

A elaboração deste livro foi motivada pela carência de material didático, em cursos de graduação e pós-graduação em meteorologia e áreas afins, sobre os sistemas de tempo que atuam no Brasil e as influências da variabilidade climática. Além do caráter didático para os cursos de meteorologia e ciências atmosféricas e oceânicas, esta obra também é destinada a pesquisadores e alunos em ciências físicas e naturais ambientais interessados em conhecer, com um enfoque físico, a natureza, o comportamento e o impacto dos principais sistemas meteorológicos que atuam no Brasil. O material compilado abrange interesses de vários setores: educacional, agricultura, recursos hídricos, defesa civil, econômico e social. Da concepção até a publicação, foram mais de três anos, dois dos quais reunindo o material com os autores, até que tivéssemos os capítulos em fase final. A dedicação dos autores na preparação dos diversos capítulos contribuiu para que o livro se tornasse realidade. Os assuntos foram tratados de forma detalhada, com vários exemplos e ilustrações que esclarecem as explicações. O Cap. 1 fornece uma compreensão geral dos aspectos de tempo e clima, e as três partes em que foram divididos os capítulos subsequentes mostram os principais sistemas meteorológicos que atuam sobre o Brasil; o clima das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul; e as variabilidades climáticas. Alguns dos tópicos discutidos são: a apresentação dos sistemas meteorológicos que provocam chuvas em várias partes do Brasil e a discussão de seus comportamentos; as características do clima em cada região; a variabilidade climática que afeta os sistemas responsáveis por chuva em diversas regiões e que podem causar enchentes ou secas; os fatores locais ou remotos que contribuem para a redução ou o excesso de chuvas; e as projeções do clima futuro no Brasil. Esperamos que os conhecimentos aqui apresentados possam contribuir para o contínuo desenvolvimento de pesquisas na área, e que despertem o interesse não só dos alunos e pesquisadores, mas também do público em geral, o qual poderá ter uma visão ampla do Tempo e Clima no Brasil.

PREFÁCIO

Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti

Nelson Jesus Ferreira

O tempo é o que vemos acontecer na atmosfera, o clima é o que esperamos que aconteça. Qual a relação entre tempo e clima? O tempo determina o clima, ou, ao contrário, é o clima que determina o tempo? O tempo e o clima estão em constante evolução, mas há padrões que se repetem (clima) e outros que podem ser antecipados, o que permite prever o tempo futuro com dias de antecedência e até mesmo, em algumas circunstâncias, padrões climáticos com meses de antecedência. Todas as previsões meteorológicas são bastante úteis para a humanidade.

As flutuações do tempo e do clima são fenômenos exclusivamente naturais ou a humanidade pode alterá-las significativamente? É evidente, nos dias de hoje, que as ações da humanidade podem afetar profundamente o clima do planeta e que as mudanças climáticas estão ocorrendo a velocidades sem precedentes no último milhão de anos e talvez muito mais. Torna-se importante, assim, conhecer o funcionamento do sistema climático e de que maneira ele está sendo alterado.

Este livro preenche uma importante lacuna ao apresentar, de forma didática, as principais manifestações do tempo e do clima no Brasil. Resulta da experiência acumulada em várias instituições de pesquisa e ensino, como a Universidade de São Paulo, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Pará e, especialmente, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Essa experiência acumulada no INPE teve seus primórdios com a publicação, em 1986, do *Boletim de Monitoramento do Clima do Nordeste do Brasil*, o qual, em poucos meses, alcançou abrangência nacional e tornou-se o conhecido boletim mensal de análises e previsões climáticas *Climanálise*. Em mais de duas décadas, o *Climanálise* constitui a principal referência de registro e documentação científica das flutuações climáticas de relevância para o Brasil em todas as escalas espaciais, além de introduzir a previsão climática sazonal e seus avanços. Tem servido como referência básica em estudos e pesquisas sobre o clima e o tempo no País. Em grande medida, este livro rende homenagem a todos aqueles que construíram esse conhecimento.

Tempo e Clima no Brasil servirá como leitura agradável a todos aqueles que quiserem saber mais sobre o assunto, e se tornará leitura obrigatória para estudantes de meteorologia, hidrologia, geografia e meio ambiente.

