ANÁLISE ESPECTRAL DAS COTAS DO RIO NEGRO EM MANAUS

Carlos A. Nobre, Lourdes B.F.C. Paião, Mariângela Amêndola

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq
Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos - SP

RESUMO

Submeteu-se a série das cotas do Rio Negro em Manaus do período 1903-1983 à análise espectral. Na série original, a periodicidade correspondente ao ciclo anual responde pela maior parte da variância da série. Utilizando a janela de Parzen, construiu-se o espectro suavizado da série sem o ciclo anual. O espectro apresenta duas periodicidades (28,5 e 15,5 meses aproximadamente). Essas periodicidades são significativamente diferentes de ruído vermelho ao nível de 88% a posteriori (99,8% a priori). Investigou-se possível relação da periodicidade de 28 meses na cota do Rio Negro com a oscilação quase-bienal dos ventos zonais da estratosfera tropical (período de aproximadamente 27 meses). A série foi dividida em dois períodos, 1903-1950 e 1951-1983 (este último para correlacionar com os ventos zonais ao nível de 50 mb para Balboa, Panamá, os quais existem desde 1951). A tendência à oscilação na faixa de 28 meses desapareceu para o período 1951-83 indicando a inexistência de uma relação direta entre a oscilação quase-bienal da estratosfera e variações interanuais do nível do Rio Negro. A periodicidade de aproximadamente 16 meses é estatisticamente significativa para estes dois períodos analisados.

1. INTRODUÇÃO

A análise espectral de séries de dados hidrometeorológicos revela, muitas vezes, periodicidades inesperadas, isto é, aquelas não relacionadas ao ciclo anual ou diurno ou às harmônicas destes ciclos. O estudo destas periodicidades "escondidas" é interessante sobre dois aspectos: por um lado, tais periodicidades podem indicar a existência de fenômenos físicos de importância, tal como a descoberta de uma oscilação com período de aproximadamente 27 meses nos ventos da estratosfera equatorial[1], e, por outro lado, podem servir de base a modelos estatísticos de previsão de uma dada variável meteorológica ou hidrológica, tal como precipitação, temperatura, nível ou vazão de um rio, etc., com possíveis aplicações práticas.

É obviamente importante que a significância estatística destas periodicidades seja determinada assim com sua estacionaridade, isto é, a tendência da amplitude das periodicidades não variar significativamente para diferentes períodos analisados. A análise deve prosseguir somente para aquelas periodicidades que exibirem alto grau de significância e forem estacionárias. Um erro frequentemente praticado na análise espectral de séries de dados hidrometeorológicos é não testar a significância estatística das periodicidades encontradas e tirar conclusões, em geral no sentido de extrapolações do comportamento da série temporal para o futuro, com base em periodicidades pouco significativas.

---

[1] Em meteorologia denominada Oscilação Quase-Bienal (OQB)

Neste trabalho submetemos a série das cotas do nível do Rio Negro em Manaus (LAT=3°08'S, LONG=60°01'W) para o período 1903-83 à análise espectral. No ponto de medida em Manaus, o Rio Negro acha-se a 18 km de sua confluência com o Rio Amazonas e é, de certo modo, "represado" pelo último. Assim, para todos os fins práticos, pode-se dizer que esta série reflete o nível do Rio Amazonas à altura da confluência com o Rio Negro, isto é, no médio Amazonas. Até esse ponto, o Rio Amazonas drena uma bacia de aproximadamente 3 milhões de km^2, sendo a precipitação anual média nesta área em torno de 2500 mm. Na parte noroeste desta bacia, compreendendo a Amazônia colombiana e o noroeste da Amazônia brasileira, a precipitação anual atinge valores acima de 3000 mm e não há estação seca bem definida. As partes oeste, sul e leste deste domínio experimentam uma estação seca bem definida, nos meses de junho, julho e agosto, e a precipitação anual situa-se em torno de 2200 mm. A parte norte da bacia, compreendendo os tributários da margem esquerda do Rio Negro, influenciada pelo regime de chuvas do Hemisfério Norte, experimenta uma estação seca de novembro a março e a precipitação anual média é algo inferior a 2000 mm.

