El Niño
Oscilação Sul

Clima – Vegetação - Agricultura



Moacir Antonio Berlato - Gilberto Rocca da Cunha - Denise Cybis Fontana

El Niño Oscilação Sul

Clima - Vegetação - Agricultura

El Niño Oscilação Sul

Clima - Vegetação - Agricultura

Moacir Antonio Berlato
Gilberto Rocca da Cunha
Denise Cybis Fontana

Passo Fundo, RS
2024

Copyrigth © 2024 by Moacir Antonio Berlato, Gilberto Rocca da Cunha e Denise Cybis Fontana.

Editor: Gilberto Rocca da Cunha

Capa e diagramação: Everaldo Lemos Siqueira

Revisão: Ana Paula Assumpção Cordeiro (capítulo1)
Sandra Maria Moussalle (capítulo 2)
Leila Maria Costamilan (capítulo 3)

1ª edição [2024] – PDF

Grafia atualizada segundo o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, que passou a vigorar no Brasil em 2009.



Fotografias da capa 1

Fotografias 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8: Dirceu Neri Gassen
Fotografia 7: Pedro Luiz Scheeren

CIP Catalogação na Publicação

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Berlato, Moacir Antonio
El Niño oscilação Sul [livro eletrônico] : clima, vegetação e agricultura / Moacir Antonio Berlato, Gilberto Rocca da Cunha, Denise Cybis Fontana. -- Passo Fundo, RS : Ed. dos Autores, 2024.
PDF

Bibliografia
ISBN 978-65-01-02988-7

1. Agricultura - Brasil 2. Clima - Mudanças 3. Climatologia 4. Gestão de riscos 5. Meteorologia 6. Vegetação I. Cunha, Gilberto Rocca da. II. Fontana, Denise Cybis. III. Título.

24-207661 CDD-551.69

Índices para catálogo sistemático:

1. Climatologia : Aspectos ambientais : Ciências da terra 551.69

Aline Graziele Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

ATENÇÃO!

Os autores não assumem qualquer responsabilidade, expressa ou implícita, por decisões tomadas pelos usuários com base nas informações dessa obra. Incluam-se, embora não limitados, lucro cessantes, interrupção de negócios e outros prejuízos pecuniários. Cada autor é responsável, única e exclusivamente, pelo conteúdo do capítulo que assina.

[2024]
Todos os direitos desta edição reservados a
Moacir Antonio Berlato, Gilberto Rocca da Cunha e Denise Cybis Fontana
Passo Fundo, RS

Autores

MOACIR ANTONIO BERLATO
GILBERTO ROCCA DA CUNHA
DENISE CYBIS FONTANA



MOACIR ANTONIO BERLATO

MOACIR ANTONIO BERLATO é Técnico Rural, pela Escola Técnica de Agricultura de Viamão (ETA) (1962), engenheiro-agrônomo, pela Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (1966), mestre em Climatologia Agrícola pelo Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas (IICA) (1970) e doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (1987). Ex-pesquisador e diretor (por dois períodos, 1975 a 1978 e 1986 a 1988) do Instituto de Pesquisas Agronômicas da Secretaria de Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul (IPAGRO). Presidente da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia (SBA), período 1991/1993, gestão em que foi criada a Revista Brasileira de Agrometeorologia (RBA). Professor de Agrometeorologia, aposentado, da Faculdade de Agronomia da UFRGS, de graduação e pós-graduação, orientador de mestrado e doutorado. Orientou e coorientou 22 dissertações e teses. Tem 88 artigos publicados em revistas científicas (autor e coautor), 104 trabalhos publicados em anais de eventos, 2 livros (autor e editor) e 8 capítulos de livros. Áreas de interesse: El Niño Oscilação Sul e seus impactos no clima e na agricultura. Uso de previsões climáticas na agricultura, relação clima-planta e modelagem agrometeorológica.



GILBERTO ROCCA DA CUNHA

GILBERTO ROCCA DA CUNHA é engenheiro-agrônomo (1985), mestre (1988) e doutor (1991) pela Universidade Federal Rio Grande do Sul (UFRGS). É pesquisador da Embrapa, desde agosto de 1989. Foi Chefe-Geral da Embrapa Trigo, de 1º de março de 2006 a 5 de setembro de 2010. É autor da série de livros Meteorologia: Fatos & Mitos (1997, 2000 e 2003), Cientistas no Divã (2007), Galileu é meu pesadelo (2009), A ciência como ela é... (2011) e Ah! Essa estranha instituição chamada ciência (2021), entre outros. É Editor-Chefe de AGROMETEOROS, o periódico científico da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. Atua em pesquisa nas áreas de bioclimatologia de cereais de inverno, aplicações de previsões de tempo e clima na agricultura e é membro da equipe responsável pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) no Brasil.



DENISE CYBIS FONTANA

DENISE CYBIS FONTANA possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1985). Obteve o título de Mestre em Fitotecnia em 1987 e de Doutor em Fitotecnia em 1995 pela UFRGS, em sanduíche com a Cranfield University, Inglaterra. Em 2005 realizou estagio pós-doutoral junto a University of Southern Queensland, Austrália. É professora titular da UFRGS, atuando como orientadora de graduação e pós-graduação (mestrado e doutorado). Tem experiência em ensino e pesquisa na área de agrometeorologia e de sensoriamento remoto, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem agrometeorológica-espectral do rendimento de culturas, indicadores espectrais para fins de monitoramento no setor agropecuário, relações entre dados espectrais e fluxos gasosos e componentes do balanço de energia usando imagens orbitais. Foi presidente por dois mandatos da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia (2013-15 e 2015-17).

Dedicatórias
Agradecimentos

MOACIR ANTONIO BERLATO

Dedicatória

Moacir Antonio Berlato, autor do capítulo 1, dedica essa obra às filhas Lisane e Larissa e às netas Valentina e Lila.

Agradecimentos

À Larissa Berlato, doutoranda em *Design* da UFSC, pela melhoria da resolução das figuras.
À doutora Ana Paula Assumpção Cordeiro, pela revisão do texto original e pelas sugestões.

GILBERTO ROCCA DA CUNHA

Dedicatória

Gilberto Rocca da Cunha, autor do capítulo 3, dedica essa obra à memoria da extinta Seção de Ecologia Agrícola do, igualmente extinto, Instituto de Pesquisas Agronômicas (IPAGRO), onde, em setembro de 1978, na icônica sede da Rua Botafogo, no bairro Menino Deus, em Porto Alegre, teve o primeiro contato, de uma jornada que se estenderia por 11 anos, com a meteorologia aplicada à agricultura.

Agradecimento

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), que, há 34 anos, tem me oportunizado vivenciar intensamente, como membro da equipe responsável pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), a meteorologia aplicada à agricultura brasileira.

DENISE CYBIS FONTANA

Dedicatória

Denise Cybis Fontana, autora do capítulo 2, dedica à sua pequena família: Henrique, Gabriel, Rodrigo, Julia, Vinícius, Teresa, Caio e Maya.

Agradecimento

Ao grupo de pesquisas em Agrometeorologia/UFRGS, especialmente aos alunos de graduação e pós-graduação que dedicaram tempo e esforços para o entendimento do fenômeno ENOS e efeitos associados.

Prefácio

Antonio Divino Moura

Tive o privilégio, após obter o meu PhD em Meteorologia pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), em 1975, de, seja junto ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, criado em meados dos anos 1970, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e, especialmente, pela atuação em pesquisa colaborativa com organizações internacionais, vivenciar, ativamente, a revolução que aconteceu nas ciências atmosféricas, quando, a partir da década de 1980, começou, efetivamente, a ser elucidado o papel do acoplamento dinâmico oceano-atmosfera como uma das principais fontes de variabilidade climática interanual no mundo.

Destaco ainda, que, em 1982, quando se estabeleceu um grande evento El Niño, pelas mais variadas razões, ele, além de não ter sido previsto, tampouco foi identificado no seu estágio inicial. As informações das temperaturas oceânicas eram raras, além de tardar para ser disponibilizadas e as imagens dos satélites na faixa equatorial, naquele ano, haviam sido contaminadas pelos aerossóis que foram dispersos na atmosfera pela erupção do Vulcão El Chichón, em março de 1982, no México. Mas, assim que o evento El Niño de 1982/83 começou a ganhar força e espalhar, muito além da Bacia do Pacífico, anomalias climáticas extremas em várias partes do mundo, ele passou a receber uma cobertura midiática até então desconhecida e se popularizou sobremaneira.

A comunidade cientifica não poderia mais ignorar El Nño e nem o que estava acontecendo no mundo. Há tempos que se sabia de El Niño e alguns detalhes, especialmente desde o El Niño de 1957/58 e a teorização do acoplamento dinâmico oceano-atmosfera, com a junção dos componentes El Niño e Oscilação Sul (El Niño Southern Oscillation), que sobreveio nos anos 1960. Foi então que começou a ser posto em prática um grande esforço de cooperação internacional, unindo meteorologistas e oceanógrafos, que se materializaria no Programa TOGA (Tropical Oceans and Global Atmosphere Program), que veio a se estender de 1º de janeiro 1985 a 31 dezembro 1994. O legado deixado pelo Programa TOGA, em termos de sistema de monitoramento da Bacia do Pacífico na faixa equatorial, de distribuição de dados em tempo quase real, de melhoria na modelagem de acoplamento dinâmico oceano-atmosfera e de previsões climáticas sazonais, para as

regiões onde o fenômeno ENOS possui sinais inequívocos de influência, é imensurável. Mas, se o Programa TOGA abrangeu o Oceano Pacífico, não podemos ignorar, no caso do monitoramento do Oceano Atlântico, do Projeto PIRATA, cujas contribuições desse esforço de colaboração internacional, do qual o Brasil é parte relevante, para melhor entendimento das secas do Nordeste brasileiro, por exemplo, foram e são fundamentais. O papel dos oceanos tropicais, suas variações e seu acoplamento dinâmico com a atmosfera e suas influências no clima mundial vieram à luz, apesar das muitas incertezas associadas e que, algumas, ainda hoje, persistem.

A inclusão do ENOS, via o acoplamento dinâmico oceano-atmosfera, como base das previsões climáticas, para as regiões do mundo influenciadas por esse fenômeno, evidentemente, foi fundamental para os avanços alcançados na área. O Brasil, por possuir várias partes do seu território sensível às fases do ENOS, foi um dos países beneficiados pela melhoria das nossas previsões na escala climática.

Destaquei essa breve história, porque, indubitavelmente, o livro que ora me cabe apresentar, pertinentemente bem focado em impactos no clima, na vegetação e em aplicações na agricultura brasileira, ainda que não descuide de trazer boa análise histórica e adequada teoria do estado atual da arte sobre o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), certamente, não pode ser dissociado desse esforço iniciado nos anos 1980. Sem essa evolução do conhecimento sobre o ENOS, que possibilitou a divulgação de previsões climáticas, em escala operacional, obras dessa natureza não justificariam existir.

Sobre a obra, indubitavelmente, ela não fica restrita à agricultura, apesar de escrita por agrometeorologistas. Vislumbro que, da sua leitura, poderão se beneficiar, sobremaneira, além dos profissionais das ciências agrárias, também aqueles que atuam em gestão de recurso hídricos, os gestores públicos que possuem a competência para tomar decisões antecipadas às catástrofes esperáveis, também estudantes em processo de formação, tanto de graduação quanto de pós-graduação, seja em Agronomia, Geografia, Meteorologia e nos mais variados campos do conhecimento que busquem melhor explorar os recursos naturais. A leitura é fácil e agradável, ainda que a robustez teórica da obra seja sempre preservada.

Os autores desse livro vivenciaram essa história, aqui contada, intensivamente. Muitas vezes estivemos presentes, juntos, em eventos seminais desse processo, tanto no Brasil quanto no exterior. Todos possuem mais de quatro décadas dedicadas ao estudo do ENOS, seus impactos climáticos e aplicações no Brasil. Especificamente, destaco que conheci o autor principal e mentor desse livro, Professor Moacir Antonio Berlato, no início dos anos 1980, no INPE, quando ele cumpria o seu programa de doutoramento em Meteorologia, em São José dos Campos. Berlato sempre foi um profissional de destaque, nível técnico elevado, responsável, agregador na formação de equipes e que daria prova cabal disso, ao retornar para o Rio Grande do Sul, onde, tanto junto ao antigo Instituto de Pesquisas Agronômicas (IPAGRO) quanto no Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), desencadearia uma produção acadêmica relevante sobre o ENOS, formando inúmeros mestres e doutores nesse tema. Além de Moacir Berlato, também conheço os outros dois auto-

res, Gilberto Cunha e Denise Fontana. Ambos oriundos do grupo da UFRGS, formados sobre a tutoria dos professores Moacir Berlato e Homero Bergasmaschi (outro respeitável agrometeorologista brasileiro). Denise Fontana, que teve passagem de formação pelo IRI (instituição internacional, sediada junto a Universidade de Columbia, nos EUA, que, aliás, ajudei a criar, em 1992, e fui diretor-geral), continuou na UFRGS, onde desenvolve uma exitosa carreira ligando sensoriamento remoto, meteorologia e agricultura. E Gilberto Cunha, que, em 1989, passou para os quadros da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), instituição na qual tem se dedicado a estudar temas afetos à gestão de riscos climáticos na agricultura brasileira, em que o ENOS não pode ser ignorado, tendo feito parte da equipe original que instituiu, a partir de 1996, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) como base da política pública de crédito e seguro rural no Brasil.

