

Variabilidade interanual da precipitação na bacia do rio Iguaçu

Fabio Martins Silva, Vanessa Kelly Lermen e Jonas Teixeira Nery*

Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. *Author for correspondence. e-mail: jonanery@dfi.uem.com.br

RESUMO. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo da variabilidade interanual da precipitação, mensal e anual da bacia do rio Iguaçu, Estado do Paraná. Para tanto, trabalhou-se com 31 séries desta bacia, no período de 1967 a 1997, dados cedidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Diversos métodos estatísticos de estimação de parâmetros foram utilizados para estudar a variabilidade das séries de precipitação. Alguns resultados mostraram uma grande variabilidade da precipitação para esta bacia.

Palavras-chave: precipitação, variabilidade, El Niño, índices, bacia do Iguaçu.

ABSTRACT. Interannual variability of rainfall in the Iguaçu basin. A diagnosis on interannual variability of rainfall in the Iguaçu basin, state of Paraná, Brazil, is provided. Rainfall data collected by the National Agency of Electric Energy (ANEEL) comprising the period 1967-1997 were analyzed. Different statistical parameters were used to analyze precipitation variability in the basin. Results showed extensive rainfall variability.

Key words: precipitation, variability, El Niño, index, Iguaçu basin.

A bacia do rio Iguaçu localiza-se na região Sul do Brasil, ao Sul do Estado do Paraná. As cidades mais importantes situadas na bacia são: Curitiba, São José dos Pinhais, Colombo, Cascavel (parcialmente), Guarapuava, Araucária, Pinhais e Francisco Beltrão. A população da bacia é estimada em 3,3 milhões de habitantes, dos quais 79,4% correspondem à população urbana. Nas cabeceiras da bacia, onde se situa a área metropolitana de Curitiba, existe uma grande concentração populacional, com atividades industriais, comerciais e de serviços. No interior predomina a agropecuária, sendo as culturas de soja e trigo as mais destacadas, havendo ainda pastagens (Suderhsa, 1997).

A área da bacia situa-se entre as latitudes 25°05'S e 26°45'S e longitudes 48°57'W e 54°50'W, possuindo uma área de drenagem de 69.373 Km². Seu leito principal possui o comprimento maior de 1.275 Km, na direção leste-oeste. As nascentes do rio Iguaçu surgem da porção oeste da serra do Mar, com altitude em torno de 1.200 m na sua cabeceira, em seguida o rio Iguaçu entra no planalto de Curitiba também denominado Primeiro Planalto, com altitudes variando entre 800 e 1000 m, apresentando um relevo ondulado de colinas suavemente arredondadas. Nesta bacia, na região de Curitiba, estão depositados sedimentos de origem fluvio-lacustre, preenchendo uma antiga depressão, principalmente, durante o Pleistoceno. A largura média deste planalto é de 75 Km, limitando-se a

leste com a serra do Mar e a oeste com a Escarpa Devoniana, que caracteriza a passagem para o Segundo Planalto, com a altitude variando entre 1.090 e 1.200 m. Este planalto é constituído de rochas sedimentares (Arenito Furnas) e rochas ígneas intrusivas. A largura média do Segundo Planalto é de 120 Km e possui altitudes variando entre 750 e 780 m na porção oeste, frente à escarpa Triássico-Jurássica, que o limita com o Terceiro Planalto ou Planalto *Trapp* do Paraná; a altitude média na Testa da escarpa Triássico-Jurássica é de 1.200 m sendo constituída pelo arenito Botucatu. As demais áreas do Terceiro Planalto são formadas por um vasto derramamento Basáltico. No Terceiro Planalto, a bacia do rio Iguaçu é limitada ao norte pelo Planalto de Palmas, apresentando altitudes próximas dos 1.200 m na Serra da Fortuna, na divisa com o Estado de Santa Catarina. As águas da bacia do rio Iguaçu são despejadas no rio Paraná, caracterizando o limite oeste da bacia, do Terceiro Planalto e do Estado do Paraná, com altitude mínima de aproximadamente 80 m na sua foz (Maack, 1981). Esta grande diferença de altitudes ao longo da bacia, sugeriu um estudo dentro de escalas regionais, buscando obter diferentes caracterizações climáticas. Mesmo que em uma escala menor, o método de Köppen classifica a bacia do rio Iguaçu como de clima subtropical úmido, com verão quente e inverno fresco, sem estação seca.

