

Estudo de Caso

Persistência de Precipitação no Verão 2009/2010 em São Paulo

(“45 dias de chuva”)

Maria Clara Godinho Ciloni e Leandro Meneguelli Biondo

DCA - IAG - USP

mariacilaraciloni@gmail.com, leandromet@gmail.com

R07 - 9 de Dezembro de 2010

Sumário

1	Introdução	2
2	Metodologia	3
3	Resultados	10
4	Conclusão	25

1 Introdução

Há uma grande preocupação com os efeitos da precipitação em áreas metropolitanas. Normalmente, a urbanização altera a cobertura e ocupação do solo, o que afeta, por sua vez, os processos naturais de escoamento da precipitação, e pode resultar em enchentes que afetam milhares de pessoas (Pereira Filho, 1998). A Região Metropolitana de São Paulo se insere na bacia hidrográfica do Alto Tietê, com uma área de 5.985 km² e abrange 39 municípios. A bacia ocupa apenas 2,7% do território paulista e concentra quase 50% da população do Estado. A população da RMSP esta hoje estimada em cerca de 20 milhões de pessoas.

Em geral, as enchentes ocorrem entre setembro e março no período chuvoso (Pereira Filho 2005). A maioria dos eventos de enchentes está associada a chuvas induzidas pela ilha de calor e a circulação da brisa marítima (Pereira Filho 1999). Há ainda eventos devidos ao efeito topográfico (Blanco e Massambani 1997), sistemas convectivos de mesoescala (Silva Dias 1989), sistemas frontais (Satyamurty et al. 1990) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS (Rocha e Gandú 1996). Fenômenos de grande escala como os eventos de El Niño (Gan e Rao 1991) e La Niña modulam também os regimes de precipitação na região.

O verão de 2009/2010, estação chuvosa para a região de São Paulo, teve ocorrência de chuvas fortes que provocaram danos materiais e humanos de grandes proporções em todo o estado, em particular na região metropolitana. Em decorrência dos eventos de chuva do verão perdeu-se mais de 65 vidas no estado, além das mais de 23 mil que deixaram suas casas. As chuvas foram amplamente divulgadas em todos os meios de comunicação, que passaram a contar os dias com ocorrência de precipitação na Capital, em 10 de fevereiro de 2010 foi publicado na revista Veja uma notícia que citava o 45º dia de “dilúvio”.

No período de 26 de dezembro de 2009 a 24 de fevereiro de 2010 foram registrados 1.170mm de chuva na estação do IAG-USP (zona sul da capital) e 855mm na estação Mirante de Santana (zona norte da capital), período selecionado para análise neste estudo, em que temos como objetivos:

- Caracterizar período analisado em relação à estação chuvosa em São Paulo (Climatológica).
- Identificar e descrever sistemas sinóticos relacionados às chuvas entre 26/12/2009 e 24/02/2010.

- Relacionar os diferentes sistemas e suas interações com a ocorrência e intensidade de chuvas.
- Estabelecer fontes e caminhos percorridos da umidade relacionada aos eventos de precipitação.
- Analisar variações de ocorrência e intensidade de chuvas em diferentes regiões da grande São Paulo.

2 Metodologia

2.1 Dados

2.1.1 Dados Observacionais de Estações Meteorológicas - INMET e IAG-USP

Uma estação meteorológica de superfície automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é composta de uma unidade de memória central ("data logger"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade dos ventos, etc), que integra os valores medidos minuto a minuto e transmite os dados observados automaticamente a cada hora. O Mirante de Santana é a principal estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no município de São Paulo, está localizada no bairro de Jardim São Paulo, na latitude $23^{\circ} 29' S$, longitude $46^{\circ} 37' W$. Para este estudo utilizamos os dados horários da estação Mirante de Santana do período de 01 de janeiro a 30 de março de 2010. Os dados da estação Mirante de Santana foram adquiridos com resolução temporal de 1 hora.

A Estação Meteorológica do IAG-USP encontra-se registrada junto à Organização Meteorológica Mundial sob o número 83004 . Ela é constituída de um cercado meteorológico, de um conjunto de salas no terraço do edifício da administração do Parque de Ciência e Tecnologia da USP e de uma torre no alto deste mesmo edifício, localizados no bairro da Barra Funda. Em termos geográficos, tanto o cercado quanto o edifício encontram-se nos arredores de um marco correspondente à latitude $23^{\circ}39' S$ e à longitude $46^{\circ}37' W$. A resolução temporal dos dados da estação IAG-USP utilizados é de 5 minutos.

2.1.2 Imagens de Satélite NEODAAS - Dundee Satellite Receiving Station

O NERC Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service (<http://www.neodaas.ac.uk/>) da University of Dundee oferece acesso a diversas imagens de satélites meteorológicos de diferentes fontes e resoluções. Entre estas imagens estão as do GOES 12, satélite geoestacionário localizado na longitude 75,0W com cobertura da América do Sul, América central, parte da América do Norte e da Antártica, e a maior parte dos oceanos Pacífico e Atlântico.

As imagens utilizadas no auxílio da análise sinótica foram as de alta resolução (2816x3248 pixels em 8bits - escala de 256 tons de cinza) do GOES 12, canais infravermelho térmico (ch4, comprimento de onda 10.2–11.2 μm), visível (ch1, comprimento de onda 0.5–0.7 μm) e vapor d'água (ch6, comprimento de onda 5.8 – 7.3 μm). As imagens foram adquiridas por ftp para o período de 10 de janeiro de 2010 a 01 de março de 2010, com intervalo de 3 horas entre imagens.



Figura 1: Área de cobertura do satélite meteorológico GOES12.

2.1.3 Dados de Reanálise do NCEP

Foram utilizados dados de reanálise do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) e assimilações do modelo numérico GFS (Global Forecast System), para o período de 21 de dezembro de 2009 a 05 de março de 2010. Foram utilizados os dados de 6 em 6 horas, sendo que as variáveis principais utilizadas foram:

- Nível de 850hPa - Umidade relativa, Vento e Temperatura.

- Nível de 500hPa - Linhas de corrente e intensidade do vento.
- Nível de 200hPa - Vento, Índices CAPE (energia potencial convectiva disponível) e LIFT (diferença de temperatura entre uma parcela com levantamento adiabático e a temperatura ambiente em um mesmo nível de pressão).

Além dos mapas das variáveis acima limitados às latitudes 5N e 50S e longitudes entre 80W e 20W, foram também utilizados perfis verticais, zonais, longitudinais e temporais para auxiliar a visualização dos sistemas, intensidades e suas propagações espaciais.

2.1.4 Imagens de Radar do DAEE

O radar meteorológico de São Paulo (RSP) é de propriedade do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), autarquia da Secretaria de Saneamento e Energia de São Paulo. O radar está instalado na Barragem de Ponte Nova, localizada na cabeceira do rio Tietê. O DAEE oferece diversos produtos resultantes dos dados observacionais do RSP, entre eles o Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI). Os dados do produto CAPPI têm resolução temporal de 05 minutos e registram a chuva observada numa altitude constante; no caso de São Paulo, adota-se altitude igual a 3 km. A transformação (refletividade x precipitação - relação $Z \times R$) adotada foi: $Z = 200R^{1.6}$ onde Z é refletividade e R é intensidade de chuva em mm/hora. O RSP cobre uma área correspondente a um círculo com 240 km de raio; essa área abrange toda a região leste do Estado de São Paulo, sul dos Estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais.

Os dados do RSP foram fornecidos pelo CTH em formato compactado, estes foram descompactados para arquivos compatíveis com o software de visualização Grads e posteriormente criadas imagens GIF do período para posterior análise. A resolução útil das imagens é de 240x240 pixels, sendo que a intensidade de precipitação registrada pode ser de 0, 1, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75 ou 100 milímetros de chuva. Esta intensidade pode ser visualizada em tons de cinza (8 bits, 256 tons) ou realçada da forma que for conveniente, para análise visual configuramos as imagens geradas com 12 cores diferentes, uma para cada intensidade medida não-nula.

Foram utilizados dados do período entre 20 de dezembro de 2009 e 20 de março de 2010 com resolução temporal de 30 minutos para verificação de precipitação e classificação, e posteriormente dados com

resolução temporal maior, de 5 minutos, para definição dos eventos de referência dos diferentes sistemas meteorológicos.

2.1.5 Cartas Sinóticas do CPTEC-INPE

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza, a cada 6 horas, análises sinóticas de superfície e altitude, em que são destacadas as condições de tempo da América do Sul e seu entorno. As informações contidas nas cartas incluem temperatura, vento, pressão de superfície, corrente em altitude e intensidade de jato. Também são representados os sistemas meteorológicos atuantes em diferentes áreas da região de cobertura, como frentes frias e quentes, Zona de Convergência Inter Tropical (ZCAS) e Zona de Convergência de umidade (ZCOU), sistemas de alta e baixa pressão.

As cartas do CPTEC foram utilizadas para verificação das conclusões tiradas à partir dos dados de reanálise, e em alguns casos para identificar sistemas que não conseguimos identificar por outros meios.

