

Determinação de áreas de semelhante comportamento pluviométrico a partir de um ano de dados de precipitação

Carlos Frederico Angelis¹
Luiz Augusto Toledo Machado¹

ABSTRACT. Cluster analysis were applied to 106 rain gauges which recorded one year of hourly precipitation data. 10 different clusters were identified using 20 different variables assessed from the data set of each rain gauge. Descriptive statistics as annual amount, hourly, sazonal and diurnal variations of rainfall were also assessed from each rain gauge. The findings of this assignment are in agreement with previous studies; however, some limitations related to the diurnal cycle of rainfall are realized when many rain gauges are located far from one to another. The difference between the first harmonic peak of a given rain gauge cluster and each rain gauge of this cluster showed high values exceeding 6 hours depending on the cluster. This characteristic is related to the high spatial variability of the diurnal cycle of rainfall and it shows that diurnal variations of rainfall must be carefully investigated when large areas are the focus of the study.

RESUMO. Cento e seis Plataformas Hidrológicas de Coleta de Dados foram agrupadas em 10 diferentes grupos usando a técnica de Análise de Clusters. Vinte variáveis obtidas através da série temporal de dados de cada PCD foram utilizadas no processo de agrupamento. As PCD's registraram um ano de informações horárias da precipitação e estatísticas descritivas como total de chuva e média horária, sazonalidade da precipitação e variações ao longo do dia foram calculadas para cada grupo de PCD. Uma comparação qualitativa revelou grande concordância entre os resultados obtidos nessa pesquisa com trabalhos anteriores. Porém, grandes limitações na obtenção do ciclo diurno da chuva foram observadas quando grupos com PCD's localizadas muito distantes umas das outras foram considerados. O desvio da hora de máxima amplitude do primeiro harmônico de um determinado grupo de PCD's e as PCD's individuais que compõem esse grupo foi muito alto, e em alguns casos excedeu 6 horas. Essa limitação ocorre devido a grande variabilidade espacial do ciclo diário indicando que o ciclo diurno da precipitação deve ser cuidadosamente investigado sobre extensas áreas.

¹ Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climático – CPTEC/INPE/DSA
Rodovia Presidente Dutra, km40 – Cachoeira Paulista – SP – CEP: 12630-000
Telefone: 12 3186 9291 - email: (angelis, machado)@cptec.inpe.br

INTRODUÇÃO

A Região Tropical da América do Sul é uma das áreas mais chuvosas da Terra e ela desempenha um importante papel no balanço global de água e energia. Durante o verão e o outono austral (Dezembro a Maio) os principais sistemas atuantes sobre essa área são o anti-ciclone da Alta da Bolívia, a Zona de Convergência Inter-tropical (ITCZ), parte da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e sistemas frontais provenientes das zonas de média latitude (Todd et al., 2003; Negri et al., 2000; Kodama 1992; Figueroa e Nobre, 1990; Rao e Hada, 1990). Durante esse período a chuva sobre a Amazônia atinge o máximo com os maiores valores de totais anuais aumentando do Sul e Centro da Amazônia em direção ao Noroeste dessa região. Durante o inverno e primavera (Junho a Novembro) a chuva sobre a maior parte da Amazônia atinge os valores mínimos (Negri et al., 2000; Souza et al., 2000; Figueroa e Nobre, 1990 e Rao e Hada, 1990). Pronunciada sazonalidade da precipitação ocorre em quase todas as partes da Amazônia, com exceção da costa Atlântica onde a precipitação ocorre constantemente ao longo do ano. A precipitação sobre a Região Norte é influenciada pelo fenômeno El Niño o qual causa uma diminuição da quantidade de chuva sobre partes da Amazônia e Nordeste brasileiro. Durante os eventos de El Niño o braço descendente da Célula de Walker move na direção leste e a alta pressão formada nesses locais impede a formação de fortes atividades convectivas (Kayano e Moura, 1986; Nobre e Oliveira, 1987 e Marengo e Hastenrath, 1993).