Os altos e constantes níveis de precipitação favorecem à agricultura, base econômica da região, e condicionam um ótimo potencial hidrelétrico, também favorecido devido à complexidade da formação geológica que compõe a bacia do rio Iguaçu, que é capaz de gerar aproximadamente 8.300 MW de energia, o que equivale a 30,6% da potência elétrica gerada pelo Estado do Paraná (COPEL, 1996).

A geração de energia hidroelétrica é também um fator importante da economia do Estado do Paraná. A variabilidade da precipitação é um condicionante essencial no planejamento dessa atividade. Além do conhecimento do regime pluviométrico, do ponto de vista climatológico, é necessário o conhecimento do impacto das variações climáticas sobre a precipitação. Isso permite adequar o planejamento a essas variações e tornar mais eficiente e racional a utilização de recursos hídricos (Grimm e Ferraz, 1997).

Muitos trabalhos têm sido realizados estudando a precipitação do Sul do Brasil. Sansigolo e Nery (1998) estudaram a precipitação do Sul e do Sudeste do Brasil utilizando análise de fatores e agrupamento, mostrando que a região apresenta grande variabilidade sazonal, com ciclo bem definido e com o primeiro fator comum temporal explicando 52% da variância total da variável.

Um fenômeno que interfere nas características climáticas das circulações de grande escala da atmosfera terrestre é o fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS). O Oceano Pacífico Tropical sofre um aquecimento anômalo de águas, geralmente frias a Leste desse oceano. Este aquecimento provoca mudanças na circulação de grande escala da atmosfera, causando anomalias climáticas em várias regiões do globo (Hoskin e Karoly 1981; Webster, 1981 e outros).

As intensidades e fases da Oscilação Sul têm sido usualmente medidas através dos índices denominados de Índices da Oscilação Sul (IOS), que são derivados de parâmetros meteorológicos (pressão ao nível do mar, temperatura, vento e precipitação) observada nas vizinhanças de centros de ação da OS. Entre esses, um índice baseado nas diferenças das anomalias (mensais e sazonais) normalizadas de pressão ao nível do mar entre Tahiti e Darwin, que é negativo durante episódios quentes da OS, tem sido apontado como um ótimo indicador do estado da Oscilação Sul (Trenberth, 1983).

Segundo Hoffmann (1975), as frentes frias são as principais causadoras das precipitações no Sul do Brasil. Em virtude de sua variabilidade espacial e temporal, a precipitação é complexa e variável.

Os objetivos deste trabalho são dois: 1) estabelecer grupos homogêneos de precipitação

através da aplicação da análise de componentes principais, seguida de uma análise de classificação; 2) estudar a variabilidade temporal da precipitação e estudar a variabilidade interanual da precipitação no Estado do Paraná.

Material e métodos

Os dados foram cedidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Foram analisados dados de pluviosidade mensal utilizando-se um conjunto de 31 estações distribuídas no período de 1967 - 1997, nos Estados de Santa Catarina e Paraná, conforme a Tabela 1 e Figura 1.

Tabela 1. Postos pluviométricos com suas respectivas latitudes, longitudes, altitudes e períodos

Nº	Nome dos Postos	Longitude W	Latitude S	Altitude (m)	Período
E1	São Bento	25°56'	49°53'	750	1967-1997
E2	Curitiba	25°25'	49°18'	900	1967-1997
E3	Rio da Varzea	25°57'	49°23'	810	1967-1997
E4	Piraquara	25°25'	49°08'	900	1967-1997
E5	São Mateus	25°52'	50°23'	760	1967-1997
E6	Rio Claro	25°56'	50°41'	750	1967-1997
E7	Guarapuava	25°27'	51°27'	950	1967-1997
E8	Leonópolis	25°41'	51°12'	960	1967-1997
E9	Santa Clara	25°38'	51°58'	740	1967-1997
E10	Q. do Iguaçu	25°28'	52°54'	550	1967-1997
E11	Aguas do Vere	25°46'	52°56'	390	1967-1997
E12	Balça Santana	25°54'	52°51'	450	1967-1997
E13	U. Cavernoso	25°44'	52°13'	560	1967-1997
E14	Salto Osorio	25°32'	53°02'	380	1967-1997
E15	Pq Nacional	25°41'	54°26'	100	1967-1997
E16	Rio Negro	26°06'	49°48'	770	1967-1997
E17	Fragosos	26°09'	49°23'	790	1967-1997
E18	S. Canoinhas	26°22'	50°17'	765	1967-1997
E19	Marcilio Dias	26°06'	50°23'	764	1967-1997
E20	Fluviópolis	26°02'	50°35'	770	1967-1997
E21	U. da Vitória	26°14'	51°04'	736	1967-1997
E22	C. da Alegria	51°47'	26°52'	1000	1967-1997
E23	Jangada	26°22'	51°15'	800	1967-1997
E24	Faz. Maracana	26°02'	51°09'	840	1967-1997
E25	Salto Canoinhas	26°22'	50°17'		1967-1997
E26	Abelardo Luz	52°19'	26°33'	760	1967-1997
E27	Pte. Vitorino	26°03'	52°48'	550	1967-1997
E28	S. Claudelino	26°17'	52°2'	800	1967-1997
E29	Saudades	53°00'	26°55'	280	1967-1997
E30	Pte. Alta norte	50°28'	27°09'	980	1967-1997
E31	Palmitos	53°09'	27°04'	400	1967-1997

