, não sendo apresentadas as interações entre a onda Mista Rossby-Gravidade com os modos de Kelvin, de Gravidade propagando-se para oeste e para leste.

A figura 2 apresenta a interação entre as ondas de Rossby e Kelvin para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. Nota-se, que em geral, as configurações são semelhantes para ambas as resoluções, porém a resolução T126L28 apresenta magnitudes maiores. A região tropical é dominada por interferência destrutiva, enquanto que em latitudes médias são dominadas por construtiva. Para a segunda categoria há uma clara definição que os valores negativos tropicais são dominantes quando comparados com as figuras 1-C e 1-D. Para essa categoria os ventos zonais na região tropical possuem altos valores para ambos os modos (figuras não mostradas), o que só seria possível existindo essa interferência destrutiva, dado que os ventos zonais observados nessa região, em geral, tem valores menores que em latitudes médias, em escala sinótica. A configuração da segunda categoria é mais confinada em relação aos trópicos que a primeira.

A interação entre os modos de Rossby e o Misto Rossby-Gravidade é mostrado na figura 3. Em geral os valores são muito baixos não ultrapassando a magnitude de 3%. Ambos as resoluções possuem valores e configurações semelhantes e a segunda categoria é mais confinada em relação aos trópicos que a segunda. Na primeira categoria pode-se notar uma configuração de trem de ondas passando ao sul da América do Sul.

Na figura 4 encontra-se a interação entre as ondas de Rossby e de Gravidade propagando-se para oeste para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. Para a primeira categoria há uma grande interferência destrutiva ao sul da América do Sul, sendo dominante nessa região em comparação com a figura 1 e as magnitudes para a resolução T126L28 são bem maiores que para a resolução T170L42; destaca-se também um máximo negativo ao norte da frente fria sobre o oceano. Para a segunda categoria, as magnitudes de ambas as resoluções são mais próximas que na primeira categoria, porém os gradientes bem mais intensos, e destaca-se, ao longo da frente fria sobre o oceano, interferência construtiva no lado norte e destrutiva no lado sul.

A figura 5 apresenta a interação entre as ondas de Rossby e de Gravidade propagando-se para leste para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. Para a primeira categoria há também uma grande interferência destrutiva ao sul da América do Sul, porém menor em comparação com a figura 4 e as magnitudes para a resolução T126L28 são bem maiores que para a resolução T170L42; destaca-se também um máximo negativo ao norte da frente fria sobre o oceano mais intenso que no caso da figura 4. Para a segunda categoria, as magnitudes de ambas as resoluções são mais próximas que na primeira categoria, porém os gradientes bem mais intensos, e destaca-se, ao longo da frente fria sobre o oceano, interferência destrutiva no lado norte e construtiva no lado sul, sentido contrário que o caso da figura 4. Há também um máximo negativo intenso sobre a região central da Argentina.

Na figura 6 encontra-se a interação entre as ondas de Kelvin e de Gravidade propagando-se para oeste para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. As magnitudes não são muito altas e não ultrapassam 15% para a resolução T126L28 e 5% para T170L42, evidenciando que novamente as magnitudes são menores para a resolução mais fina, principalmente para a primeira categoria. Destaca-se a interferência construtiva no lado norte da frente sobre o oceano e destrutiva, menos intensa, no lado sul, em ambas as categorias apresentadas e um máximo positivo ao sul da América do Sul para a primeira categoria.

A figura 7 apresenta a interação entre as ondas de Kelvin e de Gravidade propagando-se para leste para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. As características são as mesmas que o caso da figura 6, porém totalmente fora de fase, ou seja, onde em um caso há interferência construtiva no outro há destrutiva e vice-versa. A interferência destrutiva neste caso é bem mais intensa que o caso da figura 6.

