

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ENOS NA PRECIPITAÇÃO DA PARAÍBA E SANTA CATARINA ATRAVÉS DA *CROSS WAVELET TRANSFORM*

*Bruno Sousa de Morais*¹ & *Celso Augusto Guimarães Santos*²

RESUMO --- Neste trabalho foi aplicada a transformada *wavelet* e a *cross wavelet transform* na análise, no espaço tempo-freqüência, da relação existente entre a precipitação de postos pluviométricos localizados nos Estados da Paraíba e Santa Catarina e o índice IOS (Índice de Oscilação Sul), cujo valor indica a ocorrência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña*. Utilizou-se também a *wavelet coherence*, visando complementar a interpretação dos resultados obtidos. Foi possível observar que existe uma relação entre o índice IOS e a precipitação nesses Estados, como mostrado pelas estatísticas do ângulo de fase obtidas através da *cross wavelet*. Neste estudo, foi utilizado o software desenvolvido por Jevrejeva *et al.* (2003), para executar os cálculos da *cross wavelet transform* e *wavelet coherence*.

ABSTRACT --- The wavelet transform and cross wavelet transform, at time-frequency domain, were applied in this paper in order to analyze the relationship between the data from four raingauges in Paraíba and Santa Catarina states and the Southern Oscillation Index (SOI), which values indicate the occurrence of *El Niño* and *La Niña* phenomena. The wavelet coherence was also used in order to completely understand the obtained results. It was possible to observe that there is a relationship between SOI and the precipitation values in Paraíba and Santa Catarina states, as shown by the phase angle statistics using the cross wavelet transform. In the present study, a program developed by Jevrejeva *et al.* (2003) was used in order to compute the cross wavelet transform and the wavelet coherence.

Palavras-chave: Transformada *wavelet*, *cross wavelet*, ENOS.

1) Bolsita PIBIC/CNPq, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba. bruno_sousapb@hotmail.com

2) Professor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba. 58051-900 João Pessoa-PB. e-mail: celso@ct.ufpb.br

1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil vem enfrentando diversos fenômenos hidrológicos extremos, sejam eles severas secas ou a ocorrência de chuvas em excesso. Ambos os eventos têm provocado a perda de inúmeras vidas, além de prejuízos econômicos e impactos ambientais dificilmente quantificáveis.

Um grande número de pesquisas científicas tem investigado os mecanismos responsáveis pela ocorrência dessa grande variabilidade pluviométrica, constatando que a precipitação no Nordeste e no Sul do Brasil é fortemente modulada pela existência de padrões atmosféricos e oceânicos globais, resultando na ocorrência do fenômeno ENOS (*El Niño* Oscilação Sul).

O ENOS é um fenômeno global manifestado no Oceano Pacífico, que atua em duas vertentes, uma componente oceânica, devido ao aquecimento das águas superficiais do Pacífico Leste, e uma componente atmosférica, denominada Oscilação Sul, flutuação inversa no campo de pressão entre as regiões da Alta Pressão Subtropical do Pacífico Sudeste e a Baixa Pressão da Indonésia (CANE, 1992). A medida da Oscilação Sul é dada pelo Índice de Oscilação Sul (IOS), definido pela diferença normalizada no campo das pressões ao nível do mar (PNM) entre as estações de Tahiti no Pacífico Sul e Darwin no norte da Austrália (SOUZA *et al.*, 1998). Quando o ENOS é associado a um aumento de temperatura no Oceano Pacífico tem-se o *El Niño*, já quando ocorre diminuição de temperatura, é denominado *La Niña*. Esses dois diferentes cenários causam impactos distintos nos índices de precipitação no Brasil, sendo a ocorrência do *El Niño* responsável pelo aumento da precipitação na região Sul e pela ocorrência de secas severas na região Nordeste, enquanto que na ocorrência do *La Niña* esse cenário se inverte. Essas oscilações podem ser constatadas no índice IOS pela ocorrência de valores continuamente negativos (*El Niño*) e continuamente positivos (*La Niña*).