Existem várias formas para estudar um conjunto de dados unidimensionais. Neste estudo, a técnica estatística *boxplot* apresentada no livro de Tuckey (1977) foi eleita para analisar a evolução da distribuição da frequência da chuva. Esta metodologia inclui informações sobre valores estimados, sua localização (média ou mediana), escala (amplitude interquartil) e assimetria (diferença entre quartil e mediana). Com o objetivo de mostrar uma maior estabilidade nos parâmetros estimados, considera-se a média de cinco valores extremos, máximos e mínimos como uma estimativa robusta destas séries. Uma estatística é considerada

robusta quando não é afetada por valores extremos ou atípicos.

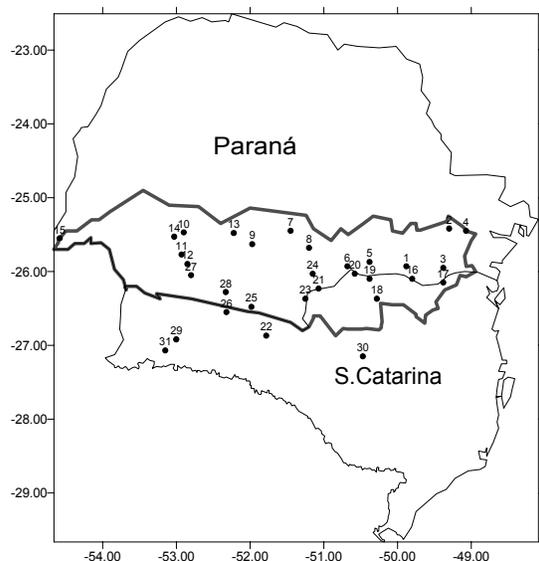


Figura 1. Localização da área de estudo com a distribuição espacial dos postos e estações utilizadas

Este tipo de análise (distribuição de frequência) das chuvas anuais dá uma estimativa da probabilidade para diferentes valores da variável estudada. Ao analisar todas as estações, está-se comparando a onda anual da distribuição regional.

Componentes principais

Originalmente, a Análise de Componentes Principais (ACP) foi introduzida por Pearson, em 1901 e por Hotelling em 1933 (Everitt e Der, 1977). A aplicação da ACP a um conjunto de dados de grande dimensão é interessante, inicialmente, apenas para determinar combinações lineares das variáveis originais que expliquem o máximo possível a variação existente nos dados iniciais.

A rigor, a ACP não necessita de condição de validade, ou seja, esta técnica não exige nenhuma suposição teórica de existência de um modelo causal, distribuição de probabilidade para os dados. Logo, não é possível estabelecer quaisquer relações de causa efeito entre variáveis, mesmo que existam. Em hipótese alguma se supõe que existam variáveis “escondidas”, ou seja, fatores subjacentes. A ACP é somente uma técnica de redução de dimensões. Por exemplo, para m componentes e p variáveis ($p \geq m$), tem-se a seguinte configuração de variáveis latentes: componentes principais resultantes de combinações lineares perfeitas (sem erros) das variáveis.

$$CP_1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p$$

$$CP_2 = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p$$

.

.