APRESENTAÇÃO

COM RESPEITO ainda à formação de “banda dupla” da ZCIT, mencionada em Waliser e Gautier (1993) e Uvo (1989), destacaram-se as imagens compostas dos satélites Goes-10 e Meteosat-9, obtidas durante o monitoramento do período chuvoso sobre o NEB em 2008 (Fig. 2.5). Nessas imagens, foram evidenciados outros dois episódios de “banda dupla” da ZCIT. Ressalte-se que, nos meses de março e abril de 2008, os totais pluviométricos ocorreram acima da média histórica na maior parte do setor norte do NEB (Climanálise, vol. 23, nº3 e nº4).

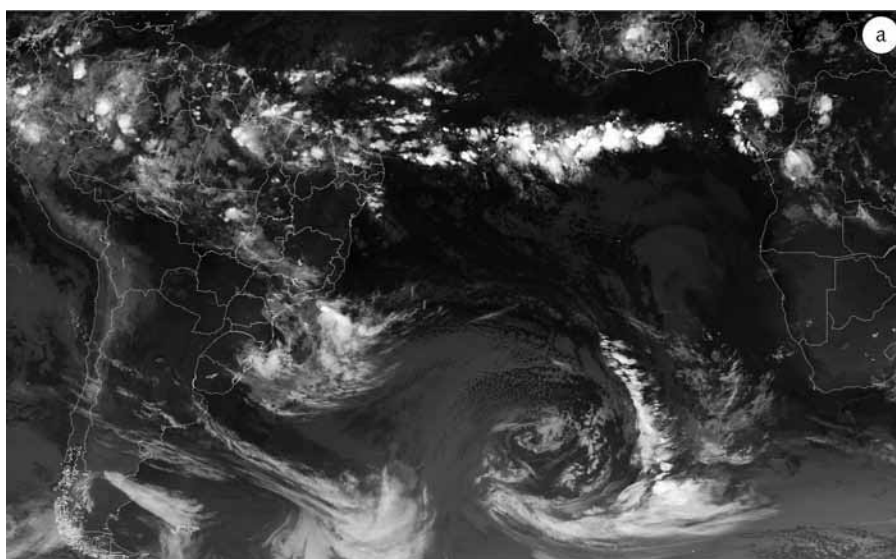
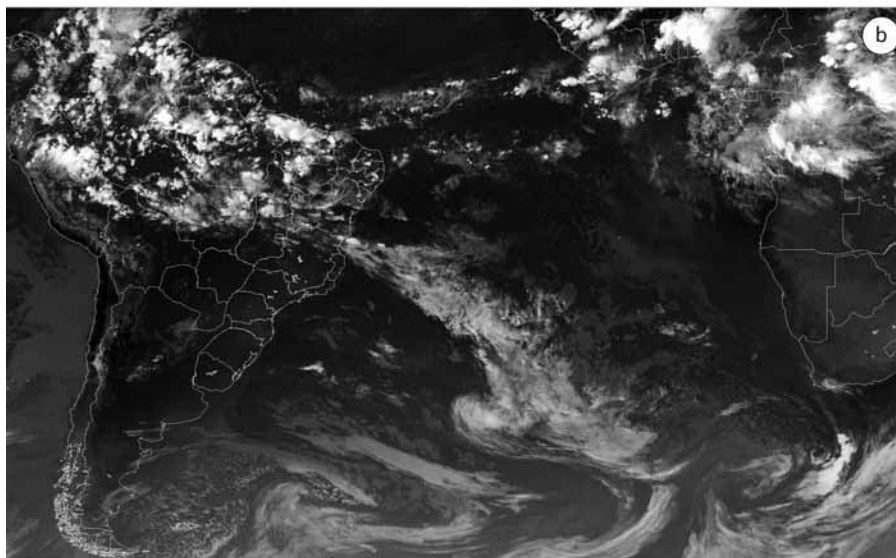


FIG. 2.5 Imagem composta (satélites Goes-10 + Meteosat-9), no canal infravermelho, ilustrando a atuação da ZCIT em (a) 22/4/2008 às 06:15 UTC e (b) 24/4/2008 às 20:15 UTC
Fonte: INPE/CPTEC/DSA.



OUTRO ASPECTO relacionado à variação da posição da ZCIT no Atlântico Equatorial consiste na interrupção de seu deslocamento para o sul, retornando aproximadamente $1,5^\circ$ para o norte e voltando novamente para posições mais ao sul. Essa variação latitudinal da ZCIT

foi denominada por Uvo (1989) como “saltos da ZCIT”, que geralmente ocorrem nos meses de fevereiro e março, particularmente em anos secos.