É apropriado a esta altura, indicar as causas que determinam a marcha anual do nível d'água do Rio Amazonas. Os tributários do Amazonas estão localizados em ambos os hemisférios. Uma fração maior da descarga total do Amazonas é proviniente dos tributários do Hemisfério Sul. Ao contrário do Rio Congo, cujo nível d'água apresenta dois máximos por ano, refletindo a migração sazonal norte-sul da banda de chuvas tropicais sobre a África, o nível d'água do Rio Amazonas apresenta um só pico durante o ano. Isto é uma consequência das peculiaridades do regime de precipitação sobre o continente sul-americano tropical. Em maio, quando as chuvas sobre as cabeceiras dos afluentes do Hemisfério Sul começam a diminuir, a precipitação sobre a região das cabeceiras dos tributários do Hemisfério Norte começa a elevar-se rapidamente. Dado o tempo de residência da água no sistema hidrológico o máximo da cheia ocorre em meados de maio no baixo Amazonas, refletindo maior influência das chuvas do Hemisfério Sul, início de junho no médio Amazonas e início de julho no alto Amazonas. Portanto o nível d'água máximo (e, consequentemente, a vazão do rio) está ligado não somente ao total de precipitação sobre toda a bacia de drenagem mas também à distribuição temporal das chuvas sobre as bacias de drenagem dos tributários do Hemisfério Norte e Sul. Mesmo num ano com precipitação anual normal, o nível máximo poderia ser acima da média se uma extensa banda de chuvas convectivas permanecesse quase-estacionária em maio e junho sobre a Amazônia equatorial sem migração clara para o Hemisfério Norte.

O nível mensal médio do Rio Negro em Manaus para o período 1903-83, assim como seu desvio-padrão, são apresentados na Figura 1. O rio apresenta um só pico anual apesar de ter tributários em ambos os hemisférios. O nível máximo acontece entre fins de maio e julho com predominância para cair em junho. O nível mínimo se dá em outubro e novembro e a variação média entre cheia e vazante é, aproximadamente, 9 m. O desvio-padrão na época das cheias do rio é menor porque, em geral, nesta época o rio abandona seu leito normal e transborda.

A série das cotas do Rio Negro em Manaus utilizadas neste estudo estendem-se de 1903 a 1983 sem interrupções. A série histórica original consiste de dados diários (média de duas medições da cota do rio por dia). Destes dados as cotas médias mensais foram computadas e o espectro da série das cotas médias mensais foi calculado. A Figura 2 mostra a série temporal, X_t, das cotas médias mensais do Rio Negro em Manaus de janeiro/1903 a dezembro/1983 (972 pontos). Observa-se claramente o ciclo anual na variação do nível do rio. Contudo, uma inspeção mais cuidadosa desta figura revela que de um ano para outro há variações marcantes nos níveis máximos e mínimos, ou, em outras palavras, há variações interanuais do nível do rio que estão ligadas à variabilidade interanual das chuvas sobre a bacia de drenagem.

2. SÉRIE SEM O CICLO ANUAL

Não constitui surpresa uma série de dados hidrometeorológicos apresentar oscilação com o período do ciclo anual já que devido a inclinação do eixo de rotação da terra, isto é, a existência de estações, este ciclo, além do ciclo diurno, é comum a quase todas as séries de variáveis hidrometeorológicas. É usual, portanto, se remover o ciclo anual para o estudo de outras periodicidades não aparentes que possamexistir nestas séries temporais.

Vamos construir a série Y_t, que é a série X_t na qual o ciclo anual foi removido. A série Y_t é definida como

$$Y_{m,\ell} = \frac{(X_{m,\ell} - \bar{X}_m)}{\bar{\sigma}_m}, \quad \begin{matrix} \ell = 1903, 1904, \ldots, 1983 \\ m = 1(\text{jan}), 2(\text{fev}), \ldots 12(\text{dez}) \end{matrix} \tag{2}$$

onde $\bar{X}_m$ e $\bar{\sigma}_m$ são as médias para todo o período (1903-1983) das cotas e desvios-padrão mensais, respectivamente. O procedimento aplicado em (2) elimina satisfatoriamente o ciclo anual. Os valores de $(X_t - \bar{X}_m)$ são divididos por $\bar{\sigma}_m$ para compensar o fato de que as flutuações do nível do rio são menores na época da cheia (junho-julho) porque o rio, em geral, transborda.

