

## Seção do Capítulo 11: O Tempo e o Clima Tropical

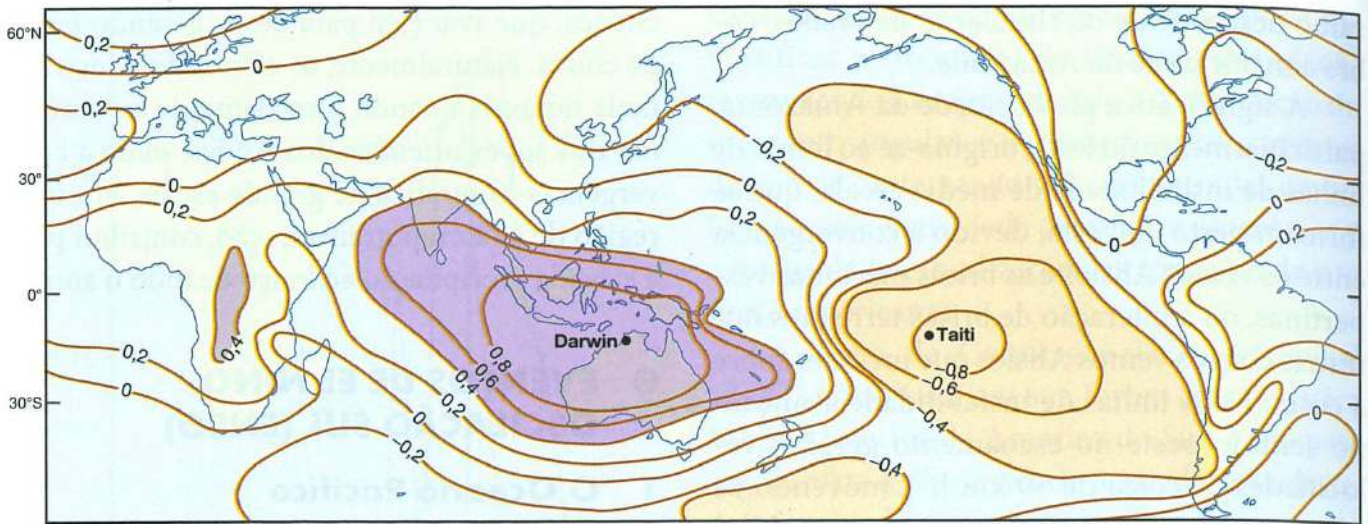
Barry e Chorley, 2013

### **G EVENTOS DE EL NIÑO- OSCILAÇÃO SUL (ENSO)**

#### **1 O Oceano Pacífico**

A Oscilação Sul é uma variação irregular, uma "gangorra" atmosférica ou onda estacionária de massa e pressão atmosféricas, envolvendo trocas de ar entre a célula subtropical de alta pressão sobre o Pacífico Sul oriental e uma região de baixa pressão centrada no Pacífico ocidental e na Indonésia (Figura 11.49). Ela apresenta um período irregular, entre dois e 10 anos. Alguns especialistas acreditam que o seu mecanismo está centrado no controle sobre a intensidade dos ventos Alísios do Pacífico exercido pela atividade das células subtropicais de alta pressão, particularmente sobre o Pacífico Sul. Outros, reconhecendo o oceano como uma enorme fonte de energia térmica, acreditam que as variações de temperatura perto da superfície no Pacífico tropical podem atuar de maneira semelhante a um pêndulo, movimentando todo o sistema do ENSO (ver Quadro 11.1). É importante observar que uma piscina espessa (isto é, mais de 100 m) com a água superficial mais quente do planeta acumula-se no Pacífico equatorial ocidental, entre a superfície e a termoclina. Ela é causada pela insolação intensa, pela baixa perda de calor por evaporação nessa região de ventos fracos e pelo empilhamento de água superficial forçada a oeste pelos ventos Alísios de leste. Essa piscina quente se dissipa periodicamente durante o El Niño, pela mudança no padrão de circulação das correntes oceânicas e pela liberação de calor para a atmosfera – de forma direta e por evaporação.

A Oscilação Sul é associada às fases da circulação de Walker, apresentadas no Capítulo 7C.1. As fases positivas da circulação de Walker



**Figura 11.49** Correlação entre pressões médias anuais ao nível do mar com as observadas em Darwin, Austrália, ilustrando as duas células principais da Oscilação Sul.