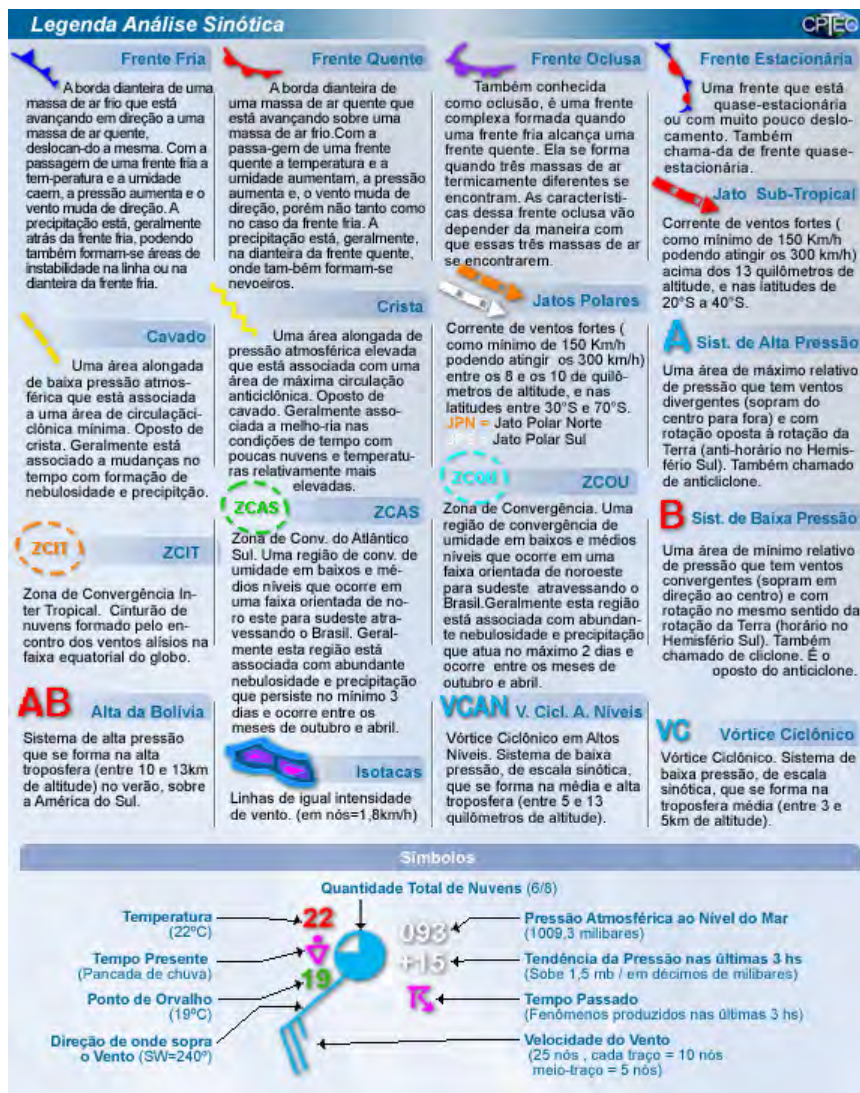


Figura 2: Legenda das condições indicadas nas cartas sinóticas do CPTEC.

2.2 Sistemas Meteorológicos

2.2.1 Convecção Isolada

A CI geralmente se forma à tarde sem orientação aparente e pode estar, ou não, associada a algum sistema de grande escala; surge e se dissipa, geralmente, próximo ao local de formação. São células convectivas ordinárias sem deslocamento aparente ou de deslocamento muito lento, e sem região preferencial para formação, sobre o continente. [J. Farias, 2009]

Eventos de CI ocorrem preferencialmente entre 13:30 HL e 18:30 HL, de acordo com o ciclo do aquecimento diurno. Estas células ocorrem em sua grande maioria no interior do continente, seu deslocamento, quando observado, é de oeste para leste na maior parte das vezes. Podem dar origem, na fase de decaimento, a áreas de precipitação estratiformes mais extensas do que as células na fase madura de desenvolvimento. [J. Farias, 2009]

2.2.2 Brisa Marítma

A BM pode dar origem a sistemas precipitantes convectivos e estratiformes. Os eventos convectivos induzidos pela BM se deslocam para oeste na forma de CI, com características morfológicas semelhantes a CI. Em geral, desenvolvem-se entre 14:30 HL e 19:00 HL e tendem a formar linhas de células convectivas ao longo da costa, as quais são favorecidas pela Serra do Mar. Este tipo de sistema alcança a RMSP, onde normalmente produz precipitação convectiva intensa. [J. Farias, 2009]

Em alguns casos, a BM dá origem a pequenas bandas ou áreas de precipitação estratiforme, com pequeno tempo de vida, nestes casos é possível observar o deslocamento de núcleos convectivos alinhados em direção ao interior do continente, associada à frente de BM.[J. Farias, 2009]

2.2.3 Frentes Frias

Uma frente fria é formada pelo deslocamento de uma massa de ar mais frio que se move em uma região inicialmente mais quente. No Brasil as frentes frias são formadas principalmente pelo deslocamento de massas polares secas que se movem de sudoeste para nordeste sobre a região continental (Sul e Sudeste, podendo chegar até o Nordeste) e a parte adjacente do Oceano Atlântico Sul.[Cavalcanti,2009]

A precipitação gerada pelas frentes frias na região do RMSP utiliza umidade existente na atmosfera quente existente na localidade antes do deslocamento do sistema. As frentes frias atuam na região do RMSP durante todo o ano, sendo mais convectivas durante o verão e estratiformes no inverno, quando a velocidade de passagem da frente é maior. O tempo de deslocamento médio destas frentes na região é de 18-20 horas[Santos, 2006]. Um critério utilizado para a identificação objetiva de frentes frias no Brasil é identificar uma redução de temperatura em 925hPa, de pelo menos $2^{\circ}C$, e/ou a existência de ventos de sul maiores ou iguais a $2\frac{m}{s}$. [Cavalcanti,2009]

2.2.4 Bandas Dispersas de Precipitação

Deslocamento de Nordeste para Sudeste, sem organização espacial, com extensa área de chuva estratiforme com presença de áreas menores com chuva convectiva. As BD não apresentam organização espacial e, geralmente, estão associadas a um sistema de grande escala, tais como frentes estacionárias. Em geral, elas se deslocam de noroeste para sudeste e com chuva estratiforme e convecção embebida nestas. O período de vida destes sistemas pode chegar a até 5 dias, de acordo com os dados de radar. As BD convectivas de maior longevidade estão, em geral, associadas aos episódios de ZCAS.[J. Farias, 2009]

Episódios de ZCAS têm variabilidade associada a entrada de frentes frias (em geral), a propagações para leste da Oscilação de Madden-Julia (no período de 30-60 dias) e a propagações de ondas de rossby (2-30 dias)[Cavalcanti,2009]. Estes eventos que influenciam na variabilidade da ZCAS estão, por sua vez, associados uns aos outros.

2.2.5 Ondas frontais “Subtropicais” (OFST)

Entre os meses de outubro e abril, uma das regiões ciclogênicas preferenciais sobre a América do Sul, localizada sobre o nordeste da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul apresenta uma redução da ocorrência de eventos ciclogênicos. Porém, mesmo com uma frequência menor, alguns cavados ainda conseguem cruzar os Andes por latitudes mais baixas, gerando eventos ciclogênicos que provocam grandes impactos à população. Neste período do ano estes sistemas de baixa pressão em superfície também se formam mais ao norte, entre o norte do Rio Grande do Sul (RS) e a Região Sudeste (SE) do Brasil, geralmente entre os paralelos 20°S e 30°S . Em alguns casos eles podem se formar no continente, na área compreendida entre o norte da Argentina, Paraguai, sul de Mato Grosso do Sul (MS) e o oeste da região Sul do Brasil [Ciclogênese, 2008].

A Figura 3 mostra a área aproximada onde os ciclones costumam formar-se durante o período compreendido entre os meses de outubro e abril.

Devido à presença destacada da corrente de JST como o principal suporte dinâmico em altitude, estes sistemas ciclônicos podem ser denominados, a partir de uma abordagem prática operacional, ondas frontais com características subtropicais ou simplesmente Ondas Frontais Subtropicais (OFST). As OFST, definidas desta maneira (visão operacional), geralmente têm associado um ciclone com

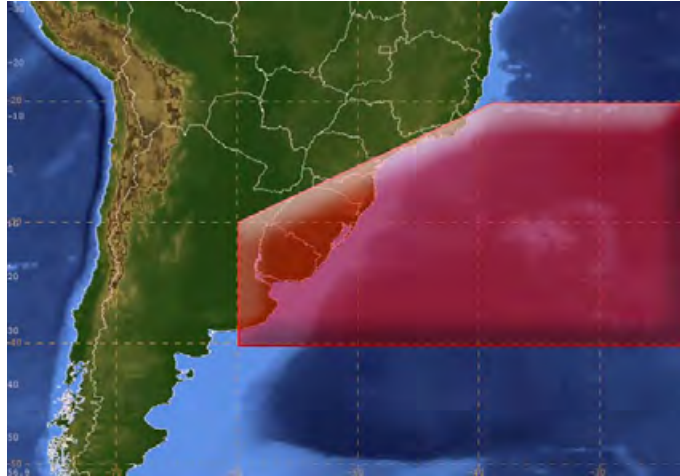


Figura 3: Área ciclogênica na América do Sul durante o período outubro – abril.[Ciclogênese, 2008]

características extratropicais fracas. Em algumas ocasiões, as OFST podem apresentar ciclones com núcleos quentes em baixos níveis mantido pela atividade convectiva [Ciclogênese, 2008].

O ramo frio associado às OFST pode ser denominado como “frente subtropical” ou simplesmente cavado baroclínico, porém jamais pode ser confundido com uma frente polar clássica. O contraste de temperatura do ar em superfície, provocado pelo deslocamento do ramo frio da OFST é muito menor se comparado com os sistemas polares típicos. Em várias ocasiões quase não é possível detectá-lo através da temperatura do ar em uma carta sinótica de superfície, sendo apenas possível observar um gradiente de umidade significativo. Um aspecto importante para o prognóstico é que em uma frente polar a nebulosidade e a precipitação ocorrem no setor frio do sistema, após o giro ciclônico do vento. Em um cavado baroclínico a ocorrência de nebulosidade e precipitação geralmente ocorre antes do giro ciclônico do vento[Ciclogênese, 2008].

3 Resultados

Inicialmente escolhemos o período a ser considerado para a identificação dos sistemas meteorológicos que aparentam provocar as precipitações e quantificar esta precipitação. O período total de interesse para a estação chuvosa de 2009/2010 engloba os meses de Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março, sendo que em Novembro e Março há uma situação sinótica de transição, em geral sem padrões definidos de comportamento, o que traz maiores dificuldades de análise. Assim sendo, nos limitamos

aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, especificamente o período entre 26/12/2009 e 25/02/2010, com um total de 61 dias com chuvas consistentes. Os dados das estações Mirante de Santana (norte da capital) e IAG-USP (17Km ao sul, coincidentemente na mesma latitude) são apresentados na **Figura 4**.