Assim, pelo conteúdo e pelas credenciais dos autores, eu não hesito em recomendar fortemente essa obra. Você, certamente, ao lê-la, vai auferir muitos benefícios!

São José dos Campos, 19 de abril de 2024

Antonio Divino Moura

Engenharia Elétrica UFMG, 1969, PhD MIT, 1975, pós-doutorado NASA/GISS, 1980, ex-pesquisador e ex-professor do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do INPE, ex-diretor do IRI, foi vice-presidente da OMM e ex-diretor do INMET

Sumário

15 CAPÍTULO 1
El Niño Oscilação Sul
Moacir Antonio Berlato

161 CAPÍTULO 2
Detecção de alterações na vegetação associadas ao fenômeno ENOS, usando imagens orbitais
Denise Cybis Fontana

199 CAPÍTULO 3
Previsões ENOS e suas aplicações na agricultura brasileira
Gilberto Rocca da Cunha



CAPÍTULO 1

El Niño Oscilação Sul

Moacir Antonio Berlato

1 El Niño Oscilação Sul

Moacir Antonio Berlato

Introdução

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é o principal mecanismo de variabilidade interanual do clima da Terra. É o resultado da interação oceano-atmosfera, que ocorre no Oceano Pacífico equatorial, ora com águas quentes, ora com águas frias, em associação com uma "gangorra barométrica" no Pacífico Sul, entre Taiti (na Polinésia Francesa) e Darwin, no norte da Austrália. Quando a pressão atmosférica na superfície é alta em Taiti, ela é baixa em Darwin e vice-versa, ou seja, existe uma correlação inversa da pressão atmosférica da superfície, dessas duas áreas, chamada de Oscilação Sul. Quando a anomalia de pressão é negativa no Taiti a anomalia de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) do Pacífico equatorial é positiva (El Niño, fase quente); quando a anomalia de pressão é negativa em Darwin, a anomalia de TSM do Pacífico equatorial é negativa (La Niña, fase fria).

O Oceano Pacífico contém três quintos de toda a massa de água do Planeta e ocupa 45% da circunferência da Terra. A parte mais larga do Pacífico está sobre a linha do equador terrestre, tendo, portanto, uma maior superfície para receber energia solar nas latitudes equatoriais, e transferir muito mais umidade e calor para a atmosfera do que outros oceanos.

A faixa equatorial da costa oeste da América do Sul (80º de longitude W) até a Linha da Data (180º) é a mais extensa área do oceano tropical, que mostra a maior variabilidade interanual da temperatura da superfície e os impactos dessa variabilidade interferem no comportamento normal da circulação atmosférica e no sistema climático de muitas regiões da Terra, afetando os ecossistemas, a agricultura, produzindo secas, inundações, erosão, fome, incêndios florestais, mortandade de recifes de corais, peixes e outros animais marinhos, bem como produzindo outros eventos climáticos extremos.

A costa oeste da América do Sul tropical, em condições normais, é uma região onde os ventos alísios de sudeste, soprando em direção ao equador e sob a influência da força de Coriolis, desviam para a esquerda, tornando-se ventos de leste, que carregam as águas frias da costa na direção oeste e causam o fenômeno da ressurgência das águas mais frias do fundo do oceano para a superfície. A ressurgência é o fenômeno que traz para a superfície os nutrientes que alimentam o fitoplâncton, este o zooplâncton, que por sua vez, sustenta peixes e outros animais marinhos. Os peixes alimentam as aves, for-

mando ali, na costa oeste da América do Sul tropical, uma rica cadeia trófica.

Os pescadores, navegando em seus pequenos barcos, nas costas do Peru e Equador, notavam que, anualmente, uma corrente de águas relativamente quentes, vinda do norte, invadia a região costeira. Como a corrente quente aparecia próximo do Natal, os pescadores a chamavam de "corrente de El Ninhozinho", em referência ao Menino Jesus (o Niño, em espanhol). Mais tarde, o termo El Niño, tornou-se restrito às águas muito quentes que, em certos anos, penetravam mais ao sul, impediam a ressurgência, os peixes sumiam e as aves migravam ou morriam em grande quantidade. Ou seja, a cadeia trófica era destruída.

Esse fenômeno, apesar de existir há milhares ou milhões de anos, só no final do século XIX (1891) foi, formalmente, anunciado no Boletim da Sociedade de Geografia de Lima (Peru), pelo seu presidente, Dr. Luis Carranza, chamando a atenção para o fato de uma contracorrente quente fluindo do norte e que os pescadores chamavam de corrente de El Niño. O Dr. Carranza também disse, na ocasião, que "esse fenômeno exercia grande influência no clima da região". Foi a primeira vez que apareceu a expressão El Niño na ciência. Mas, desde então, se passaram quase sete décadas, sem o interesse das ciências oceânicas e atmosféricas.

Os pescadores também notavam que, em outros anos, as águas costeiras daquela região ficavam mais frias do que o normal, a ressurgência aumentava e a cadeia alimentar enriquecia, com abundante pesca. Essa situação acabou batizada como La Niña, coerentemente, pois o antônimo de menino é menina (Niña, em espanhol).

No início do século XX, o físico e matemático inglês Sir Gilbert Walker tornou-se diretor-geral do Observatório da Índia, com a missão de estudar e prever as monções de verão asiáticas, que quando falhavam provocavam a fome e a miséria na Índia. Cerca de 80% da precipitação pluvial anual da Índia, ocorre durante os meses de verão (junho a setembro). Essas precipitações pluviais é que garantem a produção agrícola daquela região. Walker montou uma equipe de estatísticos, que calcularam as correlações entre variáveis meteorológicas em todo o mundo. E, sem saber da existência de El Niño, ele observou que quando a pressão é alta no Oceano Pacífico ela tende a ser baixa no Oceano Índico, desde a África até a Austrália. Ele chamou essa flutuação, de grande escala, de Oscilação Sul (OS) e pensou que aí estaria a chave para previsão das monções. Mas, pelo ceticismo de seus colegas sobre suas estatísticas, os trabalhos de Walker passaram várias décadas sem a devida atenção. Mais tarde, trabalhos com novos dados de séries mais longas acabaram dando crédito aos achados de Walker. Irônica ou tristemente, Walker faleceu em 1958, justamente no Ano Geofísico Internacional de 1957-1958, quando os cientistas, finalmente, voltaram sua atenção para esse singular fenômeno da costa oeste da América do Sul - o El Niño - apesar de, conforme Caviedes (2001), alguns dramáticos eventos de El Niño, como os de 1911, 1925 e 1953 tivessem repercutidos em páginas de reputados jornais. Apesar de haver antecedentes, conforme Rasmusson & Carpenter (1982), foi a notável síntese do professor Jacob Bjerknes (1966, 1969, 1972), da Universidade da Califórnia, que, claramente, ligou a flutuação interanual da TSM do Pacífico equatorial com a OS de Walker e a mudança da componente zonal do vento junto ao equador (Célula de Walker) e a precipitação pluvial em larga escala no Pacífico equatorial. Segundo Rasmusson & Carpenter (1982), os

estudos de Bjerknes mudaram o enfoque da análise estatística da OS para uma abordagem diagnóstica, fisicamente orientada. Estava explicado o acoplamento oceano-atmosfera, que produz o fenômeno EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL (ENOS).

A Walker e Bjerknes, principalmente, deve-se os fundamentos dos conhecimentos do fenômeno El Niño, sua irmã La Niña e da Oscilação Sul.

O poderoso El Niño de 1982-1983, surpreendeu os cientistas e a sociedade em geral, pelos seus impactos em todo o mundo, com severas secas em alguns lugares e enchentes em outros, além de extremos climáticos, em diversas partes do mundo. E não foi previsto, nem detectado. Isso consolidou a necessidade de montar no Pacífico uma rede de monitoramento para melhor conhecimento da física do ENOS e as possibilidades de sua previsão. Então, sob os auspícios do WCRP (*World Climate Research Programme*), foi concebido um grande Projeto, que ficou conhecido pela sigla em inglês TOGA (*Tropical Ocean Global Atmosphere*). O TOGA foi um esforço, de 10 anos (1985-1994), da comunidade científica internacional, para monitoramento do Oceano e Atmosfera, no Oceano Pacífico equatorial. A Rede de Observação do Pacífico (que tem quase quatro décadas de funcionamento), permitiu grande avanço do conhecimento da física do ENOS e revelou a influência desse fenômeno no sistema climático global. Por causa das teleconexões globais, o ENOS é o mecanismo de variabilidade interna do clima de maior impacto nas atividades humanas. Em vista disso, a previsão de seu desenvolvimento, com a maior antecedência possível, é objeto de intensa pesquisa. Hoje já existem modelos acoplados oceano-atmosfera que fazem a previsão, com sucesso, do El Niño e La Niña. A primeira previsão, bem-sucedida, do El Niño, foi realizada em 1986, pelos cientistas Mark Cane e Stephen Zebiak.

Conforme o IRI (*International Research Institute for Climate and Society*), cerca de 50% da variabilidade interanual do clima, em diversas regiões do Globo, são devido ao ENOS. Também conforme IRI (2001), durante os anos de eventos El Niño e La Niña, um terço, aproximadamente, das áreas continentais do Globo tem efeitos previsíveis.

Para a agricultura que, através da experimentação e pesquisa, já são conhecidos os mais prováveis impactos, tanto negativos, como positivos, do El Niño e La Niña, na produtividade e na produção agrícolas, uma previsão com alguns meses de antecedência, permite ao produtor rural, pela primeira vez, tomar decisões, tanto para minimizar impactos negativos quanto tirar proveito de projeções climáticas favoráveis, para sua safra agrícola. Mais, essas previsões dão suporte às políticas públicas de armazenamento e transporte, além de influenciar nos preços das *commodities* do agronegócio.

Neste capítulo, faz-se uma revisão, ainda que simples e certamente incompleta, dos conceitos básicos desse importante fenômeno. É dirigida às disciplinas de agrometeorologia e climatologia, ensinadas nas Escolas das Ciências Agrárias e áreas correlatas das ciências ambientais, aos tomadores de decisão da agropecuária e aos próprios produtores rurais, hoje conscientes dos impactos de El Niño e La Niña em suas atividades.

Breve histórico do El Niño

O EL Niño tem suas raízes na costa oeste da América do Sul. Apesar de levar o nome de El Niño (referente ao menino Jesus), o fenômeno El Niño é muito mais antigo do que Cristo e que da chegada dos pescadores à costa oeste da América do Sul equatorial,

que lhes deram o nome. Sinais do fenômeno foram identificados em amostras de corais e outros indicadores paleoclimáticos, que datam do final da última era do gelo (há cerca de 11.500 anos) (*https://earthobservatory.nasa.gov/features/ElNiño/page3.php*).

Do ponto de vista histórico, o El Niño aparece com a chegada dos europeus ao Novo Mundo, em 1500. E na ciência, segundo Philander (1990), foi quando o doutor Luis Carranza, presidente da Sociedade de Geografia de Lima (Peru), que em 1891 (ano de um muito forte El Niño), formalmente, por meio de um pequeno artigo para o Boletim da Sociedade, chamou a atenção para o fato de uma corrente quente fluindo do norte para o sul vinha sendo observada entre os portos de Paita, no norte do Peru, e Pascamayo, mais ao sul. Os pescadores, que, em seus pequenos barcos navegavam entre esses dois portos, denominaram essa corrente de "corrente de El Niño", que aparecia sempre perto do Natal (data do nascimento do Menino Jesus), daí Niño, o termo espanhol para menino. Também são citados como anunciadores dessa corrente quente o Capitão Camilo Carrillo, um especialista marinho e Frederico Alfonso Pezet, que em nome da Sociedade Geográfica fez uma comunicação em Londres, durante o VI Congresso Internacional de Geografia, em 1895 (Voituriez & Jacques, 2000). O doutor Carranza disse "Eu desejo, na presente ocasião, chamar a atenção dos distinguidos geógrafos aqui em assembleia para esse fenômeno, o qual exerce, indubitavelmente, uma muito grande influência sobre as condições climáticas desta parte do mundo". Pezet também disse, em sua comunicação em Londres, "calls for the serious attention of the men of science of the whole world".