Na figura 8 encontra-se a interação entre as ondas de Kelvin e de Gravidade propagando-se para oeste e propagando-se para leste para as duas primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42. As características principais a destacar são que as magnitudes são novamente menos intensa para a resolução mais fina e que tanto na primeira como na segunda categorias há uma tendência para interferência destrutiva, mais intensa, no lado norte da frente fria sobre o oceano e construtiva, menos intensa, no lado sul.

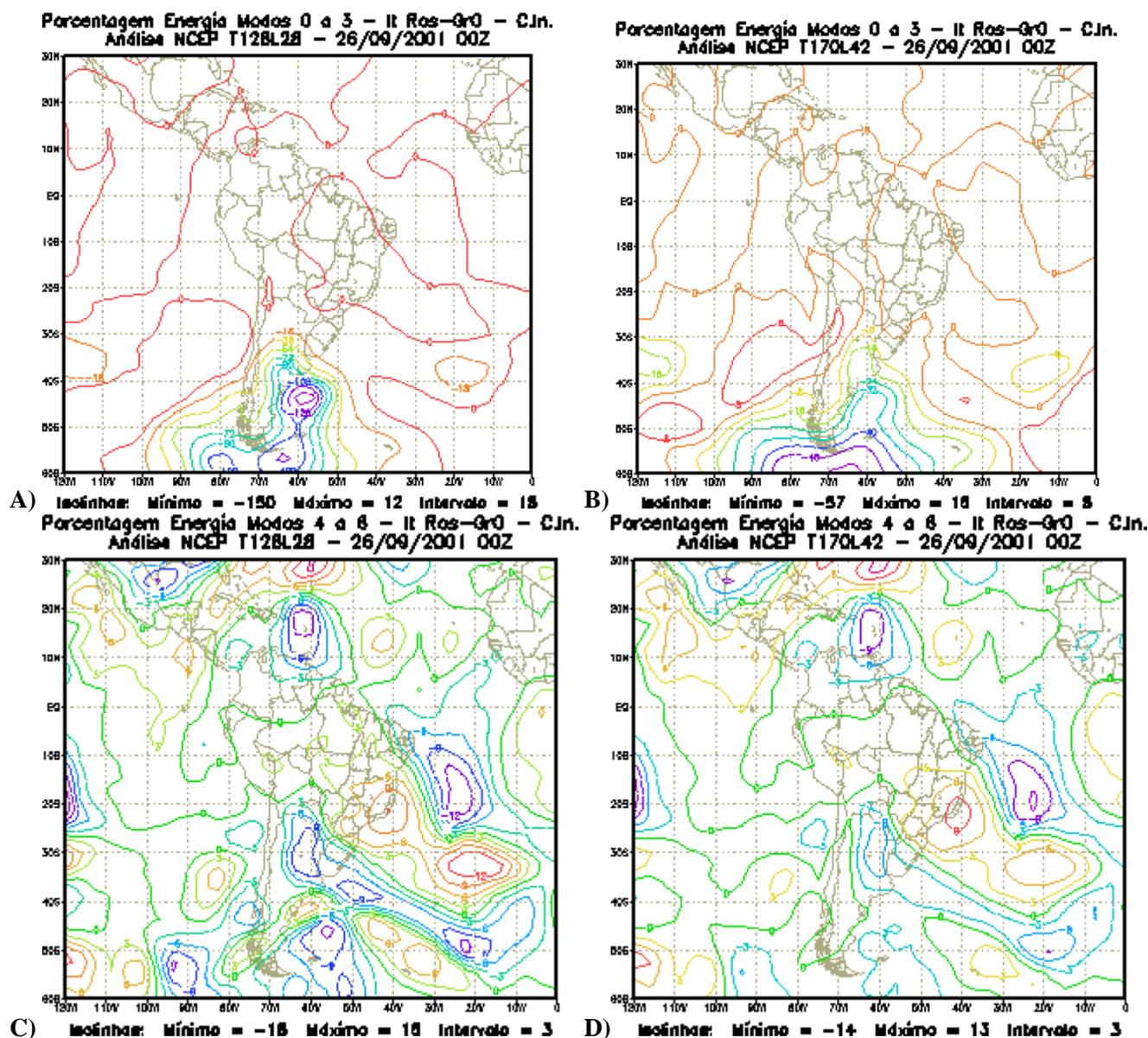


Figura 4 – Porcentagem de energia para a interação entre as ondas de Rossby e de Gravidade propagando-se para Oeste para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