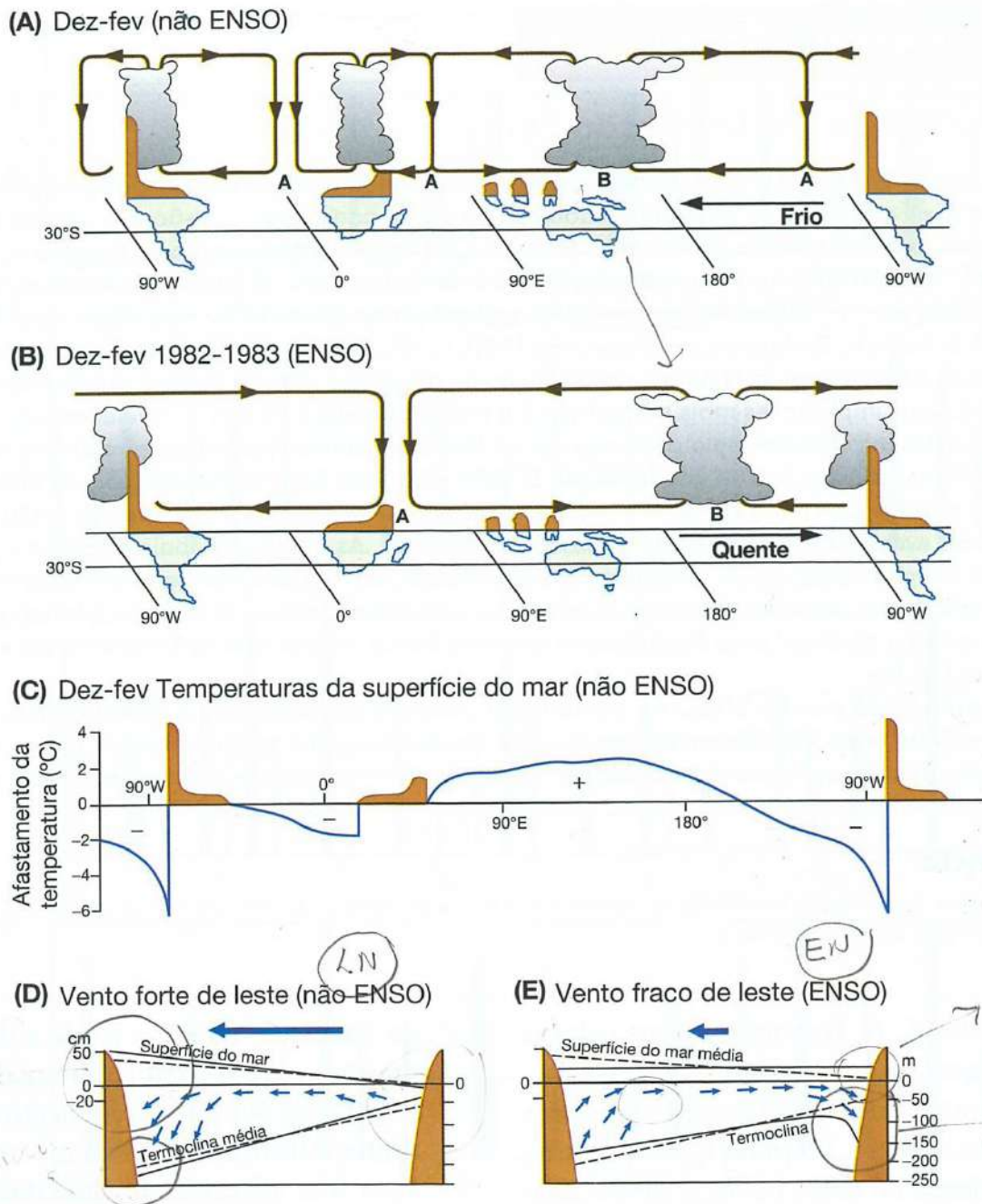
Fonte: Rasmusson (1985). Copyright © American Scientist, (1985).

(associadas em geral a eventos não ENSO, ou La Niña), que ocorrem em média em três a cada quatro anos, alternam-se com as fases negativas (eventos ENSO, ou El Niño). Às vezes, porém, a Oscilação Sul não está em evidência, e nenhuma das duas fases predomina. O nível de atividade da Oscilação Sul no Pacífico é expresso pelo Índice da Oscilação Sul (IOS), que é uma medida complexa, envolvendo as temperaturas da superfície do mar e do ar, pressões ao nível do mar e mais acima, e pluviosidade em regiões específicas.