"Essa parte do mundo", referida pelo doutor Luis Carranza, é um improdutivo deserto adjacente ao frio Oceano Pacífico equatorial. O oceano da costa oeste da América do Sul (entre as latitudes de 20º N e 20º S), em condições normais, é uma das mais produtivas regiões de todos os oceanos do mundo. Os ventos que sopram do sul (alísios) em direção ao equador, devido à força de Coriolis, carregam a água superficial para fora da costa, ocasionando o fenômeno da ressurgência. A ressurgência traz a água mais profunda e mais fria, rica em nutrientes minerais, que alimentam o fitoplâncton. O fitoplâncton é a base da cadeia alimentar. Todos os outros elos dessa cadeia trófica, como o zooplâncton, peixes, outros animais marinhos e aves, dependem, direta ou indiretamente, do fitoplâncton. A produtividade primária, nesse ecossistema, é a taxa que o carbono é usado pelo fitoplâncton, via fotossíntese. A disponibilidade de nutrientes controla a produtividade primária, onde não há limitação de luminosidade, como é o caso da ensolarada costa oeste da América do Sul.

Segundo Caviedes (2001), foi o biologista marinho alemão Erwin Schweigger, que passou a maior parte de sua vida profissional no Peru, quem observou que, em certos anos, havia uma extensiva invasão de água equatorial quente mais para o sul. Ele também noticiou que esses eventos eram acompanhados de densa nebulosidade, alta umidade, frequentes tempestades e intensas precipitações pluviais. A esses eventos, ele chamou de grandes eventos de El Niño. Era o caso de 1891, mencionado pelo doutor Carranza. Esses anos eram chamados de "anos de abundância", porque, no continente, "o deserto se transformava em abundante pastagem", onde em outros anos era impossível a existência de vegetação. Conforme Giralt *et al.* (2007), que estudaram a possível origem do El Niño, em 1998 (El Niño 1997-1998) a precipitação pluvial aumentou

mais de 500% nas hiperáridas regiões do Equador, fazendo surgir exuberante vegetação, que durou por três anos. A comunidade local, aproveitou esse período de precipitação pluvial e desenvolveu uma intensa agricultura.

Em compensação, no oceano, a cadeia trófica era destruída. Em ausência do aporte de nutrientes pela ressurgência, a vida marinha e as aves, normalmente abundantes, desapareciam.

No início, o nome El Niño era aplicado a uma corrente de fraco aquecimento, que, anualmente, vinha do norte e banhava as costas do Peru e Equador, tal como vista pelos pescadores. Mas, em alguns anos, essa corrente de água quente era muito forte e penetrava mais ao sul, provocando impactos ambientais de grandes proporções.

Apesar do El Niño de 1972-1973 não ter sido um evento ENOS dos mais fortes do século XX, ele atingiu as costas do Peru com particular ferocidade. Nessa época, o Peru era a nação maior produtora de pescado do mundo, tendo a anchova como principal espécie. Em 1971 a pesca da anchova no Peru era de 12 milhões de toneladas. E quando a costa oeste da América do Sul foi invadida pelas águas quentes do El Niño de 1972-1973, o estoque de anchova caiu violentamente. As aves começaram a morrer. De uma estimativa de 27,5 milhões de aves marinhas, em 1970, apenas 1,8 milhão sobreviveu à catástrofe.

A Figura 1 mostra uma série de dados sobre a pesca de anchova, também conhecida como enchova e anchoveta. A mais conhecida é a anchoveta do Peru e Chile (*Engraulis ringens*). São encontradas em todos os oceanos, mas com maior concentração em

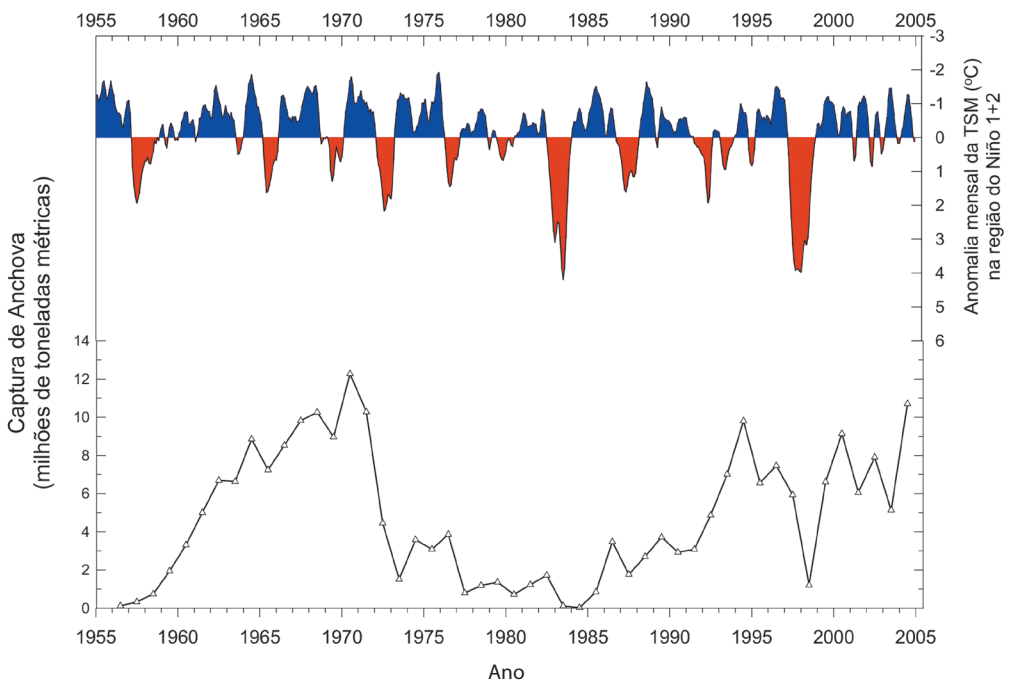


Figura 1. Captura de Anchova (milhões de toneladas métricas) na costa do Peru, na região do Niño 1+2, período de 1955-2005. Fonte: Barber *et al*. (2005).

águas temperadas. Podem medir até 40 cm. Nota-se que em anos de El Niño a captura desse peixe na costa peruana cai violentamente, o que representou grande prejuízo para a economia daquela região andina.

O outro produto, consequência desse ecossistema *sui generis* do Pacífico equatorial leste é o guano, nome dado às fezes de aves nas ilhas do Pacífico, especialmente nas ilhas do Peru. Essas ilhas habitadas de colônias de aves por séculos, acumularam imensa quantidade de excrementos. O guano é rico em nitrogênio e fósforo e é utilizado como fertilizante. O guano das ilhas do Peru, foi outro grande produto de exportação do País, durante o século XIX e início do século XX.

Segundo relato de Voituriez & Jacques (2000), em 1909, o governo peruano criou uma empresa nacional, encarregada do controle dessa atividade. Para esse grupo o El Niño era um inimigo, porque as precipitações pluviais lavavam os excrementos das aves e, também, porque as águas quentes afugentavam as anchovetas, principal alimento das aves. O evento de El Niño de 1957-1958, reduziu a população dessas aves em 50 %. E 15 milhões desapareceram. Também contribuiu que nessa época, começaram a chegar os pescadores industriais, que eram inibidos pela empresa do guano. Ainda conforme esses autores, depois da Segunda Guerra Mundial, dois fatores determinaram o fim da pressão do grupo do guano, que bloqueava o desenvolvimento da pesca industrial, por reduzir o alimento das aves marinhas produtoras do guano: a competição do salitre do Chile e o aparecimento do consumo da farinha de pescado pela avicultura e bovinocultura dos Estados Unidos, eis que a produção de sardinhas da Califórnia despencou durante a guerra, quando as cotas de pesca deixaram de ser respeitadas. Em 1970, a produção de farinha de pescado representava mais de um terço da produção mundial. Aí surgiu o El Niño de 1972-1973, e em 1973 a captura despencou para um milhão e meio de toneladas.

O colapso da anchova na costa oeste da América do Sul, entretanto, segundo Caviedes (2001), proporcionou uma revolução global no domínio da especialização agrícola. Uma "frenética" pesquisa para encontrar um substituto da farinha de pescado levou à soja, como o mais provável substituto. Em 1974, a grande demanda mundial e a pequena produção desse grão, explodiu o preço da soja que atingiu o recorde de US$ 275 por tonelada, na bolsa de Chicago. Entretanto, os maiores produtores dessa oleaginosa, foram capazes de satisfazer o mercado, e o preço despencou. Antes de 1975, os Estados Unidos já estavam produzindo ao redor de dois terços da produção mundial dessa cultura, tornando-se os maiores produtores mundiais. Mas, hoje, o Brasil disputa com os EUA, a liderança mundial na produção dessa oleaginosa.

Ainda, segundo Caviedes (2001), um dano particular do El Niño afeta a população dos corais na bacia do Pacífico. As colônias desses organismos invertebrados são muito sensíveis à mudança do ambiente. Sua sobrevivência depende de águas claras, com boa circulação e baixa variação de temperatura, sendo que uma pequena mudança dessas condições impede seu desenvolvimento ou causa sua morte. Portanto, as flutuações do oceano causada por El Niño ou La Niña, têm enorme e imediato efeito nos corais. Os corais mantêm uma relação simbiótica especial com algas microscópicas, a *zooxanthellae.* Essas algas realizam fotossíntese, que dão os nutrientes e satisfazem 90% das necessidades energéticas dos corais, para a formação dos recifes. A cor dos corais é dada pela *zooxanthellae.* Quando a água se aquece demais

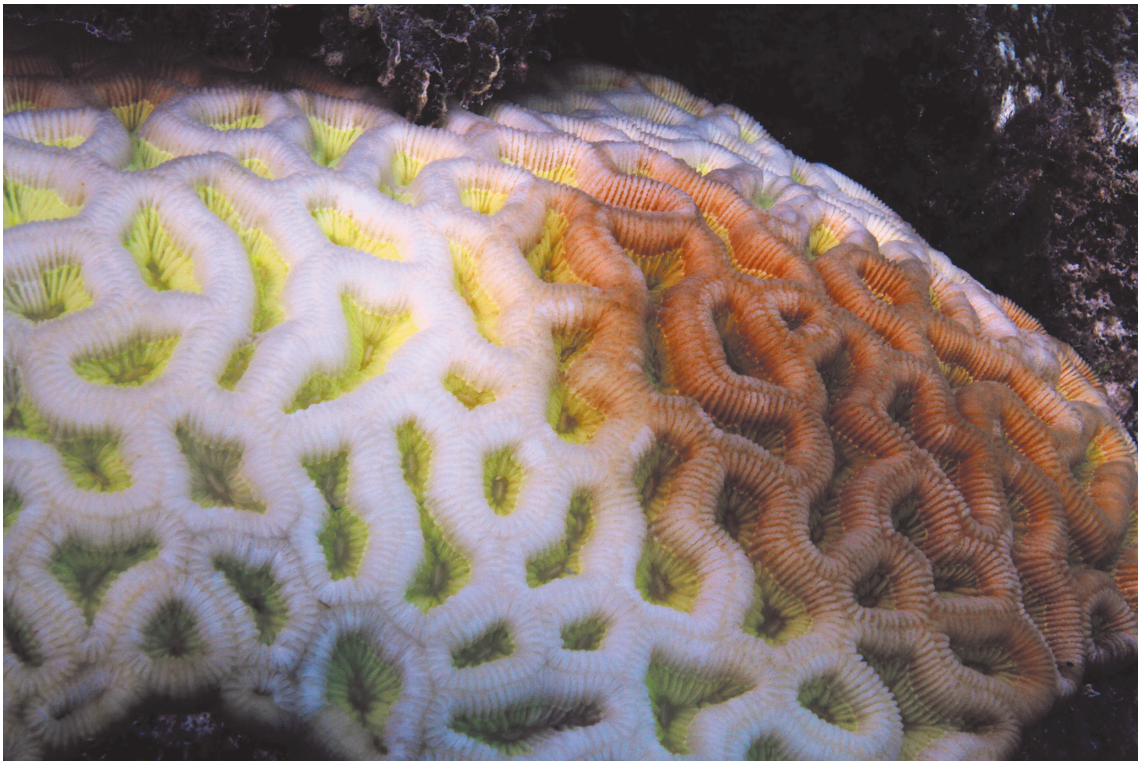


Figura 2. Branqueamento dos corais. Fonte: (*https://www.coral.noaa.gov/resources/education.html*).

o coral expulsa a *zooxanthellae* e se branqueia até a morte (Figura 2).