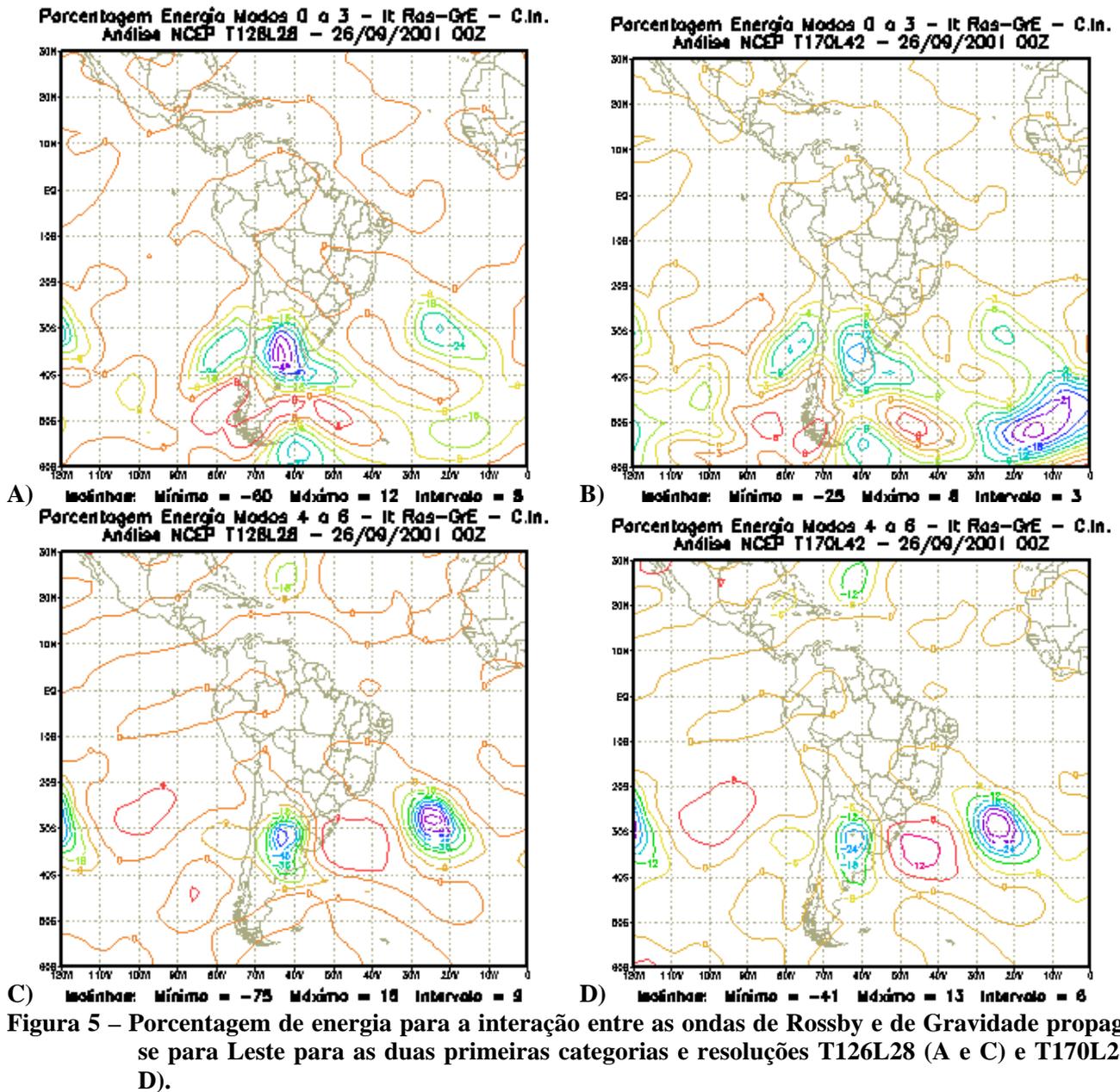
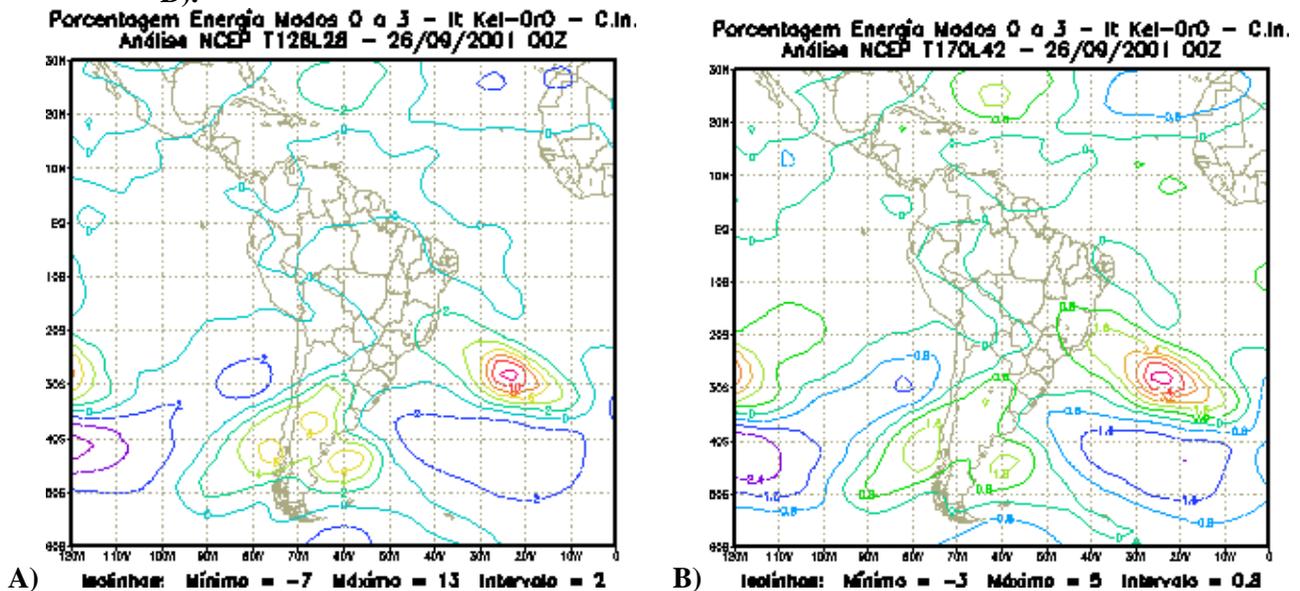
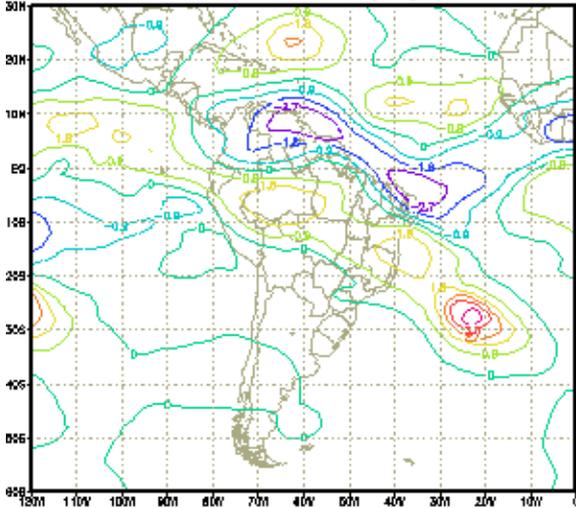