Durante a fase positiva (La Niña) (Figura 11.50A), os fortes ventos Alísios no Pacífico tropical oriental produzem ressurgência ao longo da costa oeste da América do Sul, resultando em uma corrente fria no sentido norte (a corrente do Peru, ou de Humboldt), denominada localmente como La Niña – a garota – por causa de sua riqueza em plâncton e peixes. As baixas temperaturas da superfície do mar produzem uma inversão rasa, intensificando os ventos Alísios (ou seja, criando um feedback positivo), que removem a água da superfície do Pacífico, onde se acumula água quente superficial (Figura 11.50D). Essa ação também faz a termoclina se encontrar em pouca profundidade (por volta de 40 m) no leste, em oposição aos 100-200 m observados no Pacífico ocidental. A intensificação dos Alísios de leste faz a ressurgência de água fria se espalhar para oeste, e a língua

fria de água superficial se estende naquela direção, mantida pela Corrente Equatorial Sul. Essa corrente para oeste é movida pelo vento e compensada por um declive superficial mais profundo. A contração da água quente do Pacífico no sentido oeste para o Pacífico tropical central e ocidental (Figura 11.50C) produz uma área de instabilidade e convecção, alimentada pela umidade em uma zona de convergência sob a influência dual da Zona de Convergência Intertropical e da Zona de Convergência do Pacífico Sul. O ar ascendente sobre o Pacífico ocidental alimenta o fluxo de retorno na troposfera superior (isto é, a 200 mb), fechando e intensificando a circulação de Walker. Todavia, esse escoamento também intensifica a circulação de Hadley, particularmente a sua componente meridional para norte no inverno setentrional e para sul no inverno meridional.

Todos os anos, iniciando em dezembro, um fluxo fraco de água quente para o sul substitui a Corrente do Peru, que flui para o norte, e a ressurgência fria associada por volta de 6°S ao longo da costa do equador. Esse fenômeno, conhecido como El Niño (o menino, em homenagem ao menino Jesus), intensifica-se em intervalos irregulares de dois a 10 anos (seu intervalo médio é quatro anos), quando a água quente superficial se torna muito mais ampla, e a ressurgência costeira cessa inteiramente. Isso tem consequências ecológicas e econômicas ca-



**Figura 11.50** Seções transversais esquemáticas da circulação de Walker ao longo do equador, com base em cálculos de Y. M. Tourre. (A): regime médio de dezembro a fevereiro (não ENSO), La Niña; ar ascendente e chuvas fortes ocorrem sobre a bacia amazônica, África central e Indonésia-Pacífico ocidental. (B): padrão ENSO, dezembro a fevereiro 1982-1983; o ramo Pacífico ascendente desvia para leste da Linha da Data e há convecção suprimida em outros locais, devido à subsidência. (C): afastamento da temperatura da superfície do mar de sua média zonal equatorial, correspondendo ao caso não ENSO (A). (D): Alísios fortes fazem o nível do mar subir e a termocline aprofundar no Pacífico ocidental para o caso (A). (E): os ventos diminuem, o nível do mar sobe no Pacífico oriental, à medida que a massa de água retorna a leste e a termocline se aprofunda ao longo da costa da América do Sul durante eventos ENSO. As linhas tracejadas em (D) e (E) representam as posições médias do nível médio do mar e da termocline.

Fonte: Baseado em Wyrtki (1982). Com permissão de World Meteorological Organization (1985).

tastróficas para a ictiofauna e a avifauna, e para os setores pesqueiro e de produção de guano no Equador, Peru e norte do Chile. A Figura 11.51 mostra a ocorrência de eventos de El Niño entre 1525 e 1987, classificados conforme a sua inten-

sidade. Todavia, esses eventos costeiros fazem parte de uma mudança nas temperaturas da superfície do mar ao longo de todo o Oceano Pacífico. Além disso, o padrão espacial dessas mudanças não é igual para todos os El Niños.

## AVANÇOS SIGNIFICATIVOS DO SÉCULO XX

## 11.1 O El Niño e a Oscilação Sul

Os episódios do fenômeno El Niño, com correntes costeiras quentes e consequências desastrosas para a vida e as aves marinhas, se repetem a cada quatro a sete anos, assim, já são conhecidos há muito tempo ao longo da costa oeste da América do Sul. A Oscilação Sul relacionada da pressão ao nível do mar entre o Taiti (pressão normalmente elevada) e Jacarta (ou Darwin) (pressão normalmente baixa) foi identificada por Sir Gilbert Walker em 1910, voltando a ser pesquisada na metade da década de 1950 por I. Schell e H. Berlage, e, na década de 1960, por A. J. Troup e J. Bjerknes. Troup relacionou a ocorrência de condições de El Niño a uma oscilação da atmosfera sobre o Pacífico equatorial na década de 1960. Suas implicações mais amplas para a interação entre ar e mar e as teleconexões globais foram propostas inicialmente pelo professor Jacob Bjerknes (famoso pelas frentes polares) em 1966, o qual observou as conexões de condições de El Niño e La Niña com a Oscilação Sul. A importância global dos eventos de ENSO somente foi compreendida plenamente nas décadas de 1970 e 1980, com os fortes eventos de El Niño de 1972-1973 e 1982-1983. As análises globais mostraram padrões claros de anomalias sazonais de temperatura e precipitação em regiões bem separadas durante e depois do início do aquecimento nas regiões oriental e central do Oceano Pacífico equatorial, incluindo secas no nordeste do Brasil e na Australásia e invernos frios e úmidos após o El Niño no sul e sudeste dos Estados Unidos.

