

1. Publicação nº <i>INPE-3518-PRE/741</i>	2. Versão	3. Data <i>Maio, 1985</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DME/DPM</i>		Programa <i>TECLIM</i>	
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>MODOS NORMAIS</i> <i>MODELAGEM</i> <i>INICIAÇÃO</i>			
7. C.D.U.: <i>551.511.6</i>			
8. Título <i>USO DE MODOS NORMAIS DAS EQUAÇÕES PRIMITIVAS EM MODELAGEM ATMOSFÉRICA</i>		<i>INPE-3518-PRE/741</i>	10. Páginas: <i>24</i>
9. Autoria <i>Pedro Leite da Silva Dias</i> <i>José Paulo Bonatti</i>		11. Última página: <i>23</i>	
		12. Revisada por <i>Mary Toshie Kagano</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Marco Antonio Raupp</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <i>A forma linearizada das equações primitivas, com relação a um estado básico em repouso, pode ser dividida em equação da estrutura vertical e equações da estrutura horizontal (também conhecidas por equações da água rasa). A equação da estrutura vertical forma um problema de Sturm-Liouville e, portanto, suas autofunções (funções da estrutura vertical) forma um conjunto completo e ortogonal que pode ser determinado numericamente no caso geral. As equações da estrutura horizontal também permitem a determinação de auto-soluções completas e ortogonais de dois tipos básicos: ondas de gravidade rápidas e ondas rotacionais lentas (também conhecidas por ondas de Rossby-Haurwitz). Ligando estes dois tipos básicos de ondas, existem ondas mistas de Rossby-gravidade e ondas de Kelvin. Os modos normais podem ser determinados numericamente através da representação das equações primitivas em forma de diferenças finitas, permitindo assim uma comparação com os modos normais determinados de maneira exata. A completeza das autofunções permite a expansão em série das variáveis dependentes desta base. Portanto, o uso da tradicional base formada por harmônicos esféricos, no método espectral de solução das equações primitivas, pode ser substituído pela expansão nos modos normais das equações primitivas. Os modos normais das equações primitivas também têm sido utilizados no processo de iniciação de modelos de previsão de maneira a evitar a contaminação dos resultados pelas ondas de gravidade de pouco significado meteorológico. Modos normais também são utilizados na expansão e dados observados visando uma interpretação física dos resultados.</i>			
15. Observações <i>Trabalho apresentado no Iº Seminário de Modelagem Numérica do Mar, São José dos Campos, INPE, 12-14 de dezembro de 1984.</i>			

USO DE MODOS NORMAIS DAS EQUAÇÕES PRIMITIVAS
EM MODELAGEM ATMOSFÉRICA

Pedro Leite da Silva Dias

Departamento de Meteorologia
Instituto Astronômico e Geofísico
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

José Paulo Bonatti

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
C.P. 515 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

RESUMO

A forma linearizada das equações primitivas, com relação a um estado básico em repouso, pode ser dividida em equação da estrutura vertical e equações da estrutura horizontal (também conhecidas por equações da água rasa). A equação da estrutura vertical forma um problema de Sturm-Liouville e, portanto, suas autofunções (funções da estrutura vertical) formam um conjunto completo e ortogonal que pode ser determinado numericamente no caso geral. As equações da estrutura horizontal também permitem a determinação de auto-soluções completas e ortogonais de dois tipos básicos: ondas de gravidade rápidas e ondas rotacionais lentas (também conhecidas por ondas de Rossby-Haurwitz). Ligando estes dois tipos básicos de ondas, existem ondas mistas de Rossby-gravidade e ondas de Kelvin. Os modos normais podem ser determinados numericamente através da representação das equações primitivas em forma de diferenças finitas, permitindo assim uma comparação com os modos normais determinados de maneira exata. A completeza das autofunções permite a expansão em série das variáveis dependentes desta base. Portanto, o uso da tradicional base formada por harmônicos esféricos, no método espectral de solução das equações primitivas, pode ser substituído pela expansão nos modos normais das equações primitivas. Os modos normais das equações primitivas também têm sido utilizados no processo de iniciação de modelos de previsão de maneira a evitar a contaminação dos resultados

pelas ondas de gravidade de pouco significado meteorológico. Modos normais também são utilizados na expansão de dados observados visando uma interpretação física dos resultados.

ABSTRACT

The linearized form of the primitive equations about a basic state at rest can be separated in the vertical and horizontal dependence. The vertical structure functions can be determined numerically and constitute a system of complete and orthogonal functions. The horizontal structure equations allow the determination of two basic sets of eigenmodes: fast gravity waves and slow rotational waves (also known as Rossby-Haurwitz waves). There are also two types of waves linking the fast and slow domains: the mixed Rossby-gravity wave and Kelvin waves. Normal modes can also be determined for finite difference versions of the primitive equations, allowing for the comparison with the exact form. The completeness of the eigenfunctions associated with the vertical structure equations and the horizontal structure equations allow the expansion of the dependent variables in a series of such basis. Thus, instead of the regular spherical harmonic representation in the spectral model, the normal modes of the primitive equations can be used as basis. Normal modes of the primitive equations are also used in the initializations procedure of numerical prediction models in order to avoid contaminations by fast gravity waves. Normal modes are also used for expansion of observed data and physical interpretation of the results.

1. INTRODUÇÃO

Existem dois tipos básicos de métodos numéricos aplicados à resolução das equações diferenciais parciais que governam os movimentos da atmosfera: diferenças finitas e métodos espectrais. No primeiro caso são utilizadas aproximações das derivadas através de discretização obtida pelo desenvolvimento em série de Taylor, e no segundo caso cada variável dependente é representada por uma série de funções ortogonais e completas. No método espectral as derivadas são calculadas de forma analítica em termos de uma série. As equações de previsão podem ser transformadas num sistema

de equações diferenciais ordinárias para os coeficientes de expansão da série. Evidentemente, o sistema de equações diferenciais ordinárias é acoplado e não-linear no caso em que o sistema original é não-linear. Porém, sua resolução através do método da transformada de Orzag (1970) torna-o competitivo e mais preciso do que o tradicional método de resolução por diferenças finitas.

No caso da atmosfera é comum a utilização de harmônicos esféricos como base para o método espectral aplicado às equações primitivas (Silberman, 1954; Platzman, 1960, etc.). O uso generalizado de harmônicos esféricos até hoje pode ser facilmente explicado: (a) estas funções constituem os modos normais da equação da vorticidade barotrópica não-divergente no caso linear, (b) um mapeamento na esfera não é necessário de maneira que dificuldades com métodos de diferenças finitas nas vizinhanças do pólo ocorrem, e (c) a forma truncada das séries satisfazem os critérios de conservação de energia e enstrofia de maneira a garantir a estabilidade da solução mesmo no caso não-linear. A razão (a) garante que a solução será exata pelo menos no caso barotrópico não-divergente linear.

Entretanto, um modelo barotrópico não-divergente é uma aproximação razoavelmente restritiva da atmosfera real e portanto pode-se esperar que em situações genéricas a solução seja profundamente diferente e que a expansão em harmônicos esféricos não seja eficiente. Este argumento é de fato razoável, e nestas condições poderiam ser utilizados outros tipos de funções-base como, por exemplo, polinômios de Chebyshev (Schubert et alii, 1984). Porém, assim como os harmônicos esféricos são as autofunções da equação da vorticidade barotrópica linearizada, pode-se pensar na utilização dos modos normais de modelos atmosféricos menos restritivos. Um procedimento ao longo destas linhas foi desenvolvido por Kasahara (1977), no qual as autofunções das equações de um modelo barotrópico divergente (funções de Hough) são utilizadas como base.