Nas áreas localizadas abaixo da latitude 20° S a distribuição da precipitação se mostra mais uniforme e segundo Quadro et al. (1996) a média do acumulado anual varia entre 1500 a 2000 mm. Vários estudos mostram que sistemas frontais, intensidade dos jatos de baixo nível, anomalias da temperatura da superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico e a ocorrência de eventos ligados a ZCAS estão entre os fatores que modulam o regime de precipitação sobre as áreas sub-tropicais da América do Sul (Marengo et al., 2003; Wang e Fu, 2002; Barros e Doyle, 2002; Nougues-Paegle e Mo, 1997). A precipitação sobre o Sul do Brasil, Uruguai e Nordeste Argentino é reduzida ou aumentada em função de fortes ou fracos eventos de ZACS (Barros et al. 2000). Além disso, o avanço de frentes frias originárias nas zonas de médias latitudes provoca chuvas no Sul e Sudeste do Brasil, Sul do Paraguai, Nordeste da Argentina e Uruguai e dependendo da intensidade desses sistemas, precipitação pode ocorrer no Nordeste brasileiro (Cavalcanti e Kousky, 2003; Kane, 2002). A ocorrência de Sistemas Convectivos de Mesoescala sobre a Argentina, Sul do Brasil e Uruguai que normalmente movem na direção leste, também podem interferir no regime de precipitação dessas áreas (Velasco e Fritsch, 1987; Machado et al., 1998). Outros fenômenos como El Niño e La Niña também podem influenciar no regime de precipitação da região sub-tropical da América do Sul. A relação entre anomalias positivas da precipitação sobre essas áreas e a

ocorrência de El Niño foi confirmada por vários estudos observacionais (Ropelewski & Halpert, 1987; Kousky and Ropelewski, 1989)

Uma das maneiras de se estudar a climatologia da precipitação sobre o Brasil é fazer uso da rede de pluviômetros atualmente existente juntamente com o uso de dados de satélites meteorológicos. Apesar de possuir muitos pluviômetros, a rede ainda não possui densidade suficiente para garantir alta confiança nos resultados obtidos por interpolação. Além disso, os dados de satélites possuem grandes incertezas decorrentes de algumas características técnicas e operacionais desses sensores. Para diminuir essas incertezas é necessário melhorar as estimativas de precipitação derivadas de satélites, e para isso um bom entendimento do comportamento do regime de precipitação de um determinado local pode ser de grande importância.

O objetivo desse trabalho é analisar um ano de dados de todos os pluviômetros pertencentes à rede de coleta de dados da Agência Nacional das Águas (ANA), e com isso tentar encontrar padrões de comportamento pluviométrico sobre a área coberta por cada pluviômetro. Esses padrões serão usados na elaboração de algoritmos estimadores de precipitação que fazem uso de satélites meteorológicos.

MATERIAL E MÉTODO

De um conjunto total de 284 Plataformas Hidrológicas de Coleta de Dados (PCD) espalhadas pelo território brasileiro e cujos dados estão disponíveis na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), 106 foram selecionadas por apresentarem menos de 15% de ausência de dados durante o período de estudo (Fevereiro de 2003 a Janeiro de 2004). A ausência de dados nessas PCD's se apresenta de forma aleatória, ou seja, não há longos períodos contínuos sem registro de dados garantindo assim uma redução nos efeitos tendenciosos dos resultados.

Os pluviômetros de cada PCD registram a precipitação acumulada em cada hora e durante o período de estudo de um ano foi possível levantar uma série histórica registrando até 8760 horas. Nas PCD's que acusaram até 15% de ausência de dados, o total de horas registradas foi de 7446.

Vinte variáveis derivadas do conjunto de dados de cada plataforma foram submetidas a uma Análise de Clusters que produziu 10 diferentes regimes de precipitação. A Análise de Clusters revelou que o comportamento pluviométrico de cada grupo é distinto dos demais e com isso foi possível analisar todas as PCD's de uma forma coletiva, ao contrário da análise individual. A Tabela 1 mostra as variáveis usadas na Análise de Clusters.

Tabela 1: Variáveis utilizadas para agrupar PCD's segundo seu comportamento pluviométrico

Variável
1 – Total de chuva
2 – Precipitação média
3 – Precipitação média para as horas de chuva
4 – Proporção entre o número de horas com chuva e o número total de horas
5 – Precipitação média em Janeiro
6 - Precipitação média em Fevereiro
7 - Precipitação média em Março
8 - Precipitação média em Abril
9 - Precipitação média em Maio
10 - Precipitação média em Junho
11 - Precipitação média em Julho
12 - Precipitação média em Agosto
13 - Precipitação média em Setembro
14 - Precipitação média em Outubro
15 - Precipitação média em Novembro
16 - Precipitação média em Dezembro
17 – Amplitude do 1 ^o harmônico
18 – Fase do 1 ^o harmônico
19 – Amplitude do 2 ^o harmônico
20 – Fase do 2 ^o harmônico