O COMPORTAMENTO climatológico mensal da ZCIT, considerando a variável ROL com valores menores que 240 W/m^2 , para indicar as áreas com maior atividade convectiva, e o escoamento do vento em 925 hPa, para indicar as áreas de confluência dos alísios, é representado na Fig. 2.6. O deslocamento latitudinal da convecção e da zona de confluência durante as estações do ano ocorre de maneira consistente com os estudos anteriores. No verão e no outono, há um deslocamento para o sul; no inverno e na primavera, para o norte. Nota-se que a convecção mais forte da ZCIT está mais próxima da costa do Brasil em janeiro e fevereiro e mais próxima da costa da África entre julho e setembro. Nos meses de março a junho, a convecção se estende sobre o Atlântico

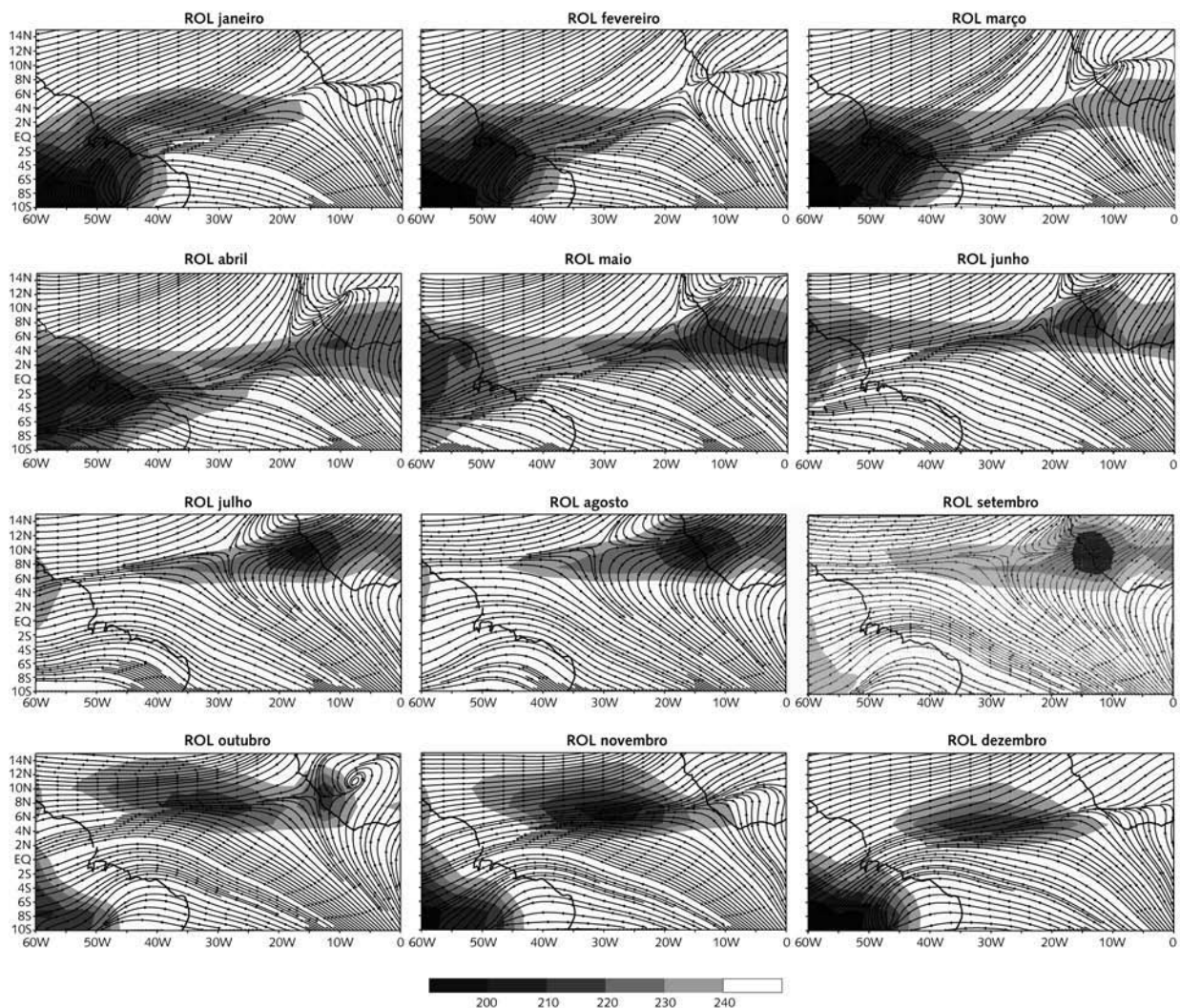


FIG. 2.6 Médias climatológicas mensais (1980 a 2004) de ROL menor que 240 W/m^2 (dados obtidos da NOAA; Liebman e Smith, 1996) e escoamento do vento em 925 hPa (dados extraídos das reanálises NCEP/NCAR; Kalnay et al., 1996)