Na próxima seção será discutida a formulação dos modos normais das equações primitivas, suas características temporais e espaciais no que se refere à estrutura tridimensional dos modos. Na última seção serão discutidas algumas aplicações encontradas na literatura especializada.

2. MODOS NORMAIS

As equações primitivas em coordenadas esféricas na horizontal e sigma na vertical ($\sigma = p/p_s$), onde p é a pressão atmosférica e p_s é a pressão na superfície, constituem o sistema mais genérico de variáveis em modelos atmosféricos (Haltiner and Williams, 1980). Após proceder a linearização das equações considerando um estado básico em repouso, com perfil de temperatura apenas em função de sigma, o sistema original torna-se separável em suas partes vertical e horizontal (Kasahara and Puri, 1981) dadas, respectivamente, por

$$\frac{d}{d\sigma} \left(\frac{\sigma g}{R\bar{s}} \frac{d\psi_n}{d\sigma} \right) + \frac{1}{Dn} \psi_n = 0, \quad (1)$$

com as seguintes condições de contorno:

$$\frac{d\psi_n}{d\sigma} + \frac{\xi_\infty}{T_\infty} \psi_n = 0 \quad \text{em } \sigma = 1, \quad (2a)$$

$$\frac{d\psi_n}{d\sigma} = 0 \quad \text{em } \sigma = 0, \quad (2b)$$

e

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} - \text{sen}\phi v_n + \frac{\gamma n}{\cos\phi} \frac{\partial h_n}{\partial \lambda} = 0, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial v_n}{\partial t} + \text{sen}\phi u_n + \gamma n \frac{\partial h_n}{\partial \phi} = 0, \quad (3b)$$

$$\frac{\partial h_n}{\partial t} + \frac{\gamma n}{\cos\phi} \frac{\partial u_n}{\partial \lambda} + \frac{\gamma n}{\cos\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (v_n \cos\phi) = 0, \quad (3c)$$

onde g é a aceleração da gravidade; R é a constante do ar seco; $\xi = (RT_0/C_p \sigma) - (dT_0/d\sigma)$; C_p é o calor específico do ar seco à pressão constante; $T_0(\sigma)$ é a temperatura do estado básico; ξ^∞ e T_∞ são os valores de ξ e T na superfície ($\sigma = 1$); D_n é a profundidade equivalente correspondente ao n -ésimo modo vertical e ψ_n representa a sua estrutura vertical; λ é a longitude; θ é a latitude; t é o tempo (tornado adimensional pelo fator 2Ω); Ω é a velocidade angular de rotação da Terra; u_n e v_n são as estruturas horizontais do vento zonal e meridional, respectivamente, correspondentes ao n -ésimo modo vertical (escalados por $(gD_n)^{1/2}$); $h_n = z_n + RT_0(\sigma) \ln P_s/gD_n$; z_n é a estrutura horizontal da altura geopotencial correspondente ao n -ésimo modo vertical (também escalado por D_n).

A equação 1, juntamente com as condições de contorno 2 e 3, forma um problema de Sturm-Liouville (Kasahara and Puri, 1981). Esta equação pode ser resolvida por métodos analíticos em casos particulares com $T_0(\sigma)$ constante ou dado por uma função linear (Jacobs and Wiin-Nielsen, 1966). No caso geral, a equação da estrutura vertical pode ser resolvida por métodos numéricos baseados na formulação em diferenças finitas na vertical (Kasahara, 1976; Tokioka, 1978) ou por um método galerkiniano (Kasahara, 1984). O exemplo mostrado na Figura 1 utiliza o esquema de diferenças finitas C de Tokioka (1978), com perfil de temperatura dado pela sondagem típica da região tropical sobre a América do Sul.

Os modos verticais mostrados na Figura 1 indicam a presença de um modo com estrutura quase constante com altura, de mesmo sinal, usualmente denominado modo externo, com altura equivalente de 9844m. Este modo é também frequentemente denominado modo barotrópico. Os modos seguintes têm estrutura vertical sucessivamente mais complexa com maior número de zeros, caracterizando portanto estados baroclínicos de estrutura mais complexa; estes modos são chamados modos internos das equações primitivas. Em particular pode-se notar que, no caso apresentado na Figura 1, o 4º modo interno apresenta altura equivalente da ordem de 213m, com estrutura vertical correspondente a uma única reversão de sinal na troposfera e outra na baixa estratosfera. Logo, como o vento tem esta mesma estrutura vertical, segue-se que este modo representa um sistema atmosférico com um ciclone em baixos níveis, um anticiclone na alta troposfera e circulação ciclônica novamente na baixa estratosfera. Em termos de temperatura, ter-se-ia um núcleo quente

na média troposfera com uma anomalia fria na região da tropausa (visto que a temperatura está relacionada com a derivada vertical da estrutura vertical, via equação hidrostática).

A sensibilidade dos modos verticais à localização da condição de fronteira no topo e a resolução vertical do esquema de diferenças finitas, foram estudadas por Silva Dias e Bonatti (1984). A sensibilidade foi estudada em função da decomposição de dados observados em modos verticais dada a completude das auto-soluções dos problemas de Stürm-Liouville (Equação 2). principal resultado consiste na fraca dependência da energética da projeção em função da altura equivalente; entretanto, em termos da ordem do modo vertical ocorre grande variação.

As equações da estrutura horizontal (4-6) são também conhecidas por equações da água rasa (Haltiner and Williams, 1980). Existem dois métodos básicos para a determinação dos modos normais das equações da água rasa: por diferenças finitas e por métodos galerkinianos. No primeiro caso as equações são discretizadas e o problema de determinação dos modos normais se restringe à solução de um problema de autovalor-autovetor matricial. Outra possibilidade consiste em usar o método proposto por Kasahara (1976) que é uma simplificação do proposto por Longuet-Higgins (1968). Neste caso, os modos normais podem ser determinados através da expansão das variáveis dependentes em série de polinômios associados de Legendre. O sistema de equações para os coeficientes de expansão forma um problema de autovalor e autovetor, cuja solução permite o conhecimento da frequência do modo normal e de sua estrutura meridional em função do número de onda zonal, para cada altura equivalente D_n . Os detalhes da derivação da solução dos modos normais das equações da água rasa (também conhecidas por funções de Hough) podem ser encontrados em Bonatti et alii (1983).

Na Figura 2 é apresentada a dependência da frequência de oscilação no tempo (ν) em função do número de onda zonal (s) e do índice meridional (l) para $E_n=10$ e $E_n=1000$ (onde $E_n = \frac{4a^2 \Omega^2}{gD_n}$ ou, equivalentemente, $D_n = 8800m$ e $D_n = 88m$, respectivamente); na Figura 2 s negativo significa propagação para oeste. Fica evidente na Figura 2 a separação dos modos normais com relação à frequência alta (ondas de gravidade) e modos de baixa frequência (Rossby/Haurwitz). Existem também modos que unem os dois regimes (ondas mis

tas de Rossby-gravidade e de Kelvin). Também é evidente o achatamento das frequências a medida que a altura equivalente diminui, o que implica uma certa dificuldade na separação dos modos por frequência.