Para o cálculo das variáveis mostradas na Tabela 1 todos os valores presentes na série temporal de dados de cada PCD que não foram associados como ausência de dados são considerados como horas válidas. Sempre que o valor da precipitação em uma determinada hora foi maior que zero considerou-se como uma hora de chuva. A variável 1 foi calculada através da soma de todas as horas válidas durante o período observado e mostra o total de chuva ocorrido no período de estudo. A variável 2 foi obtida pela razão entre a variável 1 e o número de horas válidas e revela a precipitação média em cada PCD. A precipitação média para as horas de chuva (variável 3) foi calculada a partir da razão entre os valores de precipitação maiores que zero e seu número de ocorrências. A proporção entre o número de horas de chuva e o número total de horas válidas (variável 4) mostra a porcentagem do primeiro valor em relação ao segundo. A precipitação média mensal (variáveis de 5 a 16) mostra o ciclo sazonal da precipitação durante o período observado. As amplitudes e fases do primeiro e segundo harmônicos (variáveis de 17 a 20), calculados segundo o método proposto por Wilks (1995), são associados ao ciclo diurno da precipitação durante o período de estudo.

Todas as variáveis mostradas na Tabela 1 foram utilizadas na Análise de Clusters que agrupou em um mesmo grupo aquelas PCD's que apresentaram alto grau de similaridade entre as observações individuais de cada variável. Como a Análise de Clusters não oferece uma solução para a determinação de quantos grupos serão criados, optou-se pelos 10 grupos que apresentaram os maiores desvios entre os grupos e o menor desvio para a mesma população do grupo de acordo com o dendograma obtido na análise (não mostrado).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A localização das PCD's e sua associação a cada grupo obtido na Análise de Clusters são mostrados na Figura 1.