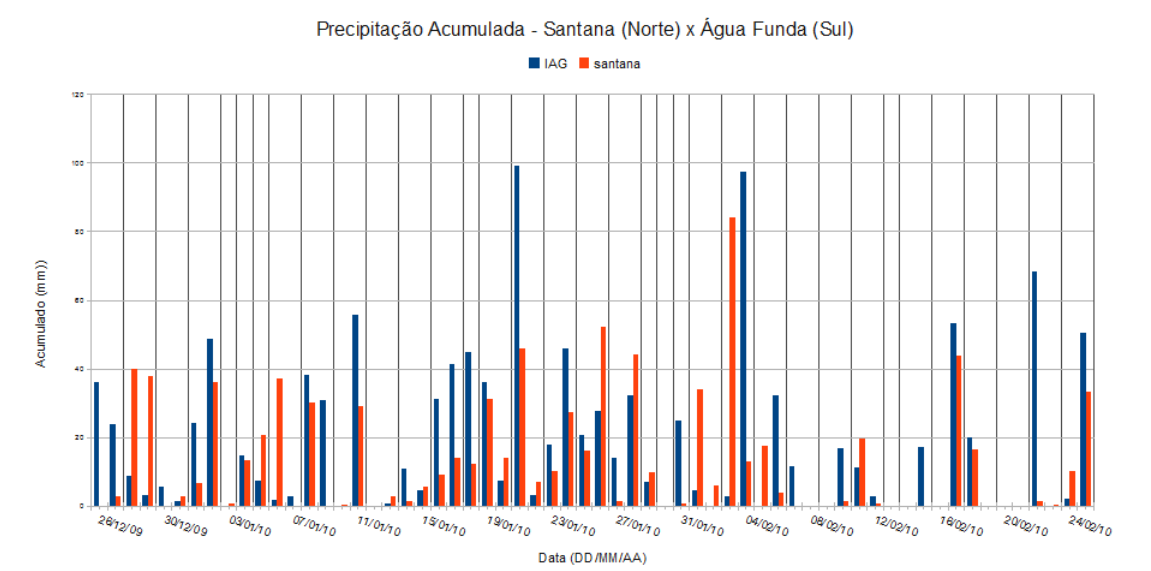


Figura 4: Acumulados diários de precipitação, 26/12/09 a 25/02/10 (61 dias – 45 de chuva no IAG e 43 em Santana), 48 dias com chuva no IAG ou Santana (>1mm/dia) Total IAG – 1.170mm Total Santana – 855mm

Para verificar a importância das chuvas do verão 2009/2010 foram consultadas diferentes fontes de dados climatológicos e comparados com os valores registrados, entre eles utilizamos o Boletim trimestral do IAG-USP, que para DJF apontou um número de dias de chuva acima das normais climatológicas de 1933-1960, também acima das normais de 1961-1990 e da média de 1933-2009 para os meses de dezembro e janeiro, nestes meses a precipitação também foi significativamente maior às normais climatológicas e a média. Para fevereiro a situação foi um pouco diferente, o número de dias de chuva foi menor do que as normais e média, mas a precipitação ficou consideravelmente acima (**Fig.5**). O mesmo ocorreu na estação mirante de Santana, em que a chuva registrada foi 185% (370mm) da normal climatológica de precipitação para dezembro, 242% (580mm) em janeiro e 115%(300mm) em fevereiro, sendo que 57% da precipitação de fevereiro se concentrou nos primeiros 7 dias do mês.

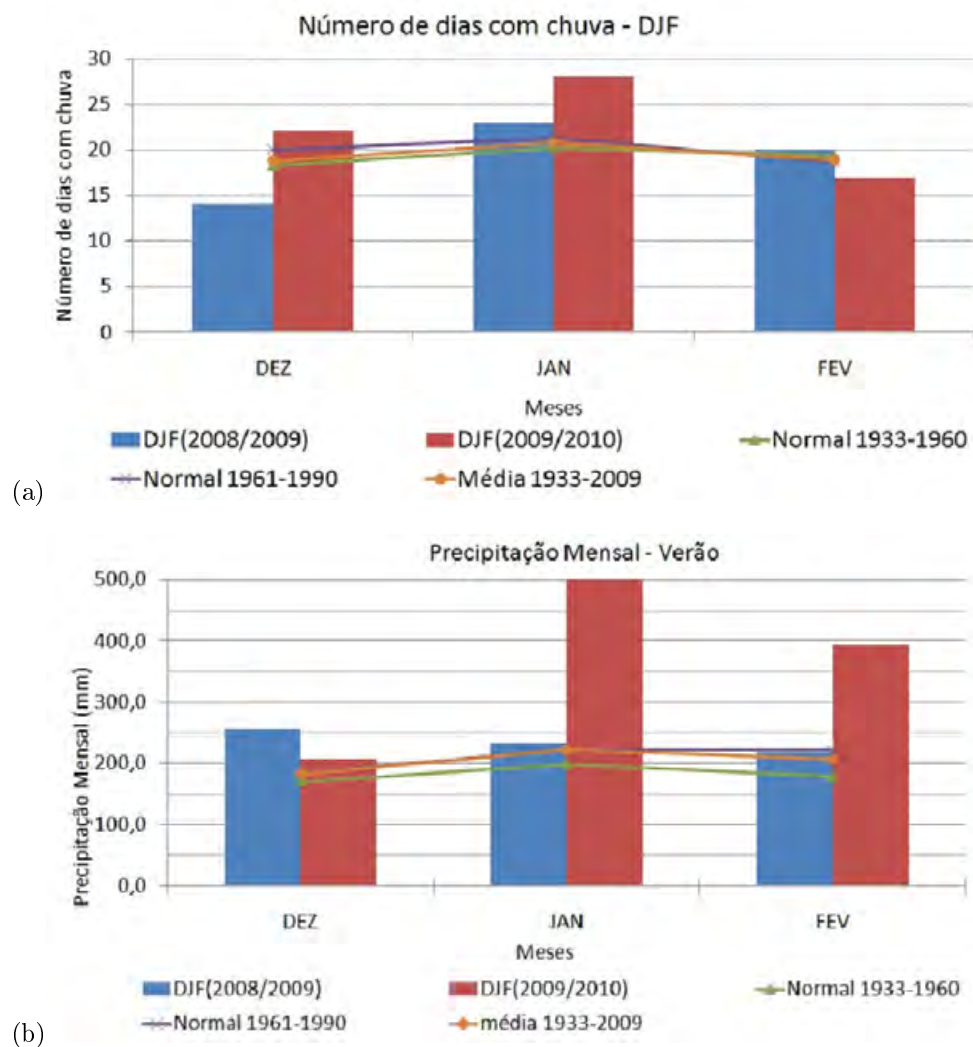


Figura 5: dias com chuva e precipitação total no verão - boletim iag

Outra informação relevante encontrada no boletim trimestral do IAG-USP é a variação ao longo dos anos da quantidade de dias de precipitação e precipitação acumulada, sendo que a quantidade de dias foi alta mas próxima de outros valores registrados anteriormente, enquanto o acumulado é o maior já registrado, por uma margem maior que 20% em relação ao ano com o segundo maior acumulado desde 1934. Os gráficos históricos são apresentados na **Figura 6**, a seguir:

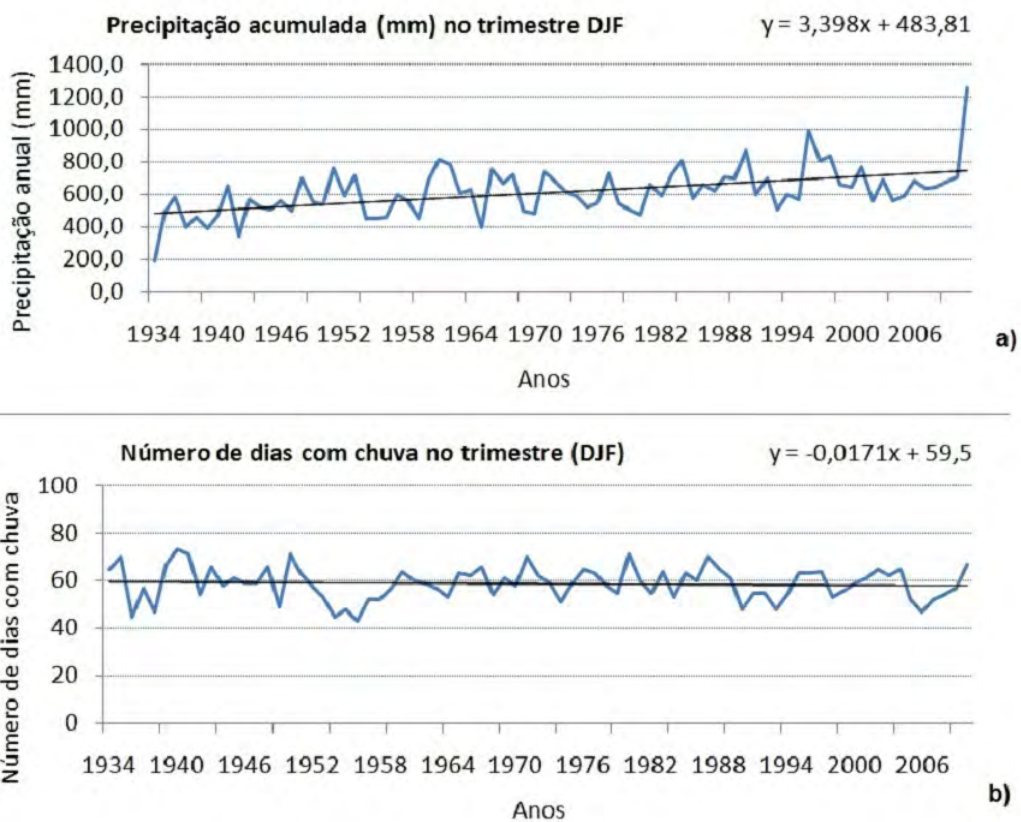


Figura 6: histórico dias e prec boletim iag

Sabendo que a chuva do período de interesse foi acima do normal, fizemos uma análise das anomalias de precipitação e temperatura do Brasil para DJF, utilizando os produtos de anomalia do INMET. Para o mês de dezembro houve anomalia positiva tanto de temperatura quanto de umidade para a maior parte do estado de São Paulo, e o restante do país registrou anomalias de precipitação positivas e negativas com anomalia de temperatura próxima de zero em quase todo o território nacional (**Fig.7**)