.

$$CP_m = a_{1m}X_1 + a_{2m}X_2 + \dots + a_{pm}X_p$$

A solução deste sistema de equações é única (isto é verdade na prática, na teoria, a igualdade de dois autovetores implica uma infinidade de soluções, mas tal situação é raríssima). Esta solução considera a variação total presente no conjunto das variáveis iniciais, onde a primeira CP_1 explica o máximo possível da variância dos dados iniciais, enquanto a segunda CP_2 explica o máximo possível da variância ainda não explicada e assim por diante, até a última CP_m que contribui com a menor parcela de explicação da variância total dos dados iniciais.

Análise de Cluster

Embora no estudo de áreas homogêneas fosse possível efetuar de forma relativamente simples e rápida a identificação dessas áreas, tomando por base os planos fatoriais, optou-se por realizar a identificação final das zonas homogêneas de precipitação para a bacia do Iguaçu. Utilizou-se o método de classificação hierárquica de Ward, com distância euclidiana. Esse procedimento justifica-se pelo simples fato de que o pré-processamento dos dados, através da ACP, elimina as informações redundantes e separa o sinal de grande escala (variância comum) do ruído (variância específica) associado a cada estação. Além do mais, fornece uma síntese do conjunto de dados, isenta de subjetividade e justificada em um critério estatístico. Como *input* foram consideradas as cargas (componentes principais) espaciais mais significativas.

O método de Ward utiliza uma análise de variância para avaliar a distância entre as séries. Este método pode ser resumido nas seguintes etapas, para cada série: 1) cálculo das médias das variáveis; 2) obtenção do quadrado da distância euclidiana entre essas médias; 3) soma das distâncias para todos os indivíduos e 4) minimização da variância dentro dos grupos.

A principal desvantagem apontada pelos pesquisadores da área de metodologia, em relação à utilização do método, é a sua tendência em criar grupos de tamanhos semelhantes e pequenos. Porém, em Climatologia, esse método tem se mostrado bastante eficiente, uma vez que os resultados obtidos, após sua aplicação, tendem a confirmar o número de clusters pré-estabelecidos, com base em outras informações climatológicas para áreas alvos de estudos.

Após a classificação dos grupos foi gerado um índice de anomalia da precipitação para todas as estações pertencentes a cada área homogênea, correlacionando esse índice com a anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico. Este índice foi gerado juntando todos os janeiros para cada grupo, todos os meses de fevereiro, até dezembro. Em seguida, calculou-se a média de cada matriz, originando uma matriz de valores médios de todos os meses de janeiro, de fevereiro, até dezembro. Calculou-se então a anomalia dessa matriz, sendo denominada de índice de anomalia para as regiões homogêneas, obtidas na análise de Cluster, portanto, geraram-se três índices, com base nos três grupos homogêneos obtidos.

Foi realizada também a correlação com defasagem de um, dois e três meses para a anomalia da precipitação em relação à anomalia da TSM (El Niño 1+2). O objetivo desta análise foi estudar a variabilidade da precipitação desta bacia em relação aos eventos El Niño e La Niña.

Resultados e discussão

Na Figura 2(A-D) foram traçados os gráficos *boxplot* (no eixo das ordenadas estão as frequências e nas abscissas, as estações), para algumas estações e para alguns anos previamente selecionados. As estações escolhidas a partir da base escolhida para este estudo foram (da esquerda para a direita): E5, E6, E9, E10, E11, E13, E16, E17, E18, E21, E22, E23, E24, E26, E27, E28, E29, E30 e E31.

No primeiro estudo em relação à variabilidade interanual, utilizou-se das funções de distribuição (*boxplot*) de alguns anos: 1981 e 1990 (anos normais) e 1983 e 1992 (ano de El Niño) em relação às estações que apresentaram maiores valores de precipitação nos referidos anos. Pode-se observar através da Figura 2 que no ano de 1983 e 1992, nas estações selecionadas, aparecem os maiores valores de máxima precipitação, bem como valores a 75% de precipitação, nos referidos anos, assim como seus respectivos valores médios de precipitação. Desta forma, pode-se observar uma variabilidade de ano para ano e mesmo de um evento El Niño para outro.

Para o estudo da variabilidade interanual da precipitação pluviométrica, na bacia do rio Iguaçu, através do método de Ward, geraram-se três áreas homogêneas, de acordo com o corte feito no dendrograma (Figura 3). O resultado da análise de cluster foi obtido, considerando *input* os autovetores associados aos autovalores retidos na ACP. O corte, no dendrograma, foi feito de maneira subjetiva, observando-se as características da bacia.