A Figura 3 mostra a série Y_t, isto é, a série original sem o ciclo anual. Constata-se que realmente o ciclo anual foi eliminado (compare Figuras 2 e 3). Entretanto, observamos que a série não aparenta ser um conjunto de números aleatórios. Visualmente, percebemos a tendência a oscilação com período entre 2 a 3 anos (24 a 36 meses).

A função de auto correlação

$$AC_\ell = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x})(x_{t+\ell} - \bar{x}) \Big/ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} (x_t - \bar{x})^2 \tag{1}$$

$$\text{para } \ell = 0, 1, \ldots, N-1,$$

calculada para Y_t, é mostrada na Figura 4 para um "lag" máximo 144. Notamos uma tendência de oscilação, o que é indicativo de periodicidade(s) na série.

Finalmente, nessa seção, calcula-se o espectro suavizado de Y_t. Utiliza-se a janela de Parzen ("Parzen window"). A largura de banda é 0.00775 (mes^{-1}). Uma explicação detalhada sobre o cálculo do espectro suavizado, da largura da banda e bandas de confiança para as estimativas espectrais pode ser encontrada em Nobre et alli (1982). Notamos uma tendência de oscilação, o que é indicativo de periodicidade na série. Nesse caso, como não há razão para se esperar nenhuma outra periodicidade já que o ciclo anual e os harmônicos do ciclo anual foram eliminados, as bandas de confiança devem ser calculadas para níveis de significância a posteriori. Na Figura 5 são indicadas as periodicidades que ultrapassam o nível de 88% de significância a posteriori (99,8% a priori), cujos períodos são 28,5 e 15,5 meses

3. DISCUSSÃO

O nível do Rio Negro em Manaus representa, em última instância, o efeito integrado das chuvas sazonais sobre a bacia de drenagem até aquele ponto. Esta bacia corresponde a uma área de aproximadamente 3 milhões de km^2 e está sujeita

ao regime de chuvas tropicais continentais. Qualquer pulsação das chuvas tropicais nessa grande escala seria fenômeno de interesse e, provavelmente, ligado ao acoplamento dos oceanos tropicais com a atmosfera global.

É bastante conhecida uma oscilação, de aproximadamente 27 meses, dos ventos zonais da estratosfera equatorial, isto é, os ventos desta camada da atmosfera alternam-se entre ventos de leste e ventos de oeste com um período de um pouco mais de 2 anos em média.

Pela proximidade dos períodos da oscilação quase-bienal (OQB) ($\tilde{}$ 27 meses) e de uma das periodicidades encontradas para a variação do nível do Rio Negro ($\tilde{}$ 28 meses), poderia-se supor que a OQB esteja sendo forçada por flutuações de intensidade das chuvas tropicais. Vamos portanto, procurar verificar tal conjectura. As origens desta OQB ainda não estão totalmente esclarecidas (Wallace, 1973).

Possivelmente a teoria mais aceita para a explicação da OQB (Holton e Lindzen, 1972) afirma que tal oscilação resulta da interação não linear na estratosfera entre ondas de Kelvin e ondas mistas Rossby - gravidade equatoriais com o vento zonal médio. Tal oscilação com período superior a 2 anos seria, assim, resultado de interação não-linear não diretamente ligadas aos períodos destas ondas. Por outro lado, se pulsações na faixa da oscilação da OQB da atividade convectiva continental existirem e estiverem correlacionadas em fase com a OQB então poder-se-ia pensar que a OQB é forçada diretamente e uma teoria linear seria suficiente para explicá-la.

Para verificar esta última hipótese, dividimos a série Y_t em dois períodos: a) 1903-1950 e b) 1951-1983. Tal divisão é feita para podermos calcular o espectro cruzado da série Y_t com a série dos ventos zonais estratosféricos no nível de 50 mb para Balboa, Panamá, já que esta última série só é disponível a partir de 1951.