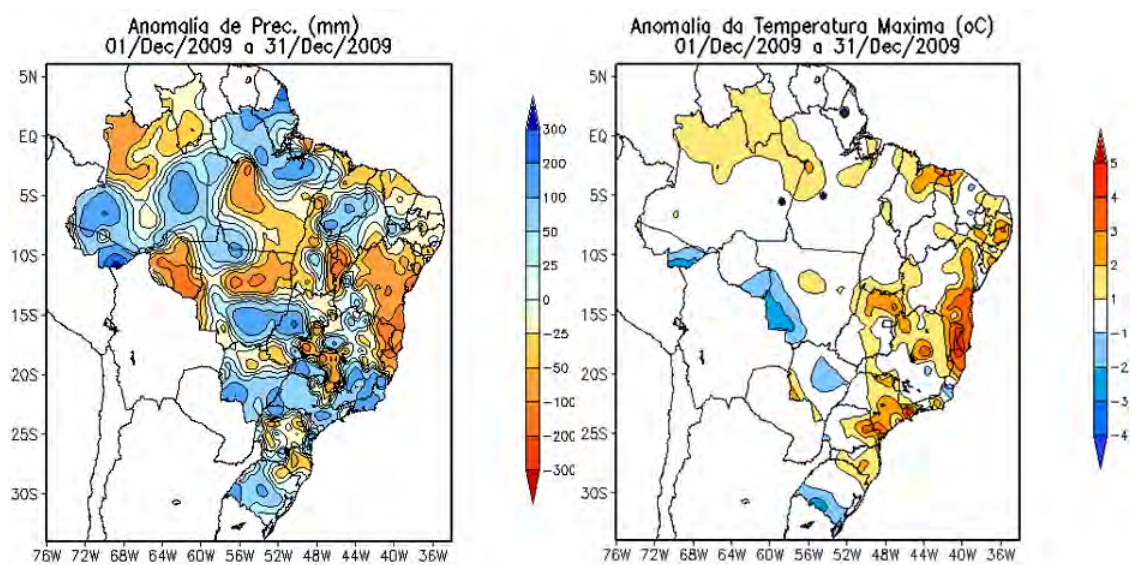


Figura 7: Anomalias dezembro 2009 para os dados do INMET.

Para janeiro as anomalias continuaram positivas para a região leste do estado de São Paulo, a de precipitação mais significativamente, sendo que no interior (noroeste) houve anomalia negativa. O restante do país teve uma área maior com anomalias de precipitação negativa e de temperatura positiva (Fig.8) .

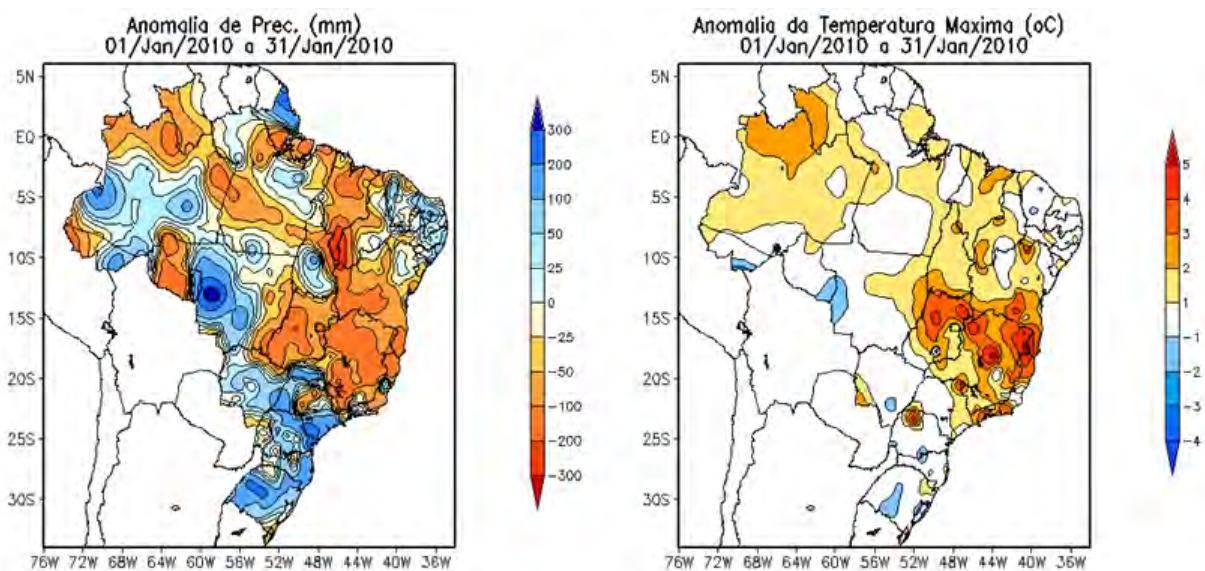


Figura 8: Anomalias janeiro 2010 para os dados do INMET.

Por fim, para fevereiro foram registradas anomalias negativas de precipitação para a maior parte do estado de São Paulo, ficando as anomalias positivas concentradas na região da capital, o comportamento espacial da anomalia de temperatura é semelhante, com anomalias positivas concentradas na região da capital (Fig.9). A região centro-oeste registrou anomalias positivas e a maior parte do restante do país teve menos chuva, registrado predominantemente anomalias positivas de temperaturas no Brasil.

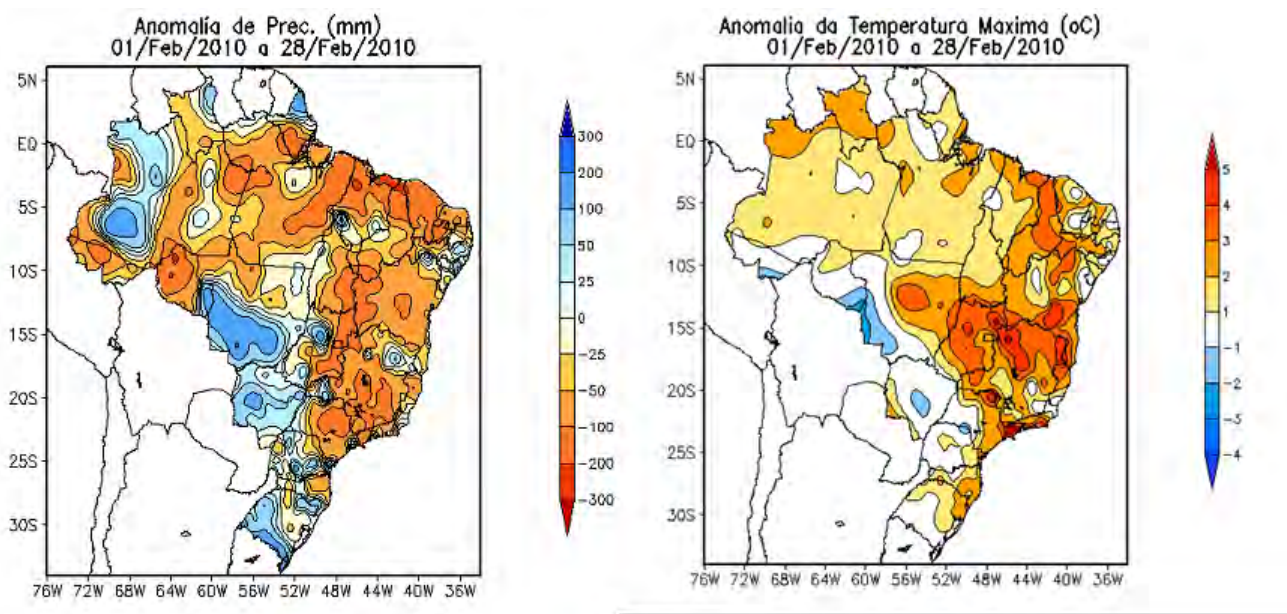


Figura 9: Anomalias fevereiro 2010 para os dados do INMET.

Para a classificação das chuvas foram utilizados os campos de reanálise nos horários mais próximos da precipitação registrada nas estações meteorológicas de referência, a seguir são apresentados exemplos de situações sinóticas observadas, como elas foram classificadas nas cartas de superfície do CPTEC e como consideramos os sistemas presentes nas imagens em nossa classificação (Fig. 10 a 14).

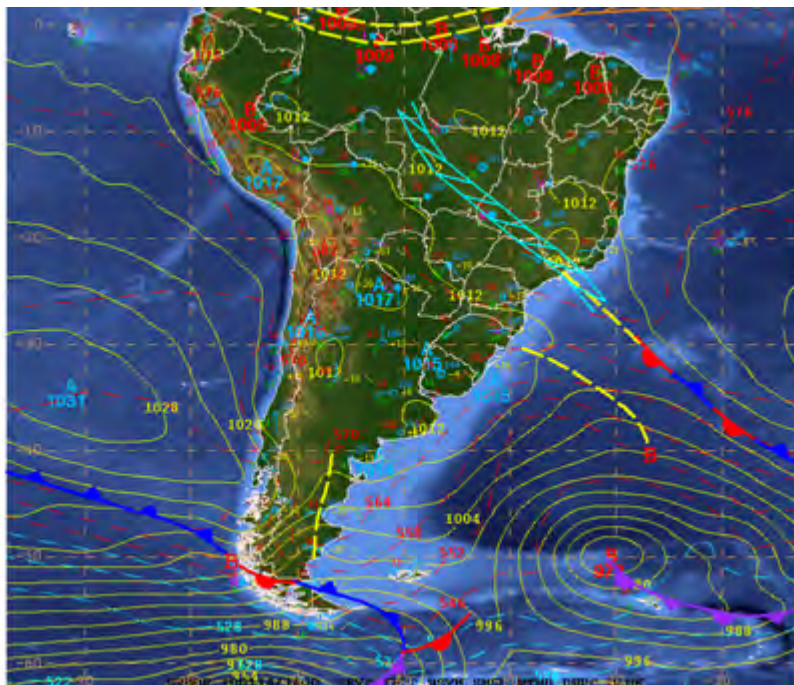


Figura 10: Exemplo de carta sinótica confirmando o esperado para um dia em que há influência de cavado baroclínico e ZCOU.