Buscando mostrar que a transformada cruzada *wavelet* (*cross wavelet transform*) poder ser usada para comprovar a ligação existente entre a precipitação no Nordeste e no Sul do país e a ocorrência do ENOS, neste trabalho foi utilizada esta transformada, empregando dados de precipitação de dois postos pluviométricos dos Estados da Paraíba e de Santa Catarina e o índice IOS. Também foi utilizada a transformada *wavelet* para análise isolada das séries de precipitação, sendo possível identificar as frequências existentes e suas variações temporais para cada série estudada. Santos *et al.* (2001) utilizaram a transformada *wavelet* para análise dos índices pluviométricos da cidade de Matsuyama no Japão, quando indicaram o uso da série temporal da escala média da faixa 8–16-meses para análise de períodos secos ou chuvosos da série bruta, e Jevrejeva *et al.* (2003), ao analisarem a influência da Oscilação Ártica (OA) e do ENOS sobre as condições do gelo no oceano Báltico, desenvolveram uma ferramenta para cálculo da *cross wavelet*

transform e da *wavelet coherence*. Apesar de sua recente formulação, o uso da *cross wavelet* vem se expandindo por todo o mundo, despontando como uma importante ferramenta na análise de sinais (YANG *et al.*, 2007; NEZLIN, 2008; YATES *et al.*, 2007). Dessa forma, devido à robustez dos métodos apresentados, os mesmos foram escolhidos, neste estudo, para a análise da influência do IOS sobre os índices pluviométricos das regiões consideradas.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Dados utilizados

Foram utilizados dados de dois postos pluviométricos localizados nos Estados da Paraíba e de Santa Catarina, nas cidades de Santa Luzia e Luiz Alves, respectivamente, compreendidos entre 1966 e 1991. Os postos pluviométricos estudados foram monitorados pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) e pela ANA (Agência Nacional das Águas). Utilizou-se também o índice IOS, com dados para o mesmo período dos dados pluviométricos citados. O índice IOS foi obtido no NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), no sítio <http://www.noaa.gov>.

3.2 - A Transformada *Wavelet*

A grande maioria dos dados em ciências da Terra não apresenta variabilidade periódica, mas sim aperiódica. Assim, é de realçar o fato de que os espectros de potência das *wavelets* são de interpretação mais simples do que os correspondentes espectros de potência da análise de Fourier clássica.

A existência de diferentes definições, bem como a utilização de diversas notações na literatura para descrever a transformada *wavelet* (*wavelet transform*), não ajudou a sedimentar, no seio da comunidade científica, os principais conceitos associados a esta técnica. A análise por *wavelets* baseia-se na convolução do sinal em estudo $f(t)$ com sucessivas funções, representativas de escalas diferentes, as funções *wavelets* $g_{ab}(t)$. A forma de cada uma destas funções é obtida a partir de uma função principal, previamente definida, vulgarmente designada *mother wavelet* $g(t)$:

$$g_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

onde a , sempre maior do que zero, representa a escala temporal da perturbação (uma escala menor corresponde a uma frequência superior) e o parâmetro b corresponde aos diferentes instantes ao longo do tempo. Deste modo, na versão contínua, a transformada *wavelet* (W) é definida pela seguinte expressão:

$$W(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int g\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (2)$$

O termo do denominador \sqrt{a} corresponde a um fator de normalização da energia de cada *wavelet* $W(b, a)$ de forma a manter a mesma energia da *wavelet* principal. A equação (2) reflete a principal novidade introduzida pelas *wavelets*; a possibilidade de transformar uma série temporal num espaço de dois parâmetros (a , b) que traduz a medida local da amplitude relativa de variabilidade com escala a no instante b . Esta definição contrasta de forma evidente com a equivalente definição da transformada de Fourier que nos fornece apenas uma amplitude média para cada escala (frequência ou período) da variabilidade ao longo de todo o domínio. Devido a isso, dois sinais bem distintos no domínio temporal podem apresentar um espectro de potência bastante semelhante dominados pelos mesmos dois picos. Ou seja, um sinal simples que muda de frequência no meio da série, e um outro sinal justapondo duas frequências ao longo de toda a série, teria um espectro de potência com duas frequências, e assim, sem nenhum conhecimento adicional *a priori* seria praticamente impossível dizer qual dos dois sinais produziu cada um dos espectros de potência. De fato, toda a informação relativa à evolução temporal do sinal é perdida ao se aplicar a análise de Fourier, o que não acontece quando se aplica a análise com *wavelet*. Estas limitações constituíram um forte incentivo para o desenvolvimento da análise por *wavelets*.