As Figuras 6 e 7 mostram o espectro suavizado da série Y_t para os períodos 1903-1950 e 1951-1983, respectivamente. Observamos que para o primeiro período as periodicidades de aproximadamente 28 e 16 meses estão presentes e são estatisticamente significativas. Já para o segundo período (1951-1983), a periodicidade de $\tilde{}$ 28 meses desaparece e somente a periodicidade de 17 meses é significativa. Concluimos, portanto, que a série não é estacionária com relação à periodicidade de 28 meses o que indica que não devem haver mecanismos diretos ligando a OQB dos ventos da estratosfera com variações interanuais da vazão do Rio Amazonas.

4. CONCLUSÕES

Nas seções anteriores estudou-se o comportamento espectral da série das cotas mensais do Rio Negro em Manaus, para um período de 81 anos (1903-1983). Na série original o ciclo anual explica a maior parte da variância. Com o intuito de verificar a existência de oscilações de mais baixa frequência do nível do rio (períodos maiores que o ciclo anual), as quais poderiam ser associadas à variabilidade interanual das chuvas sobre a Amazônia, eliminou-se a sazonalidade da série original. O espectro da nova série assim construída revelou a existência de duas periodicidades (aproximadamente 28 e 16 meses) estatisticamente significativas ao nível de 88% a posteriori (99.8% a priori).

Verificou-se a possibilidade de a Oscilação Quase-Bienal dos ventos zonais da estratosfera, cujo período é aproximadamente 27 meses, estar correlacionada com a periodicidade de $\tilde{}$ 28 meses das cotas do Rio Negro. O espectro desta última série para o período 1951-83 não revelou, entretanto, a existência da periodicidade na faixa 27-29 meses demostrando a não-estacionaridade dessa periodicidade e indicando a inexistência de uma relação direta entre a OQB da estratosfera e variações interanuais do nível do rio. A periodicidade de aproxima

damente 16 meses é estatisticamente significativa para estes dois períodos analisados (no período de 1951-83 o pico no espectro deslocou-se para a periodicidade de aproximadamente 17 meses; nesse sentido seria mais correto dizer que a série apresenta tendência a oscilação na faixa de 15 a 18 meses).

AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos agradecimentos ao Dr. Horácio Hideki Yanasse por revisar este trabalho e por valiosas sugestões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HOLTON, J.R.; LINDZEN, R.S. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. J. Atmos. Sci., 29:1076-1080, 1972.

2. NOBRE, C.A.; YANASSE, H.H.; YANASSE, C.C. Previsão de secas no Nordeste pelo método das periodicidades: usos e abusos. INPE-2344-PRE/407. São José dos Campos, SP, 1982.