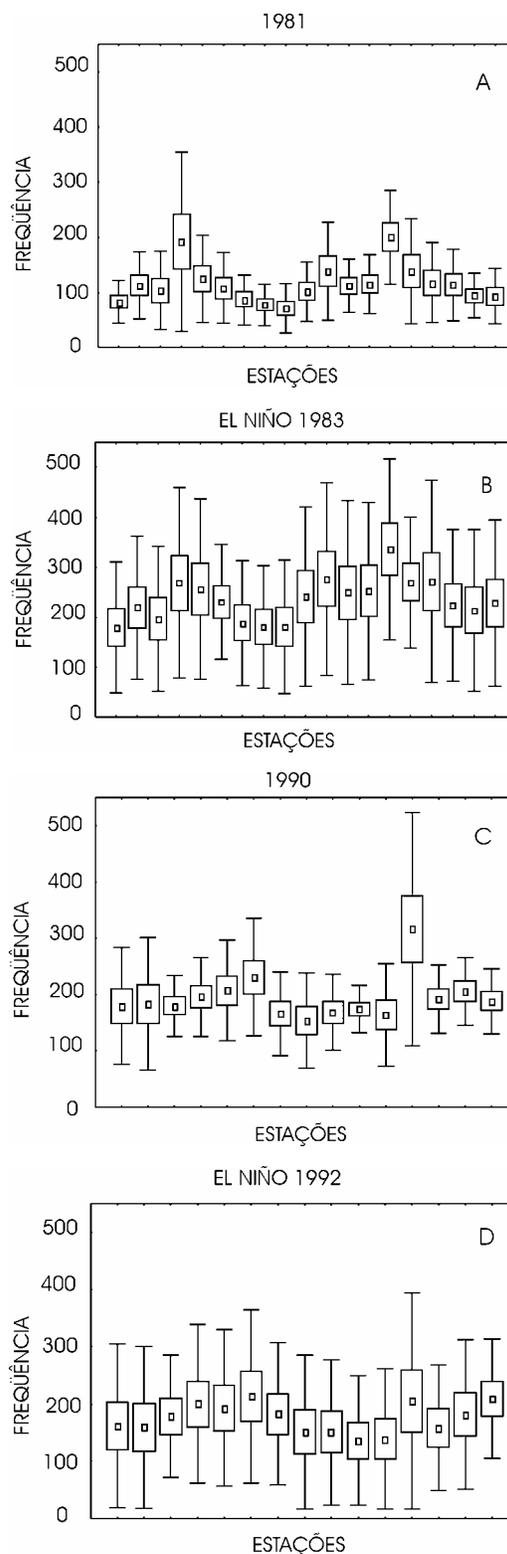


Figura 2 (A-D). *Boxplot* da precipitação: A. para um ano normal (1981); B. para um ano de El Niño (1983); C. para o ano normal (1990) e D. para o ano de El Niño (1992)

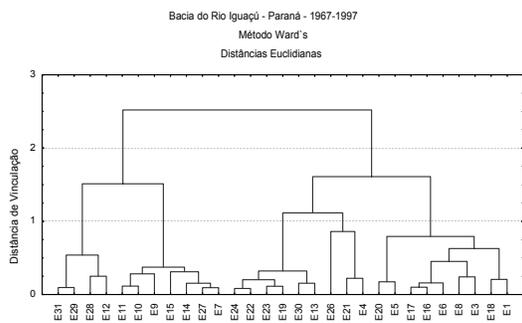


Figura 3. Dendrograma dos auto vetores associados aos auto valores retidos pela ACP

Na Figura 4, observam-se as áreas homogêneas com as respectivas estações pluviométricas utilizadas. Uma área homogênea, denominada grupo I (G I), oeste da bacia; outra área homogênea, denominada grupo II (G II), ao sul da bacia e a última área homogênea, denominada de grupo III (G III), a leste da referida bacia.