Figura 5 – Percentagem de energia para a interação entre as ondas de Rossby e de Gravidade propagando-se para Leste para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

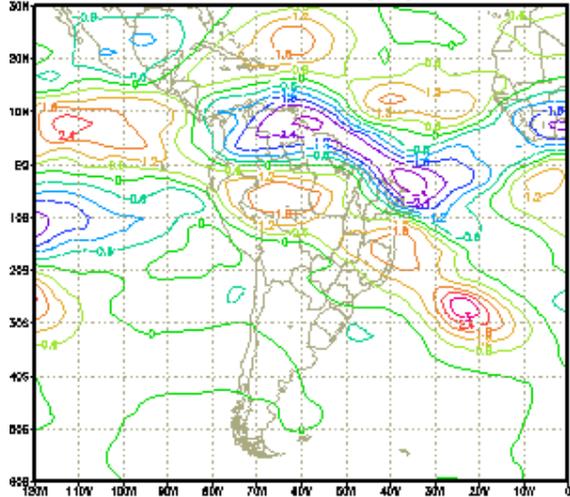


Porcentagem Energia Modos 4 a 6 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z



C) Isolinhas: Mínimo = -4 Máximo = 5 Intervalo = 0,9

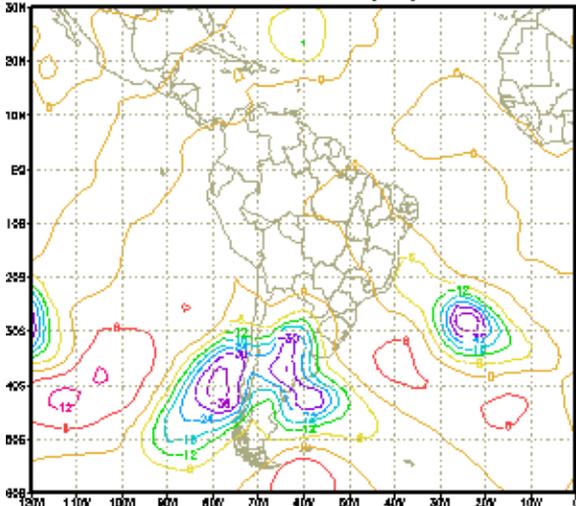
Porcentagem Energia Modos 4 a 6 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T170L42 - 26/09/2001 00Z



D) Isolinhas: Mínimo = -3 Máximo = 3 Intervalo = 0,6

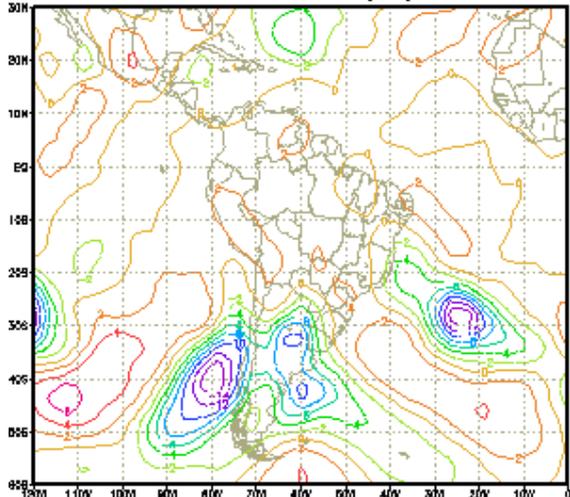
Figura 6 – Porcentagem de energia para a interação entre as ondas de Kelvin e de Gravidade propagando-se para Oeste para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

Porcentagem Energia Modos 0 a 3 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z