Glynn & Colgan (1992) estimaram que o evento de El Niño de 1982-1983 causou o extermínio de, aproximadamente, 95% dos corais da Ilha de Galápagos e resultou em redução de 70 a 95% dos corais das costas da Costa Rica, Panamá, Colômbia e Equador, todos na costa leste do Oceano Pacífico.

Em escala global, a cientista Ruth Battes, do Instituto de Biologia Marinha do Havaí, disse que 50% dos recifes de corais morreram nos últimos 30-40 anos. E que a continuar o aquecimento global, a maioria dos recifes de corais estará morta em 2050 (Fonte: NOVA - O clima e seus mistérios, vídeo de 2018, disponível no Netflix).

Também, recentemente, foi divulgado o Sumário Executivo "Status of Coral Reefs of the World- 2020" da *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN), que é uma rede operacional do "International Coral Status of Coral Reefs of the World" (*https://gcrmn.net*). Analisaram cerca de dois milhões de observações feitas por 300 colaboradores de 73 países. Segundo suas análises, o aquecimento projetado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), de 1,5°C, reduziria os recifes de corais entre 70 e 90%. Com 2°C de aumento da temperatura global, virtualmente todos. Só em 1998 (El Niño de 1997-1998), o branqueamento causou a morte de 8% dos corais de todo o mundo. Afirmam que os recifes de corais estão entre os ecossistemas mais vulneráveis do Planeta à pressão antrópica, via CO_2, aquecimento global e acidificação dos oceanos. Cobrem apenas 0,2% da superfície do fundo dos mares e abrigam mais de 25% de todas as espécies marinhas.

Também, foi constatado que os impactos

ecológicos negativos, em anos de El Niño, não se restringiam ao Pacífico na costa da América do Sul, mas se estendiam até o Pacífico equatorial central, onde a vida marinha desaparecia e a população de aves das ilhas do Pacífico equatorial era dizimada. De "anos de abundância" o El Niño, modernamente, passou a ter um significado, em geral, pejorativo. Ele agora é associado a desastres ecológicos e econômicos, não só na sua região de origem, mas, também, em diversas partes do mundo, via o mecanismo da teleconexão. Mas ele produz alguns importantes benefícios. Por exemplo, o El Niño inibe o desenvolvimento de furacões do Atlântico norte, que causam devastação e morte no Sudeste dos Estado Unidos, no Caribe e na costa leste da América Central, com prejuízos de bilhões de dólares. Isso permitiu Landsea (2000) afirmar que, possivelmente, o maior efeito do El Niño no sistema climático seja o de interferir na estrutura nos ciclones tropicais. O El Niño também torna o inverno mais ameno no norte dos EUA, com economia e preços menores de energia. Também, na agricultura, em determinadas regiões e certos cultivos, o El Niño continua sendo sinônimo de "anos de abundância".

Às vezes, as águas do Pacífico leste e central ficam mais frias que o normal, o que enriquece a cadeia trófica da região. Esse fenômeno recebeu por alguns autores nomes como Anti-El Niño ou El Viejo, mas acabou prevalecendo um nome que faz sentido: La Niña, porque o antônimo de menino é menina. Se El Niño se refere a menino (menino Jesus), então La Niña (a menina) é um nome mais apropriado. A La Niña também, via teleconexão, causa impactos no clima em regiões distantes no Globo. Em geral, as áreas dos impactos de El Niño são as mesmas dos impactos de La Niña, só que com o sinal trocado. Mas, também, a La Niña tem efeitos benéficos em algumas regiões, como, por exemplo, para a agricultura de parte da Região Nordeste do Brasil.

Historiadores e arqueólogos, admitem a teoria que o El Niño desempenhou papel decisivo na extinção de antigas civilizações das Américas. Historiadores sugerem, por exemplo, que a conquista espanhola dos incas do Peru, pelo que tudo indica, foi facilitada pelas condições de El Niño na região. Como exemplo de progresso da civilização Inca, muito antes do batismo do recorrente fenômeno da costa do Peru, com o nome de El Niño, os incas, que viviam numa região extremamente árida do norte do Peru, já tinham se adaptado ao fenômeno. Eles já haviam construído extensa rede de aquedutos e canais de pedra que protegiam as suas plantações feitas em terraços nas encostas, desviando o excesso de água para as ladeiras montanhosas.

O El Niño que facilitou a conquista do rico Império de Atahualpa no Peru

Segundo Caviedes (2001), das conquistas espanholas do Novo Mundo, dois episódios assombraram o mundo por causa da temeridade envolvida: a conquista do Império Asteca do México por Hernán Cortéz em 1519 e a tomada do Império Inca do Peru por Francisco Pizarro, em 1532.

A descrição a seguir da façanha de Francisco Pizarro para tomar o Império Inca, é baseada no excelente Livro de César N. Caviedes "El Niño in History - Storming Through the Ages". Francisco Pizarro saiu do Panamá três vezes, com o objetivo de conquistar o Império Inca no Peru. Na primeira viagem empreendida em 1524-1525, junto à costa da América do Sul, ele conseguiu chegar até a Colômbia e, fustigado pelos ventos de sul e sudeste que impediam a continuação da viagem, voltou ao Panamá. A segunda tentati-

va, no mesmo período, de 1524-1525, Pizarro ainda navegando junto à costa da América do Sul e contra os ventos, chegou até o norte do Peru e teve de voltar. Na terceira tentativa, Pizarro partiu do Panamá, em 1531, mas navegou por uma rota mais distante da costa e aí foi facilitado pelos ventos de nordeste (alísios) (ver linha tracejada na Figura 3), e em apenas treze dias Pizarro e seus homens percorreram 500 milhas, chegando no Golfo de San Mateo. O ano 1531 foi caracterizado por anomalias nas condições de ventos no Pacífico equatorial. Em San Mateo, a jornada de Pizarro passou a ser por terra, chegando ao Golfo de Guayaquil no começo de 1532. Aí, a esquadra de Pizarro, exausta, parou e pediu reforços ao Panamá. Provavelmente, devido à inusual precipitação pluvial para à época, o Rio Tumbes (ver mapa, Figura 3), facilmente atravessável a pé sob condições normais, teve de ser atravessado em balsas ou jangadas. Seguindo, depois de atravessar o Rio Chira, chegaram em San Miguel de Piura, o primeiro acampamento espanhol no Peru, de onde apenas um inóspito deserto os separava de Cajamarca, a residência do norte do imperador inca Atahualpa.

A rota de Piura à Cajamarca começou a ficar crucial, onde a marcha foi conduzida em circunstância anormal de umidade. Os rios das 250 milhas seguintes estavam inundados e a expedição teve de nadar ou usar jangadas para atravessá-los, onde vários homens pereceram. Normalmente, na época da cruzada dos espanhóis, outubro e novembro, é o pico da estação seca na região. Isso indica que o ano que os espanhóis passaram pelo sul do equador e norte do Peru era um ano de extraordinária umidade. Apesar de alguma dúvida, esse ano foi um ano de El Niño, aparecendo nas listagens históricas do fenômeno. Mesmo com as dificuldades encontradas pelo excesso de umidade, essa é uma explicação do sucesso da expedição de Pizarro, porque, em condições normais, teriam de atravessar centenas de milhas de um inóspito deserto, cujas tropas não suportariam. Daí a razão que assiste aos historiadores, que o El Niño facilitou a queda do rico Império de Atahualpa.

As mais longas cronologias de ENOS

Segundo Giralt *et al.* (2007), como as séries meteorológicas são de curto período, os "sensores naturais", como sedimentos oceânicos e lacustres, anéis de árvores (dendroclimatologia) e estalagmites e estalactites de cavernas, são valiosos arquivos, para se saber o provável começo e evolução de um fenômeno, como o ENOS. Os registros biológicos e geológicos são muito sensíveis à mudança do clima. Esses sensores naturais estão em equilíbrio dinâmico com as condições do meio e quando essas condições mudam, os sensores reagem para se adaptar e alcançar a nova condição de equilíbrio. Os vestígios dessas mudanças são refletidos nos sedimentos no fundo dos ecossistemas aquáticos e nos anéis das árvores. Então, a caracterização desses sinais, pode ajudar na revelação e evolução paleoclimática da área estudada. Outros fenômenos naturais, ou acidentes geológicos, são também indicadores.

Entretanto, conforme admitem Giralt *et al.* (2007), não há evidências sólidas do começo do ENOS, nem de sua evolução temporal. Uma hipótese, é que, aparentemente, o início do ENOS ocorreu entre 3,5 a 4 milhões de anos e uma possível causa foi o fechamento do istmo do Panamá, acidente geográfico de grande envergadura, pois separou o Oceano Pacífico do Oceano Atlântico, aumentou o transporte de calor do Oceano Atlântico, com subsequente modificação das correntes oceânicas. Mais recentemente, tem sido

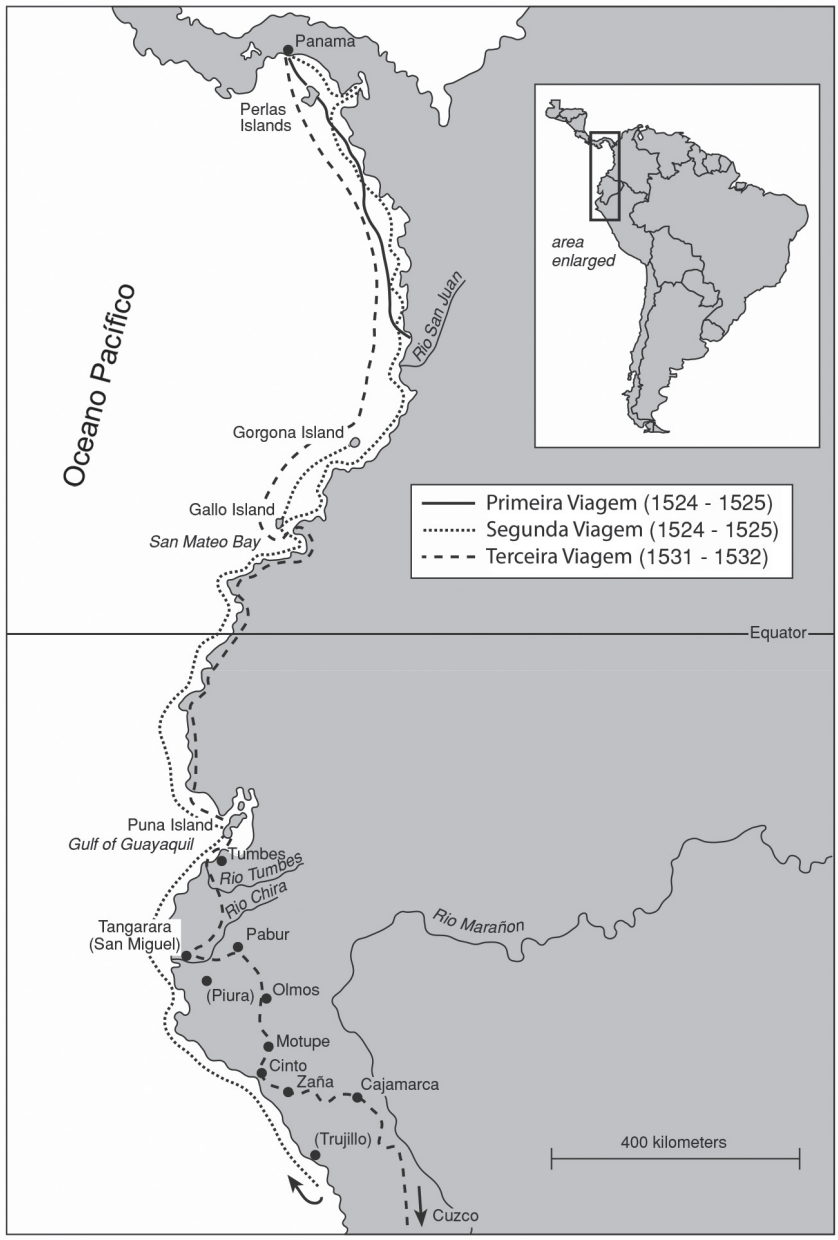


Figura 3. Rotas das três viagens de Francisco Pizarro, do Panamá ao Peru, 1524-1532, para a conquista do Império Inca. Fonte: César N. Caviedes (2001), adaptado de Hocquenghem & Orlieb (1990).

proposto, que o fechamento da rota marítima na Indonésia (também há cerca de 3,5 a 4 milhões de anos) teve maior efeito no transporte de calor e no surgimento do El Niño, que o fechamento do istmo do Panamá.

Também, conforme Cane & Molnar (2001), o fechamento da rota marítima na Indonésia foi o precursor da aridez do leste da África, por volta de 3-4 milhões de anos atrás.