Em Bonatti et alii (1983) são mostradas as estruturas horizontais dos modos normais das equações da água rasa. Apenas serão discutidas a seguir as estruturas obtidas para ondas de Rossby (número de onda zonal $s=1$, modo meridional $\ell=1$ e $E_n=10$ conforme mostrado na Figura 3 e uma onda de Kelvin com $s=1$, $\ell=0$ e $E_n=10$ (Figura 4)). Nota-se na Figura 3 um evidente balanço geostrófico entre o campo do geopotencial e do vento, enquanto a onda de Kelvin é caracterizada pela ageostrofia da componente meridional da velocidade (praticamente nula neste caso). A medida que a altura equivalente diminui os modos horizontais vão ficando confinados à região equatorial (Matsuno, 1966). Ondas de gravidade são caracterizadas por uma ausência completa de equilíbrio entre os campos de massa e de vento; entretanto, a onda mista de Rossby/gravidade (Figura 5) apresenta um comportamento dual visto que em altas latitudes o vento é aproximadamente geostrófico, enquanto na região equatorial a componente meridional da velocidade é máxima, cruzando o Equador e isoipsas.

Os modos normais das equações da água rasa também podem ser determinados usando a aproximação em forma de diferenças finitas, neste caso o problema se resume à determinação de um problema de autovalor (frequência) e autovetor (estrutura meridional) para cada número de onda zonal, através da solução de um sistema matricial de ordem $3 \times N$, onde N é o número de latitudes na forma discretizada (Dickinson and Williamson, 1972). O tratamento discretizado também permite uma análise de estabilidade numérica linear do método de discretização e uma análise de eventuais modos normais computacionais nos modelos globais (Williamson, 1976). Uma aplicação interessante do método de diferenças finitas consiste na determinação dos modos normais em modelos de área limitada; neste caso as condições de fronteira podem ser incorporadas na análise de estabilidade, e seu efeito na deturpação na estrutura dos modos normais globais pode ser avaliado por comparação. Um exemplo deste tipo de aplicação pode ser encontrado em Bonatti e Silva Dias (1983a) numa aplicação às equações da água rasa com condições de fronteira periódicas no sentido zonal e vento meridional nulo nos bordos norte e sul (no Equador e a 55°S , respectivamente).

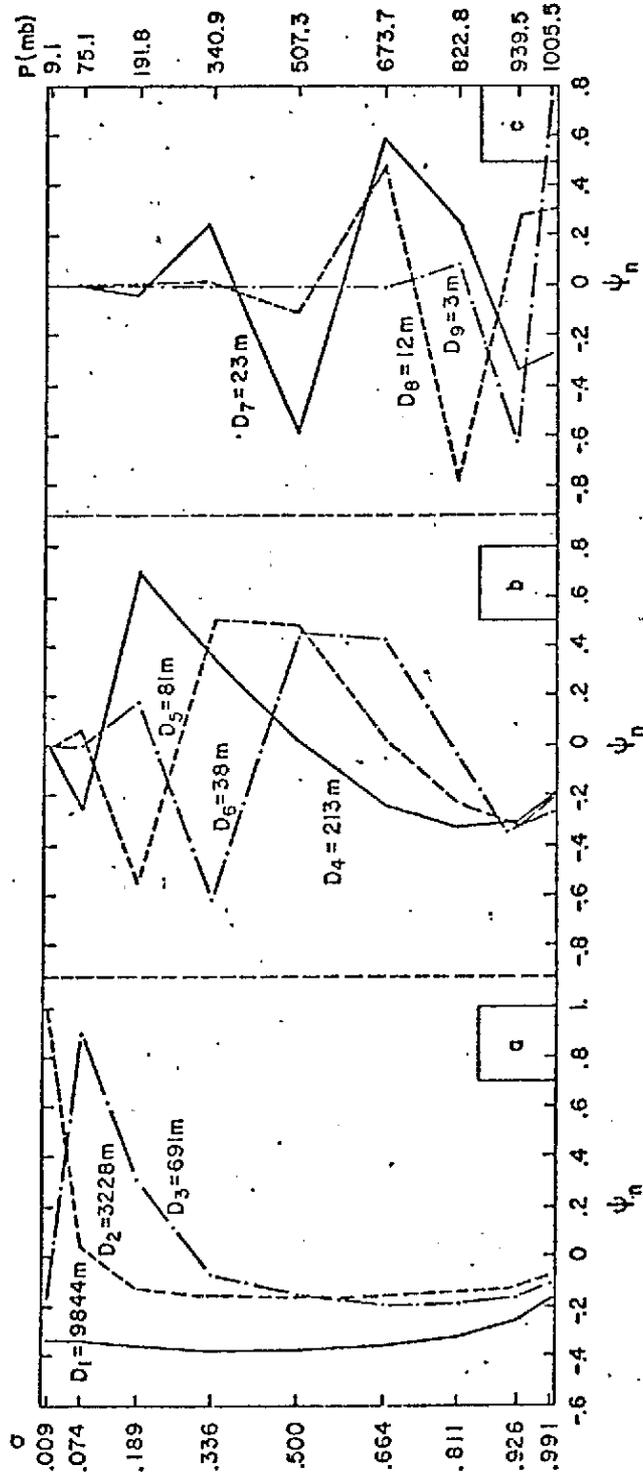


Figura 1 . Estrutura vertical das autofunções ψ_n correspondentes a altura equivalente D_n .