3.3 – Transformada *cross wavelet*

A transformada *cross wavelet* (XWT) de duas séries cronológicas X e Y , com valores de X_n e Y_n , respectivamente, conforme definido por Jevrejeva *et al.* (2003) é $W^{XY} = W^X W^{Y*}$. O argumento complexo $\arg(W^{XY})$ pode ser interpretado como a fase relativa entre X_n e Y_n , no domínio espaço-tempo-frequência. A distribuição teórica da *cross wavelet* de duas séries temporais com espectros de potência P_k^X e P_k^Y , segundo Torrence e Compo *et al.* (1998), é dada por:

$$D\left(\frac{W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)}{\sigma_X \sigma_Y} < p\right) = \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^X P_k^Y} \quad (3)$$

onde $Z_v(p)$ é o nível de confiança associado a média. Dessa forma, o desvio padrão circular é definido por:

$$s = \sqrt{-2 \ln(R/n)} \quad (4)$$

onde $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$. O desvio padrão circular é análogo ao desvio padrão linear, na medida em que varia de zero ao infinito, sendo obtidos resultados bastante semelhantes para os dois quando os ângulos são distribuídos em torno do ângulo médio.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como visto anteriormente, o uso das *wavelets* corresponde a uma decomposição da série no duplo domínio tempo-frequência, permitindo a determinação dos principais modos de variabilidade, bem como a forma como estes variam no tempo. A Fig. 1 mostra (a) os dados brutos de precipitação do posto Paraíba, (b) o seu espectro de potência da transformada *wavelet*, (c) o seu espectro global, e (d) sua série da escala média para a faixa de 8–16 meses.

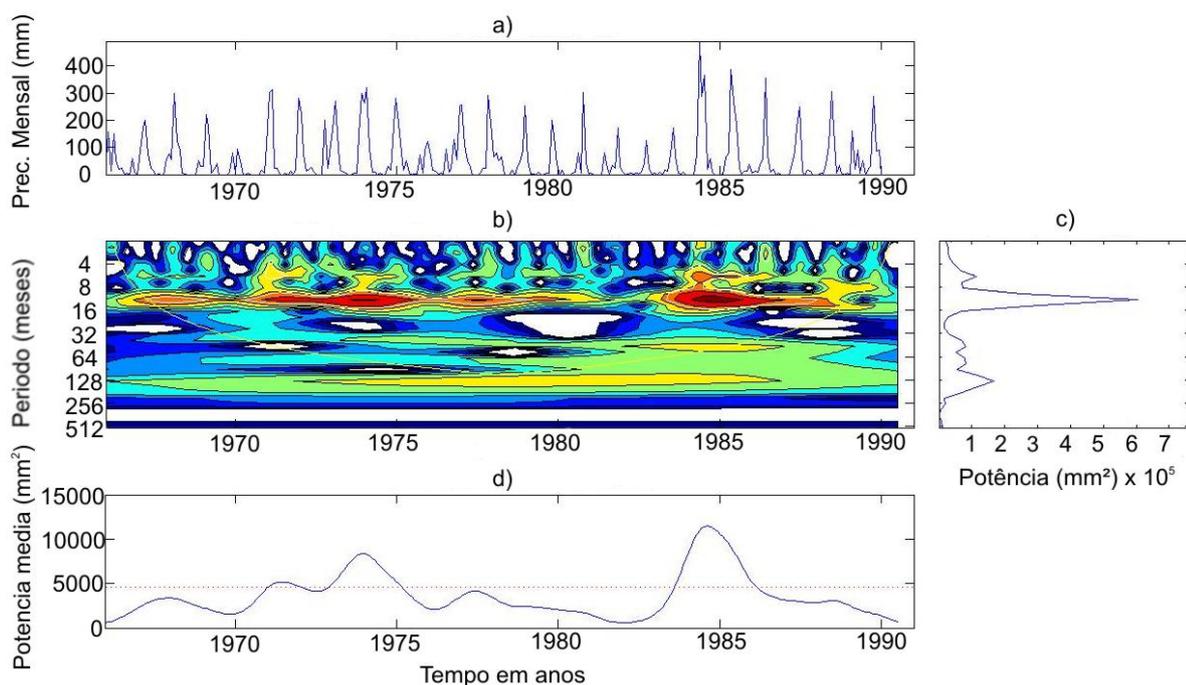


Figura 1 – (a) Hietograma mensal do posto Santa Luzia, correspondente ao período de 1966 a 1991 (b) Espectro de potência da *wavelet* usando a *wavelet*-mãe de Morlet. (c) Espectro global da *wavelet*. (d) Série temporal de escala média para a faixa de 8–16-meses.