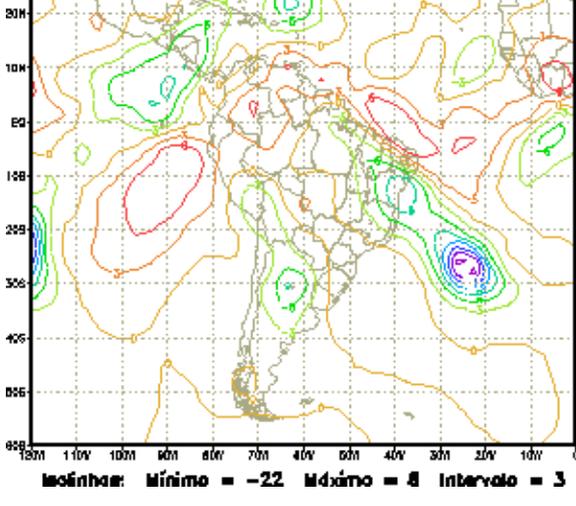
A) Isolinhas: Mínimo = -42 Máximo = 12 Intervalo = 6
Porcentagem Energia Modos 4 a 6 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z

Porcentagem Energia Modos 0 a 3 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T170L42 - 26/09/2001 00Z



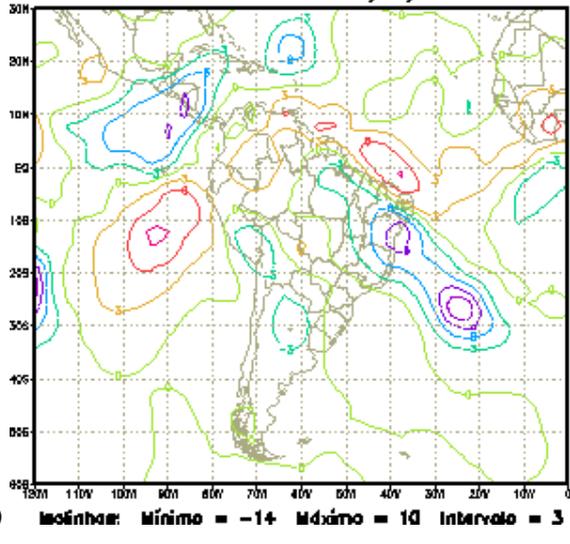
B) Isolinhas: Mínimo = -16 Máximo = 6 Intervalo = 2

Porcentagem Energia Modos 4 a 6 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z



C) Isolinhas: Mínimo = -22 Máximo = 8 Intervalo = 3

Porcentagem Energia Modos 4 a 6 - It Kel-GrE - C.In.
Análise NCEP T170L42 - 26/09/2001 00Z



D) Isolinhas: Mínimo = -14 Máximo = 10 Intervalo = 3

Figura 7 – Porcentagem de energia para a interação entre as ondas de Kelvin e de Gravidade propagando-se para Leste para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