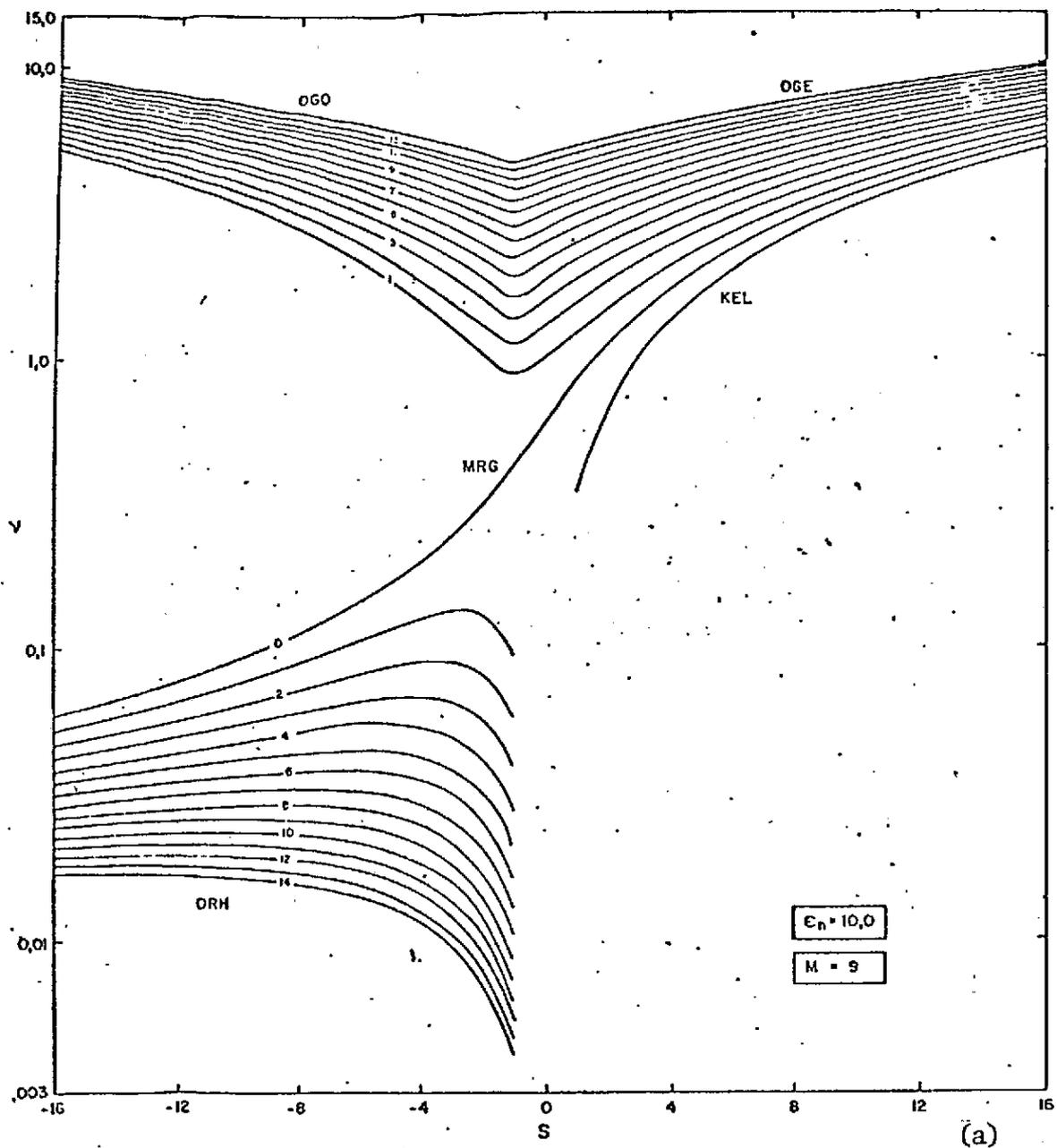


Figura 2 . Freqüência de oscilação no tempo (ν) em função do número de onda zonal (s) e do índice meridional (ℓ) para: (a) $E_n=10$ e (b) $E_n=1000$.

(continua)

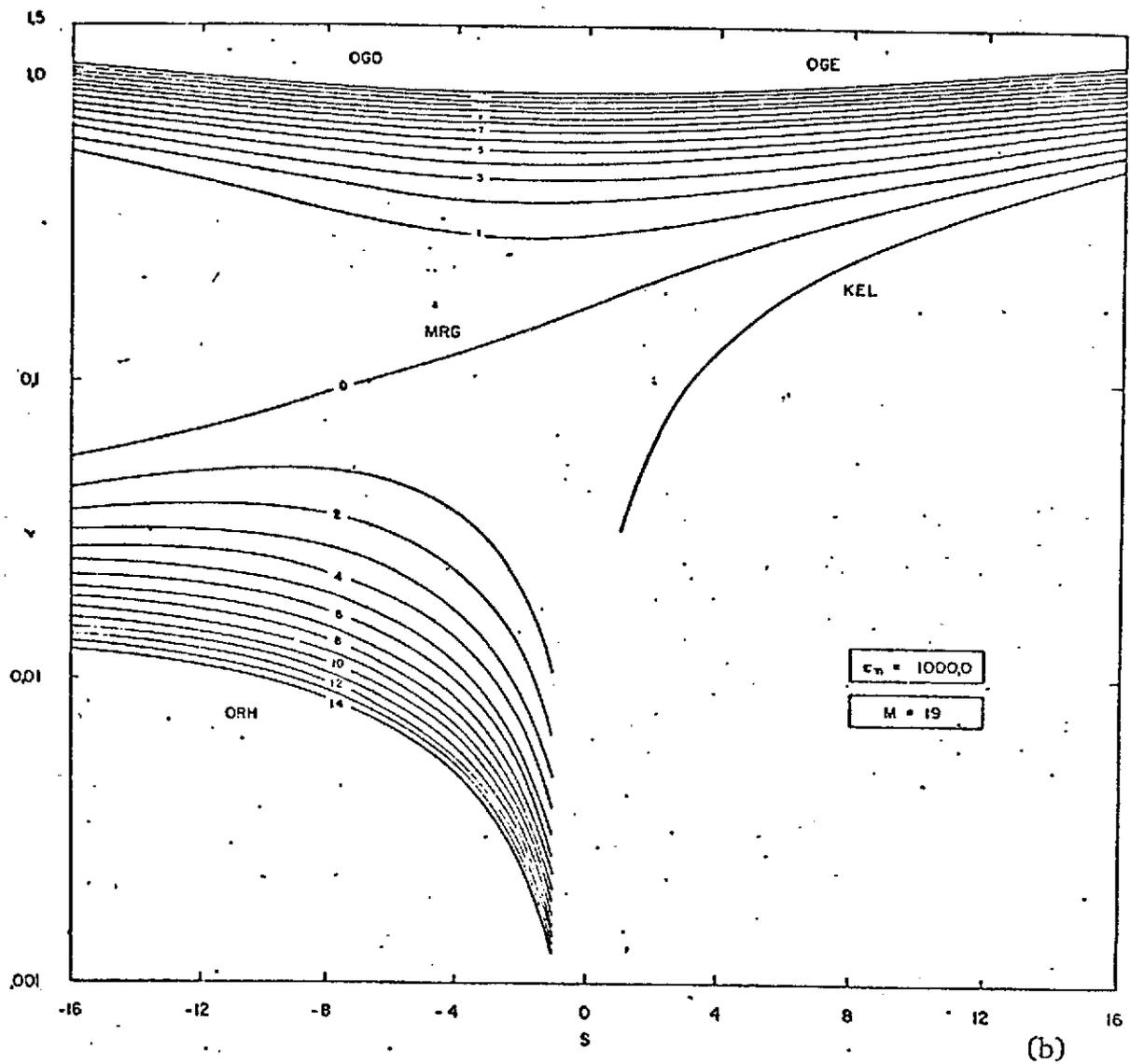


Figura 2 - Conclusão.