A Fig. 1b mostra a potência (valor absoluto quadrado) da transformada *wavelet* para a precipitação mensal do posto Paraíba, apresentado na Fig. 1a, compreendidos no período de 1966 a 1991. Por meio dela, podemos identificar as frequências presentes na série no domínio tempo. Nesta figura é possível analisar a magnitude do espectro, mantendo a localização temporal. Observando a Fig. 1b, pode-se claramente observar que a maior potência observada encontra-se na faixa 8–16 meses, o que demonstra existir nesta série um forte sinal anual (12 meses). A variação dos espectros no período 8–16 meses, analisada na Fig. 1c, possibilita a identificação, neste caso, de períodos secos e chuvosos, isto é, quando o espectro decresce substancialmente temos a representação de anos secos, enquanto para valores substancialmente maiores, temos a representação de anos

chuvosos. Por exemplo, um período seco pode ser identificado entre os anos de 1976 a 1983, enquanto que os anos de 1974 e 1985 apresentam-se como anos mais chuvosos.

Na Fig. 2 são mostrados (a) os dados brutos de precipitação do posto Santa Catarina, (b) o seu espectro de potência da transformada *wavelet*, (c) o seu espectro global, e (d) sua série da escala média para a faixa de 8–16 meses. Na Fig. 2-b pode-se observar que a maior potência observada também encontra-se na faixa 8-16 meses, apontando para a existência de um forte sinal anual, assim como observado no posto Paraíba (Fig. 1b). Pela análise da Fig. 2d, vemos que o espectro decresce substancialmente entre 1967 e 1984, o que evidencia a ocorrência de precipitações abaixo da média nesse intervalo de tempo. Já nos anos de 1984 a 1991 observa-se a ocorrência de índices pluviométricos acima da média da região.