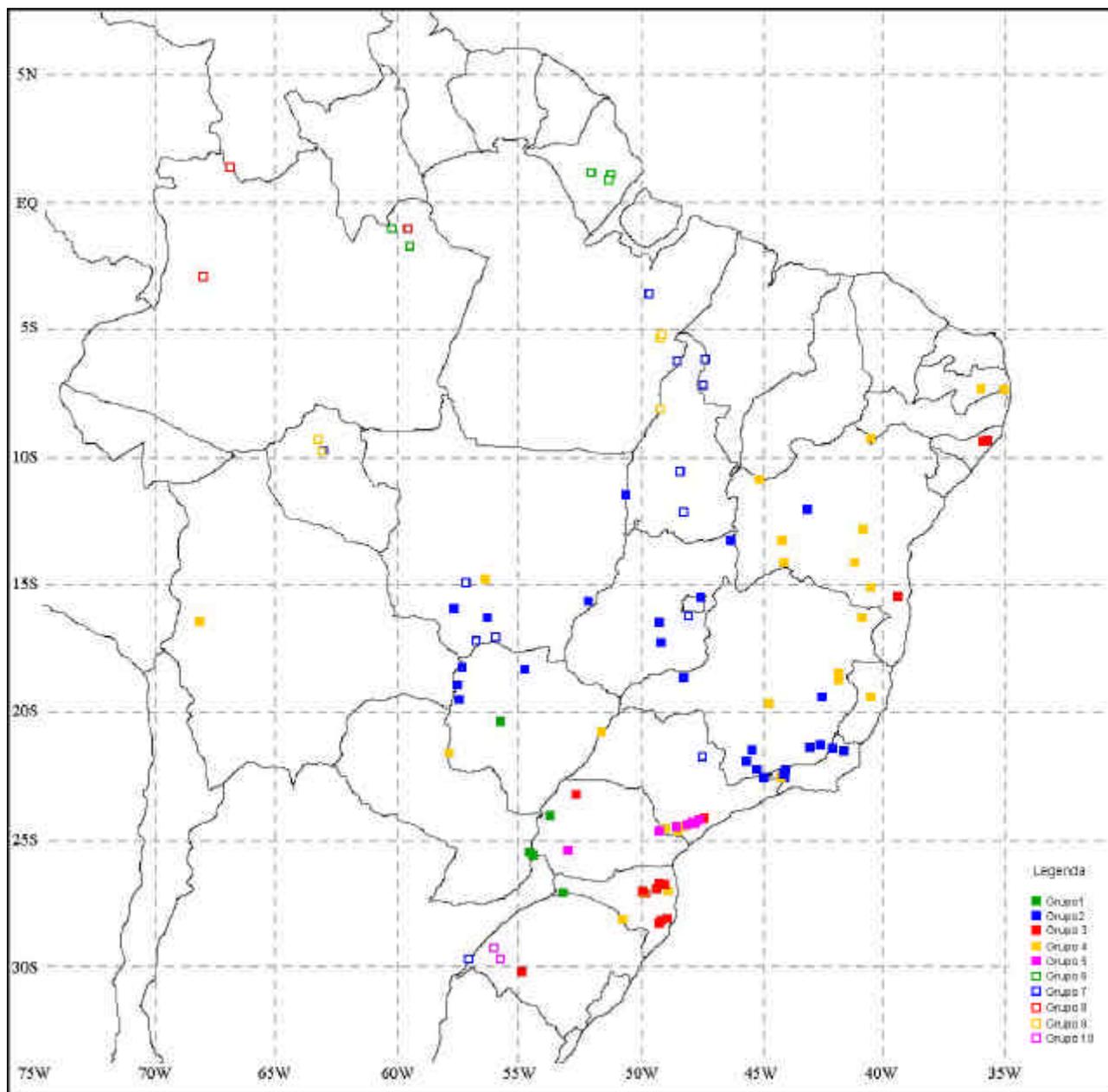


Figura 1: Localização das PCD's e identificação de cada grupo revelado pela Análise de Clusters

Todos os grupos mostrados na Figura 1 apresentam PCD's localizadas próximas umas das outras, com exceção do Grupo 4 que parece predominar na região Nordeste do Brasil e apresenta várias PCD's em áreas localizadas no Centro e Sul do país. Na Região Sul é possível identificar os Grupos 1, 3 e 5 e 10. Na região Central do Brasil o Grupo 2 aparece bem distinto dos demais. Na Região Norte os grupos 6, 8 aparecem no norte e noroeste da Amazônia, respectivamente, enquanto que os Grupo 7 e 9 aparecem no Centro-Leste e Oeste da Amazônia. Os resultados acima sugerem que a localização geográfica é um fator que influencia no comportamento pluviométrico de uma determinada região. Uma redução do número de clusters reforçou essa característica (não mostrado)

e revelou grupos ainda mais bem definidos daqueles exibidos na Figura 1. Certamente a orografia associada a região de cada PCD também apresenta um impacto local no padrão de chuva que pode responder por algumas aparentes discrepâncias nos grupos de cluster obtido, contudo, nota-se que esse fator não foi predominante haja visto a clara organização regional dos padrões de chuva.

As estatísticas do total de chuva, precipitação média, precipitação média para as horas de chuva e proporção de horas de chuva em relação ao total de horas válidas calculadas para o período de estudo são mostrada na Figura 2.