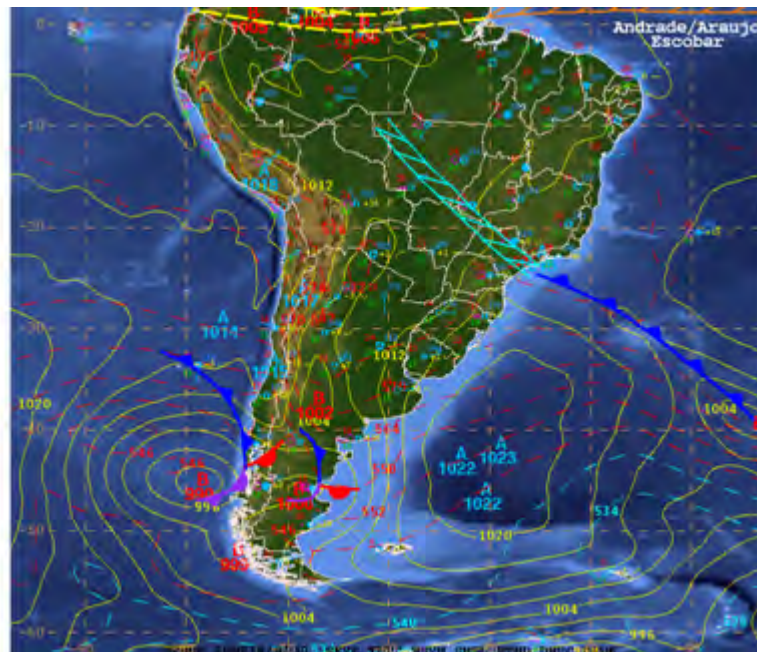


Figura 11: Exemplo de carta sinótica confirmando o esperado para um dia em que há influência de frente e ZCOU, e pelo horário da precipitação também foi classificado como afetado por brisa.

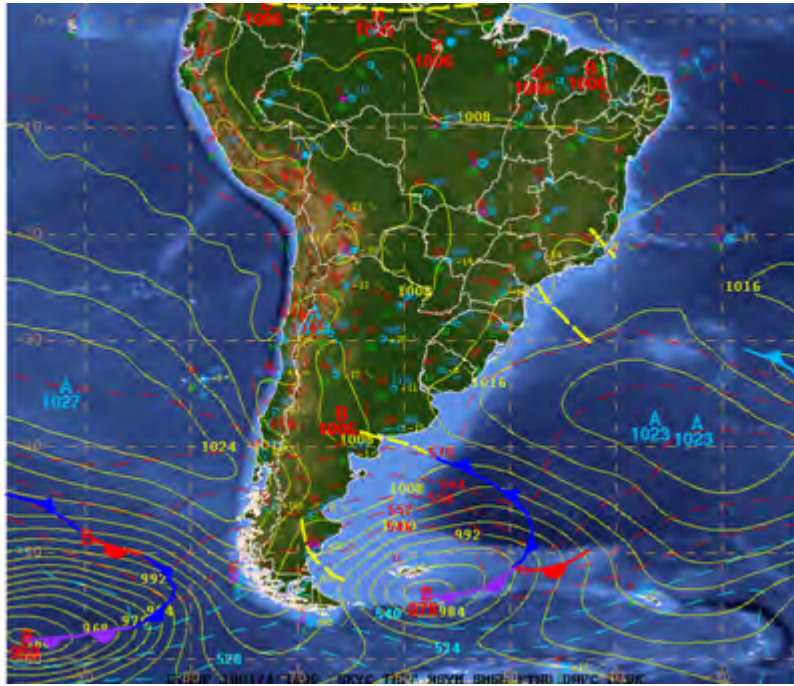


Figura 12: Exemplo de carta sinótica confirmando o esperado para um dia em que há influência de cavado baroclínico e brisa

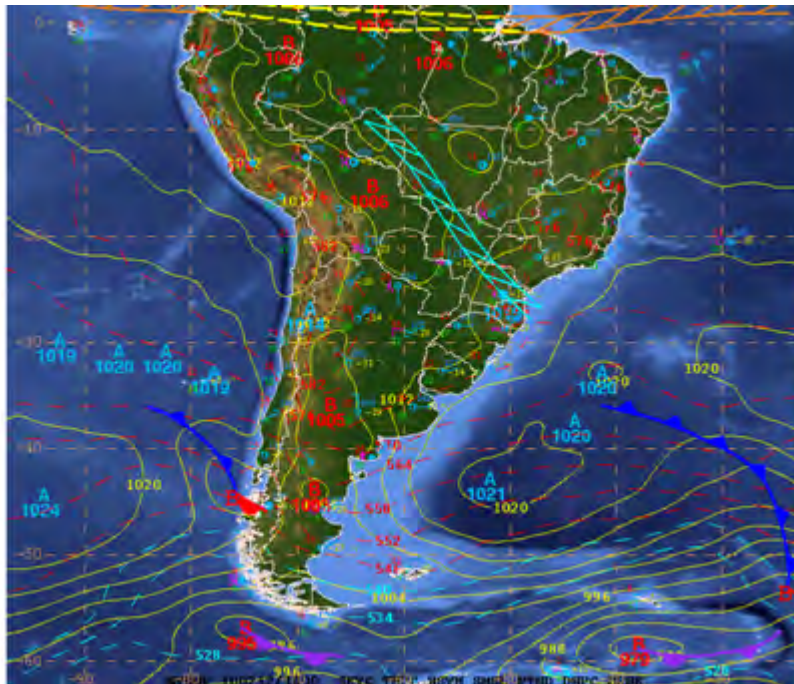


Figura 13: Exemplo de carta sinótica confirmando o esperado para um dia em que há influência de brisa e ZCOU

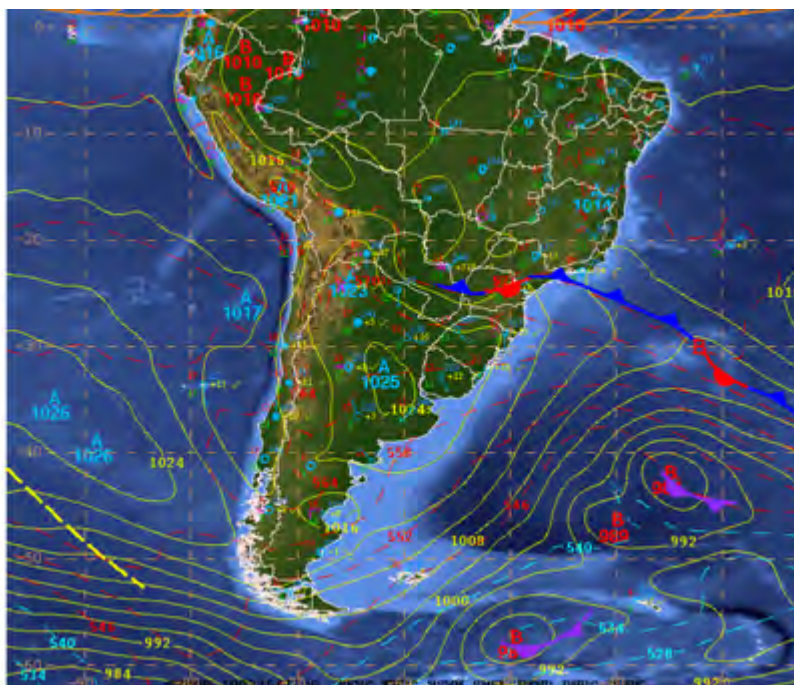


Figura 14: Exemplo de carta sinótica confirmando o esperado para um dia em que há influência de frente e brisa.

Quanto à classificação realizada, seguem exemplos da análise de padrões realizada por Maria Clara para o período de 25 de dezembro de 2009 a 23 de janeiro de 2010 :

Dia 25, os ventos se organizam de forma a vir da Amazônia pra São Paulo, estando muito fortes às 18Z, e quase chegando ao leste do estado. Em superfície, pode-se associar a tal configuração, a presença de uma região de baixa pressão: às 12Z, de cerca de 1009 e 1010 hPa, a leste dos estados RJ, SP, PR, SC e RS, e, de 1007hPa às 18Z, a leste do litoral sul de SP e dos litorais do PR e SC.

No dia 25, é notável que se configura uma circulação anticiclônica, no nível de 850hPa, sobre boa parte do Brasil. Em superfície, às 06Z, nota-se uma configuração de centros de baixa na forma de uma vírgula invertida, que está fortalecendo essa circulação.

No dia 26, às 00Z, ventos de SW dominam o Sudeste e parte do Centro-Oeste do Brasil, enquanto ventos de S dominam a região Sul. Isso faz com que a grande área de alta umidade relativa migre para nordeste.

Nesse mesmo dia, às 12 e às 18Z, nota-se que a os ventos vêm da Amazônia para o estado de São Paulo. Isso está associado à presença de uma baixa de 1008 hPa em superfície, no litoral dos estados SP, RJ e PR, às 12Z e de uma baixa de cerca de 1004 e 1005 hpa nessa mesma região, às 18Z. O CPTEC coloca um cavado nessa região.

No dia 27 às 12Z, há uma área de umidade relativa alta sobre o oceano que se acopla ao grande bloco continental de umidade relativa alta, pelos litorais de SP e PR, fazendo com que os ventos virem e passem a ter componente meridional de norte. Em superfície, há nessa região um cavado desde as 00Z do dia 26.

Dia 28 às 00Z, a região úmida sobre o oceano já se desacoplou mas há uma circulação ciclônica fechada ao redor de SP, sobre a região que compreende os estados do PR, leste de MS, MG e litoral de SP. Às 06Z, essa circulação já está desfeita e os ventos começam a vir da Amazônia outra vez. Em superfície, isso é justificado pela presença de uma região de baixa pressão de cerca de 1002hPa nos litorais da região Sul e dos estados SP e RJ.

Dia 28 às 18Z, em 850hPa, nota-se uma região de convergência bem definida sobre o Atlântico, com ventos fortes e umidade relativa alta, referente a um cavado amplo em superfície.