8.3 O JATO POLAR E SUA IMPORTÂNCIA NO PROGNÓSTICO DO TEMPO

Os meteorologistas, após o estudo de várias situações, determinaram o papel do JP sobre os centros de baixa pressão em superfície. Dessa maneira, o JP exerce influência direta ou indireta sobre as mudanças do tempo. Quando o JP se desloca para o norte, seus movimentos são seguidos em superfície pelos sistemas de alta e baixa pressão e pelas frentes frias e quentes. Isso significa que, quando os meteorologistas conseguem prognosticar os deslocamentos do JP, podem também prognosticar os avanços ou recuos das frentes em superfície e, portanto, prever mudanças do tempo.

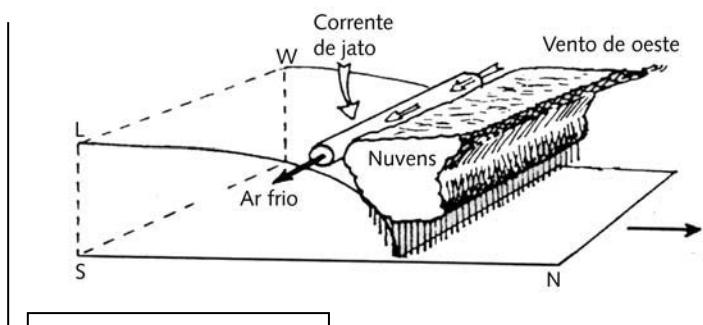


FIG. 8.3 Relação entre o jato polar e a frente fria

NA FIG. 8.3 nota-se que o ar frio desloca-se para o norte, escorregando sobre a superfície horizontal do solo. A curva de contato entre o ar frio e o solo é a frente fria. Por cima do ar frio observa-se o sistema de nuvens da frente com suas precipitações. O cano ou conduto da corrente de JP encontra-se atrás do sistema de nuvens e por cima da superfície frontal.

O JP quase sempre se localiza em direção oeste-leste, com velocidades que podem variar entre 150 e 300 km/h.

A FIG. 8.4 mostra um corte transversal ao longo de uma frente fria. Observa-se a presença do eixo da corrente de jato aproximadamente na altura de 10.500 m, sobre a vertical da pendente da frente fria com a superfície isobárica de 500 hPa. No plano horizontal, e em relação à frente em superfície, o jato geralmente aparece algumas centenas de quilômetros atrás das frentes frias e na frente das frentes quentes.

O VENTO atinge seu máximo valor (140 nós no desenho) apenas no eixo do jato. A velocidade diminui rapidamente para ambos os lados e, em geral, a diminuição é maior do lado frio do que do lado quente do jato. Na figura pode-se observar que a intensidade do vento diminui à metade, a uns 350 km do lado frio (sul) e a uns 600 km do lado quente (norte). Isso significa um gradiente horizontal de 20 e 12 nós / 100 km de distância, respectivamente.

EM RELAÇÃO à variação da velocidade do jato com a vertical, observa-se um importante aumento do gradiente acima de 500 hPa (30 nós/km). Acima do jato, a velocidade do vento decresce rapidamente (25 nós/km, aproximadamente).