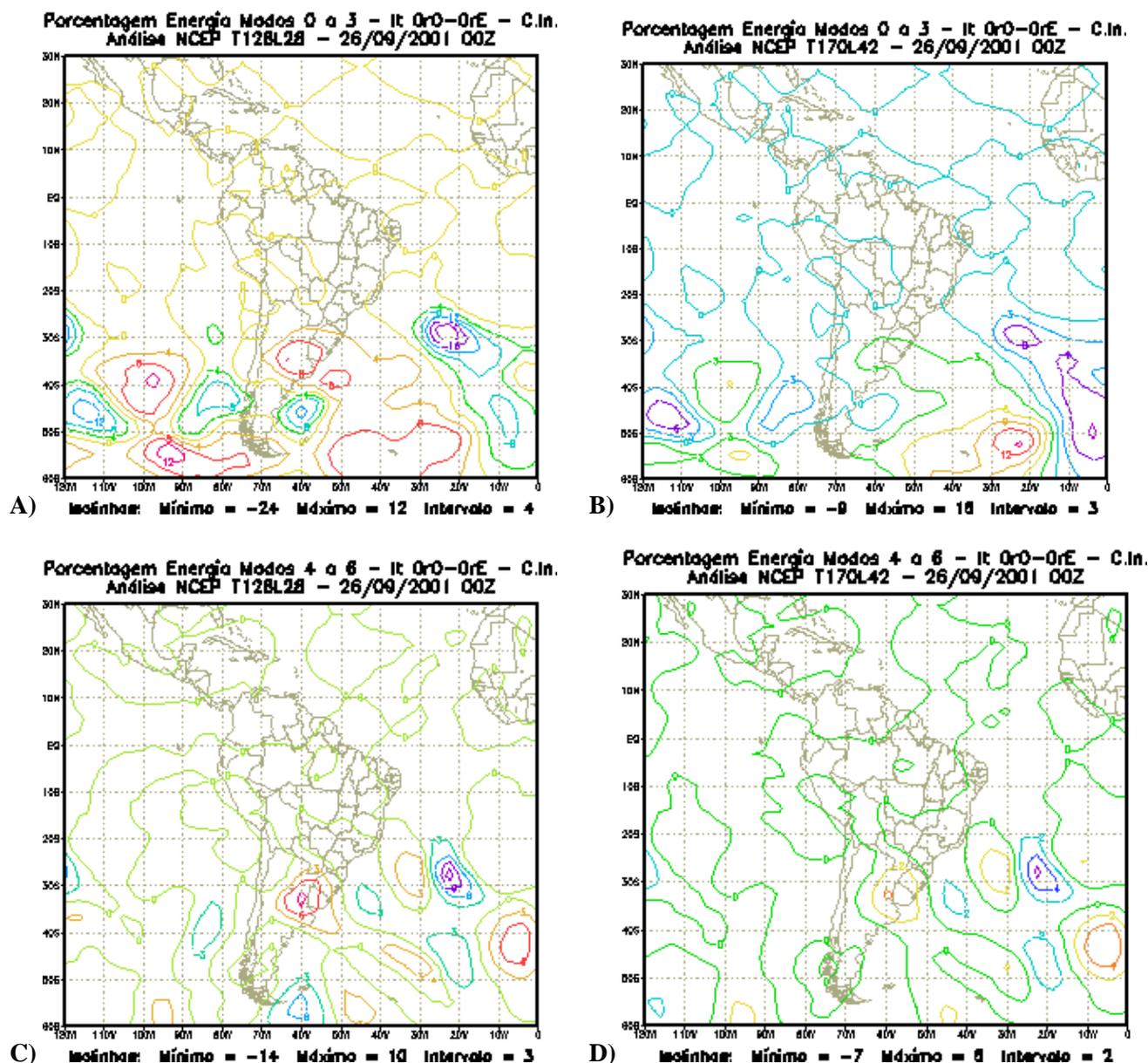


Figura 8 – Porcentagem de energia para a interação entre as ondas de Gravidade propagando-se para Oeste e para Leste para as duas primeiras categorias e resoluções T126L28 (A e C) e T170L28 (B e D).

CONCLUSÕES

Foram analisados o papel da resolução e a interação de energia em modos horizontais do ponto de vista observacional para um estudo de caso de passagem de frente fria sobre o Brasil. Uma maior resolução horizontal contribui em geral para uma análise mais detalhada dos campos, mostrando estruturas mais definidas na região da frente fria. Em geral a magnitude dos valores foram maiores para a resolução T126L28 do que para T170L28. Para a soma de todas as interações é encontrado um trem de ondas ao sul da América do Sul para a primeira categoria, com interferência construtiva a NE da alta em pressão no Pacífico (Bonatti, 2002) e a SO da alta sobre o Atlântico, e destrutiva sobre a baixa ao sul da América do Sul. Já a segunda categoria apresenta interferência destrutiva em toda a região tropical, e em latitudes médias alternância de interferência destrutiva, mais intensa, e construtiva, menos intensa. Para as interações individuais, modo a modo, são discutidos apenas os que têm magnitude relevante.