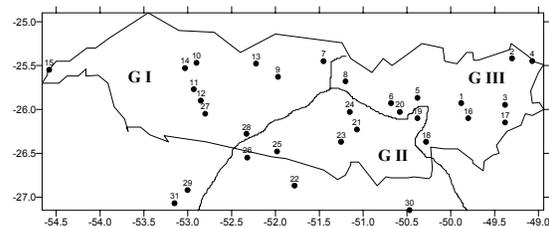


Figura 4. Distribuição espacial das áreas homogêneas e seus respectivos postos pluviométricos

A partir da obtenção dessas áreas homogêneas, pôde-se calcular um índice de anomalia da precipitação pluviométrica, para cada grupo. Assim, cada índice de anomalia foi correlacionado (correlação linear) com a anomalia da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Equatorial (El Niño 1+2). Nas Tabelas 2 e 3, pode-se observar os valores de correlação para cada grupo e para alguns eventos de El Niño e La Niña, dentro do período estudado. Os valores destacados pelo asterisco são valores significativos para um nível de significância de 1%. Observou-se uma variabilidade significativa de um evento em relação ao outro, associado à anomalia da TSM no Oceano Pacífico.

Fez-se, em uma etapa seguinte, a mesma análise tomando as séries de índices de anomalia de precipitação defasadas de um, dois e três meses. O objetivo destas defasagens foi buscar uma maior correlação entre as séries de anomalias de precipitações e as anomalias da TSM no Pacífico (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Correlações entre a anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), no Oceano Pacífico e os índices dos grupos I, II e III, nos períodos de El Niño

Período de El Niño	Grupos	Sem Defasagem	Defasagem 1 Mês	Defasagem 2 Meses	Defasagem 3 Meses
fev/72	G I	0.35	0.64*	0.34	0.02
a	GII	0.27	0.61*	0.44	0.08
fev/73	GIII	0.28	0.68*	0.43	0.22
jul/82	G I	0.47	0.35	0.23	0.02
a	GII	0.54*	0.48*	0.34	0.09
dez/83	GIII	0.52*	0.41	0.27	0.00
out/86	G I	0.47	0.50	0.22	-0.04
a	GII	0.11	0.28	0.34	0.17
dez/87	GIII	0.04	0.16	0.17	0.13

Tabela 3. Correlações entre a anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), no Oceano Pacífico e os índices dos grupos I, II e III, nos períodos de La Niña.

Período de La Niña	Grupos	Sem Defasagem	Defasagem 1 Mês	Defasagem 2 Meses	Defasagem 3 Meses
jun/67	G I	0.15	0.44	0.34	0.26
a	GII	0.03	0.32	0.44	0.25
jul/68	GIII	0.04	0.23	0.19	0.16
out/74	G I	-0.50*	-0.55*	-0.36	-0.27
a	GII	-0.65*	-0.62*	-0.25	-0.28
jan/76	GIII	-0.53*	-0.56*	-0.41	-0.27
jan/85	G I	-0.12	0.71*	0.30	0.36
a	GII	-0.03	0.69*	0.25	0.32
dez/85	GIII	0.00	0.66*	0.08	0.40

Nas Figuras 5 a 8 são apresentados os gráficos com equações de regressão para os eventos, La Niña de 1985 (grupos 1 e 3, com defasagem de um mês), o evento El Niño de 1982/83 (grupo 2, sem defasagem) e El Niño 1972/73 (grupo 3, com defasagem de 1 mês). Nestas figuras, pode-se observar a variabilidade entre os índices de anomalia da precipitação e a anomalia da TSM no Pacífico, para alguns eventos e para diferentes áreas homogêneas.

Desta forma, pode-se observar que, no curso médio da bacia estudada, os valores de correlação foram mais significativos, principalmente, para os eventos La Niña.

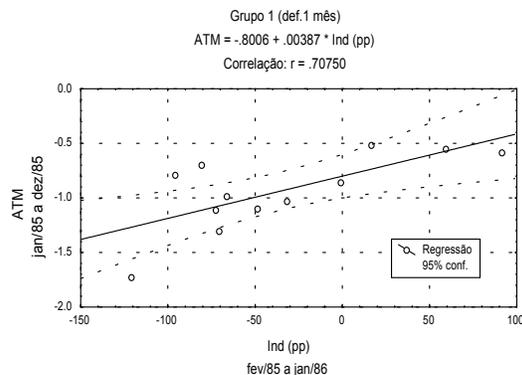


Figura 5. Equação de regressão linear entre o índice de anomalia de precipitação (índice pp) e anomalia da TSM (ATM), para o evento La Niña 1985 (grupo 1, com defasagem de 1 mês)