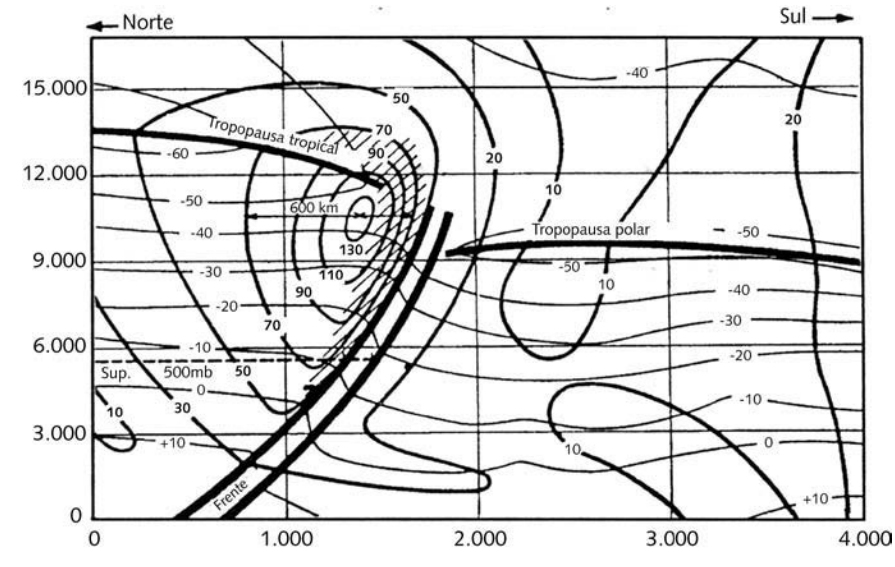


Fig. 8.4 Corte transversal de uma frente fria. Linhas contínuas em negrito: isotacas (nós); linhas contínuas: isotermas (°C) Fonte: Eichenberger, 1976.

A CARTA de superfície apresentada na Fig. 8.5 (esquerda) mostra uma intensa frente fria na região Sudeste do Brasil. Esse sistema frontal frio esteve associado a uma forte incursão de ar frio sobre o centro-sul do continente sul-americano. Pode-se observar a presença do JP (Fig. 8.5, direita) sobre a região Sul do Brasil, entre o norte do Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina. O JST aparece mais ao norte e acoplado ao JP.

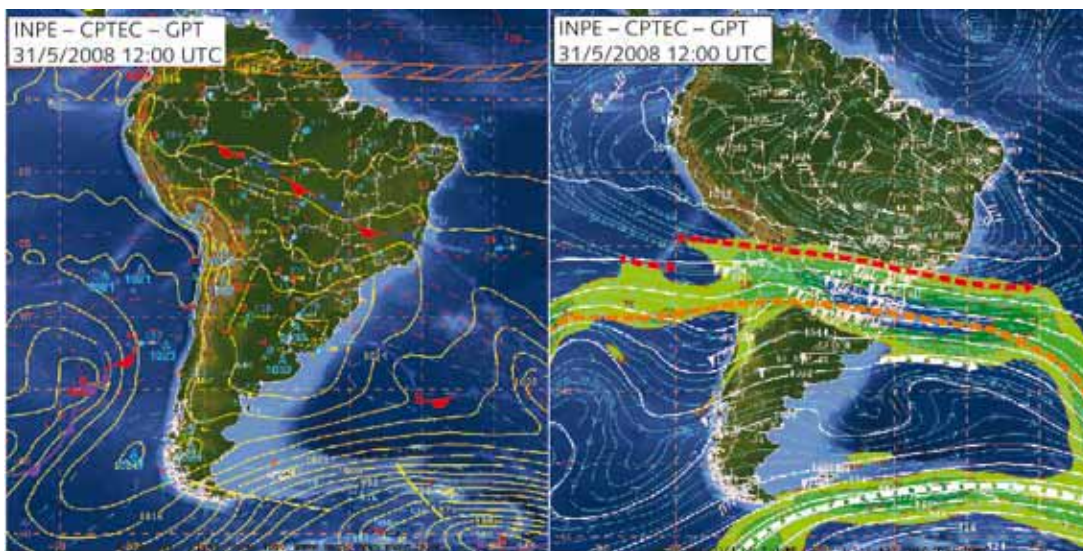
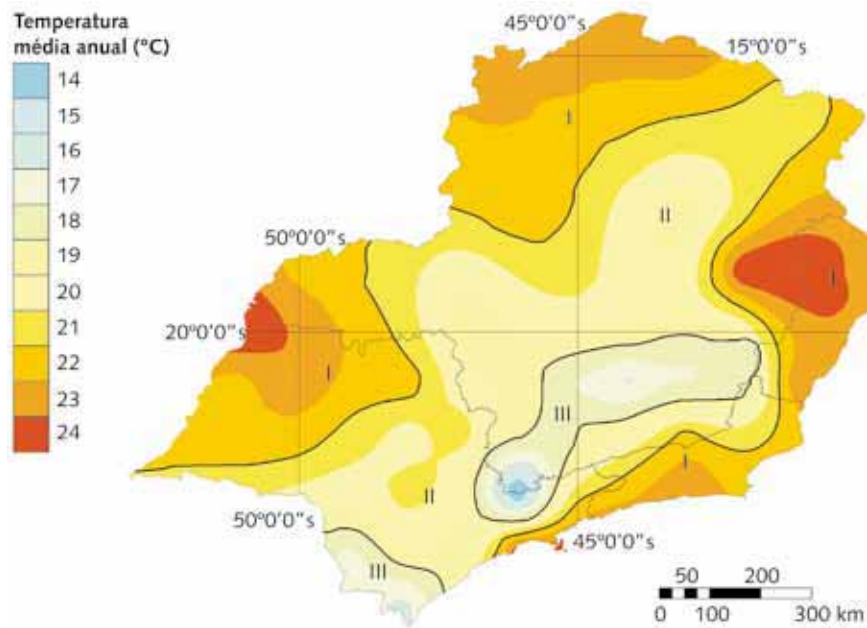