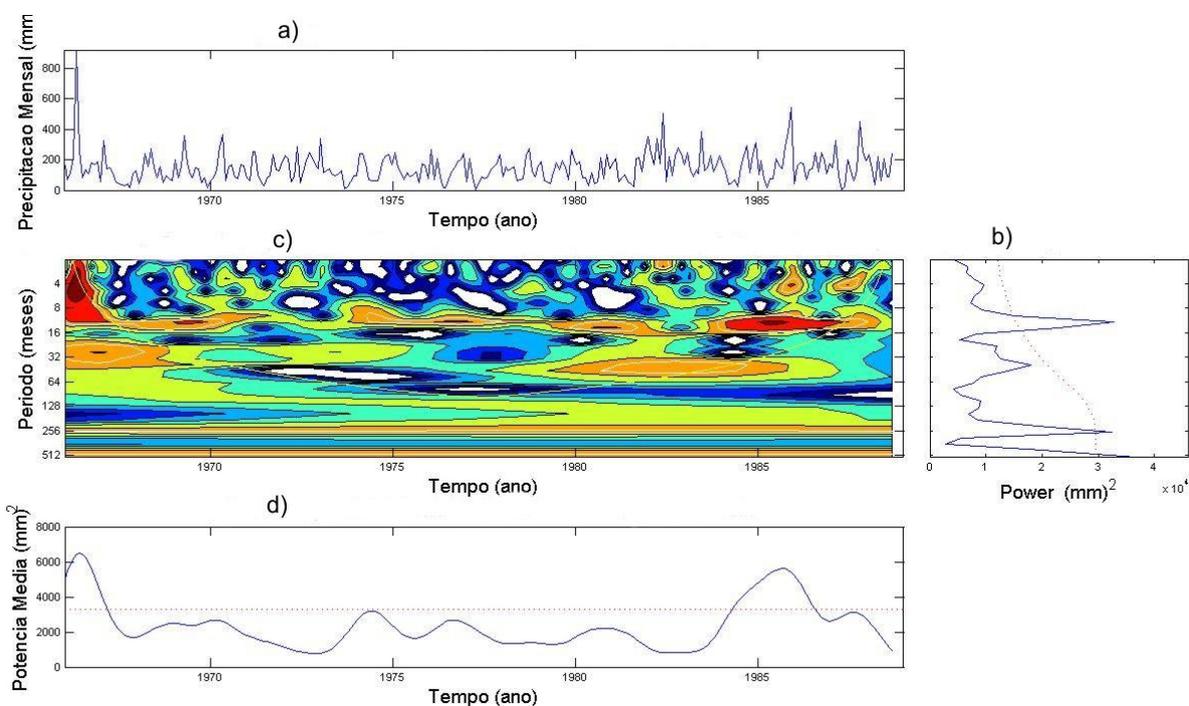


Figura 2 - (a) Hietograma mensal do posto Santa Catarina, correspondente ao período de 1966 a 1991 (b) Espectro de potência da *wavelet* usando a *wavelet*-mãe de Morlet. (c) Espectro global da *wavelet*. (d) Série temporal de escala média para a faixa de 8–16-meses.

Já para o estudo da influência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña* na precipitação dos postos estudados, faz-se necessário a análise através da *cross wavelet*, visto tratar-se de uma ferramenta capaz de examinar as relações de frequência existentes no domínio espaço-tempo-frequência entre duas séries distintas. A Fig. 3 traz os resultados obtidos para a análise da *cross wavelet* correspondentes ao posto pluviométrico Paraíba e ao índice IOS. A relação entre os dados pode ser identificada através da observação do sentido das setas presentes na imagem, quando analisamos os

períodos destacados em vermelho, para o nível de significância de 5%. As setas no sentido para a direita indicam que os dois fenômenos estão em fase, as setas para a esquerda indicam que os dois fenômenos estão defasados (em anti-fase), um em relação ao outro, enquanto as setas apontando para baixo (na direção 90°) indicam uma forte influência dos valores do índice IOS sobre os índices pluviométricos do posto Santa Luzia. Para auxiliar a interpretação, também é útil o uso da *wavelet coherence* (WCT), mostrada na Fig. 4.