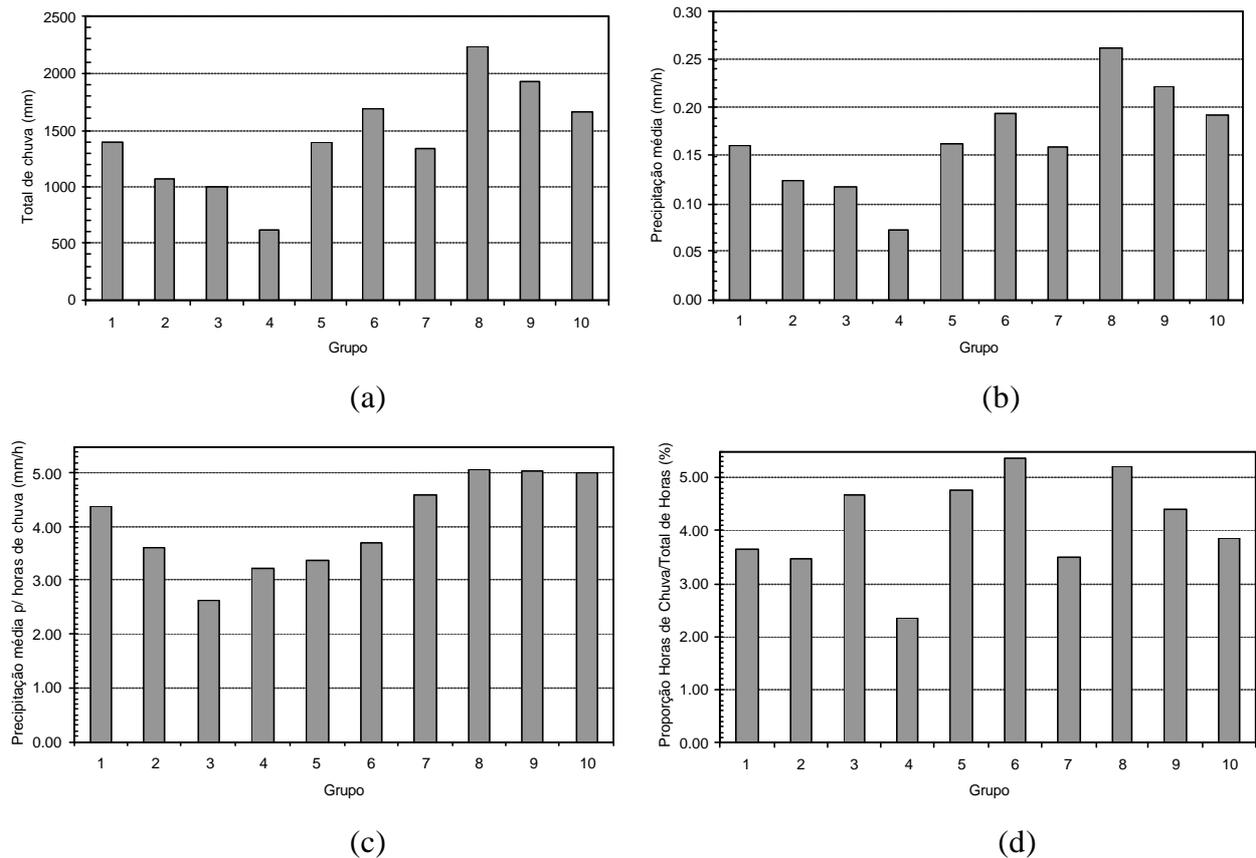


Figura 2: a) Média do total de chuva precipitada, b) precipitação média, c) precipitação média para os casos de chuva e d) proporção de horas de chuva em relação ao total de horas válidas em cada grupo de PCD

De acordo com a Figura 2a e 2b os Grupos 6, 8, 9 e 10 (Grupos 2, 3 e 4) são aqueles que apresentam maiores (menores) totais de chuva e precipitação média, enquanto os Grupos 1, 5 e 7 apresentam valores intermediários. Os Grupos 1, 7, 8 e 9 apresentaram as maiores médias quando somente as horas de chuva foram consideradas e o Grupo 3 apresentou o menor valor (Figura 2c). Interessante notar que enquanto o Grupo 3 possui baixos valores nos gráficos da Figura 2a, 2b e 2c o mesmo não ocorre para a figura 2d. Nessa última, o Grupo 3 apresenta um alto valor para a proporção de horas de chuva em relação ao total de horas observadas no período de estudo. Esse

resultado sugere que a precipitação sobre as localidades cobertas pelas PCD's desse grupo ocorrem com menor intensidade e maior duração.

O ciclo sazonal e diurno de cada grupo de PCD é mostrado na Figura 3.