DRM EN=10. S=1. L=1. R1=-0.094831

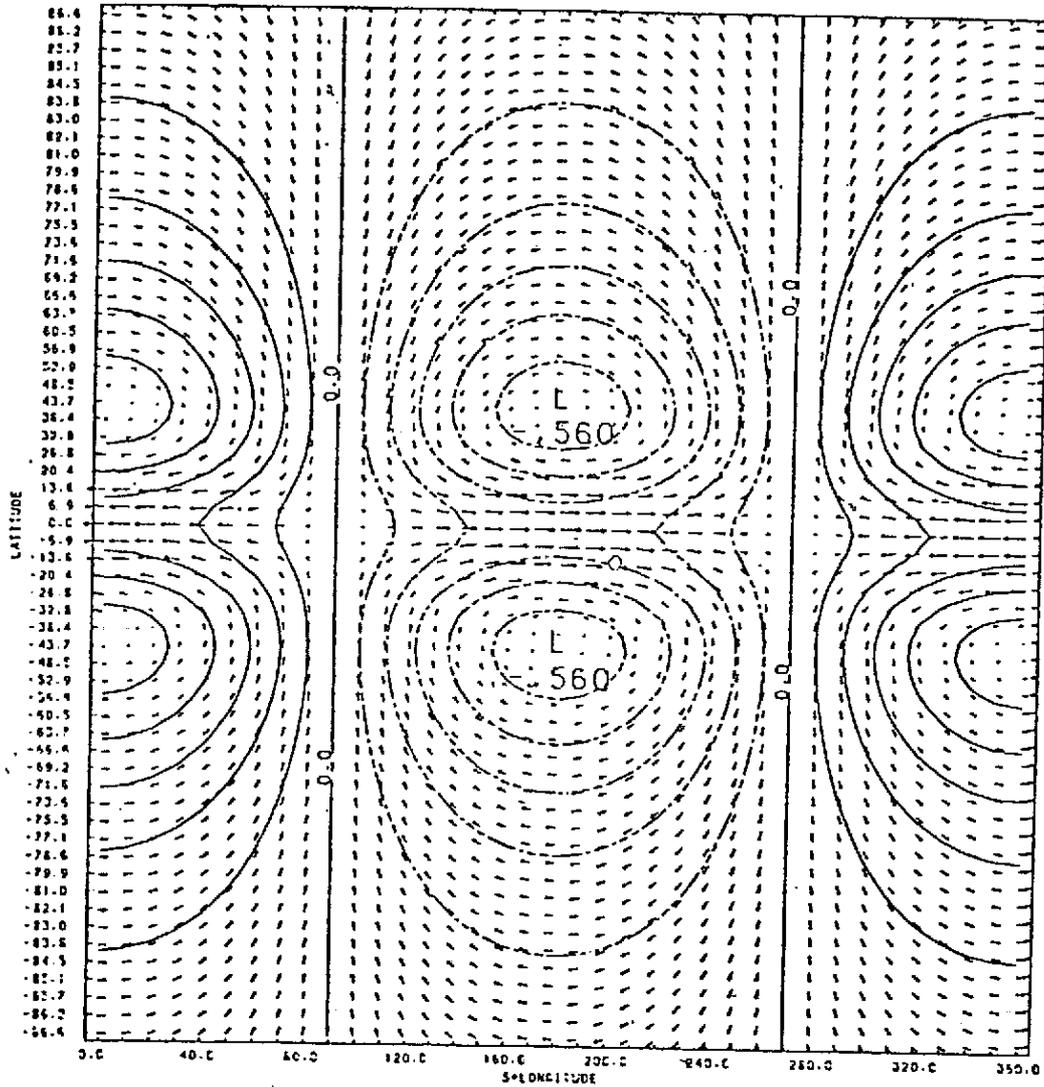


Figura 3 . Onda de Rossby para $s=1$, $l=1$ e $E_n=10$.

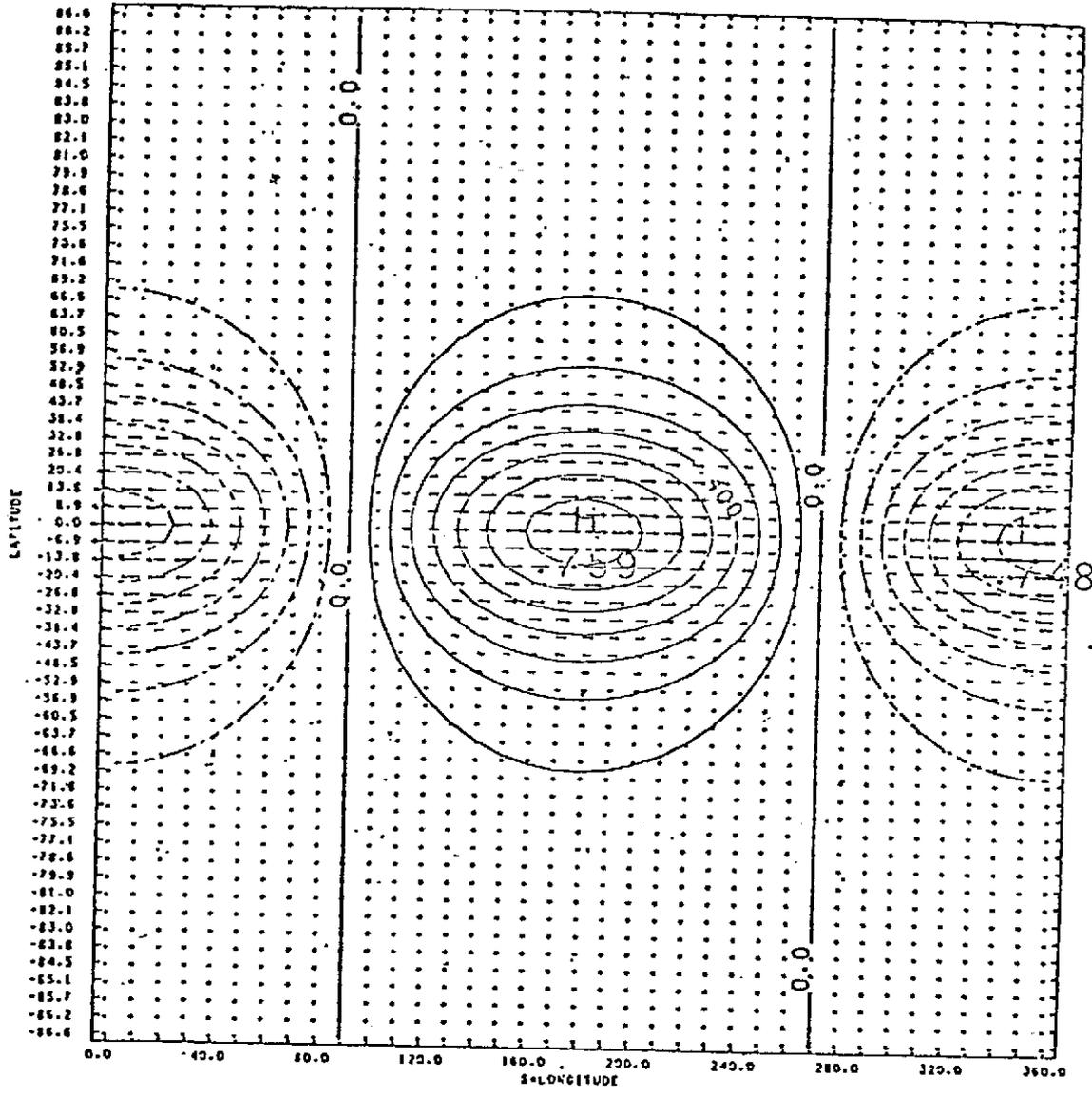


Figura 4 . Onda de Kelvin para $s=6$, $\ell=0$ e $E_n=10$.