A ocorrência de eventos ENSO no passado foi estudada por meio de documentos históricos, inferida a partir de anéis de crescimento em árvores, recifes de corais, testemunhos de gelo e registros sedimentares de alta resolução. Estima-se que o efeito líquido dos grandes eventos de El Niño sobre as tendências da temperatura global seja de aproximadamente  $+0,06^{\circ}\text{C}$  entre 1950 e 1998.

## Referência

Diaz, H.F. e Markgraf, V. (eds) (1992) El Niño. *Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*, Cambridge University Press, Cambridge, 476pp.

Recentemente, K. E. Trenberth e seus colegas mostraram que, no período 1950-1977, o aquecimento durante um El Niño se espalhou para oeste a partir do Peru, ao passo que, após uma grande mudança no clima na bacia do Pacífico em 1976-1977, o aquecimento se espalhou para leste a partir do Pacífico equatorial ocidental.

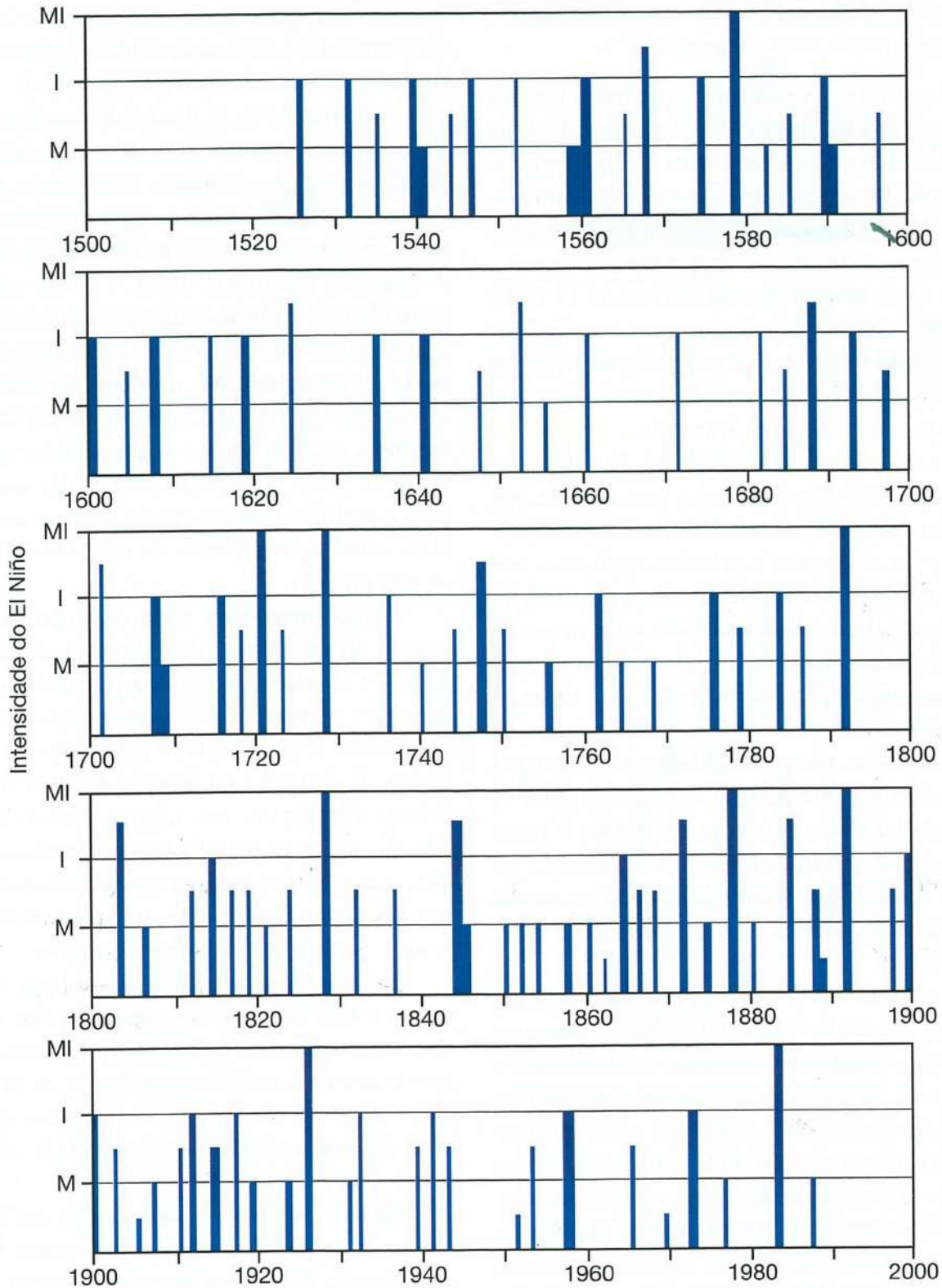
O acoplamento oceano-atmosfera durante os eventos de ENSO claramente varia em escalas temporais multidecenais.