Alguns registros de sedimentos marinhos, indicam que o ENOS foi um fenôme-

no permanente entre 5 e 3 milhões de anos, quando as condições eram muito mais quentes que atualmente.

Dados de sedimentos marinhos e lacustres, mostram ser arquivos úteis do provável surgimento e evolução do ENOS (Giralt *et al*., 2007).

Meggers (1994) relata evidências de extremos climáticos na Amazônia durante os últimos dois mil anos, com secas catastróficas e grandes incêndios florestais. Identificação semelhante de extremos climáticos na costa do Peru (inundações) e em outras áreas indicam o desaparecimento de civilizações da Amazônia devido ao impacto de megaeventos de El Niño, de longa duração, há aproximadamente 1.500, 1.000 e 700 anos.

A partir de análise de dados paleoclimáticos da costa sul do Peru, Keefer *et al.* (2003) verificaram que o período de maior intensidade de El Niño, no Holoceno, foi entre 11.000 e 9.000 anos atrás. No Holoceno Médio (6.000 anos atrás) só foram registrados quatro eventos severos de El Niño.

Quinn *et al*. (1987) produziram uma longa lista cronológica de eventos de El Niño. Eles revisaram dados, em cinco idiomas, para obter informação de eventos El Niño de mais de quatro séculos e meio. Chegaram à evidência de eventos El Niño, com base em um conjunto de informações, entre as quais: variação significativa do tempo de viagens de barcos entre os portos ao longo da costa do Peru; informações de navio piratas, mercantes e de exploradores, sobre tempestades marítimas no Pacífico; presença de águas quente mais ao sul da costa do Peru; nível do mar; temporais e intensas precipitações pluviais e inundações; destruições da infraestrutura, como pontes e edificações e até cidades; destruição de cultivos agrícolas; mortandade da fauna marinha; morte ou desaparecimento das aves produtoras do guano (um dos produtos de exportação do Peru, no final do século XIX e início do século XX); redução da pesca. Segundo os autores, que atribuíram grau de confiança a cada evento de El Niño (não apresentado aqui), a listagem tem razoável grau de confiabilidade. Conforme os autores, os eventos muito fortes e fortes de El Niño aconteceram nos anos:

1525-1526, 1531-1532, 1539-1541, 1552, 1567-1568, 1574, 1578, 1591-1592, 1607, 1614, 1618-1619, 1624, 1634, 1652, 1660, 1671, 1681, 1687-1688, 1696, 1701, 1707-1708, 1714-1715, 1720, 1728, 1747, 1761, 1775, 1785-1786, 1791, 1803-1804, 1814, 1828, 1844-1845, 1864, 1871, 1877-1878, 1884, 1891, 1899-1900, 1911-1912, 1917, 1925-1926, 1932, 1940-1941, 1957-1958, 1972-1973, 1982-1983, **1991-1992, 1997-1998, 2015-2016**.

E os eventos moderados foram nos anos:

1806-1807, 1812, 1817, 1819, 1821, 1824, 1832, 1837, 1850, 1854, 1857-1858, 1860, 1866, 1867-1868, 1874, 1880, 1887-1889, 1896-1897, 1902, 1905, 1907, 1914, 1918-1919, 1923, 1930-1931, 1939, 1943, 1951, 1953, 1965, 1976, 1987, **1994-1995, 2002-2003**, **2004-2005**, **2009-2010**.

Observação: os eventos em negrito foram acrescentados à lista de Quinn *et al.* (1987), com base na escala de intensidade dos eventos e de acordo com a Tabela 1.

Considerando a atualização da lista de Quinn *et al*. (1987), resultam 50 eventos de El Niño que foram classificados na categoria de muito fortes e fortes e 36 eventos classificados de moderados. Não foram considerados os eventos fracos. Ou seja, nesse período, houve 86 eventos de El Niño, nas duas categorias.

Caviedes (2001) apresentou uma lista de El Niño e La Niña a partir dos anos 1800 até 1999. Os anos de El Niño, do período comum com a lista de Quinn *et al*. (1987), concordam quase totalmente, com exceção de 1986, que

não aparece na lista de Quinn *et al.* (1987). E na lista de Caviedes (2001) aparece o ano de 1993, que, conforme a NOAA, não foi um ano de El Niño (Tabela 1). Também, o ano de 1917, que na lista de Quinn *et al.* (1987) aparece na relação de eventos de El Niño fortes e muito fortes e na relação de Caviedes (2001) aparece como ano de La Niña.

Os anos de La Niña, compilados por Caviedes (2001), sem a classificação de intensidade, são:

1802, 1822, 1825, 1832, 1857, 1863, 1872, 1873, 1875, 1876, 1886, 1887, 1890, 1893, 1898, 1903, 1904, 1908, 1910, 1917, 1924, 192?, 1933, 1938, 1939, 1945, 1950, 1955, 1960, 1964, 1968, 1974, 1984, 1988, 1994, **1998-2001, 2005-2006, 2007-2008, 2008-2009, 2010-2012, 2016, 2017-2018, 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023.**

Observação: Os anos em negrito, foram acrescentados à lista de Caviedes (2001), com base na Tabela 1.

Durante os anos de 1876 a 1878, houve uma Grande Fome, que matou entre 30 e 60 milhões de pessoas em todo o mundo, sendo 12 a 29 milhões na Índia. Uma seca que englobou partes da Ásia, Nordeste do Brasil, norte e sul da África, ocasionou a destruição da produção das culturas e uma crise, sem precedentes, de alimentos. Singh *et al.* (2018) combinaram observações instrumentais, estimativa de seca com base nos anéis de árvores e reconstrução de TSM até os anos 1870. Concluíram que foi o "Grande" El Niño de 1876-1878 (na lista de Quinn *et al.*, 1987, aparece como muito forte El Niño 1877-1878), que ocasionou a Grande Fome. A influência em cascata, de temperatura extrema do Pacífico, levou condições sem precedentes às bacias dos oceanos Índico e Atlântico. Singh *et al.* (2018) acreditam que as condições climáticas associadas à Grande Fome foram devido à variabilidade natural do clima, indicando que um evento similar pode acontecer de novo. Mas, o extremo El Niño pode ter sido precedido por águas frias no Pacífico central, com um forte evento La Niña em 1875-1876 (aparece na lista de Caviedes, 2001), que foi associada com seca na Índia, México e no sudoeste dos EUA. À La Niña seguiu o muito forte El Niño que ocasionou mais seca em larga porção do Globo, resultando em "**um dos mais mortíferos desastres ambientais"** da humanidade. Disponível também em: *<https://phys.org/news/2017-12-great-famine-deadliest-environmental-desasters.html>.*

Mais recentemente, Huang *et al.* (2020) calcularam a intensidade do El Niño de 1877-1878, através de conjunto de modelos (ERSSTv5), estimando também a incerteza dos cálculos, chegando à conclusão de que o evento de 1877-1878, foi semelhante aos muito fortes eventos de El Niño da era moderna, como o de 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016.

É amplamente comentado que os dados de registros instrumentais de ENOS (~150 anos) não são suficientes para a caracterização da variabilidade desse fenômeno (Gergis & Fowler, 2009; Guilyardi, 2015; Lu *et al.*, 2018, entre outros). Conforme Lu *et al.* (2018), observações do ENOS de período anterior aos dados instrumentais, ou paleo-ENOS reconstruções, fornecem uma alternativa ao estudo das respostas do ENOS às várias forçantes climáticas e podem ajudar na redução das incertezas dos modelos climáticos, na simulação das respostas ao ENOS.

Gergis & Fowler (2009), embora declarando que a lista de Quinn é a comumente usada pelos paleoclimatologistas como "anos de referência" para estudo dos ENOS passados, oferecem uma cronologia alternativa à de Quinn *et al.* (1987). A cronologia de Gergis & Fowler (2009), do período de 1525-2002 (478 anos), pretende ser uma "crono-

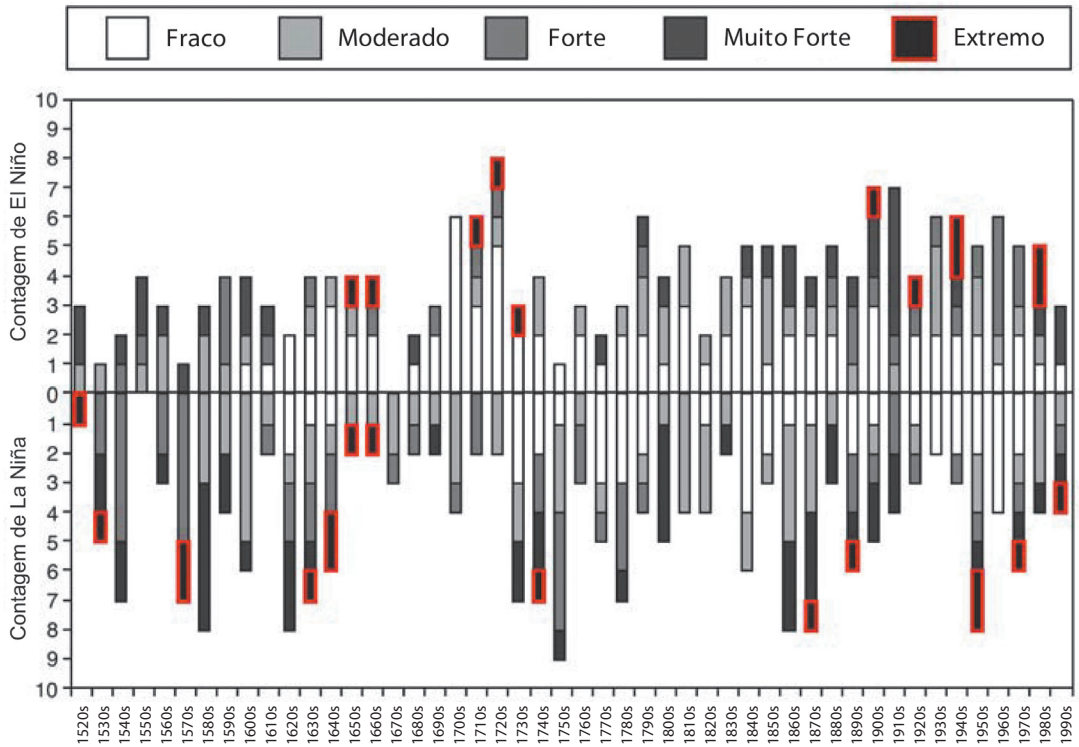


Figura 4. Tendência decadal e magnitude do El Niño e La Niña, reconstruídos, período 1525-2002 (Gergis & Fowler, 2009).

logia global", incluindo ambas as fases do ENOS. Eles se basearam em dados de reconstrução paleoclimática colhidos nas regiões que apresentam sinais da teleconexão do ENOS. Os dados paleoclimáticos utilizados foram: anéis de árvores, corais, gelo e documentação de secas e enchentes (multi-proxy). Mas, também utilizaram muitos dados de outros autores, inclusive os de Quinn *et al.* (1987). Nesse período, ocorreram 92 eventos de El Niño e 82 eventos de La Niña. Classificaram os eventos de ENOS em extremos, muito fortes, fortes, moderados e fracos. A Figura 4 mostra a tendência decadal e magnitude de El Niño e La Niña, do período 1525-2002.

Alta atividade de La Niña ocorreu durante os séculos XVI, início do século XVII e, também, no século XIX, ao passo que o pico de atividade de El Niño ocorreu no século XX. Destaca-se que 55% dos anos com eventos extremos de El Niño reconstruídos, desde 1525, ocorreram no século XX. Com a constatação que 30% dos ENOS extremos, ocorreram depois de 1940, desde 1525, os autores sugerem que o ENOS pode operar diferentemente, sob condições naturais (pré-industrial) e sob condições antrópicas (mudanças climáticas do século XX).

Anteriormente, Cobb *et al.* (2003), que fizeram a reconstituição paleoclimática de mil anos do ENOS, sugeriram que a variabilidade de ENOS seria um processo natural.

Mais recentemente, Lu *et al.* (2018), numa revisão sobre Paleo-ENOS, analisaram o trabalho de Cobb *et al.* (2003) e declararam que a variabilidade do ENOS foi a fonte dominante da variabilidade do isótopo de oxigênio ($\delta^{18}O$) no último milênio.

A Oscilação Sul e o acoplamento oceano-atmosfera que produz o fenômeno ENOS

A Oscilação Sul de Walker

Apesar de resultados preliminares, que remontam ao final do século XIX (Rasmusson & Carpenter, 1982), foi em 1904 que o matemático e físico britânico Sir Gilbert Thomas Walker tornou-se diretor-geral do Observatório da Índia, com o desafio de estudar e prever as monções asiáticas, que quando falhavam provocavam a fome e a miséria no continente indiano, como tinha acontecido no ano de 1899-1900 (ano de El Niño).