Ao longo do dia 29, observa-se circulação ciclônica a leste da região Sul, e circulação anticiclônica sobre o Atlântico a nordeste da língua úmida. Essas circulações associadas fazem com que a língua se estreite, ficando fina e próxima à sua

antiga borda norte. Em superfície, nota-se que, simultaneamente a esse processo, uma outra frente e seu ciclone associado estão se deslocando pelo Atlântico, empurrando todas as estruturas da região para norte.

É interessante observar que, nos dias 29, 30 e 31 de dezembro, assim como no dia 01 de janeiro, a umidade relativa sobre o país parece estar sendo alimentada pela ZCIT, em contrapartida ao sumidouro representado pela língua úmida que estamos descrevendo. Essa configuração se desfaz quando os ventos no Atlântico ao norte da América do Sul viram para noroeste, o que começa a acontecer às 12Z do dia 02.

Nos dias 31 de dezembro, 01 e 02 de janeiro, a língua úmida “emborca”, de forma que sua parte oeste (ligada à região de alta umidade continental) se desloca para sul com uma velocidade notavelmente mais rápida do que sua parte leste. Isso ocorre devido ao deslocamento de um anticiclone que deixa o continente, na altura da Argentina e Uruguai, e se desloca pelo oceano, na direção zonal, para leste: a região a sudoeste da língua úmida deixou de ser ciclônica. O anticiclone é correspondente a uma área de alta pressão, inicialmente de 1017 hPa, que se formou do dia 31 de dezembro às 06 Z sobre a Argentina e se deslocou para leste posteriormente. À medida que a alta se desloca para leste, sua pressão vai aumentando, sendo que no dia 02 de janeiro às 00Z, ela já está na longitude de 30W e com núcleo de 1026 hPa.

A faixa de umidade mais alta sobre o oceano se desacopla definitivamente da região úmida continental às 18Z do dia 02 de janeiro, sendo que nesta hora, o contato entre faixa úmida oceânica e a região úmida continental estava ligada sobre São Paulo.

Além do desacoplamento da língua, o deslocamento do anticiclone descrito, através do “emborcamento” de tal faixa úmida, faz com que o grande anticiclone que permanecia ao norte desta se desloque para oeste, adentrando o continente e levando o ar mais seco que estava sobre o oceano. Por causa disso, observa-se que a região Sudeste, no sul da região Nordeste e o leste da região centro-oeste do Brasil ficam secos nas próximas cartas. No dia 03/01, às 06Z, também se observa que uma alta pressão de 1017hPa, em superfície, se aproxima do Brasil e se fortalece, apresentando núcleo de 1019hPa às 12Z.

Os ventos de nordeste desse anticiclone, empurram a grande região úmida sobre a América do Sul para sudoeste, fazendo com que o bloco úmido vá adquirindo a forma de uma vírgula invertida, até que no dia 05, às 06Z, o bloco se parta em duas partes médias. No dia 5, às 18Z, há duas zonas úmidas bem definidas sobre o Brasil.

É importante observar que no dia 04 de janeiro, por volta das 18Z, uma massa de ar mais úmido começa a chegar em SP, sendo trazida por ventos de sul.

No dia 6, às 12Z, as duas zonas úmidas sobre o Brasil se juntam novamente. Nesse dia, uma frente fria estacionária chega ao sul do Brasil às 18Z.

Os ventos que levam ar com umidade relativa alta para SP estão associados a uma nova língua de umidade, que está a nordeste de uma circulação ciclônica sobre o oceano. No dia 07, esta língua úmida permanece estacionária, estando ligada ao bloco continental por uma região litorânea que pertence, em sua maior parte, ao estado do RJ. No dia 08 esta língua “emborca”, sendo que sua parte mais próxima ao continente vai para sul e a mais distante vai para norte, à medida que o anticiclone a leste do sul do Brasil vai migrando para leste. Isso possibilita que o grande anticiclone a nordeste dal ingua comece a migrar para oeste. Simultaneamente, em superfície, observa-se que a região de alta pressão (de 1017hPa a 1019hPa) que se encontrava sobre a Argentina começa a se deslocar para o Atlântico, a leste dos litorais da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul. Às 00Z, em superfície, observa-se que o cavado estendido da frente fria responsável por esta língua de umidade está alinhado com São Paulo.

Às 06Z do dia 9, a faixa úmida oceânica perde uma parte, mas depois (às 18Z), recupera um pouco de sua força por causa de ventos que sopram das áreas continentais mais úmidas para o oceano a leste dos litorais da região Sul e do leste de SP. Isso se justifica pela presença de uma alta pressão sobre a região Sul (Paraná e Santa Catarina), de 1015hPa às 12Z.

Nos dias 09 e 10, a língua úmida continua migrando para sul, até que dia 10 às 18Z, ela deixa SP (fica acoplada a regiões mais a sul), de forma que este estado fica sob uma massa de ar relativamente seco, juntamente com o leste da região Centro-Oeste, com o sul da região Nordeste e com a maior parte da região Sudeste.

No dia 11, a circulação anticiclônica sobre o leste do Brasil se enfraquece, sendo que, especificamente, às 18Z, os ventos nas áreas continentais secas estão muito fracos. Parece ter um outro anticiclone ao sul da língua (que corresponde a um cavado em superfície) se deslocando para leste e empurrando-a para norte. São observados ventos fortes e úmidos partindo da Amazônia em direção à língua oceânica úmida, que passam pelo PR e pela maior parte de SP, além do leste de SC.

No dia 12, há uma frente fria se aproximando do Brasil em superfície, correspondendo a uma faixa úmida bem definida e linear em 850.

A parte mais próxima ao continente da faixa mais antiga vai para sul enquanto sua parte mais distante do continente vai para norte, tal que a faixa úmida está quase desacoplada às 18Z. Nota-se, associada a isso, uma alta de 1014hPa se deslocando para leste em superfície.

No dia 13, a antiga língua se desacopla e a nova língua referente à frente que chegou ao Brasil no dia 12 se estabelece. A língua desacoplada está se deslocando para sudeste pelo oceano, mas é capturada e absorvida pela nova língua, fazendo com que ela se estenda até bem longe das regiões costeiras.

A nova língua está bem definida e migrando para norte durante o dia 14. Nesse dia, já se observa a formação de um anticiclone sobre a região nordeste da Argentina que pode dar fim ao acoplamento continental desta faixa de umidade oceânica.

15/01 Em altos níveis o JST está dando suporte para duas frentes em superfície, sendo que a mais ao norte estende um cavado que, por sua vez, dá suporte à ZCOU, de acordo com o CPTEC. Isso também está bem claro na imagem de umidade e vento do grads, onde há uma faixa roxa (UR > 90%) se estendendo do Amazonas ao litoral de SP, e ainda uma língua de umidade maior que as redondezas se estendendo sobre o Atlântico, acompanhada de convergência dos ventos, indicando uma região estreita de baixa pressão. Esta língua de umidade estava mais forte no dia 14 às 18Z.

No dia 15, o anticiclone deixa a Argentina e começa a se deslocar para leste, mas a língua úmida parece estar muito frágil, sendo que às 18Z já está separada do bloco continental de umidade. O anticiclone não consegue então se deslocar para leste tão bem quanto os que o antecederam. Mesmo assim, com esse processo, o amplo anticiclone que estava ao norte da língua úmida consegue adentrar as regiões continentais.

No dia 16, há uma pequena língua úmida invadindo o oceano, associada a um cavado em superfície.

No dia 17, o anticiclone continua invadindo o país, fazendo com que uma ampla região fique seca, mas não chega a atingir São Paulo.

Dia 17, às 18Z, também já há uma nova faixa de convergência de ventos e de umidade alta bem definida invadindo o oceano. Este sistema é acoplado ao continente exatamente pelo estado de SP, contribuindo para manter a umidade relativa alta sobre este estado. No entanto, esta faixa difere das anteriores por estar bem mais meridional, sendo que o anticiclone que geralmente dá suporte pelo nordeste dos sistemas, está praticamente a leste da faixa de convergência e o ciclone que deveria dar suporte pelo sudoeste, está praticamente a oeste desse sistema. Dessa forma, o próprio ciclone que deveria dar suporte a esse sistema pelo sudeste, acaba por empurrá-lo para longe do continente, enfraquecendo-o e causando o seu desacoplamento e desintegração, que ocorrem no dia 19 por volta de 06Z. Com um sistema associado a uma frente que aparece no dia 20 de janeiro, acontece o mesmo, sendo que o anticiclone se desloca para leste no dia 23 de janeiro, causando o desacoplamento de parte da área úmida de convergência de ventos.

Com análises de padrão desta natureza e o auxílio das imagens de satélite e as reanálises foram classificados e listados os sistemas que influenciavam a região metropolitana de São Paulo, esta classificação foi subjetiva e inicialmente considerados os seguintes sistemas:

- ZCAS/ZCOU;
- Frentes (frias, quentes e oclusas);
- Alta da Bolívia;
- Cavados e Cristas;
- Brisa Marítma;
- Linha de instabilidade;
- Convecção Isolada;
- Bandas dispersas de precipitação;
- Jatos;
- Vórtices ciclônicos;

A escolha destes sistemas levou em consideração todas as situações sinóticas que podem influenciar a ocorrência de chuva em São Paulo, posteriormente a lista foi reduzida conforme determinados sistemas pareciam mais relacionados às chuvas do período, e a contagem de sistemas foi se tornando mais simples. Os 4 sistemas que parecem justificar melhor as precipitações são os seguintes:

- Frentes (frias, quentes, estacionárias e oclusas);
- Brisa Marítma;
- ZCAS/ZCOU;
- Cavado Baroclínico.

Os 3 primeiros estavam na lista inicial considerada, haviam alguns dias em que nenhum dos sistemas da lista original explicavam as condições sinóticas satisfatoriamente para que houvesse chuva em São Paulo, seguimos então para a análise das cartas sinóticas de superfície e altitude do CPTEC não apenas para confirmar o que classificamos, mas para buscar as razões indicadas pelo CPTEC para haver a chuva, algumas das situações foram explicadas pelos cavados baroclínicos, e assim incluímos este novo sistema na lista, para esta lista de sistemas e o período de chuva quase intermitente de 11 de janeiro a 25 de fevereiro (total de 1170mm de chuva na estação do IAG e 850mm no Mirante de Santana) as classificações finais foram as apresentadas na **Figura 15** a seguir.