Os eventos de ENSO resultam de uma reorganização radical da circulação de Walker em dois sentidos principais:

**1** A pressão diminui e os Alísios enfraquecem sobre o Pacífico tropical oriental (Figura 11.50B), a ressurgência causada pelo vento diminui, permitindo que a ZCIT se estenda para o sul, em direção ao Peru. Esse aumento de  $1-4^{\circ}\text{C}$  nas temperaturas da superfície do mar reduz o gradiente oeste-leste na temperatura da superfície do mar

do Pacífico e também tende a diminuir a pressão sobre o Pacífico oriental. Esse último causa outra redução na atividade dos ventos Alísios, redução na ressurgência de água fria, advecção de água quente e um aumento nas temperaturas da superfície do mar – em outras palavras, o início do El Niño ativa um circuito de *feedback* positivo no sistema oceano-atmosfera no Pacífico oriental.

**2** Sobre o Pacífico tropical ocidental, a área de máxima temperatura do mar e convecção responde ao enfraquecimento citado da circulação de Walker ao mover-se para leste no Pacífico central (Figura 11.50B). Isso se deve, em parte, a um aumento na pressão no oeste, mas também a um movimento combinado da ZCIT para o sul e da ZCPS para o nordeste. Nessas condições, ondas de ventos equatoriais de oeste lançam uma imensa língua de água quente (isto é, acima de  $27,5^{\circ}\text{C}$ ) a



**Figura 11.51** Eventos de El Niño em 1525-1987, classificados como muito intenso (MI), intenso (I) e média intensidade (M).

Fonte: Quinn and Neal (1992). Copyright © Routledge, London.

leste sobre o Pacífico central, como ondas oceânicas internas de grande escala (Kelvin). Sugere-se que esse escoamento para leste às vezes possa ser desencadeado

ou intensificado pela ocorrência de pares de ciclones a norte e sul do equador. Esse fluxo de água quente para leste **rebaixa a termoclina** ao longo da costa da América

do Sul (Figura 11.50E), impedindo que a água fria alcance a superfície.

Desse modo, se o evento que irá se formar será um La Niña ou um El Niño, trazendo água superficial fria no sentido oeste ou água superficial quente no sentido leste, respectivamente, para o Pacífico central, dependerá dos processos concorrentes de **ressurgência e advecção**.

A fase mais intensa de um evento de El Niño geralmente dura cerca de um ano, e a mudança para o El Niño ocorre por volta de março a abril, quando os ventos Alísios e a língua fria estão em seu modo mais fraco. As **alterações na circulação oceano-atmosfera** no Pacífico durante o El Niño são facilitadas pelo fato de que o tempo que as correntes oceânicas superficiais levam para se adaptar a grandes mudanças nos ventos diminui notavelmente com a diminuição da latitude. Isso é demonstrado pela inversão sazonal da deriva monçônica de sudoeste e nordeste ao longo da costa da Somália no Oceano Índico. A circulação atmosférica de grande escala está sujeita a um *feedback* negativo limitante, envolvendo uma correlação negativa entre as intensidades das circulações de Walker e Hadley. Assim, o enfraquecimento da circulação de Walker durante um evento de ENSO leva a uma intensificação relativa da circulação de Hadley associada.

O **término do El Niño** é precedido pelo retorno da **termoclina** a profundidades pequenas no Pacífico equatorial oriental e central, removendo as anomalias positivas na temperatura na superfície do mar. Isso parece ocorrer em resposta a uma renovação na força dos ventos de leste ou a ondas de Kelvin oceânicas equatoriais. De dezembro a janeiro, existe um desvio de água a 28°C para sul do equador em anos “normais” e de El Niño, e isso causa a elevação da termoclina.