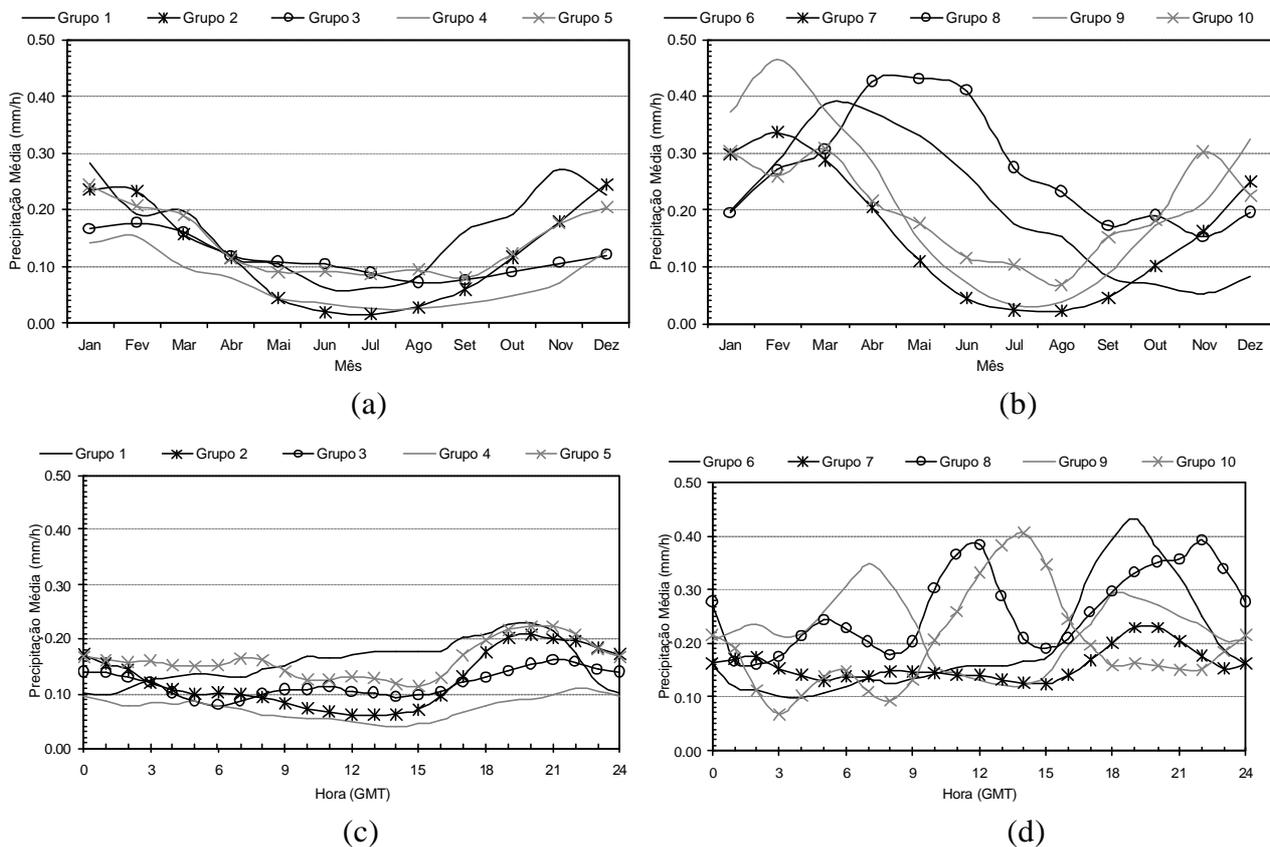


Figura 3: Ciclo sazonal da precipitação (painéis a e b) e ciclo diurno da precipitação (painéis c e d) para cada grupo de PCD's

A figura 3a e 3b revela uma estação chuvosa e outra seca para precipitação sobre o Brasil. Com exceção dos Grupos 6 e 8, as áreas cobertas pelos demais grupos apresentam o máximo (mínimo) de precipitação ocorrendo entre os meses de Novembro a Março (Abril a Outubro). Nos Grupos 6 e 8 a estação chuvosa (seca) ocorre entre Março e Junho (Julho a Fevereiro).

O ciclo diurno da precipitação também apresenta comportamento semelhante para a maioria dos grupos, com exceção dos Grupos 8, 9 e 10. Nesses últimos, um único pico de chuva ocorre às 1400 GMT para o Grupo 10, enquanto que no Grupo 8 dois máximos ocorrem as 1200 e 2300 GMT, e no Grupo 9 outros dois máximos ocorrem as 0700 e 1800 GMT. Todos os demais grupos apresentam o máximo de precipitação ocorrendo entre 1700 e 2200 GMT de acordo com a Figura 3c e 3d.

A existência de dois máximos de chuva nas estações dos Grupos 8 e 9 foi atribuída à grande distância geográfica na qual as estações pertencentes a esses grupos se localizam uma das outras.

De acordo com a Figura 1, o Grupo 8 possui duas PCD's localizadas no oeste e outras duas localizadas na região centroeste da Amazônia, e o Grupo 9 possui três estações distantes entre si localizadas na região noroeste da Amazônia. A hora de máxima ocorrência de precipitação em cada uma das PCD's desses grupos difere muito entre si e quando agrupadas produzem os dois diferentes picos de chuva percebidos na Figura 3d. A solução para eliminar esse problema seria aumentar o número de grupos na análise de clusters além de considerar também o efeito da topografia. Como o número de estações é muito baixo na região Norte do Brasil, aceitou-se o resultado obtido mesmo reconhecendo as limitações impostas pela grande distância geográfica das PCD's da Região Norte.

O resultado da Amplitude e Fase do primeiro harmônico em cada grupo de PCD's é mostrado na Figura 4.