Fig. 8.5 Carta de superfície (esquerda) e altitude (direita) correspondente ao dia 30 de maio de 2008, às 12:00 UTC. O JP aparece plotado em traço grosso laranja

8.3.1 Identificação da corrente do jato por meio de imagens de satélite

A Fig. 8.6 mostra a imagem de satélite no canal infravermelho correspondente ao dia 8 de janeiro de 2008, às 17:45 UTC. Por meio da análise dessa imagem, pode-se identificar a presença do JP atravessando o continente, com leve inclinação de noroeste a sudeste, pelo sul do Chile e

Fig. 16.2 Temperaturas médias anuais da região Sudeste
 Fonte dos dados: Embrapa, DAEE, INMET, elaborada por Daniel H. Candido.



16.2.2 Chuvas

A chuva é o principal tipo de precipitação que ocorre na região Sudeste, reflexo de sua posição quase que totalmente intertropical. A distribuição da pluviosidade é fortemente influenciada pelos atributos geográficos da paisagem e pela dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam na área, e as grandes variabilidades inter e intra-anual e espacial estão entre as características mais marcantes do ritmo pluvial.

A DISTRIBUIÇÃO espacial da pluviosidade (Fig. 16.3) é fortemente controlada pela disposição do relevo, pela atuação das frentes polares e pela continentalidade, com quatro zonas de totais pluviométricos distintos na região.

A PRIMEIRA zona abrange as quatro classes de totais mais elevados da Fig. 16.3, estendendo-se pelo litoral paulista em direção S-N. O oceano Atlântico garante permanente suprimento de água para evaporação, além de núcleos de condensação que, aliados ao intenso fluxo de energia solar, favorecem as precipitações. Esse setor apresenta índices anuais de chuva com médias superiores a 2.000 mm, superando os 4.500 mm em Bertioga, no litoral central paulista, onde o traçado da costa é oposto aos fluxos oceânicos e àqueles provenientes do sul que, aliados à disposição da Serra do Mar, promovem essas alturas pluviométricas bastante consideráveis. Em termos de gênese, as chuvas convectivas – registradas o ano todo, principalmente no semestre primavera-verão –, de grande importância, são favorecidas pela maritimidade,

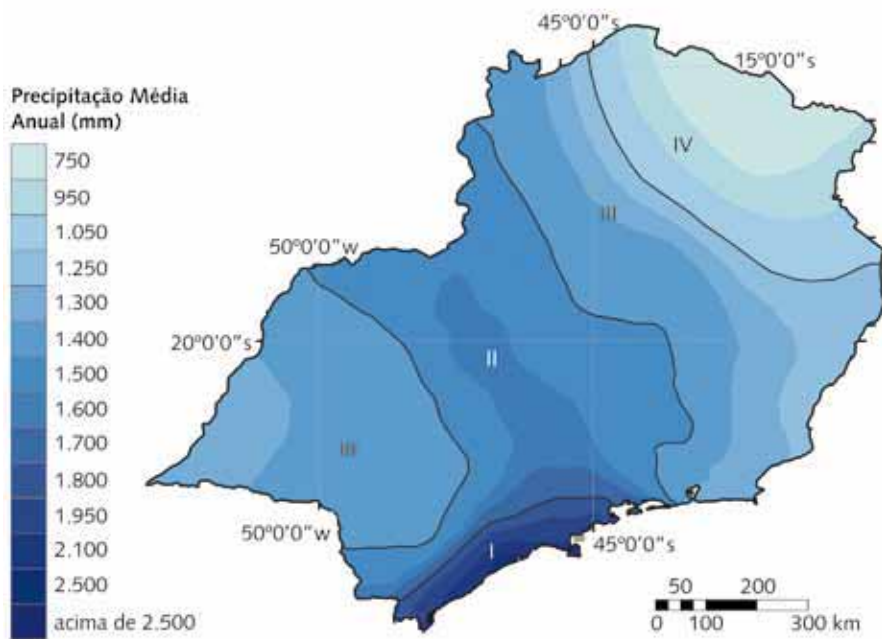


FIG. 16.3 Precipitação média na região Sudeste (1961 a 1990)
 Fonte dos dados: Embrapa, DAEE, INMET, elaborada por Andréa K. Vicente.