## 2 Teleconexões

As teleconexões são definidas como ligações entre variáveis atmosféricas e oceânicas por longas distâncias; as ligações entre condições climáticas no Oceano Pacífico tropical oriental e ocidental representam uma teleconexão “ca-

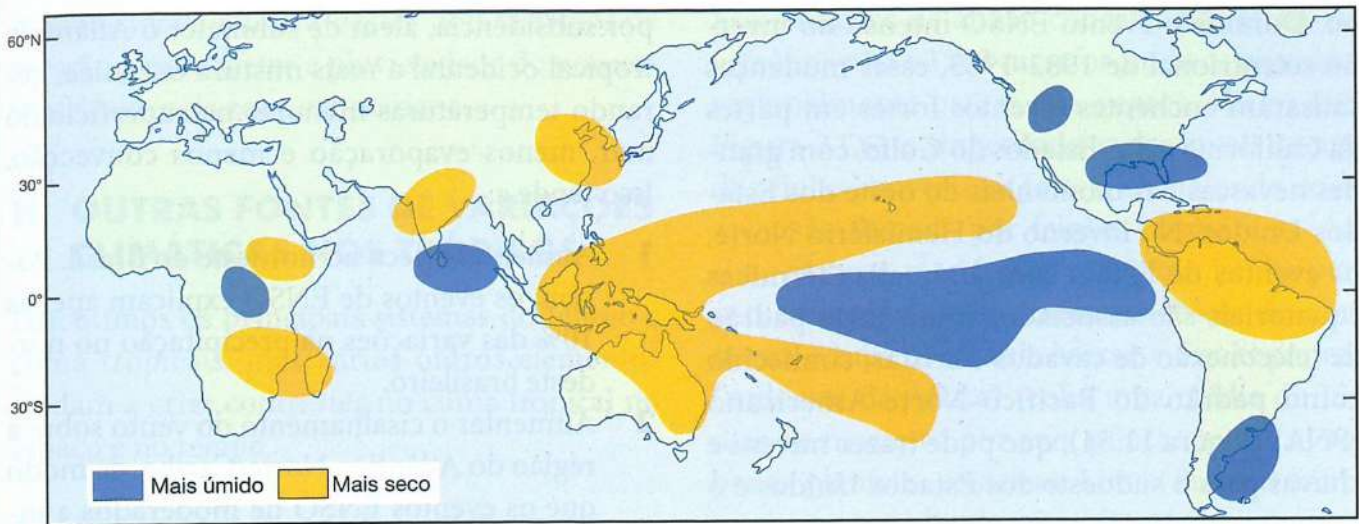
nônica”. A Figura 11.52 ilustra a coincidência de eventos de ENSO com climas regionais mais úmidos ou mais secos do que o normal.

No Capítulo 7C.1, discutimos a observação de Walker de uma teleconexão entre os eventos de ENSO e a pluviosidade monçônica abaixo do normal sobre o sul e sudeste asiático (Figura 11.53). Isso se deve ao movimento para leste da zona de máxima convecção sobre o Pacífico ocidental. Todavia, é importante reconhecer que os mecanismos do ENSO são apenas uma parte do fenômeno das monções sul-asiáticas. Por exemplo, partes da Índia podem ter secas na ausência do El Niño, e o começo das monções também pode depender do controle exercido pela quantidade de cobertura de neve euroasiática sobre a persistência de célula continental de alta pressão.

O movimento da zona de máxima convecção do Pacífico ocidental para leste na fase do ENSO também diminui a pluviosidade nas monções de verão sobre o norte da Austrália, bem como a pluviosidade extratropical sobre o leste da Austrália na estação de inverno para primavera. Durante esta última, a célula de alta pressão sobre a Austrália traz secas disseminadas, mas que são compensadas pelo aumento nas chuvas no oeste da Austrália associado aos ventos de norte que ocorrem na região.