WPCO (M=10, S=1, L=0, N)= -0.413887

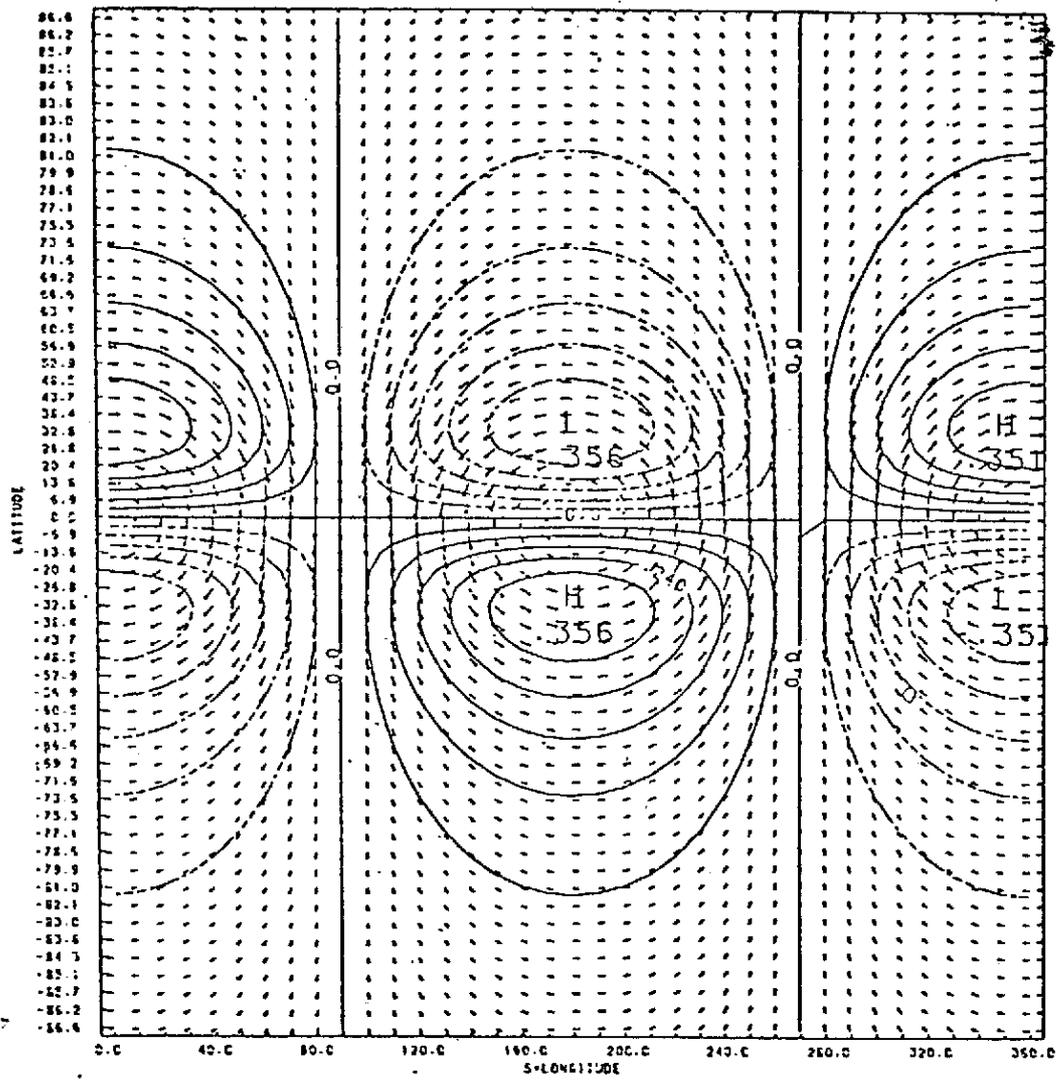


Figura 5 . Onda mista Rossby-gravidade para $s=1$, $l=0$ e $E_n=10$.

A Figura 6 mostra o diagrama de dispersão, associado ao caso estudado por Bonatti e Silva Dias (1983a), com altura equivalente correspondente ao modo externo. Como a condição de fronteira norte foi aplicada exatamente ao Equador, com componente meridional nula do vento, somente os modos simétricos (na componente zonal e no geopotencial) podem ser determinados. Ao comparar a relação de dispersão na esfera e a determinada pelo método de Kasahara (1976) (Figura 2), com a Figura 6 fica evidente o efeito da discretização. Em particular pode-se notar que a frequência de ondas de gravidade não aumenta monotonicamente com o número de onda zonal, o mesmo acontecendo com relação à ordem no número de onda meridional (relacionado com a complexidade da estrutura meridional). Ondas de Rossby também são afetadas pela discretização, conforme indicado pela inversão do comportamento da frequência com relação à ordem do modo meridional e pelo aparecimento de modos espúrios (linhas tracejadas na Figura 6 com propagação para leste, i.e., número de onda negativo). Um efeito importante da condição de fronteira utilizada refere-se ao aparecimento de uma onda com propagação para oeste com amplitude máxima ao longo da fronteira sul do modelo. Trata-se de uma onda do tipo Kelvin, análoga ao tipo regular que se propaga para leste com amplitude máxima na região equatorial (indicada pelo índice $l=-1$ na Figura 6). Em Bonatti e Silva Dias (1983a) são discutidas as estruturas meridionais dos modos do modelo discretizado e o aparecimento de modos computacionais com estrutura do tipo $2\Delta y$, onde Δy representa o espaçamento meridional da grade.

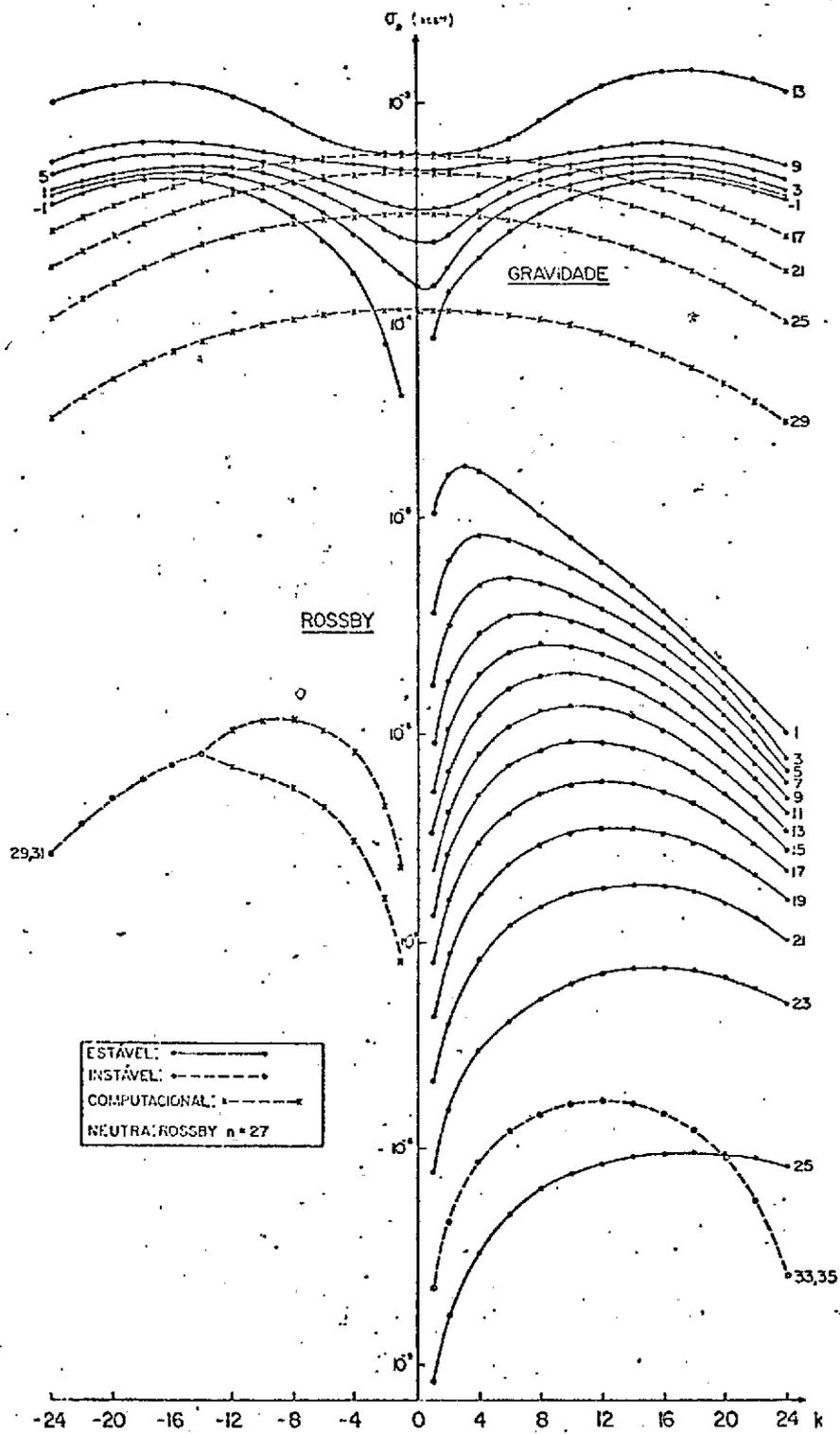


Figura 6 - Frequência de oscilação no tempo (σ_r) em função do número de onda zonal (k) e do índice meridional (l) para $D_n=5500m$.