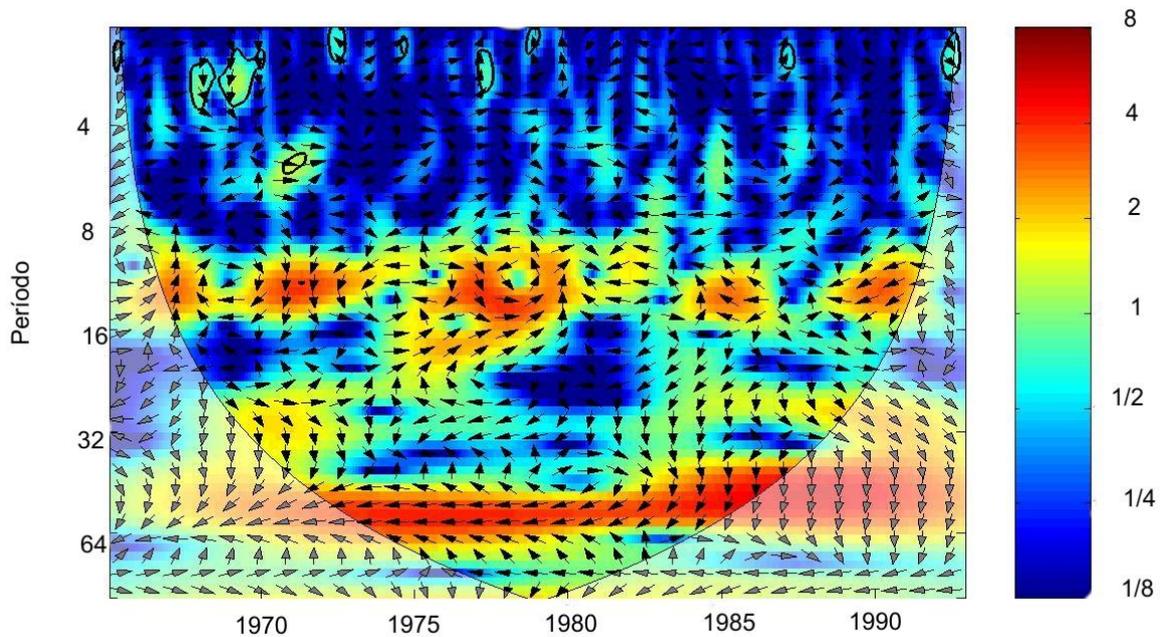


Figura 3 - Transformada *cross wavelet* para a precipitação do posto Paraíba e o Índice IOS. O nível de significância de 5% aparece em destaque, na cor vermelha. A relação entre os fenômenos pode ser identificada pelo sentido das setas (com o sentido para a direita indicando que estão em fase, o sentido para a esquerda indicando que estão em anti-fase, ou seja, defasados, e o sentido apontando para baixo mostrando que há forte influência do valor do índice IOS na precipitação mensal no posto Paraíba).

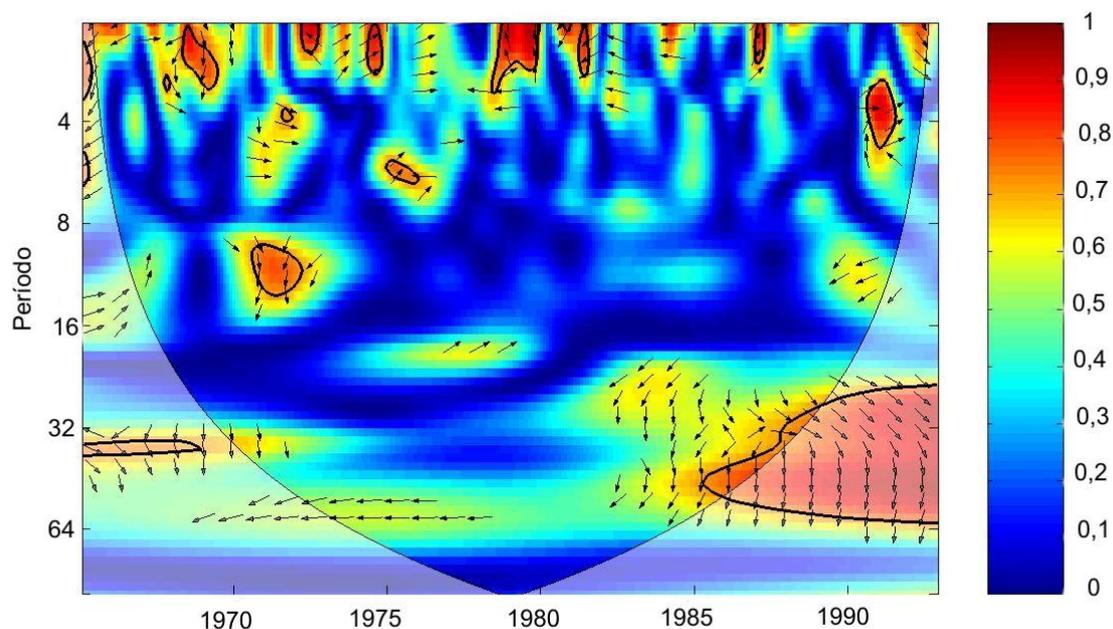


Fig. 4 Coerência *wavelet* entre o índice IOS e a precipitação para o posto Paraíba. O nível de significância de 5% aparece novamente em vermelho, com o sentido para a direita indicando que estão em fase, o sentido para a esquerda indicando que estão em anti-fase, ou seja, defasados, e o sentido apontando para baixo mostrando que há forte influência do valor do índice IOS sobre o total mensal precipitado no posto Paraíba.

A Fig. 5 traz os resultados obtidos para a análise da *cross wavelet* correspondentes ao posto pluviométrico Santa Catarina e ao índice IOS. Da mesma forma que na análise para a precipitação da Paraíba, a relação entre os dados pode ser identificada através da observação do sentido das setas presentes na imagem, quando analisamos os períodos destacados em vermelho, para o nível de significância de 5%. As setas no sentido para a direita indicam que os dois fenômenos estão em fase, as setas para a esquerda indicam que os dois fenômenos estão defasados (em anti-fase), um em relação ao outro, enquanto as setas apontado para baixo (na direção 90°) indicam uma forte influência dos valores do índice IOS sobre os índices pluviométricos do posto Santa Catarina. Para auxiliar a interpretação, também é útil o uso da *wavelet coherence* (WCT), mostrada na Fig. 6.