3. WALLACE, J.M. General circulation of the tropical lower stratosphere. Rev. Geoph. Space Phys., 11[2]:191-222, 1973.

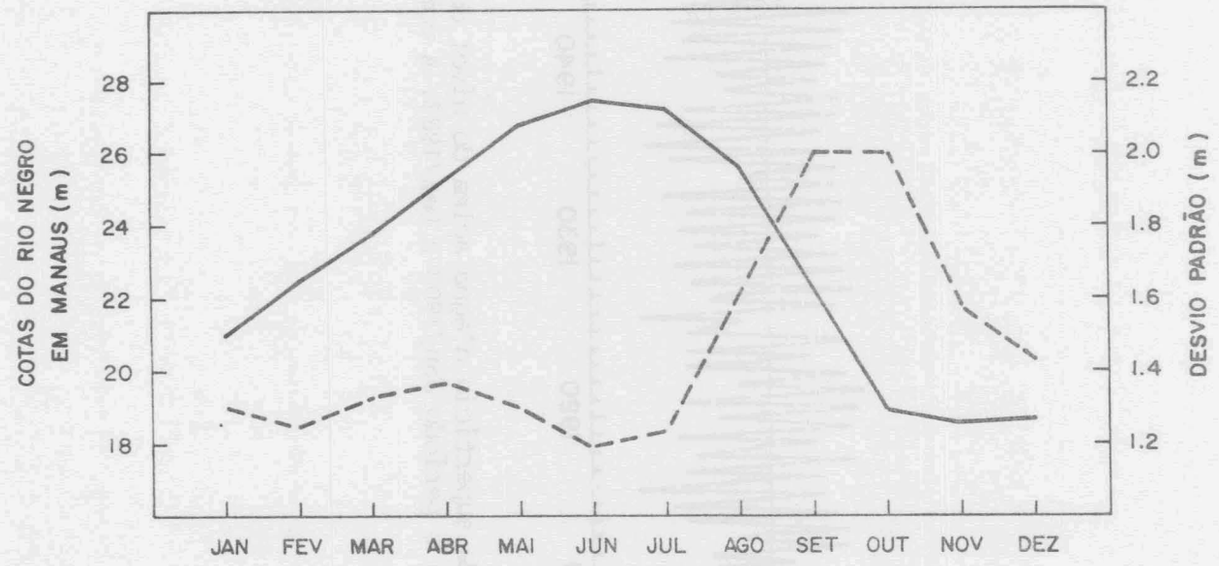


Fig. 1 - Médias mensais das cotas (nível da superfície d'água acima do nível do mar em metros) do Rio Negro em Manaus para o período 1903-1983 (linha traço e ponto) e o respectivo desvio-padrão mensal (linha cheia).

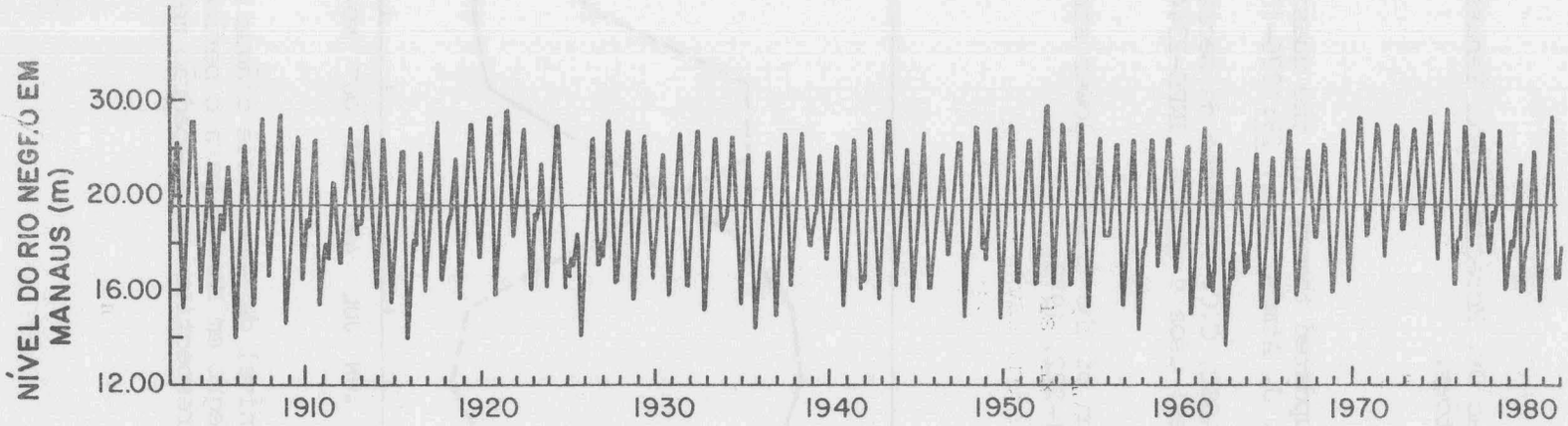


Fig. 2 - Cotas (nível da superfície d'água acima do nível do mar em metros) médias mensais do Rio Negro em Manaus para o período Jan/1903 a Dez/1983. A cota média para o período 1903-1983 (23,27 m) é indicada.