3. APLICAÇÕES

A aplicação dos modos normais na resolução das equações primitivas por métodos espectrais foi apresentada na introdução como motivação para a determinação dos modos (Kasahara, 1977); a sua utilização na análise da estabilidade numérica e efeitos de fronteira é outra aplicação importante. Entretanto, os modos normais das equações primitivas encontraram recentemente uma importante aplicação na iniciação de modelos de previsão numérica de tempo. É evidente que a determinação dos modos normais das equações primitivas na forma dos dois tipos básicos de ondas (gravidade e de Rossby/Haurwitz) depende da linearidade das equações com relação a um estado básico em repouso. A inclusão de cisalhamento meridional e vertical impossibilitam a separação de variáveis e não existem mais os modos verticais (externo e interno), assim como os modos horizontais clássicos. Porém, o conceito de modos clássicos é ainda muito útil na interpretação física da solução das equações não-lineares (Kasahara, 1977; Machenhauer, 1977; Leith, 1980) e na análise dos movimentos atmosféricos observados (Kasahara, 1976; Kasahara and Puri, 1981; Silva Dias and Paegle, 1984; Silva Dias and Bonatti, 1985).

As funções de Hough formam um conjunto ortogonal completo e portanto, pode-se expandir as variáveis dependentes (u, v, ϕ) das equações da água rasa numa série da seguinte forma:

$$\xi(\lambda, \phi, t) = \sum_{s, \ell, r} C_{s, \ell, r}(t) \xi_{s, \ell, r}(\phi) e^{is\lambda}, \quad (4)$$

onde $C_{s, \ell, r}(t)$ são os coeficientes de expansão e $\xi(\lambda, \phi, t)$ é o vetor de estado que representa simultaneamente as variáveis (u, v, ϕ), e r representa o tipo de onda (Bonatti e Silva Dias 1983b). Em Kasahara (1977) é discutida a aplicação da Expansão 4 às equações originais em forma não-linear. Substituindo as séries da forma dada pela Equação 4 para as variáveis dependentes e para os termos não-lineares e forçantes e utilizando as propriedades de ortogonalidade, encontra-se um sistema de equações diferenciais acopladas para os coeficientes de expansão dado por:

$$\frac{d}{dt} C_{s, \ell, r}(t) + iv_{s, \ell, r} C_{s, \ell, r}(t) = \eta_{s, \ell, r}(t) + f_{s, \ell, r}(t). \quad (5)$$

Os termos $\eta_{s,\ell,r}$ e $f_{s,\ell,r}$ dependem de todos os $C_{s,\ell,r}$ e, portanto, é conveniente utilizar o método da transformada de Eliassen et alii (1970), isto é, a cada iteração no tempo, na integração numérica da Equação 4, volta-se do espaço de fase para o espaço físico a fim de obter os termos não-lineares por cálculo direto.

A iniciação por modos normais pode ser feita por dois processos básicos: iniciação linear e não-linear. No procedimento linear, as observações de um estado da atmosfera num determinado instante são projetadas nos modos normais rotacionais (i.e., modos lentos) e sua projeção nas ondas de gravidade são ignoradas. Entretanto, este procedimento não garante que ondas de gravidade permaneçam com pequena amplitude no decorrer da integração, visto que há uma tendência à sua geração pelos termos não-lineares e forçantes (Machenhauer, 1977). Este é exatamente o fundamento da iniciação não-linear por modos normais.

O método de iniciação não-linear por modos normais supõe que o coeficiente de expansão das ondas de gravidade seja obtido pela condição de equilíbrio entre os termos de geração não-linear, forçante e linear, isto é:

$$C_{s,\ell,g}^{(0)} = \frac{\eta_{s,\ell,g}^{(0)} + f_{s,\ell,g}^{(0)}}{iv_{s,\ell,g}}, \quad (6)$$

onde g significa a componente gravitacional. Neste caso é mantida a componente rotacional do movimento em função das observações. O método tem sido amplamente utilizado pelos centros operacionais de previsão de tempo com grande sucesso. Um exemplo da técnica de iniciação não-linear por modos normais foi mostrado por Bonatti e Silva Dias (1983b), com a inclusão de uma forçante no campo da massa.

Entretanto, notou-se que grandes alterações podem ser provocadas nos dados originais com a manutenção da componente rotacional. Para solucionar o problema, foi proposto um esquema de iniciação variacional por modos normais (Daley, 1978). A idéia básica consiste em permitir que a componente rotacional seja alterada no processo de iniciação, desde que o erro médio quadrático entre o campo observado e o obtido após a iniciação seja o

menor possível. É possível, neste caso, fornecer um peso mais importante a determinadas variáveis em certas regiões. Assim, na região tropical, onde as informações de vento costumam ser mais significativas (via satélite), menor peso é dado às observações do campo de massa (temperatura). O reverso em geral ocorre em latitudes mais altas. Evidentemente, é também possível dar maior importância às observações coletadas em regiões ricas de dados confiáveis.

Os resultados obtidos por iniciação por modos normais foram revistos por Daley (1981). Apesar do grande sucesso obtido nos centros operacionais de previsão de tempo, ainda persistem alguns problemas importantes. Em particular, as taxas de precipitação continuam abaixo das expectativas. A causa deste problema parece estar relacionada com: (i) inadequação do campo inicial da umidade e (ii) deficiência do processo de iniciação com relação à inclusão de processos diabáticos. A causa (ii) parece ter importância muito significativa na região tropical, visto que lá ocorre grande liberação de calor latente. O problema parece estar relacionado com a nossa incapacidade atual de definir, de maneira suficientemente precisa, o campo da precipitação e sua partição vertical de calor. Muito trabalho ainda parece ser necessário na definição de técnicas de estimativa de precipitação por satélite (aplicáveis às regiões remotas sobre continentes e oceanos) e na parametrização da convecção úmida.

A aplicação dos modos normais na expansão de dados observados vem permitindo uma interpretação dos movimentos atmosféricos complexos em função de uma base simples (modos rotacionais e de gravidade). Os estudos observacionais também permitem a avaliação diagnóstica da importância relativa dos termos que aparecem nas equações primitivas em formas mais completas, o que auxilia a análise e o desenvolvimento de sistemas de iniciação mais complexos. Os resultados de Kasahara (1976) referem-se unicamente à expansão em funções de Hough das análises de 500mb do National Meteorological Center dos Estados Unidos (NMC). Foi verificada a dominância dos modos rotacionais sobre os modos gravitacionais. Kasahara e Puri (1981) completam a expansão utilizando os modos verticais das equações primitivas; a análise da partição vertical de energia é feita de forma global e foi observado uma estrutura bimodal no espectro vertical, com picos de energia no modo externo e num modo interno com altura equivalente da ordem de 250m. Silva Dias e

Bonatti (1985) discutem a partição da energia em modos verticais sobre a região tropical da América do Sul, durante um período convectivamente ativo. A dominância do modo interno de altura equivalente de 250m é associada à atividade convectiva profunda. Silva Dias e Paegle (1984) extrapolam os resultados anteriores para o globo inteiro, calculando também a decomposição em funções de Hough de cada estrutura horizontal associada aos modos verticais dominantes.

4. COMENTÁRIOS GERAIS

Os resultados dos estudos observacionais de decomposição de dados, modelagem do impacto de fontes de calor na iniciação, e os resultados práticos obtidos nos centros mundiais de previsão de tempo sugerem algumas linhas básicas de pesquisa. Os seguintes pontos parecem merecer uma especial atenção:

- (a) Comparação da estrutura modal observada com base em dados em pontos de grade com aquela determinada por modelos de previsão globais. O espectro vertical também deve ser obtido através de observações diretas de radiossondagem, evitando desta maneira a utilização de análises dependentes de modelos.
- (b) Comparação da estrutura modal de diferentes esquemas de análise objetiva (NMC, ECMWF, GFDL, GLASS, etc.), com especial atenção para os modos rápidos.
- (c) Impacto de fontes de calor na estrutura modal usando modelos mais realísticos em termos de parametrização da convecção. A influência de fontes de calor na iniciação é algo fundamental para modelos de previsão, válidos para a região tropical.
- (d) Identificação dos modos preferenciais em situações anômalas, tais como as observadas durante anos de El Niño. A análise deve incluir a determinação das escalas verticais preferenciais e contribuições locais em termos de componentes rápidas e lentas.