O regime clássico de monção, é definido quando, numa determinada região o vento na superfície muda de direção sazonalmente, devido ao aquecimento diferencial, entre continente e oceano. No caso das monções asiáticas, no verão, o vento que flui sobre as águas do Oceano Índico, chegando no continente mais quente, o ar úmido ascende, resfria e condensa, formando nuvens e precipitações pluviais. Cerca de 80% da precipitação pluvial anual da Índia ocorre durante as monções de verão (junho a setembro) (Kripalani & Kulkarni, 1997). Essa precipitação pluvial é que garante as safras agrícolas daquela região. No inverno reverte a circulação e o continente fica seco. E, historicamente, o El Niño foi o causador das falhas das monções, pela subsidência de um ramo da célula de Walker, impedindo a convecção. Segundo Kumar *et al.* (2006), o histórico de 132 anos de precipitação pluvial na Índia (1871-2002), revela que secas severas sempre estiveram relacionadas com o fenômeno El Niño. Porém, nas últimas décadas, mesmo o muito intenso El Niño de 1997-1998, não produziu seca, e as previsões falharam neste e noutros casos.

Conforme Philander (1990), Walker, provavelmente sem saber do El Niño, disse "Quando a pressão é alta no Oceano Pacífi-

NOTA 1

No Brasil, até há algum tempo, não se falava em circulação de monções ou clima de monções, porque, principalmente, não é satisfeita a condição dos ventos nos baixos níveis reverterem, com a estação do ano, conforme as monções canônicas. Zhou & Lau (1998) escreveram um trabalho cujo título é uma pergunta: Existe clima de monção na América do Sul? Mas depois de ampla análise da circulação da América do Sul e comparando e contrastando as monções da América do Sul, com o clássico sistema de monções de verão da Ásia, encontraram várias características comuns. Para cumprir com exigência do vento próximo da superfície (900 hPa), isso foi possível com a retirada da componente anual média. Por exemplo, vento climatológico de janeiro menos o vento anual médio e vento climatológico julho menos o vento anual médio (verão e inverno). Desde então, diversos autores, que estudaram esse problema, consideraram que a condição de verão chuvoso e inverno seco no centro-oeste do Brasil, por exemplo, apresenta características que configurariam circulação monçônica (Gan et al., 2004; Gan et al., 2016; Grimm & Zilli, 2009; Liebmann & Mechoso, 2011, entre outros). O sistema de monções do Brasil é considerado um importante mecanismo de produção de precipitação pluvial. Um aspecto de grande interesse prático, é a previsão do início, a duração e o final das precipitações pluviais de monções, numa região onde a agricultura é uma das bases de sua economia. O CPTEC/INPE usa um critério proposto por Liebman et al. (2007), para estimar o início e final da estação chuvosa, bem como a duração do período chuvoso, para as regiões que apresentam período seco e período chuvoso, bem definidos. Já foi mostrado que, o principal modo de variabilidade interanual da precipitação pluvial do sistema de monções de verão na América do Sul e do Brasil, está associado ao ENOS (Paegle & Mo, 2002; Grimm, 2004; Marengo et al., 2012, entre outros).

co ela tende a ser baixa no Oceano Índico da África à Austrália".

Walker (1923), em um trabalho de sua série de artigos, denominado "Correlation in seasonal variations of weather, VIII. A preliminar study of world-weather", nas considerações finais desse artigo, ele dá ênfase à oscilação inversa da pressão do Oceano Pacífico e Oceano Índico.

Essa irregular flutuação, de grande escala, a qual ele chamou de Oscilação Sul, reforçou sua ideia que as monções eram parte de um fenômeno global e que aí estaria a chave para sua previsão. Então, ele montou uma equipe de estatísticos para calcular as correlações entre muitas variáveis de estações meteorológicas ao redor do mundo, como pressão atmosférica, temperatura, precipitação pluvial, manchas solares e até a intensidade das enchentes anuais do Rio Nilo. Ainda, segundo Philander (1990), a série de artigos de Walker foi publicada entre os anos 1923 e 1937, sintetizando seus resultados e estabelecendo que a Oscilação Sul está correlacionada com grandes mudanças no comportamento das precipitações pluviais e campos de ventos, no Pacífico tropical e Oceano Índico e com flutuações da temperatura na África, Canadá e EUA. Mas seus achados não se traduziram em previsores das falhas das monções. Seus contemporâneos expressaram dúvidas sobre as relações estatísticas de Walker, com inferências baseadas em séries meteorológicas relativamente curtas e sem suporte teórico. Segundo Philander (1990), muitos anos mais tarde, a análise de séries longas, de forma retumbante, vingaram Walker. Mas por causa do ceticismo dos seus colegas, o interesse nesse fenômeno foi esquecido, nas décadas seguintes às suas publicações. Conforme Cane (1986), só nos anos 1960, ressurgiu o interesse pela Oscilação Sul.

Caviedes (2001) comenta que, durante fortes eventos de El Niño, a área influenciada pela Oscilação Sul é tão vasta que se pode identificar dois hemisférios (ver Figura 5): um hemisfério de oeste, que compreende a bacia do Pacífico, o oeste da América do Sul, a América Central e a metade oeste da América do Norte, com baixa pressão do ar, águas quentes na costa, com anormalmente intensas precipitações pluviais; um hemisfério centrado na Indonésia, com alta pressão do ar, águas mais frias que o normal e severas secas. Estão incluídos nesse hemisfério o Sudeste da Ásia, Austrália, Índia, África, a bacia do Atlântico e o Nordeste do Brasil.

A Figura 5 mostra dois centros de pressão na superfície no Pacífico sul, que estão fora de fase ou inversamente correlacionados (os dois hemisférios de Caviedes), um em Taiti, na Polinésia Francesa, e o outro em Darwin, no norte da Austrália. Essa configuração é também chamada de "gangorra barométrica". A partir desses dois pontos, é calculado um índice, denominado de Índice de Oscilação Sul (IOS).

Matematicamente, o IOS é dado por:

$$IOS = \left[\frac{p-\bar{p}}{s_{(p)}}\right]_{Taiti} - \left[\frac{p-\bar{p}}{s_{(p)}}\right]_{Darwin} \quad (1)$$

Onde p é a pressão atmosférica de Taiti, $\bar{p}$ é a pressão média da série de Taiti e $S_{(p)}$ é o desvio padrão da série de Taiti. Para Darwin é a mesma coisa. Conforme as pressões ocorridas em Taiti e Darwin, a solução da equação (1) resulta em IOS>0 e IOS<0. O IOS está altamente correlacionado com o Niño 3 (0,8) e Niño 3.4 (0,84), conforme Huang *et al.* (2020).

O IOS é um dos indicadores do ENOS. Os outros são: anomalias de TSM das regiões Niños, radiação de onda longa emitida (OL↑), anomalias do nível do mar, entre outras.

Segundo Philander (1990), a Oscilação

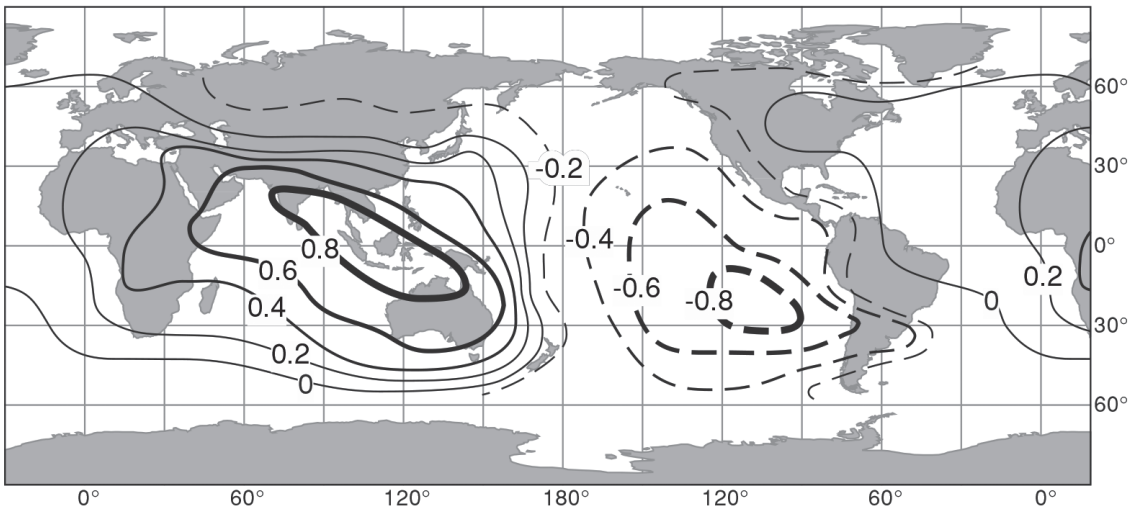


Figura 5. Carta global, com destaque os dois centros de correlação inversa de pressão da superfície do Pacífico, Darwin no norte da Austrália e Taiti na Polinésia Francesa, que são utilizados para o cálculo do IOS. Fonte: Caviedes (2001).

Sul envolve a variação interanual na circulação termal dos trópicos e, também, afeta, a circulação fora dos trópicos, de maneira indireta. Esses efeitos são mais efetivos durante a fase madura do ENOS, quando as anomalias da TSM cobrem a maior parte do Pacífico tropical.

Também, conforme Kousky *et al.* (1984), numa revisão sobre a Oscilação Sul, afirmaram que as anomalias climáticas associadas com a Oscilação Sul são altamente persistentes e que essa persistência é devido ao muito forte acoplamento atmosfera-oceano do Pacífico tropical. Disseram ainda que, embora a causa iniciadora dessa oscilação não seja tão clara, uma vez iniciada segue uma sequência de eventos com efeitos bem definidos na precipitação pluvial, numa larga porção dos trópicos e subtrópicos, com secas em várias regiões e excessos de precipitação pluvial em outras.

Até a metade do século XX, o El Niño foi considerado um fenômeno restrito à costa equatorial do oeste da América do Sul (Peru e Equador). Somente durante o Ano Geofísico Internacional de 1957-1958 (El Niño), foi que os cientistas voltaram sua atenção para esse singular fenômeno. Triste ou ironicamente, Walker faleceu em 1958. Os dados de 1957 mostraram que o aumento da temperatura da superfície do mar (TSM), se estendia ao longo do equador, desde a costa da América do Sul até a Linha da Data (Cane, 1986). E foi Jacob Bjerknes que, já na época, disse que o El Niño, não era um fenômeno localizado, mas que se desenvolvia através de uma retroalimentação positiva envolvendo todo o Oceano Pacífico equatorial e a atmosfera.

O acoplamento oceano-atmosfera: a hipótese de Bjerknes

Embora haja significativos antecedentes, também, conforme Rasmusson & Carpenter (1982), sobre a ligação da Oscilação Sul e El Niño, foi Jacob Bjerknes, norueguês, filho do mundialmente renomado meteorologista Vilhelm Bjerknes, naturalizado americano, da Universidade da Califórnia, Los Angeles, quem fez a notável síntese da relação entre o oceano e a atmosfera no

Pacífico tropical. Em seu "seminal paper", Bjerknes (1969) foi o primeiro a formular a hipótese do acoplamento oceano-atmosfera que produz o ENOS. Segundo Philander (1990), Bjerknes propôs a relação física entre a variação interanual das condições geográficas e meteorológicas no Pacífico tropical. Explicou como o ar seco desce sobre a água fria do leste do Pacífico e flui para o oeste ao longo de equador, empurrado pelos ventos alísios. Nessa trajetória o ar é aquecido pela radiação solar e adquire umidade até o extremo oeste do Pacífico tropical (região da Indonésia), onde o ar úmido, quente e mais leve, ascende adiabaticamente, condensa formando torres de nuvens e intensa precipitação pluvial, retornando pela alta troposfera para leste e fechando uma circulação que Bjerknes chamou de circulação de Walker, em homenagem a Sir Gilbert Walker.

A variação interanual da temperatura do mar do Pacífico tropical causa a Oscilação Sul, mas do ponto de vista oceanográfico, a mudança da temperatura da superfície do oceano é causada pela flutuação do vento superficial, associado com a Oscilação Sul. Philander (1990) chamou isso de argumento circular, e que Bjerknes inferiu que essa interação entre o oceano e a atmosfera era o coração da Oscilação Sul. Ele descreveu como uma mudança inicial no oceano afeta a atmosfera, de maneira que a alterada condição meteorológica, por seu turno, induz mudança no oceano, o que reforça a mudança inicial.