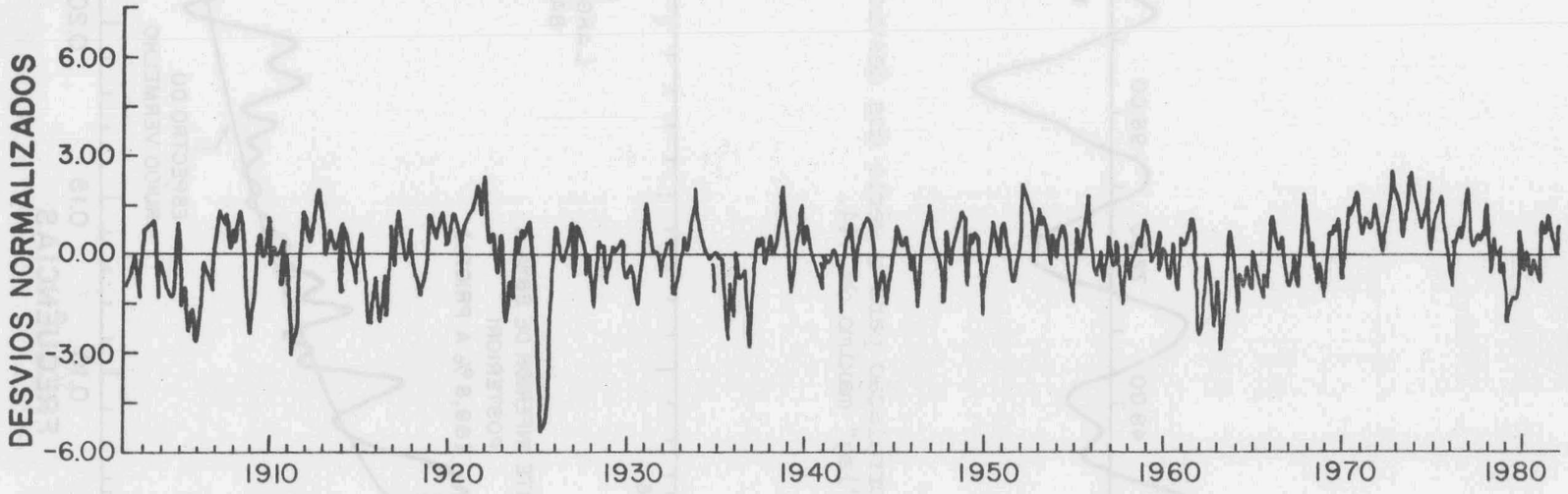


Fig. 3 - Série dos desvios normalizados (série sem o ciclo anual) para o Rio Negro em Manaus para o período 1903-83.