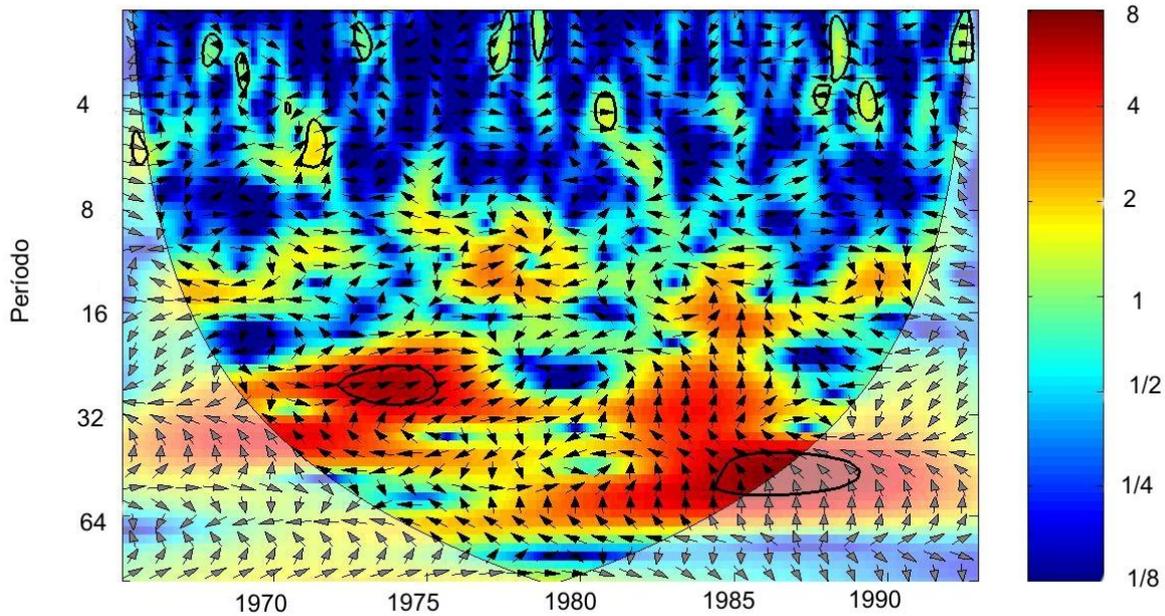


Figura 5 - Transformada *cross wavelet* para a precipitação do posto Santa Catarina e o Índice IOS. O nível de significância de 5% aparece em destaque, na cor vermelha. A relação entre os fenômenos pode ser identificada pelo sentido das setas (com o sentido para a direita indicando que estão em fase, o sentido para a esquerda indicando que estão em anti-fase, ou seja, defasados, e o sentido apontando para baixo mostrando que há forte influência do valor do índice IOS na precipitação mensal no posto Santa Catarina).