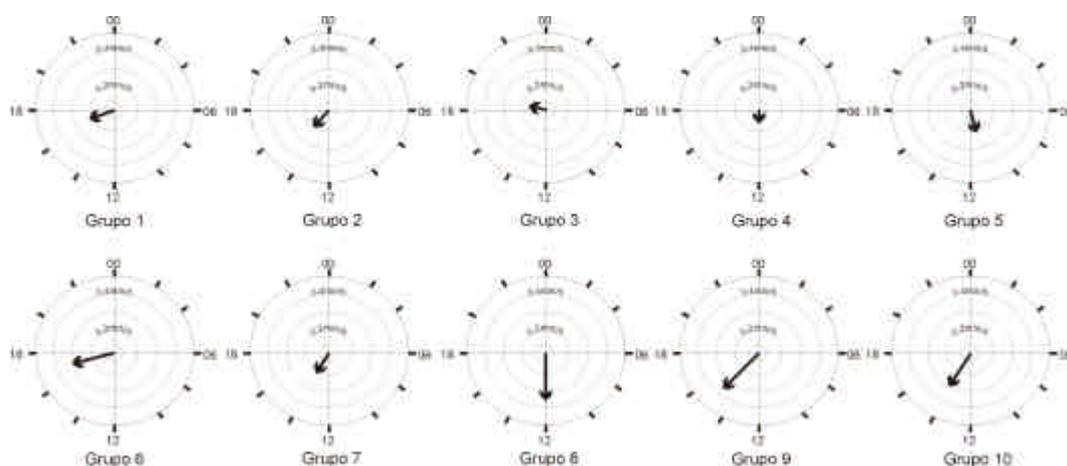


Figura 4: Diagramas em disco mostrando a Amplitude e Fase do primeiro Harmônico de cada grupo de PCD's. O tamanho da seta indica o valor da amplitude e a seta aponta para sua hora de máximo

A análise de harmônicos aplicada em cada grupo de PCD's revelou que a primeira e a segunda componentes (primeiro e segundo harmônico) possuem maior peso nos sinais do ciclo diurno da precipitação mostrados na Figura 3c e 3d do que as demais componentes. O segundo harmônico (ciclo semi-diurno) foi utilizado nesse trabalho somente como variável para ajudar na separação das PCD's. A análise dos resultados dessa componente será abordada em futuros trabalhos. Os resultados obtidos na Figura 4 estão consistentes com aqueles mostrados na Figura 3, porém muitas precauções devem ser tomadas na inferência de conclusões. O sinal médio do primeiro harmônico obtido através de todos os sinais pertencentes a cada PCD de um determinado grupo (Figura 4) pode não expressar o verdadeiro valor dessa variável devido à alta variabilidade espacial do ciclo diurno da precipitação.

Apesar do período de estudo desse trabalho focar um ano que apresentou forte atividade do fenômeno El-Niño, os resultados aqui obtidos possuem muitas semelhanças com estudos anteriores que envolveram a climatologia da precipitação sobre o Brasil e América do Sul. As áreas de altas e baixas pluviosidade apontadas por Angelis et al. (2004), Negri et al. (2000), Figueroa e Nobre

(1989) e outros, foram também observadas nesse estudo de acordo com a Figura 2. Os ciclos sazonal e diurno da precipitação mostrados na Figura 3 também são consistentes com os resultados obtidos por Angelis et al. (2004) e Negri et al. (2000). Os resultados obtidos na Figura 4, porém, não possuem muita concordância com aqueles obtidos por Angelis et al. (2004). As principais diferenças são atribuídas ao fato de ter-se obtido a média do ciclo diurno da precipitação para o grupo de PCD's em detrimento da análise individual de casos. Quando uma comparação individual do ciclo diurno da precipitação em cada PCD foi feita com os aqueles indicados por Angelis et al. (2004) os resultados apresentaram grande semelhança (não mostrado). Além disso, o desvio da hora de máxima amplitude do primeiro harmônico entre um grupo de PCD e cada PCD individual que compõe esse grupo chegou a exceder 6 horas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cento e seis Plataformas Hidrológicas de Coleta de Dados foram agrupadas em 10 diferentes grupos usando a técnica de Análise de Clusters. Vinte variáveis obtidas através da série temporal de dados de cada PCD foram utilizadas no processo de agrupamento e os resultados mostraram que a localização geográfica parece influenciar no comportamento pluviométrico de cada PCD. Percebeu-se que dos 10 grupos obtidos, 6 possuem PCD's localizadas em uma mesma região.

As PCD's registraram um ano de informações horárias da precipitação e sua divisão em grupos que possuem o mesmo comportamento pluviométrico pareceu ser eficiente para o estudo da climatologia da precipitação sobre o Brasil. Estatísticas descritivas como total de chuva e média horária juntamente com o levantamento da sazonalidade da precipitação e as variações ao longo do dia foram calculadas para cada grupo de PCD. Os resultados foram comparados qualitativamente com outros obtidos em trabalhos anteriores e todas as variáveis estudadas mostraram-se semelhantes àquelas previamente estudadas. Grandes limitações na obtenção do ciclo diurno da chuva foram observadas quando grupos com PCD's localizadas muito distantes umas das outras foram considerados. O desvio da hora de máxima amplitude do primeiro harmônico de um determinado grupo de PCD's e as PCD's individuais que compõem esse grupo foi muito alto e em alguns casos excedeu 6 horas. Essa limitação ocorre devido a grande variabilidade espacial do ciclo diário, indicando portanto que o ciclo diurno da precipitação deve ser cuidadosamente investigado quando estudado sobre extensas áreas.