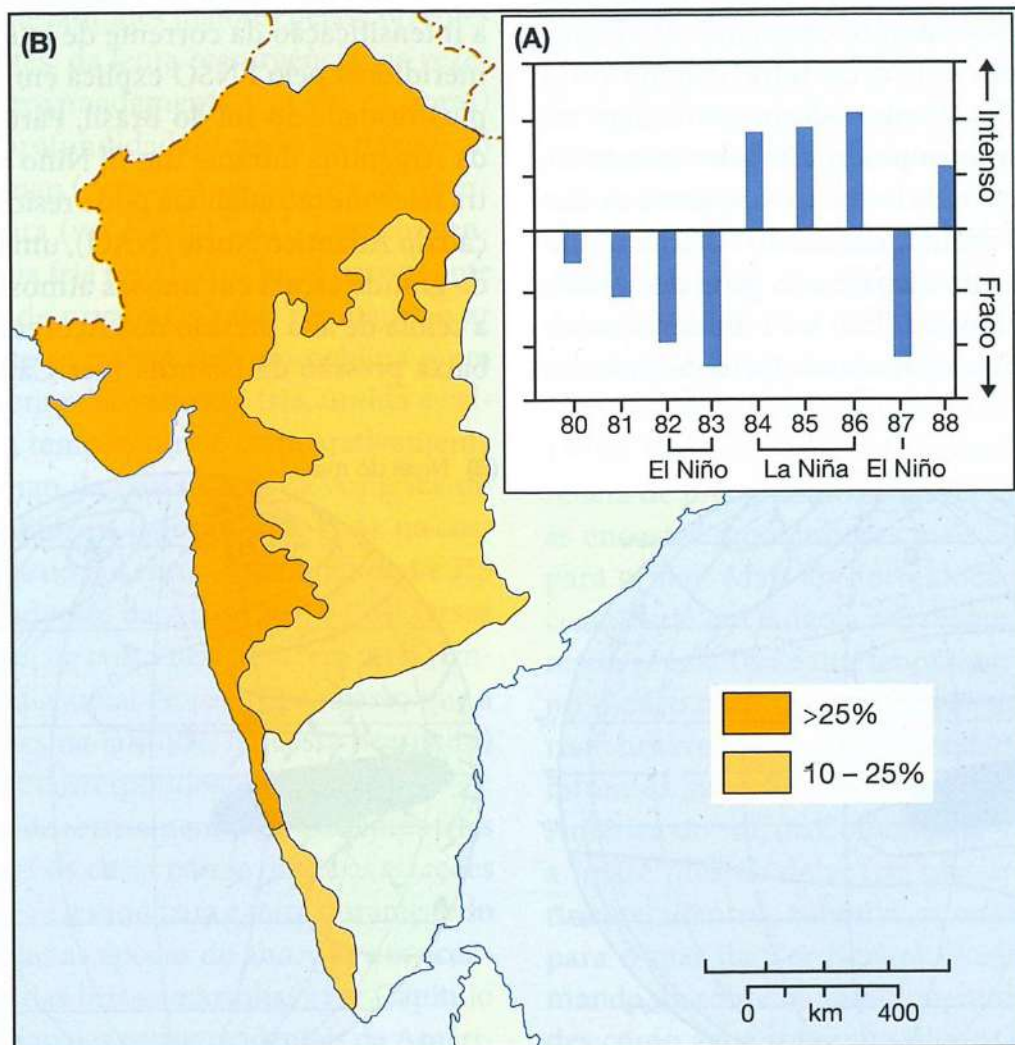
Sobre o Oceano Índico, o controle climático sazonal dominante é exercido pelas inversões sazonais nas monções, mas ainda existe um mecanismo secundário semelhante ao El Niño sobre o sudeste da África e Madagascar, que resulta em uma redução na pluviosidade durante eventos de ENSO.

Observa-se que as teleconexões do ENSO afetam as regiões extratropicais, assim como as tropicais. Durante a fase mais intensa do El Niño, duas células de alta pressão, centradas a 20°N e 20°S, formam-se sobre o Pacífico na troposfera superior, onde o aquecimento anômalo da atmosfera está no nível máximo. Essas células intensificam a circulação de Hadley, fazem ventos tropicais de níveis altos se formarem perto do equador, e intensificam correntes de jato subtropicais, deslocando-as em direção ao equador, especialmente no hemisfério de inver-



**Figura 11.52** Coincidência entre eventos de ENSO e anomalias de climas regionais mais úmidos ou secos do que o normal.

Fontes: Rasmusson e Ropelowski, e Halpert. In Glantz et al. (1990). Composição reproduzida com permissão da Cambridge University Press.



**Figura 11.53** Conexão proposta entre as monções indianas de verão e o El Niño. (A): intensidade observada das monções asiáticas de verão (1980-1988) mostrando seu enfraquecimento durante os três anos de El Niño intenso, 1982, 1983 e 1987. (B): áreas da Índia onde os déficits de pluviosidade nas monções de verão (enquanto porcentagem abaixo da média de 1901-1970) foram significativamente mais frequentes em anos de El Niño.

Fonte: A: Browning (1996). B: Gregory (1988). IGU Study Group on Recent Climate Change.

no. Durante o evento ENSO intenso do inverno setentrional de 1982-1983, essas mudanças causaram enchentes e ventos fortes em partes da Califórnia e dos Estados do Golfo, com grandes nevascas nas montanhas do oeste dos Estados Unidos. No inverno do Hemisfério Norte, os eventos de ENSO com anomalias térmicas equatoriais são associados a um forte padrão de teleconexão de cavados e cristas, conhecido como padrão do Pacífico-Norte-Americano (PNA) (Figura 11.54), que pode trazer nuvens e chuvas para o sudoeste dos Estados Unidos e o noroeste do México.