Nas palavras de Bjerknes (1969), a temperatura máxima do mar do Pacífico equatorial central e leste, ocorre como resultado do anômalo enfraquecimento dos ventos alísios do Hemisfério Sul (alísios de sudeste), com o inerente enfraquecimento da ressurgência equatorial. E que essas anomalias mostraram estar fortemente ligadas à "Oscilação Sul" de Sir Gilbert Walker. A Circulação de Walker está associada com o aumento do vento de leste no equador e também com o aumento da ressurgência, que aumenta o contraste leste-oeste da temperatura superficial do Pacífico equatorial. Essa cadeia de reações mostra que a intensificação da Circulação de Walker também intensifica o contraste leste-oeste da temperatura, que é a causa primeira da Circulação de Walker. Um decréscimo dos ventos equatoriais de leste, enfraquece a ressurgência equatorial, então o Pacífico equatorial leste fica mais quente e supre calor também para a atmosfera acima. Esse enfraquecimento do contraste da temperatura leste-oeste atinge a Circulação de Walker, enfraquecendo-a. É o processo da retroalimentação positiva de Bjerknes, da interação oceano-atmosfera, que sustenta tanto as anomalias quentes ou frias da TSM.

Ainda, segundo Bjerknes (1969), na realidade, a Célula de Walker, que realiza a troca de ar, no cinturão equatorial, entre a costa da América do Sul e o Pacífico oeste é uma parte de um mecanismo maior definido estatisticamente por Sir Gilbert Walker, que é a Oscilação Sul; esta se refere à troca de massa ao longo da completa circunferência do Globo, nas latitudes tropicais (Figura 5). O que distingue a célula de Walker de outras trocas de ar leste-oeste nos trópicos, é que ela opera grande intervenção de energia potencial pela combinação, em grande escala, de subida de ar quente e úmido e subsidência de ar frio e seco. A Célula de Walker é a ligação entre as anomalias de TSM do Pacífico leste e a Oscilação Sul. Ele disse que a flutuação da circulação de Walker, inicia alguns dos maiores pulsos na Oscilação Sul.

Segundo Bjerknes (1969), a extensão da água fria do Pacífico equatorial é única, co-

brindo cerca de 85° de longitude no equador, desde a costa oeste da América do Sul. Também, segundo Bjerknes (1972), com base em análises do vento superficial e temperatura do Pacífico de 1962-1967, o cinturão equatorial desde a costa da América do Sul (80°W) até a Linha da Data (180°) é a mais extensa área do oceano tropical que mostra a maior variabilidade interanual da temperatura na superfície e que isso era causado pela variação da intensidade dos ventos de leste (alísios) e a inerente variação da ressurgência. E que o impacto dessa variabilidade do oceano sobre a circulação global da atmosfera vinha sendo mostrado. Ele, também, disse existir a relação entre a TSM do Pacífico tropical e as anomalias da circulação das latitudes médias. A ideia dessa teleconexão é coerente com o comportamento da Oscilação Sul de Walker.

Cane (1986) declarou que a ideia da teleconexão hipotetizada por BJerknes passou a ser objeto de intenso interesse entre teóricos, observadores e previsores do ENOS.

O aquecimento do Oceano Pacífico central e leste enfraquece a Célula Zonal de Walker e desloca a zona de convecção profunda e fortes precipitações pluviais de oeste para leste que se posiciona no Pacífico equatorial central e na costa da América do Sul. Bjerknes (1966, 1969) também mostrou que o aquecimento anômalo da região equatorial do Pacífico intensifica a circulação meridional ou célula de Hadley, que é também uma circulação de tipo térmica, em ambos os hemisférios, com intensificação e deslocamento, também, do Jato Subtropical de ambos hemisférios. Essas condições são mais claras no Hemisfério de Inverno.

Bjerknes (1972), também falou da implicação da descrita interação oceano-atmosfera no Pacífico, na variação interanual do clima e na possibilidade de previsão. E exortou oceanógrafos e meteorologistas para extensiva e coordenada pesquisa adicional, nesse sentido.

Possivelmente, Bjerknes (1972), estava pensando no porquê da possibilidade de previsão de mais longo prazo, que a previsão do tempo à época. Segundo McPhaden (2002), "o El Niño envolve um íntimo acoplamento da atmosfera e o oceano no Pacífico equatorial, dois fluídos que respondem um ao outro, de maneira muito diferente em escala de tempo. A atmosfera é mil vezes menos densa que o oceano e responde quase imediatamente às forçantes da superfície do oceano. O oceano, é massivo por comparação, e sua resposta dinâmica às forçantes atmosféricas é relativamente lenta. Por exemplo, a profundidade da Termoclina pode tomar vários meses para se ajustar à mudança do vento nos trópicos, ao passo que a convecção na atmosfera se desenvolve em horas sobre a água quente da superfície. É a lenta evolução do campo térmico do oceano, que fornece a memória para o sistema climático, no Pacífico tropical, e essa inércia térmica é que fornece as bases para a previsibilidade do ENOS, em maior escala de tempo".

Na Figura 6, é apresentado o diagrama esquemático da interação oceano-atmosfera que ocorre no Pacífico equatorial, representando a cadeia de eventos, para o caso das condições normais do Pacífico. Os ventos alísios de sudeste produzem a ressurgência de água fria no leste, a Termoclina se aproxima da superfície e no equador, como vento de leste, determinam o acúmulo de água quente e convecção no oeste; um gradiente de TSM leste-oeste se estabelece, que por sua vez resulta na intensificação dos ventos de leste, em um processo de retroalimentação positiva.

Na Figura 7, é apresentado o diagrama esquemático da cadeia de eventos para a situação do pico do El Niño, com anomalias

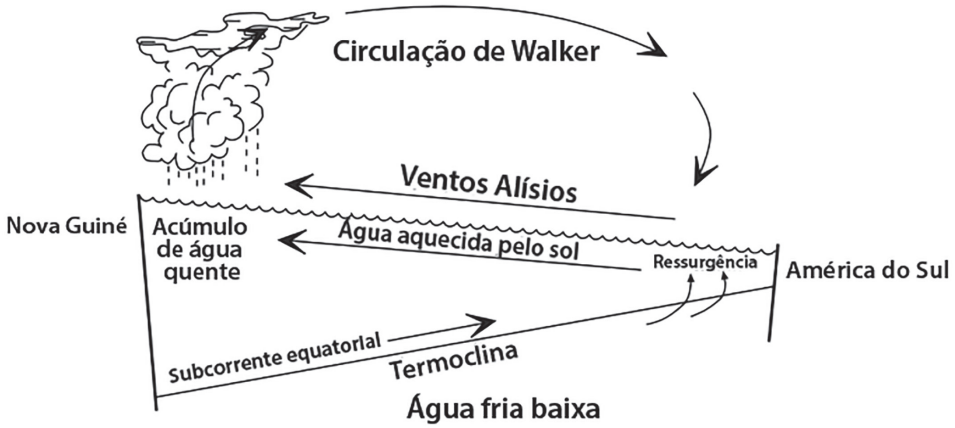


Figura 6. Retroalimentação positiva de Bjerknes, para condições normais do Pacífico equatorial. Fonte: (*http:tpos2020.org/first-reporter/*).

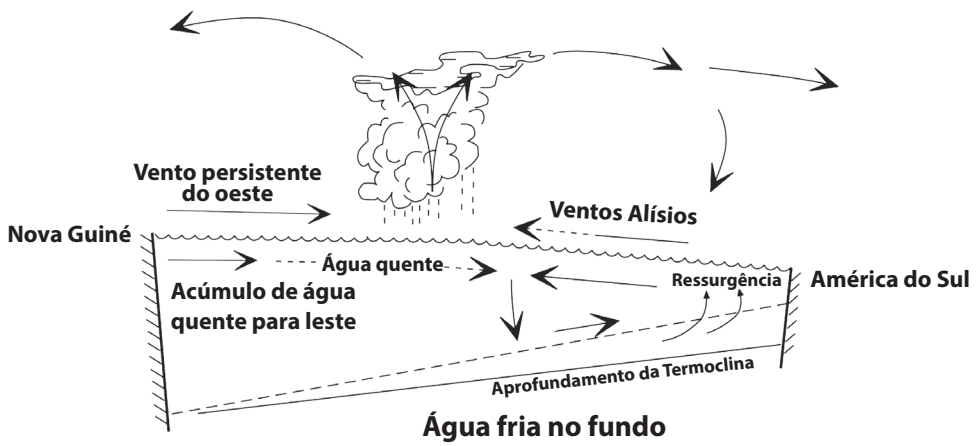


Figura 7. Retroalimentação positiva de Bjerknes, para condição de pico do El Niño, no Pacífico equatorial. Fonte: (*Washington.edu/Kessler/ocasionally-asked-questions*). Data de acesso: outubro de 2019.

de vento de oeste e o deslocamento da água quente para leste, com atuação de uma onda Kelvin. A zona de convergência e intensas precipitações pluviais se desloca para o Pacífico central, causando distúrbio na célula de Walker. A Termoclina se aprofunda no leste e a inclinação da superfície do oceano entre leste e oeste diminui, pelo refluxo da água quente que foi "empilhada" no oeste.

A retroalimentação positiva de Bjerknes pode ser descrita de qualquer ponto da cadeia de eventos do sistema acoplado oceano-atmosfera. Por exemplo, em condição de El Niño: os ventos alísios equatoriais enfraquecem → decresce a ressurgência da água fria no leste → superfície do oceano se aquece → reduz o gradiente de temperatura leste-oeste → enfraquecimento dos ventos alísios equatoriais... e esse circuito continuaria, até que outro evento ocorra. Esse outro evento é a retroalimentação negativa.

A retroalimentação positiva de Bjerknes é crucial para o desenvolvimento tanto de eventos El Niño, como eventos La Niña.

"*Dialogue of the wind and the sea*".
Debussy, La mer.

Philander (1990) disse: "*The fascinating story of how independent lines of oceanographic and meteorological research elegantly converged to reveal interactions between the ocean and atmosphere has not ended yet.*"

Cane (1986) chama, o que se viu acima, de "a hipótese de Bjerknes" e que "esse cenário, no qual ambos, oceano tropical e a atmosfera, são ativos participantes, foi o principal estímulo das subsequentes pesquisas com o ENOS".

Cane (1986), também disse, que o maior avanço, logo depois de Bjerknes, foi do lado oceanográfico do problema. Aí começa a contribuição importante do Prof. Klaus Wyrtki, da Universidade do Havaí, falecido em 2013. Os trabalhos de Wyrtki (1975, 1984, 1985) em coletar e interpretar os dados do Pacífico tropical sobre o nível do mar contribuíram muito, para o entendimento da oceanografia e dinâmica do El Niño. Também, segundo Rasmusson & Carpenter (1982), uma significativa nova dimensão da OS/El Niño foi dada por Wyrtki (1975), quando ele mostrou que o evento El Niño estava associado com a mudança da inclinação leste-oeste do nível do mar, no Pacífico tropical. Wyrtki (1975) apresentou, o que ele chamou, de uma nova teoria e explicação para o desenvolvimento do El Niño. Ele disse que o El Niño não é devido ao enfraquecimento dos alísios de sudeste sobre as águas do Peru, mas sim, que precedendo o El Niño, um longo período (mais de um ano) de intensos alísios estão presentes no Pacífico central, com aumento da inclinação leste-oeste do nível do mar e o acúmulo da água quente no Pacífico oeste. Wyrtki (1975, 1985) foi o primeiro a mostrar a existência da piscina de água quente (PAQ) no Pacífico oeste e da descarga e recarga da água quente, no Pacífico equatorial. Ele também encontrou que o enfraquecimento dos ventos alísios a milhares de quilômetros a oeste, no Pacífico central, estava relacionado com o desenvolvimento do El Niño ao longo da costa da América do Sul, alguns meses mais tarde. Também, sugeriu, que ondas oceânicas equatoriais de larga escala, eram o mecanismo pelo qual variações do vento no Pacífico central, determinariam o início do El Niño no Pacífico leste.

Segundo McPhaden (2002), as ondas equatoriais são de dois tipos no Pacífico: a onda Kelvin, que viaja para leste ao longo do equador e a onda de Rossby que se propaga para oeste. Elas são evidentes abaixo da superfície, como ondulações da Termoclina que sobe e desce por dezenas de metros com a passagens dessas ondas. As ondas de Kelvin demoram ao redor de dois meses para cruzarem a bacia do Pacífico e as ondas de Rossby demoram ao redor de seis meses para cruzarem a mesma bacia. Quando essas ondas atingem os continentes a leste e oeste, dos limites do Oceano Pacífico, são refletidas. No caso das ondas de Kelvin há dispersão de energia para maiores latitudes ao longo da costa oeste das Américas. Conforme McPhaden (2002), os ciclos de vida dessas ondas (meses ou estações) em resposta à mudança do vento, são aspectos críticos da dinâmica do oceano, controlando a evolução de eventos de El Niño e La Niña. As ondas equatoriais também afetam o nível do mar e a intensidade e direção das correntes oceânicas.