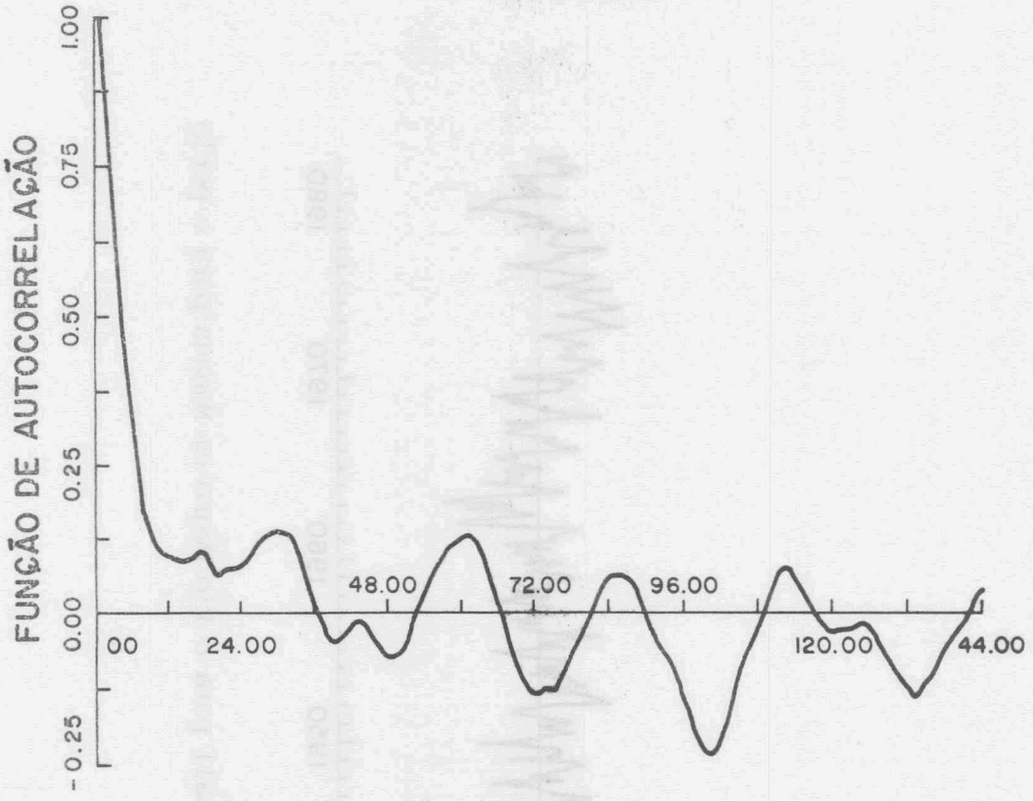


Fig. 4 - Função de autocorrelação para a série dos desvios normalizados (Figura 3) para um "lag" máximo de 144.

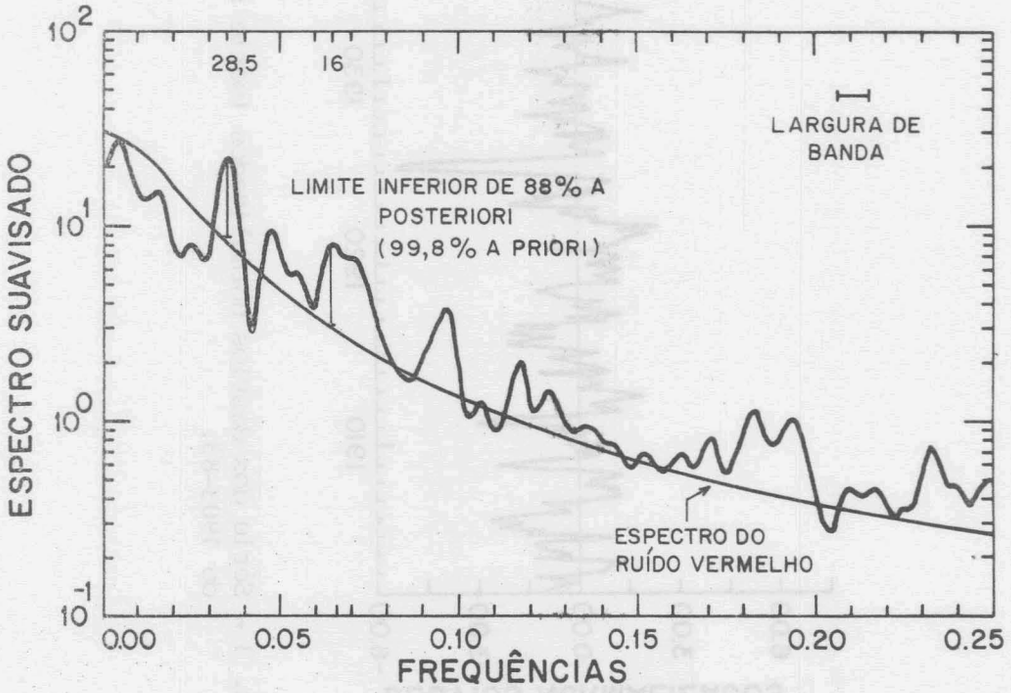


Fig. 5 - Estimativas espectrais suavizados plotados em escala logarítmica da série dos desvios normalizados (Figura 3). A largura de banda é 0,00775 ciclos/mês. O limite de confiança é indicado.