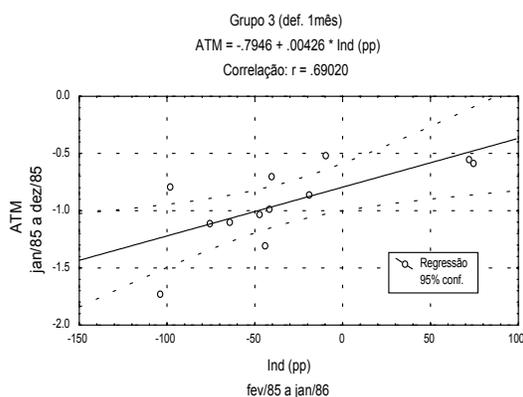


Figura 6. Equação de regressão linear entre o índice de anomalia de precipitação (índice pp) e anomalia da TSM (ATM), para o evento La Niña 1985 (grupo 3, com defasagem de 1 mês)

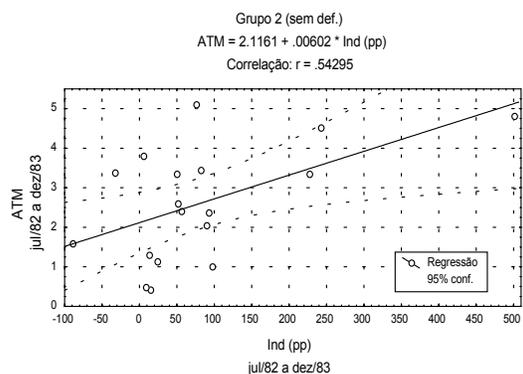


Figura 7. Equação de regressão linear entre o índice de anomalia de precipitação (índice pp) e anomalia da TSM (ATM), para o evento El Niño 1982/83 (grupo 2, sem defasagem)

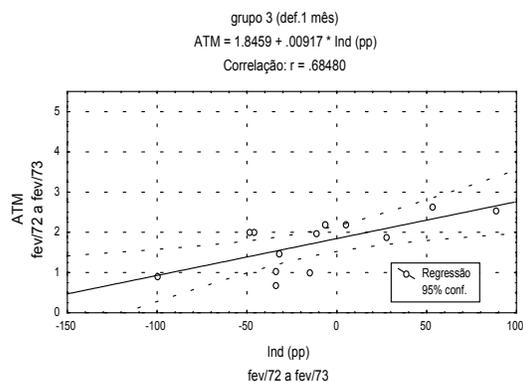


Figura 8. Equação de regressão linear entre o índice de anomalia de precipitação (índice pp) e anomalia da TSM (ATM), para o evento El Niño 1972/73 (grupo 3, com defasagem de 1 mês)

Referências

- COPEL. *Energia elétrica no Paraná, 25 anos de evolução*. Curitiba: Copel, 1996.
- EVERITT, B.S.; DER, G. A. *Handbook of statistical analyses using SAS*. London: Chapman & Hall, 1977.
- GRIMM, A.M.; FERRAZ, S.E.T. Variabilidade sazonal e interanual da precipitação no Estado do Paraná: Efeitos de El Niño e La Niña. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 1997, Vitória. *Anais...* Vitória: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1997, p. 195-214.
- HOFFMANN, J. A. J., *Atlas climático de América Del Sur*. Primera Parte. Ginebra: OMM, 1975.
- HOSKIN, B. J.; KAROLY, D. The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing. *J. Atmos. Sci.* Boston, v. 38, p. 1179-1196, 1981.
- MAACK, R. *Geografia física do Estado do Paraná*. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio, 1981.
- SANSIGOLO, C. A.; NERY, J. T. Análise de fatores Comuns e Agrupamentos das Precipitações na Região Sudeste e Sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília-DF. *Anais...* Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998, p. 200-215
- SUDERHSA, *Qualidade das águas interiores do Estado do Paraná 1987-1995*. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento ambiental. Curitiba, 1997.
- TRENBERTH, K. E. Spacial and temporal variations of the Southern oscillation. *Roy. Meteor. Soc. Quart. J.*, Reading, v. 102, p. 639-653, 1983.
- TUCKEY, J.W. *Exploratory data analysis*. Reading Mass., Addison-Wesley, 1977.
- WEBSTER, P. J. Mechanisms Determining the Atmospheric Response to Sea Surface Temperature Anomalies. *J. Atmos. Sci.*, Boston, v. 38, p. 554-571, 1981.

Received on July 18, 2001.

Accepted on October 22, 2001.