que contribui para a permanente umidade e as altas temperaturas. As precipitações pluviométricas de origem frontal, que ocorrem devido ao confronto entre massas tropicais e extratropicais, também são comuns na área, e em alguns trechos elas são dinamizadas pela posição do relevo, que nesse setor é oposto ao avanço dos sistemas extratropicais quando estes apresentam uma trajetória mais marítima. Ao se elevarem para transpor a Serra do Mar, os fluxos atmosféricos úmidos sofrem resfriamento adiabático e ocasionam precipitações abundantes nas áreas a barlavento da escarpa.

A SEGUNDA zona, composta pelas três classes seguintes, é um setor que ainda apresenta pluviosidade destacada. Disposta no sentido SE-NW, estende-se do Rio de Janeiro ao oeste de Minas Gerais, com volumes em torno de 1.500 mm a 1.700 mm anuais. Coincide com a topografia da Serra da Canastra a noroeste e da Serra da Mantiqueira a sudeste, refletindo a influência da orografia na ocorrência das chuvas. Além disso, ocorre ali o equilíbrio dinâmico entre o anticiclone migratório polar e o sistema de alta pressão do Atlântico Sul, notadamente no verão, o que resulta na permanência das frentes polares na região, provocando chuvas intensas e muitas vezes prolongadas por vários dias. As perturbações de oeste também contribuem para a precipitação nesse setor.

A TERCEIRA zona, com pluviosidade mais reduzida (entre 1.250 mm e 1.400 mm), situa-se mais no interior do continente. Compreende o Planalto Ocidental paulista, destacando-se as planícies

bilidade da chuva de primavera e verão na América do Sul, associados ao ENOS e calculados a partir de simulações do clima atual (1961-1990) e do clima futuro (2071-2100) com o modelo acoplado ECHAM5-OM, Grimm e Natori (2006) verificaram que a forte e consistente influência do ENOS no Sul do Brasil na primavera se enfraquece na projeção do clima futuro, enquanto se fortalece no Norte/Nordeste do Brasil. Entre as razões apresentadas para tal mudança está a modificação nas anomalias de TSM associadas ao ENOS na primavera, que apresentam menor contraste entre equador e subtropicais (diminuindo a propagação de ondas de Rossby para o sudeste da América do Sul, conforme Vera et al., 2004) e maior extensão latitudinal e intensidade no Pacífico Central e Leste (o que aumenta a subsidência anômala sobre a Amazônia). Além disso, o estado da atmosfera futura apresenta ventos de oeste mais fracos junto ao equador, no Pacífico Leste, diminuindo as condições favoráveis à propagação de ondas de Rossby para a América do Sul subtropical. Tais mecanismos são explicados a seguir.

22.3 MECANISMOS DA VARIABILIDADE INTERANUAL

As fontes anômalas tropicais de calor associadas a episódios ENOS perturbam as circulações divergentes de Walker (zonal) e de Hadley (meridional) sobre a América do Sul e produzem trens de ondas de Rossby (devido à divergência anômala em altos níveis), que são anomalias de circulação rotacional que se propagam para os extratropicais, com importantes efeitos sobre os subtropicais e extratropicais do continente. Essa resposta está nos principais modos de variabilidade interanual da circulação atmosférica no Hemisfério Sul, de interesse para o Brasil. É o caso, por exemplo, do padrão Pacífico-América do Sul (PSA na sigla em inglês), que parece estar associado ao ENOS, correspondendo ao trem de ondas que se propaga para o sudeste a partir do Pacífico Tropical, e então para o equador, atingindo a América do Sul.

ESSES mecanismos são aqui descritos com ênfase na primavera austral, estação de maior impacto do ENOS nos extratropicais do Brasil.