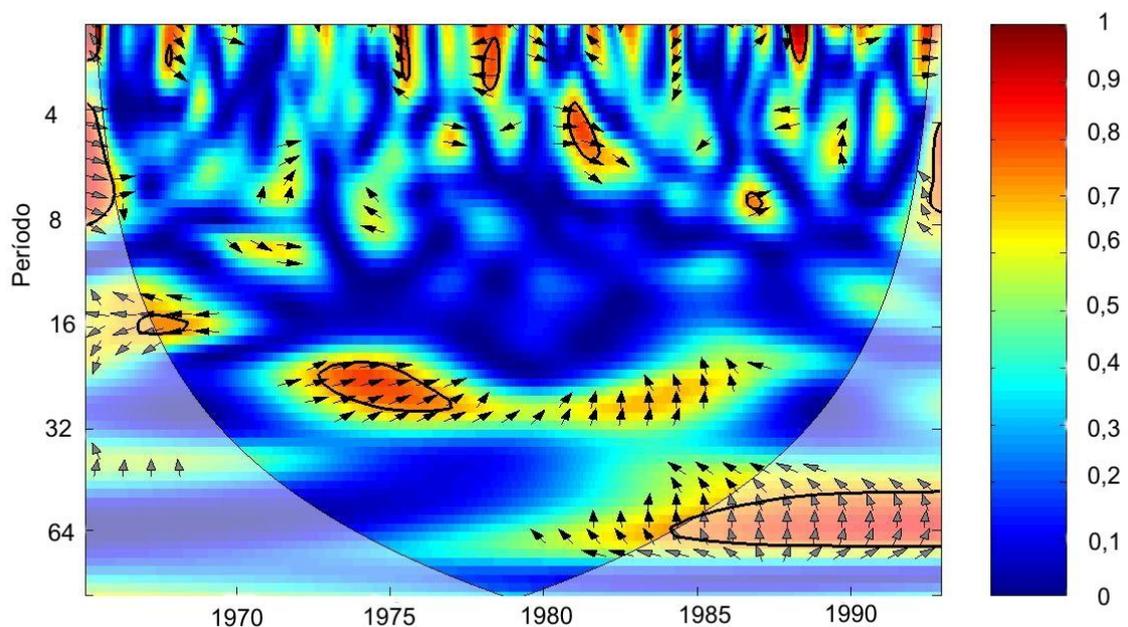


Fig. 3 Coerência *wavelet* entre o índice IOS e a precipitação para o posto Santa Catarina. O nível de significância de 5% aparece novamente em vermelho, com o sentido para a direita indicando que estão em fase, o sentido para a esquerda indicando que estão em anti-fase, ou seja, defasados, e o sentido apontando para baixo mostrando que há forte influência do valor do índice IOS sobre o total mensal precipitado no posto Santa Catarina.

5 – CONCLUSÕES

Com base na metodologia empregada e nos resultados obtidos, pode-se concluir que a transformada *wavelet* mostrou-se uma ferramenta eficaz na análise do sinal de precipitação para os postos pluviométricos estudados. O espectro de potência da *wavelet* mostrou uma grande concentração no período de 8–16 meses, revelando uma periodicidade anual dos eventos de precipitação na região. Através da transformada *cross wavelet* foi possível identificar uma influência dos valores do índice IOS sobre os índices pluviométricos da região, mostrando que existe influência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña* nos níveis de precipitação da Paraíba e de Santa Catarina. Outros estudos podem ser feitos, englobando outras variáveis hidrológicas, a fim de refinar o conhecimento da influência de fenômenos oceânicos e atmosféricos na precipitação não só das regiões estudadas, como também de outras regiões do país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional de Águas (ANA) pelos dados de precipitação disponibilizados e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro e bolsas fornecidas aos autores.

BIBLIOGRAFIA

CANE, M.A. (1998). Tropical Pacific ENSO modes: ENSO as a mode of coupled system. In: Trenberth, K.E. ed. *Climate System Modelling*. Cambridge: University Press, p.583–614.

SOUZA, E.B. de; ALVES, J.M.B.; REPELLI, C.A. (1998). Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Estação Chuvosa do Semi-Árido Nordeste. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 6, n. 2, p. 277–283.

SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C.O.; SUZUKI, K.; TRIGO, R. M. (2001) Matsuyama city rainfall data analysis using wavelet transform. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Tokyo*, v. 45, 211–216.

YANG, L; WONG, C.M.; LAU, E.H.Y.; CHAN, K.P.; OU, C.Q.; PEIRIS, J.S.M. (2008) Synchrony of clinical and laboratory surveillance for influenza in Hong Kong, *PLoS ONE* 3(1): e1399. doi: 10.1371/journal.pone.0001399.

NEZLIN, N.P. (2007) Seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll, *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution* 98 991–2549.

YATES, T.T.; SI, B.C.; FARRELL, R.E., Pennock D.J. (2007). Time, location, and scale dependence of soil nitrous oxide emissions, soil water, and temperature using wavelets, cross-

wavelets, and wavelet coherency analysis, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 34 (4) 265–272.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. (1998) A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, No. 1, 61–78.

JEVREJEVA, S.; MOORE, J.C.; GRINSTED, A. (2003) Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach, *J. of Geophys. Res.*, 108(D21), 4677, doi:10.1029/2003JD003417.