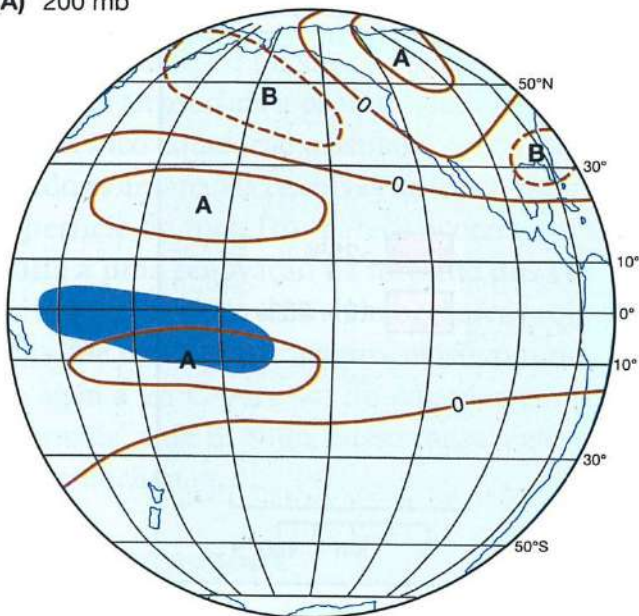
O Oceano Atlântico apresenta uma tendência para um efeito modesto semelhante ao El Niño, mas a piscina ocidental de água quente é muito menor, e as diferenças tropicais entre leste e oeste são menos consideráveis do que no Pacífico. No entanto, os eventos de ENSO no Pacífico têm uma certa influência no comportamento do sistema oceano-atmosfera no Atlântico; por exemplo, o estabelecimento do centro convectivo de baixa pressão sobre a célula subtropical de alta pressão do Atlântico central e oriental e do escoamento geral dos ventos Alísios no Atlântico. Isso leva ao desenvolvimento de uma camada mais forte de inversão

por subsidência, além de submeter o Atlântico tropical ocidental a mais mistura oceânica, gerando temperaturas menores na superfície do mar, menos evaporação e menos convecção. Isso tende a:

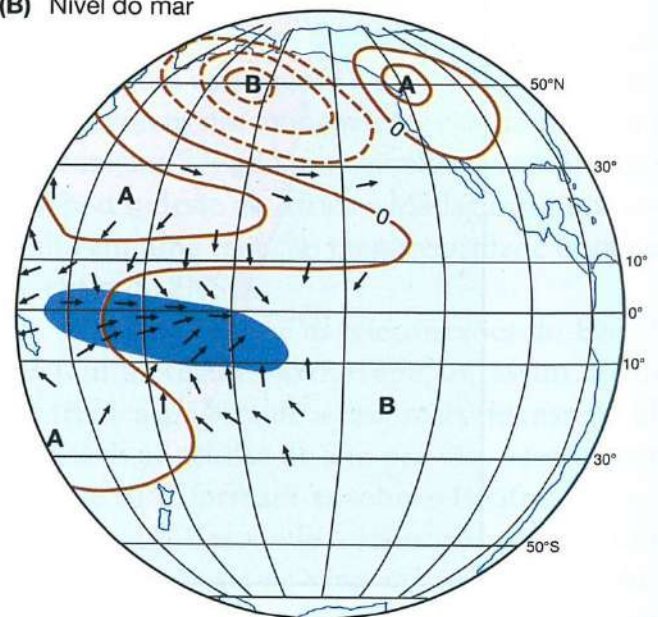
- 1 Aumentar a seca no nordeste do Brasil. Porém, os eventos de ENSO explicam apenas 10% das variações na precipitação no nordeste brasileiro.
- 2 Aumentar o cisalhamento do vento sobre a região do Atlântico Norte/Caribe, de modo que os eventos ENSO de moderados a intensos estão correlacionados com a ocorrência de aproximadamente 44% menos furacões no Atlântico do que com eventos não ENSO.

Outra influência do Pacífico envolve como a intensificação da corrente de jato subtropical meridional pelo ENSO explica em parte a forte pluviosidade no sul do Brasil, Paraguai e norte da Argentina durante um El Niño intenso. Outra teleconexão atlântica pode residir na Oscilação do Atlântico Norte (NAO), uma alternância de grande escala em massas atmosféricas entre a célula de alta pressão dos Açores e a célula de baixa pressão da Islândia (ver Capítulo 7C.2).

(A) 200 mb



(B) Nível do mar



**Figura 11.54** Modelo do padrão de circulação do Pacífico-Norte-Americano (PNA) na troposfera superior durante um evento de El Niño de dezembro a fevereiro. O sombreado indica uma região de maior pluviosidade, associada a uma convergência anômala de ventos superficiais de oeste no Pacífico ocidental equatorial.

Fonte: Shukla e Wallace (1983). Cortesia da American Meteorological Society.