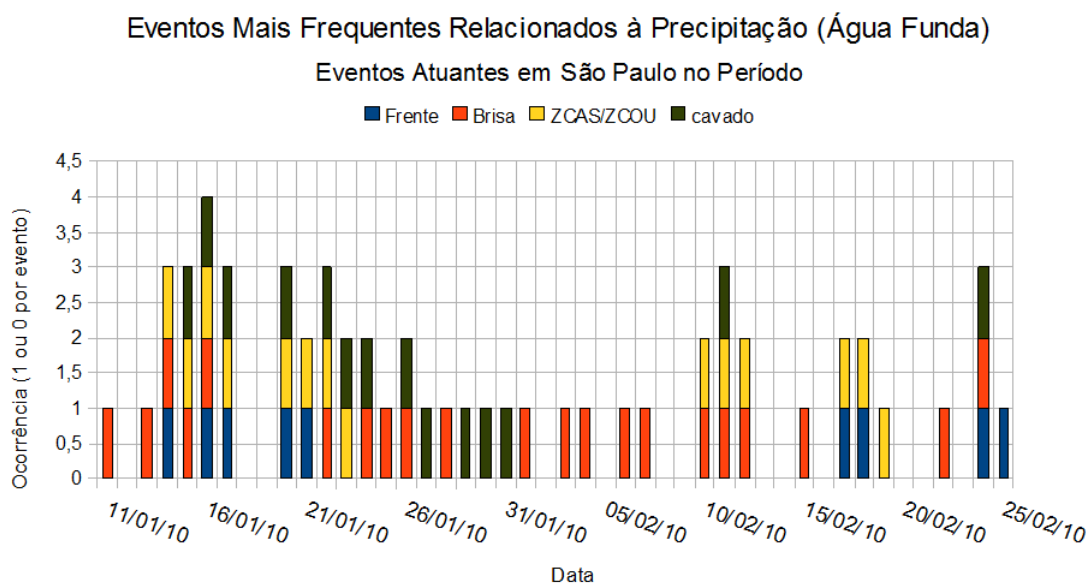


Figura 15: Eventos mais frequentes e qualificados como responsáveis pelas chuvas ocorridas nos dias do período, notar que em alguns dias há mais de 1 sistema indicado em uma mesma data.

O período com eventos classificados é de 46 dias, sendo que em 9 dias não choveu em ao menos uma das estações (“sem chuva”). Ressaltamos que em 45 destes dias choveu ao menos 1mm em uma das duas estações de referência, e dos dias em que houve chuva em ambas as estações apenas 5 não tiveram um dos sistemas indicado. A seguir a contagem final de dias para cada evento (**Fig.16**)

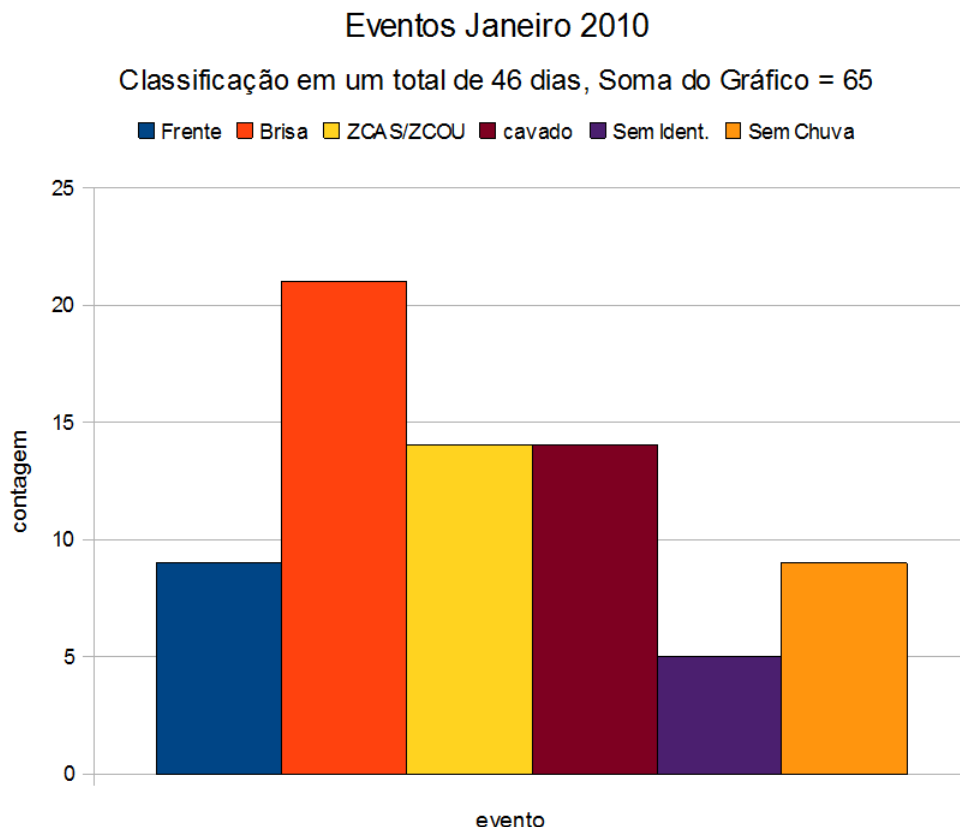


Figura 16: Eventos classificados para o período de 11 janeiro a 25 fevereiro. A contagem de dias “sem chuva” se refere a não ocorrência de precipitação em ao menos 1 das estações e a contagem de dias “Sem Ident.” (Sem identificação) é referente aos dias não classificados em que houve chuva em ambas as estações.

Na tentativa de justificar a precipitação nos dias sem evento sinótico entre os quatro da nossa lista, utilizamos os valores registrados de CAPE (energia potencial convectiva disponível) e LIFT (diferença de temperatura entre uma parcela com levantamento adiabático e a temperatura ambiente em um mesmo nível de pressão), que são indicativos da instabilidade atmosférica local, desta forma justificamos a precipitação em 3 dias sem classificação (12/01, 18/01 e 19/01, com instabilidade pelo índice CAPE) e 1 dia em que foram classificados 3 sistemas atuantes com precipitação baixa quando comparada aos dias próximos (22/01, em que tanto o índice CAPE quanto o índice LIFT indicam estabilidade

atmosférica), a comparação entre os dias em que houve precipitação, os sistemas classificados e os índices de instabilidade são apresentados na Figura 17.

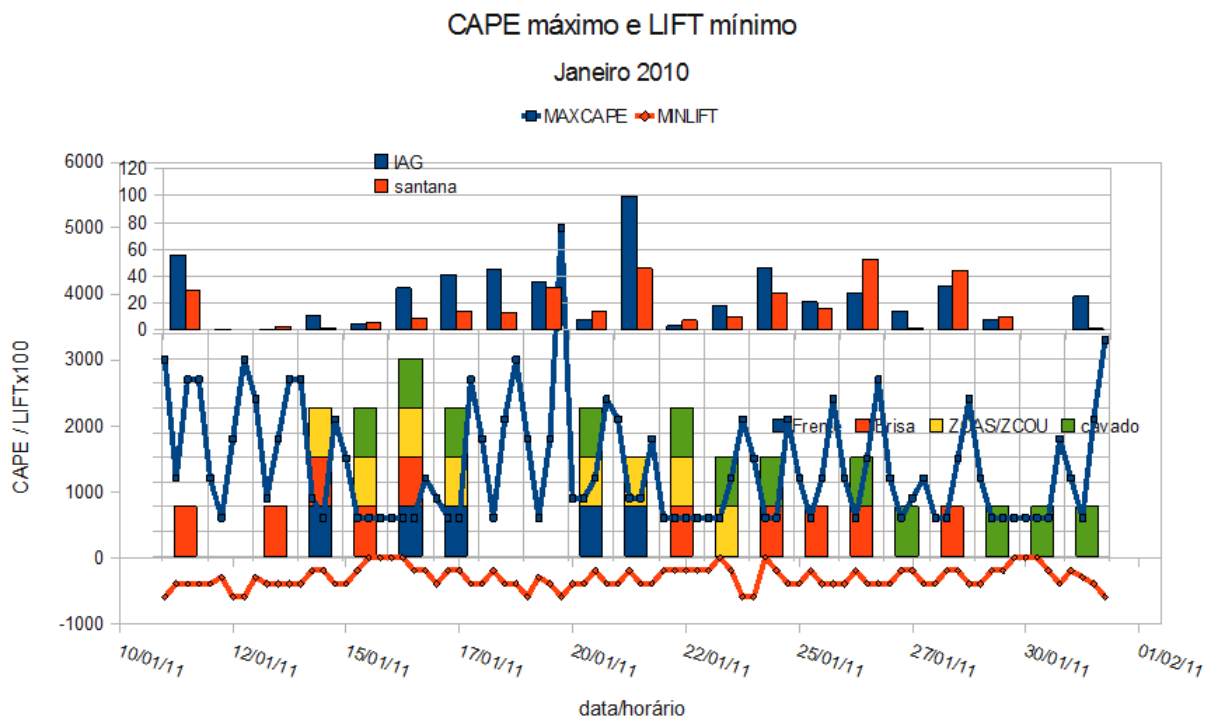


Figura 17: Precipitação para as duas estações, sistemas meteorológicos classificados e índices CAPE e LIFT, para o período de 11 de janeiro a 1 de fevereiro, período em que houve necessidade dos índices para justificar as chuvas.

Após a definição da causa da precipitação para os dias do período (11 de janeiro a 25 de fevereiro), foi realizado o acumulado de precipitação por sistema, sendo considerada a chuva de um dia como parte do acumulado para cada sistema atuante naquele dia, ou seja, um dia com 20mm de precipitação em que há 2 eventos distintos atuando sobre São Paulo contribui com 20mm para cada sistema. Esta forma de totalização foi utilizada devido à dificuldade em quantificar a contribuição de cada sistema para a precipitação, pois não podemos nem mesmo afirmar que um dos sistemas sozinho provocaria menos ou mais precipitação do que sua associação com outro sistema. Os totais acumulados de precipitação por sistema são apresentados na Figura 19.