- (e) Diagnóstico da transição de anomalias baroclínicas na região tropical para anomalias barotrópicas em latitudes mais altas. (Paegle and Baker, 1983; Wallace and Gutzler, 1981; Lim and Chang, 1983).

Os resultados de (a) e (b) devem contribuir para a avaliação da partição de energia realmente observada na atmosfera devido às incertezas dos esquemas de análise objetiva. Os experimentos na linha (c) podem contribuir para um melhor entendimento do processo de liberação de calor latente na atmosfera e seu impacto na circulação em grande escala. A análise de anomalias climáticas em termos de modos normais parece ter grande potencial por ter a base de expansão uma interpretação física clássica. Este é o objetivo dos itens (d) e (e). Em particular, a transição das estruturas baroclínicas associadas a fontes de calor nos trópicos (Silva Dias et alii, 1983; Lim and Chang, 1983) para perturbações barotrópicas em latitudes mais altas no período de inverno, podem ser exploradas em termos da interação não-linear entre modos verticais. A escala de tempo associada a este tipo de interação é algo fundamental para a questão da previsibilidade de sistema de latitudes médias (Paegle and Baker, 1983).

5. AGRADECIMENTOS

Grande parte das discussões apresentadas no presente trabalho são referentes a trabalhos já publicados pelos autores em forma de relatórios externos no INPE ou revistas especializadas. Em particular, agradecemos os comentários de Antonio D. Moura, V.B. Rao, Akira Kasahara e Vernon Kousky. Agradecemos também à FINEP que contribuiu para a execução da pesquisa sobre modos normais, através de auxílios para o INPE e para o IAG/USP. Em particular P.L. Silva Dias agrade também à FAPESP que permitiu uma visita ao National Center for Atmospheric Research em Boulder, Colorado em janeiro-fevereiro de 1984.

6. REFERÊNCIAS

BONATTI, J.P.; SILVA DIAS, P.L.; MOURA, A.D.. *Funções de Hough: teoria e utilização*. São José dos Campos, INPE, abr. 1983. 271p. (INPE-2697-RPE/429).

- BONATTI, J.P.; SILVA DIAS, P.L.. *Estabilidade numérica de um modelo barotrópico divergente discreto de área limitada*. São José dos Campos, INPE, abr. 1983a, 70p. (INPE-2703-RPE/430).
- BONATTI, J.P.; SILVA DIAS, P.L. *Um modelo espectral global com iniciação por modos normais*. São José dos Campos, INPE, mar. 1983b, 120 p. (INPE-2674-RPE/428).
- DALEY, R.. Variational non-linear normal mode initialization. *Tellus*, 39(3):201-218, June 1978.
- DALEY, R.. Normal mode initialization. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 19(3):450-468, Aug. 1981.
- DICKINSON, R.E.; WILLIAMSON, D.L.. Free oscillations of a discrete stratified fluid with applications to numerical weather prediction. *Journal of Atmospheric Sciences*, 29(5):623-640, May 1972.
- ELIASSEM, E.; MACHENHAUER, B.; RASMUSSEN, E. *On a numerical method for integration of the hydrodynamic equations with a spectral representation of the horizontal fields*. Copenhagen, Copenhagen University, Institute of Theoretical Meteorology, 1970. 35p. (Report nº 2).
- HALTINER, G.J.; WILLIAMS, R.T.. *Numerical prediction and dynamic meteorology*. New York, John Wiley & Sons, 1980, 477pp.
- JACOBS, S.L.; WIIN-NIELSEM, A.. On the stability of a barotropic basic flow in a stratified atmosphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 23(6):682-687, Nov. 1966.
- KASAHARA, A.. Normal modes of ultralong waves in the atmosphere. *Monthly Weather Review*, 104(6):669-690, June 1976.
- KASAHARA, A.. Numerical integration of the global barotropic primitive equations with harmonic expansions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 34(5):687-701, May 1977.
- KASAHARA, A.. The linear response of a stratified atmosphere to tropical forcing. *Journal of Atmospheric Sciences*, 41(14):2217-2237, July 1984.
- KASAHARA, A.; PURI, K.. Spectral representation of three dimensional global data by expansion in normal modes. *Monthly Weather Review*, 109(1):37-51, Jan. 1981.

- LEITH, C. Non-linear normal mode initialization and quasi-geostrophic theory. *Journal of Atmospheric Sciences*, 37(5):958-968, May 1980.
- LIM, H.; CHANG, C.P. Dynamics of teleconnections and Walker Circulations forced by equatorial heating. *Journal of Atmospheric Sciences*, 40(8): 1897-1915, Aug. 1983.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. The eigenfunctions of Laplace's tidal equations over a sphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 262(A1132):511-607, Feb. 1968.
- MACHENHAUER, N. On the dynamics of gravity oscillations in a shallow water model with applications to normal mode initializations. *Beitrag zur Physik der Atmosphäre*, 50:253-271, 1977. Apud Bonatti e Silva Dias (1983b).
- MATSUNO, T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 44(1):25-43, Feb. 1966.
- ORZAG, S.A. Transform method for the calculation of vector coupled sums: Applications to the spectral form of the vorticity equations. *Journal of Atmospheric Sciences*, 27(6):890-895, Sept. 1970.
- PAEGLE, J.; BAKER, W.E. The influence of the tropics on the prediction of ultralong waves. Part II: Latent heating. *Monthly Weather Review*, 111(7):1356-1371, July, 1983.
- PLATZMAN, G.W. The spectral form of the vorticity equations. *Journal of Meteorology*, 17(6):635-644, Dec. 1960.
- SCHUBERT, W.H.; FULTRON, S.; DeMARIA, N.. A Chebyshev spectral method for boundary-layer models. *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology*; Series A, 33(2-3):117-126, 1984.
- SILBERMAN, I.S. Planetary waves in the atmosphere. *Journal of Meteorology*, 11(1):27-34; Feb. 1954.
- SILVA DIAS, P.L. SCHUBERT, W.H.; DeMARIA, M.. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. *Journal of Atmospheric Sciences*, 40(11):2689-2707, Nov. 1983.
- SILVA DIAS, P.L.; BONATTI, J.P.. *Vertical mode decomposition and model resolution*. São José dos Campos, INPE, Aug. 1984, 27p. Submetido ao *Tellus*, (INPE-3230-PRE/580).

- SILVA DIAS, P.L.; PAEGLE, J.N.. The partition of energy associated with tropical heat sources. In : WORKSHOP ON FGGE RESULTS, 1. Woodshole, USA, July 1984. Washington, D.C., National Science Foundation, 1984, p.90-105.
- SILVA DIAS, P.L.; BONATTI, J.P.. A preliminary study of the observed vertical mode structure of the summer circulation over tropical South America. Accepted for publications in *Tellus*, 1985. Publicado como pre-print nº INPE-2914-PRE/426.
- TOKIOKA, T. Some considerations on vertical differencing. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 56(2):98-111, Apr. 1978.
- WALLACE, J.M.; GUTZLER, D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 109(4): 784-812, Apr. 1981.
- WILLIAMS, D.L.; TEMPERTON, C.. Normal mode initialization for a multilevel grid point model. Part II: Non-linear aspects. *Monthly Weather Review*, 109(4):744-757, Apr. 1981.
- WILLIANSON, D.L.. Normal mode initialization procedure applied to forecasts with the global shallow water equations. *Monthly Weather Review*, 104(2):195-206, Feb.1976.