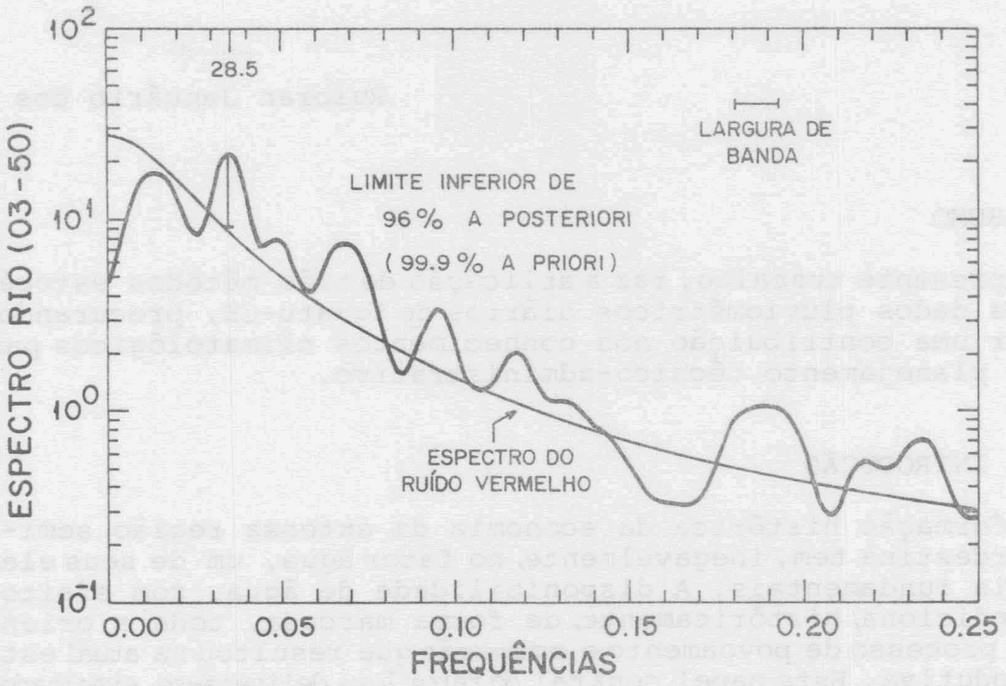


Fig. 6 - Estimativas espectrais suavizadas plotadas em escala logarítmica da série dos desvios normalizados somente que para o período 1903-1950. A largura de banda é 0,013 ciclo/mês. O limite de confiança é indicado.

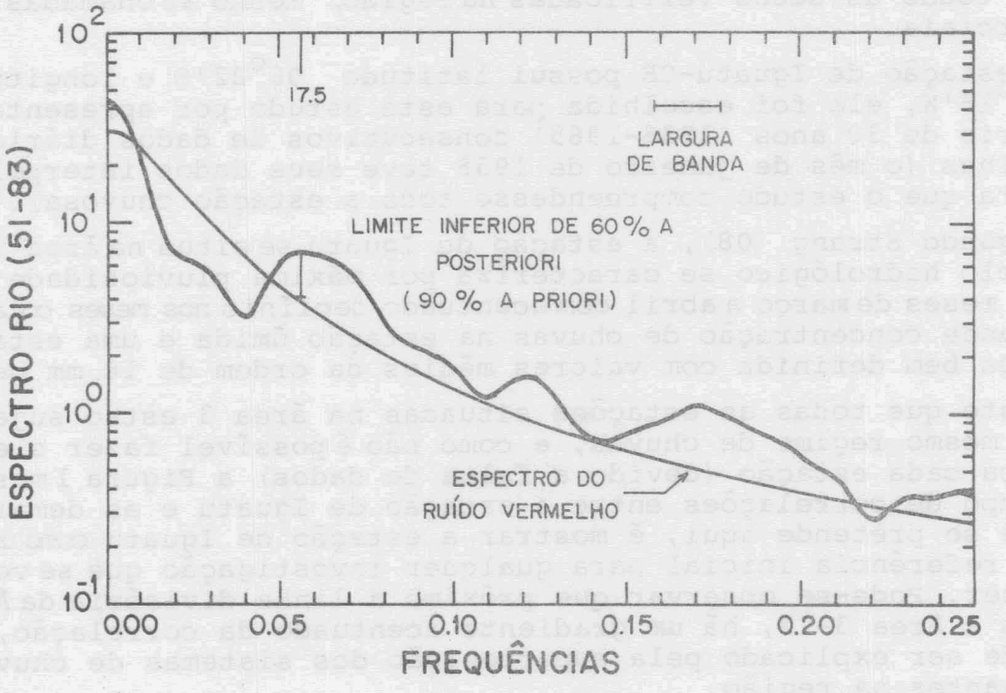


Fig. 7 - Estimativas espectrais suavizadas plotadas em escala logarítmica da série dos desvios normalizados somente que para o período 1951-1983. A largura de banda é 0,019 ciclo/mês. O limite de confiança é indicado.