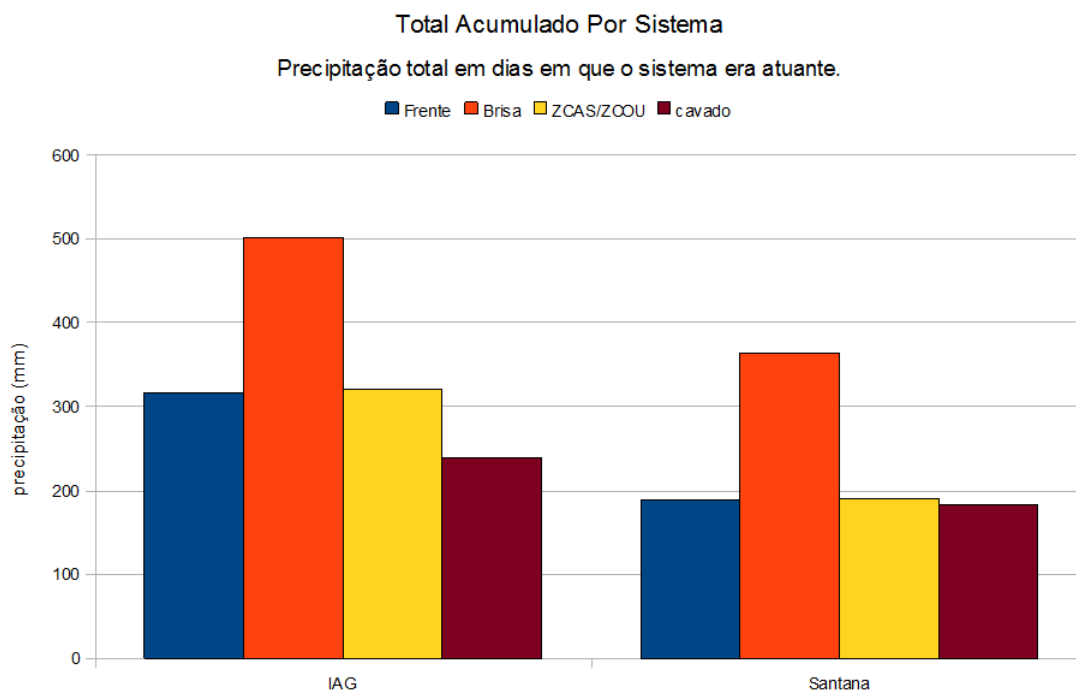


Figura 18: Total acumulado de precipitação por sistema para o período de 11 de janeiro a 25 de fevereiro de 2010. A precipitação na estação IAG-USP foi maior do que a do Mirante de Santana para todos os sistemas meteorológicos considerados.

Foi feita, ainda, uma normalização das precipitações com uso do total precipitado em cada estação, que permite uma comparação melhor entre as duas estações e permite especular quanto à contribuição de cada sistema para a precipitação na cidade de São Paulo no verão (**Fig.19**) .

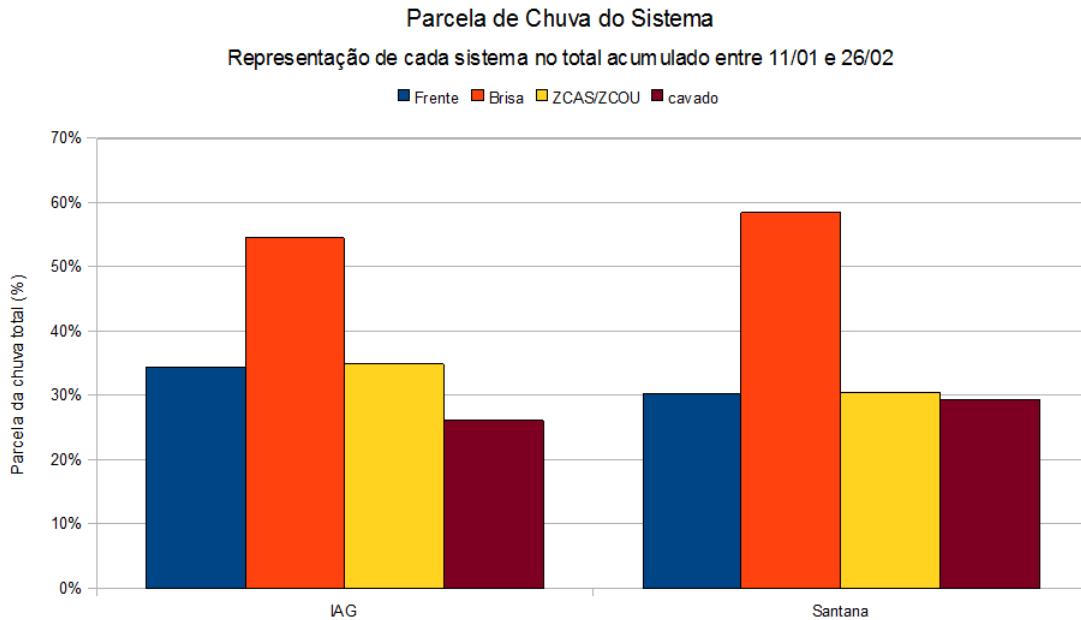


Figura 19: Total precipitado por sistema, normalizado pelo total precipitado em cada estação. Com a classificação subjetiva realizada neste trabalho pode-se notar que a relação entre os sistemas é parecida para as duas estações, com o cavado baroclínico contribuindo cerca de 3% a menos na estação do IAG e a brisa marítima sendo a maior contribuinte em ambas as estações, também cerca de 3% a menos na estação IAG, a redução da importância destes dois sistemas para o IAG é acompanhada de uma maior significância da ZCAS/ZCOU e Frente em relação ao Mirante.

O sistema Cavado Baroclínico contribui cerca de 3% a menos na estação do IAG e a brisa marítima sendo a maior contribuinte em ambas as estações, mas também cerca de 3% a menos na estação IAG, a redução da importância destes dois sistemas para o IAG é acompanhada de uma maior significância da ZCAS/ZCOU e Frente em relação ao Mirante. Esta diferença é explicada pelos dias em que houve chuva em uma estação mas não na outra e pelas diferenças de intensidade dos sistemas quando de passagem sobre cada estação, apesar desta variação não há diferença real de precipitação entre as estações para um mesmo tipo de sistema, o que é esperado uma vez que apesar de uma estação estar mais ao norte e inserida na região metropolitana, a distância entre elas é pequena, de apenas 17Km.

4 Conclusão

A precipitação acumulada no verão 2009/2010 foi excepcionalmente alta, com 550mm de chuva acima da normal climatológica do mirante de santana apenas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

Este excedente de precipitação pode ser explicado pela sucessão de eventos de diversas escalas, que ocasionou período intermitente de chuvas intensas no verão, é necessário levar em consideração as características físicas da cidade, que hoje é uma região urbanizada de grandes proporções e tem seu regime de chuvas influenciado pela ilha de calor urbana. A precipitação registrada na cidade apresenta uma perceptível tendência de aumento ao longo dos anos e o verão analisado teve níveis de volume de chuvas sem precedentes.

Foi identificado também que os sistemas precipitantes frequentemente coexistem influenciando São Paulo, o que torna a previsibilidade dos volumes e horários de chuvas menor, além de tornar complicado estabelecer a contribuição de cada sistema meteorológico para as chuvas do verão, de cada mês e até mesmo de cada dia. Não foi encontrada diferença entre as estações na influência dos diferentes sistemas, que neste estudo foram classificados como os principais atuantes nos dias com acumulado significativo, sendo eles as Frentes, o Cavado Baroclínico, ZCOU/ZCAS e Brisa Marítima

Referências

- [Cavalcanti,2009] Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N.J.; Silva Dias,M. A. F.; Justi da Silva,M. G. A., 2009: Tempo e Clima no Brasil. Oficina de Textos, 1a Ed. 464p.
- [J. Farias, 2009] Farias, J. F. S., 2009: Previsão de chuva a curtíssimo prazo na área de abrangência do radar meteorológico de São Paulo. Dissertação de Mestrado IAG USP. 97p.
- [Santos, 2006] Santos Silva, F. D., 2006: Análise Objetiva Estatística da Precipitação Estimada com Radar e medida por uma Rede Telemétrica. Dissertação de Mestrado IAG USP. 115p.
- [Oliveira e Pereira, 2007] OLIVEIRA, E. E PEREIRA FILHO, A.J., 2007: Revisiting the statistical texture approach on digital image analysis. Submitted to QJRMS.
- [Pereira Filho, 2005] PEREIRA FILHO, A. J.; SILVA, F. D S.: The morphology of tropical rainfall systems and their hydrological significance. In: 32nd conference on radar meteorology, 2005, Albuquerque. Boston: American Meteorological Society, 2005.
- [Ciclogênese, 2008] Meteorologia Sinótica Prática 2008 - Ciclogêneses na América do Sul - GRUPO DA PREVISÃO DE TEMPO GPT - CPTEC/INPE

[Frontais, 2008] Meteorologia Sinótica Prática 2008 - Sistemas frontais clássicos, cavados baroclínico e frentes subtropicais sobre América do Sul GRUPO DA PREVISÃO DE TEMPO GPT - CPTEC/INPE

[1] Documentação Grads

<http://www.iges.org/grads/gadoc/index.html>

[2] Documentação ImageMagick

<http://www.imagemagick.org/index.html>

[3] Documentação GFS/AVN/(reanálise) NCEP

(<http://www.ncep.noaa.gov/>

[4] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia -

<http://www.inmet.gov.br>

[5] CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

<http://www.cptec.inpe.br>

[6] CTH/DAEE - Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos

<http://www.cth.usp.br/>

[7] MASTER-IAG/USP - Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo regionais

<http://www.cmaster.iag.usp.br/>

[8] Boletim Trimestral IAG/USP

<http://www.estacao.iag.usp.br/>

[9] NASA – Global Elevation

[10] Scripts/dados/imagens – Ricardo Hallak, Kléber Rocha, Livia Dutra, Ricardo Camargo, Daniel Faria, Rita Ynoue, Jessé Gomes, Daniel Torres.