22.3.1 O Norte/Nordeste do Brasil e a teleconexão trópico-trópico

A teleconexão trópico-trópico é instrumental para o impacto de ENOS sobre o Norte/Nordeste do Brasil. Em episódios EN, as anomalias quentes de TSM sobre o Pacífico Tropical Central/Leste produzem mais convecção nessa região tropical com subsidência climatológica (Fig. 22.2), o que resulta em maior divergência em altos níveis no Pacífico Central/Leste,

e convergência sobre o norte da América do Sul (Fig. 22.11), associada ao ramo descendente de uma onda estacionária de Kelvin. Há, portanto, uma perturbação da célula de Walker climatológica, cujo ramo descendente no Pacífico Leste é deslocado para o norte da América do Sul, inibindo a atividade convectiva e causando a seca observada. A diminuição da convecção no Norte do Brasil perturba a célula de Hadley local, que é enfraquecida (Fig. 22.11), podendo afetar também os subtropicais.

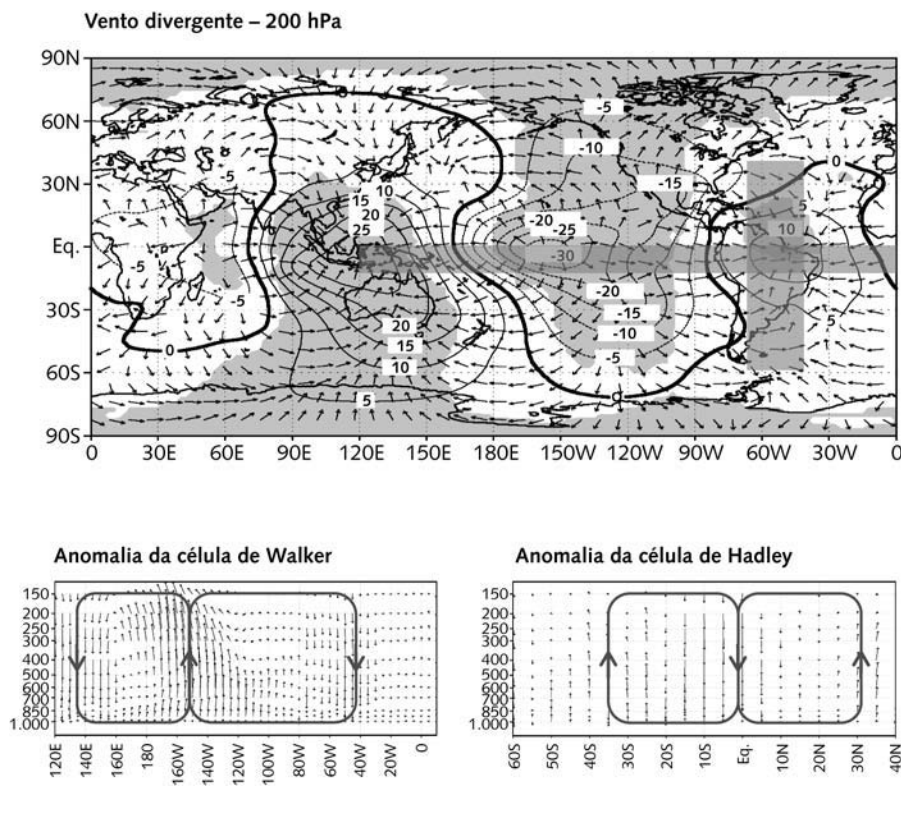


FIG. 22.11 Vento divergente anômalo em 200 hPa, associado a episódios EN na primavera austral (OND), e anomalias das células de Walker e Hadley, calculadas sobre as bandas latitudinais e longitudinais indicadas no mapa. Áreas sombreadas têm anomalias consistentes com nível de confiabilidade de 90%

22.3.2 O Sul/Sudeste do Brasil e a teleconexão trópico-extratropical

O Sul do Brasil tem um consistente sinal de ENOS na precipitação, que não é uniforme ao longo de um episódio, porque o estado básico da atmosfera no qual as ondas de Rossby se propagam varia ao longo do ano. O foco será novembro, mês de maior impacto.

AS ANOMALIAS de função corrente em altos níveis durante novembro (0) de EN mostram um trem de ondas que se estende do Pacífico Central para os extratropicais com uma larga curvatura, e outro emergindo do Pacífico Oeste, o qual, na latitude do jato subtropical, é refletido para nordeste em direção aos subtropicais da América do Sul, coerentemente com as características da propagação de uma onda de Rossby (Fig. 22.12, coluna à esquerda). Esse trem de ondas produz uma