A interação entre os modos de Rossby e de Kelvin mostra a região tropical com interferência destrutiva, que é dominante em relação à soma da figura 1 para a segunda categoria, e atitudes médias apresenta interferência construtiva. Para este caso, os ventos zonais são intensos para os modos individualmente na região tropical, principalmente para a segunda categoria, e isto só é possível devido a essa interferência destrutiva nessa região. As interações entre os modos de Rossby e de Gravidade propagando-se para oeste apresentam uma intensa interferência negativa ao sul da América do Sul para a primeira categoria que é dominante em relação à soma da figura 1 e há uma região de interferência destrutiva ao norte da frente sobre o oceano. Nesta mesma região, a segunda categoria apresenta interferência construtiva ao norte e destrutiva ao sul da frente sobre o oceano. A interação entre os modos de Rossby e Gravidade propagando-se para leste mostra um máximo negativo, mais intenso que o caso anterior, para a primeira categoria, e situação reversa, também em relação ao caso anterior, ao longo da frente sobre o oceano para a segunda categoria, destacando-se um centro de interferência negativa sobre a região central da Argentina.

No caso da interação entre os modos de Kelvin e de Gravidade propagando-se para oeste, destaca-se a interferência construtiva no lado norte da frente sobre o oceano e destrutiva, menos intensa, no lado sul, em ambas as categorias apresentadas e um máximo positivo ao sul da América do Sul para a primeira categoria. O caso de interação entre os modos de Kelvin e de Gravidade com propagação para leste apresenta situação idêntica, porém totalmente em fase reversa, com a interferência destrutiva mais intensa. Já o caso de interação entre os modos de Gravidade para propagando-se para oeste e propagando-se para leste apresenta para ambas categorias uma tendência para interferência destrutiva, mais intensa, no lado norte da frente fria sobre o oceano e construtiva, menos intensa, no lado sul.

Esta é uma análise diagnóstica; mais estudos são necessários para se entender melhor as causas e conseqüências das características encontradas aqui.

AGRADECIMENTOS

O autor de beneficiou de discussões com o Dr. Pedro Leite da Silva Dias.

REFERÊNCIAS

- Andrade, R.A. **Análise das trocas de energia entre modos verticais e horizontais, em resposta à fontes tropicais de calor de grande escala.** São José dos Campos, SP, 1994, 331p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.
- Bonatti, J.P. **Análise observacional da partição de energia em modos verticais: estudo de caso de passagem de frente fria sobre o Brasil.** **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, *Submetido*, 2002.
- Gan, M.A. **Ciclogênese e ciclones sobre a América do Sul.** São José dos Campos, SP, 1992. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.
- Huffman, G.J.; Bolvin, D.T. **GPCP one-degree daily precipitation data set documentation.** [on line]. SSAI and Laboratory for Atmospheres, NASA, 13 February 2002. (ftp://precip.gfc.nasa.gov/pub/1dd/1DD_doc)
- Kasahara, A.; Puri, K. **Spectral representation of three dimensional global data by expansion in normal mode functions.** **Monthly Weather Review**, **109** (1): 37-51, 1981.
- Nunes, A.M.B. **Inicialização física em modelos de previsão de tempo e estudo de seus efeitos na partição de energia em modos verticais e horizontais nos trópicos e na América do Sul.** São José dos Campos, SP, 2002, no prelo. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.
- Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P. **A preliminary study of the observed vertical mode structure of the summer circulations over tropical South America** **Tellus**, **37** (2): 185-195, 1985.
- Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P. **Vertical mode decomposition and model resolution.** **Tellus**, **38a** (3): 205-214, 1986.