Esse estudo irá apoiar a regionalização de curvas de probabilidade entre temperaturas de brilho e precipitação intrínsecas nos modelos de estimativa de precipitação por satélites. Esta análise será continuada através de testes de sensibilidade na determinação de grupos em função de diversos outros parâmetros tais como: parâmetros determinantes da distribuição gama da chuva e número de eventos de chuva forte, média e fraca.

REFERÊNCIAS

- Angelis, C.F., McGregor, GR e Kidd, C. (2004) A 3 year climatology of rainfall characteristics over tropical and subtropical South America based on Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Radar data. *International Journal of Climatology*, **24**:385-399
- Barros, V. e Doyle, M. (2002) Midsummer circulation in subtropical South America and related precipitation patterns. *VAMOS/CLIVAR/WCRP Conference on South American low-level jet. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 5-7 February*
- Barros, V., Gonzalez, M., Liebmann, B. e Camilloni, I. (2000) Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. *Theoretical and Applied Climatology*. **67**: 123-133
- Cavalcanti, I. e Kousky, V. (2003) Climatology of South America Cold Front. *7th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. 24-28 March 2003, Wellington, New Zeland.
- Figueroa, S.N. e Nobre, C.A. (1990) Precipitation distribution over Central and Western tropical South America. *Climanalise*, **5**: 36-45
- Kane, R.P. 2002. Precipitation anomalies in southern South America associated with a finer classification of El-Niño and La Niña events. *International Journal of Climatology*, **22**:357-373
- Kayano, M.T. e Moura, A.D. (1986) O El-Niño de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Geofísica*, **4(1-2)**: 201 - 214
- Kodama, Y.M. (1992) Large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ and the SACZ), Part I, Characteristics of sub-tropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **70**: 813-836
- Kousky, V.E. e Ropelewsiki, C.H. (1989) Extremes in the Southern Oscillation and their relationship to precipitation anomalies with emphasis on the South America region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **4**: 351-363
- Machado, L.A.T, Rossow, W.B., Guedes, R.L. e Walker, A.W. (1998) Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. *Monthly Weather Review*, **126 (6)**: 1630-1654
- Marengo, J. e Hastenrath, S. (1993) Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. *Journal of Climate*, **6 (4)**: 617-627
- Marengo, J.A. Cavalcanti, I.F.A. Satyamurty, P. Trosnikov, I. Nobre, C.A. Bonatti, J.P. Camargo, H. Sampaio, G. Sanches, M.B. Manzi, A.O. Castro, C.A.C. D'Almeida, C. Pezzi, L.P. e Candido, L. (2003) Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, **21 (5-6)**: 459-475
- Negri, A.J., Anagnostou, E.N. e Adler, R. (2000) A 10-yr climatology of Amazonian rainfall derived from passive microwave satellite observations. *Journal of Applied Meteorology*, **39**: 42-56
- Nobre, C.A. e Oliveira, A. (1987) Precipitation and circulation anomalies in South America and the 1982-83 El Niño/Southern Oscillation episode. *In: Conference of Geophysical Fluid Dynamics with special emphasis on "El Niño*. Ministério da Ciência e Tecnologia e Centro Latinoamericano de Física. São José dos Campos, 13-17 July 1987. p. 325 – 328
- Nogues-Paegle, J. e Mo, KC. (1997) Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review*, **125**: 279-291
- Quadro, M.F.L., Batista, N.M.N. e Calbete, N.O. (1996) Climatologia de precipitacao e temperatura no Brasil. *Climanalise Especial*, **vol. unico**: 90-100

- Rao, V.B. and Hada, K. (1990) Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**: 81-91
- Ropelewski, C.F. e Halpert, M.S. (1987) Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño / Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, **115**:1606-1626
- Souza, E.B., Kayano, M.T., Tota, J., Pezzi, L., Fisch, G. e Nobre, C. (2000) On the influence of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian Rainfall during 1960-1998. *Acta Amazonica*, **30(2)**:305-318
- Todd, M.C. Washington, R. e James, T. (2003) Characteristics of summertime daily rainfall variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. *Meteorology And Atmospheric Physics*, **83 (1-2)**: 89-108 2003
- Velasco, I. e Fritsch, J.M. (1987) Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research*, **92(D8)**: 9591-9613
- Wang, H. e Fu, R. (2002) Cross-equatorial flow and seasonal cycle of precipitation over South America. *Journal of Climate*, **15 (13)**: 1591-1608
- Wilks, D.S. (1995) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego Academic Press