Segundo Cane (1986), cálculos teóricos de diversos autores (por ele citados) endossaram a ideia de Wyrtki (1975). Outra observação, considerada notável, de Wyrtki (1975), foi a de que, no Pacífico oeste, o nível do mar aumenta antes da fase quente do ENOS (El Niño).

Cane (1986), também afirmou, que o Pacífico tropical oeste é o maior reservatório

de águas mais quentes dos oceanos do mundo, mantido pelos ventos alísios que dirigem a corrente no sentido oeste, ao longo do equador, sob o sol tropical.

Wyrtki (1985), usando observações do nível do mar, estimou o volume de água quente trocada, durante o El Niño 1982-1983, indicando um fluxo para leste de 40 x 10^6 m^3 s^{-1}. Segundo o autor a água quente é perdida para fora do Oceano Pacífico. Ele disse que, isso era evidente, segundo as observações do nível do mar por ele apresentadas. Então, um ciclo completo do El Niño, resulta de uma descarga do Pacífico tropical para latitudes mais altas e a duração de um ciclo completo de El Niño é determinada pelo tempo requerido para o lento acúmulo (recarga) da água quente no Pacífico oeste, pela ação normal dos ventos alísios.

Neelin *et al.* (1998) abordaram a Teoria do ENOS, já com as informações do Programa TOGA (*Tropical Ocean Global Atmosphere*), a primeira grande rede de observações sistemáticas no Pacífico, por um período de 10 anos (1985-1994). Os autores iniciaram por afirmar, que a hipótese de Bjernes (1969) da interação oceano-atmosfera, como essencial para o El Niño Oscilação Sul, não somente foi confirmada na década TOGA, como suprida dos detalhes dos mecanismos que operam nesse sistema. Segundo Neelin *et al.* (1998), a essência do postulado de Bjerknes, como interpretada à luz de novos conhecimentos, é que o ENOS surge como um ciclo autossustentado, no qual anomalias de TSM no Pacífico causam uma intensificação ou enfraquecimento dos ventos alísios e isso, por sua vez, dirige mudança de circulação do oceano, que produz anomalias de TSM. Durante o Programa TOGA, além dos avanços teóricos, foi desenvolvida uma hierarquia de modelos de previsão do ENOS, desde os mais simples aos de maior complexidade. Segundo esses autores, os modelos acoplados intermediários constituíram a mais importante contribuição à teoria do ENOS, porque simulações e previsões com eles podiam ser comparadas, quantitativamente, com observações. Segundo esses autores, ganhos no entendimento e previsão do fenômeno ENOS, foi o maior sucesso do Programa TOGA. Durante os anos 1980 e 1990, foram propostos diversos modelos, inclusive o primeiro modelo, bem-sucedido, de previsão do El Niño de 1986 por Cane *et al.* (1986). Muitos dos modelos da era TOGA, já reproduziam a variabilidade interanual, através da interação acoplada, que apresentavam significantes paralelos com a dinâmica do ENOS.

Cane *et al.* (1986), invocando os trabalhos pioneiros sobre a dinâmica do oceano de Wyrtki (1975, 1985), desenvolveram o modelo acoplado oceano-atmosfera, que fez a primeira previsão, bem-sucedida, do El Niño de 1986, declaram que "se o vento altera o comportamento da TSM, que altera o vento" então um modelo acoplado oceano-atmosfera é, claramente, requerido. No modelo conceitual dos autores, a atmosfera e o oceano têm um papel ativo no ENOS: o fenômeno é uma oscilação do sistema acoplado. É global em suas consequências, mas a vital interação para sua existência ocorre no Pacífico tropical. Segundo esse modelo, ao se aproximar o pico de um evento de El Niño a água quente não se move apenas para leste, mas também no sentido do polo, reduzindo o reservatório de água quente no equador. A transição para um novo estado de El Niño não tem lugar até que suficiente água quente flua de volta para recarregar o reservatório equatorial de calor.

Segundo Barston *et al.* (1999a), o modelo de Cane *et al.* (1986) e Zebiak & Cane (1987), foi o primeiro modelo dinâmico acoplado simples para previsão rotineira do ENOS,

com alto "Skill", em relação ao Niño 3. Seu sucesso é devido, parcialmente, à reprodução do mecanismo de armazenamento do calor subsuperficial no Pacífico equatorial oeste e central, conforme Wyrtki (1975).

Segundo, ainda, Cane *et al.* (1986), a irregularidade do intervalo entre eventos de El Niño, reflete a variabilidade desse tempo de recarga e é essa variabilidade que torna a previsão do El Niño difícil. Esse modelo implica que a futura evolução do ciclo do ENOS, não poderá ser prevista, sem o conhecimento do conteúdo de calor do oceano.

Zebiak & Cane (1987), publicaram pesquisa adicional em que descreveram o modelo acoplado oceano-atmosfera, que reproduziu, sem forças externas, características chaves do fenômeno, incluindo a recorrência do fenômeno quente, em intervalos irregulares de três a quatro anos. E que os campos de TSM média, vento e correntes oceânicas, determinam as características da estrutura espacial das anomalias de ENOS. Eles, também, declararam que o elemento crítico do modelo é a variabilidade do conteúdo do calor equatorial. E que o conteúdo de calor aumenta antes do evento quente e decresce rapidamente durante o evento quente. Sugeriram que a perda de calor durante o El Niño contribui para seu término, e que o fenômeno só voltará após o Pacífico equatorial recuperar o calor perdido.

Conforme Kessler (*http://www.pmel.noaa.gov/people/kessler-latest*), o acúmulo de água quente no Pacífico oeste tem limite e, por isso, o El Niño dura apenas de 9 a 12 meses. Ele disse que o El Niño carrega a semente de sua própria morte.

Zebiak (1989), estudou a variabilidade do conteúdo de calor no Pacífico, período 1970-1987. Os resultados confirmaram a relação entre o conteúdo de calor equatorial, ventos de superfície e TSM previstas pelo modelo acoplado de El Niño, sendo consistente, também, com as observações do nível do mar, nesse período.

Meinen & McPhaden (2000) testaram a hipótese da relação entre a variação do volume de água quente do Pacífico equatorial e o ciclo do El Niño Oscilação Sul, usando a variação observada do vento de superfície, da TSM e o volume de água mais quente que 20°C (WWV, do inglês *Water Warm Volume*), para o período 1980-1999. Os resultados confirmaram que a mudança do WWV no Pacífico oeste, conforme observado por Wyrtky (1975), bem como a média zonal ao longo do equador, conforme Wyrtki (1985) e Cane *et al.* (1986) são úteis precursores do ENOS. Notaram, também, que extremos de WWV precedem extremos da TSM do Niño 3, por vários meses e que essas duas variáveis estão correlacionadas. As análises de correlação indicaram que o pico de correlação (r=0,70) ocorre com TSM defasada de WWV, em 7 meses. E que para dada magnitude de anomalia de WWV, valores positivos estão associados com maiores anomalias de TSM, que valores negativos. Essa assimetria da distribuição da TSM, implica diferenças da importância relativa dos processos físicos que controlam a TSM, durante eventos de El Niño e La Niña.

Um índice para o conteúdo de calor do Pacífico equatorial, é o volume de água quente integrado acima da isoterma de 20 ºC entre 5ºN-5ºS; 120ºE-80ºW. Uma medida equivalente do conteúdo de calor do oceano, é a temperatura média dos primeiros 300 m de profundidade do oceano. A correlação entre o volume de água quente (WWV) e a T300 é maior que 0,9 (*https://www.pmel.noaa.gov/elnino/upper-ocean-heat-content-and-enso*). E, com a rede atual de observação do Pacífico, cujas boias ATLAS medem o perfil de temperatura até 500 m de profundidade, fica mais fácil de obter a T300.

Segundo Okumura & Deser (2010), o El Niño e La Niña não são imagens de espelho, mas exibem significantes diferenças em sua estrutura espacial e evolução sazonal. Principalmente no que se refere às anomalias de TSM sobre o Pacífico equatorial. Concordando com resultado anterior de Meinen & McPhaden (2000), afirmam que no Pacífico leste as anomalias de TSM são maiores em magnitude durante El Niño comparadas com La Niña, resultando em assimetria na distribuição da variação da TSM.

Recentemente, Guan *et al.* (2019), estudaram a assimetria do El Niño e La Niña, com respeito à magnitude, distribuição espacial e duração, interpretadas na perspectiva da retroalimentação do oceano, com base na análise da variância da temperatura das regiões do Niño 3 e Niño 4, período de 1980-2010. Os resultados confirmaram que no leste do Pacífico as anomalias positivas de TSM, na fase madura de evento El Niño, são maiores que as anomalias negativas de evento de La Niña, principalmente, devido à forte retroalimentação positiva do El Niño. Para La Niña, entretanto, os autores encontraram que as anomalias negativas, na fase madura, são maiores que do El Niño no Pacífico central (El Niño CP).

La Niña, tipicamente, tem duração maior que a duração do El Niño. Essa assimetria da duração do ENOS é causada porque a taxa de decaimento de La Niña (-0,1 ºC/mês) é menor que a taxa de decaimento do El Niño (-0,3 ºC/mês).

Embora muito variado, o El Niño e a La Niña, tendem a se desenvolver, com maior frequência, entre abril e junho de cada ano, período em que as previsões são mais difíceis. Conforme McPhaden (2003), é a chamada "barreira da primavera boreal", no Hemisfério Norte, ou barreira do outono austral, no Hemisfério Sul. Essa barreira aumenta a incerteza dos modelos de previsão do ENOS. Nessa situação, tanto os modelos dinâmicos, como os estatísticos têm dificuldade de previsão (baixo "Skill"). Conforme Clarke & Zhang (2019), essa barreira foi, pela primeira vez, documentada por Walker em 1924 e continua recebendo considerável atenção dos cientistas, nos estudos de previsão do ENOS, embora, ainda, não totalmente entendida.

As primeiras explanações sobre essa barreira, invocavam uma limitação intrínseca de previsibilidade do ENOS, como resultado do relativamente fraco acoplamento oceano-atmosfera, nessa estação do ano (Zebiak & Cane, 1987).

Wu *et al.* (2009), analisaram o "Skill" de um modelo do NCEP-CFS (*National Center for Environmental Prediction-Climate Forecast System*/NOAA) em relação à "barreira da primavera boreal". Apresentaram, também, as hipóteses da literatura para esse problema da previsibilidade do ENOS, nessa época do ano, como a fraca Circulação de Walker, os fracos gradientes leste-oeste da pressão ao nível do mar e da TSM, sinal/ruído da TSM, mais baixo na "primavera boreal". Nessas condições, um erro inicial, pode deteriorar a previsão. Também há autores que afirmam que a "barreira da primavera boreal" não é intrínseca ao sistema climático real, mas sim, mais a erros dos modelos. Conforme Wu *et al.* (2009), outros autores que trabalharam com o ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), encontraram que esse modelo não sofre muito com a "barreira da primavera boreal". Enfim, concluíram que erros dos modelos são a principal causa da persistente "barreira da primavera boreal", determinando o baixo "Skill" dos modelos.

Duan & Wei (2013), estudaram essa barreira na previsão do ENOS, usando um modelo acoplado (Modelo global oceano-at-

mosfera-sistema terrestre), para verificar a dependência sazonal da previsibilidade de anomalias de TSM para eventos de El Niño e La Niña. Foram usados quatro eventos de El Niño (1986-1987, 1991-1992, 1997-1998, 2002-2003) e quatro eventos de La Niña (1984-1985, 1988-1989, 1995-1996, 1998-1999). Mostraram que previsão na primavera boreal (outono austral), na fase de crescimento de eventos de El Niño, os erros de previsão induzidos por erro inicial e erro do modelo, têm proeminente dependência sazonal, produzindo maior barreira. Na fase de decaimento a barreira é menos significante. No caso de La Niña, tanto a fase de crescimento, como a fase de decaimento, os erros de previsão não exibem significante dependência sazonal, produzindo menor proeminência da barreira. Conforme esses autores, o erro dos modelos vem de diferentes fontes, como erro nos parâmetros do modelo, incertezas em alguns processos físicos, erros de fontes externas e incertezas no esquema da computação, entre outros.

McPhaden (2003), com dados do período 1980-2002, e com TSM do Niño 3.4, examinou a persistência da variação da TSM e do WWV em relação ao ENOS. O estudo mostrou que, diferente do que acontece com a TSM, não há a persistente "barreira da primavera" (boreal), quando considerado o conteúdo de calor do oceano. A anomalia de calor da parte superior do oceano é muito forte na primeira parte do calendário anual, coincidente com a fase de início de eventos de ENOS, quando a anomalia da TSM é fraca. Isso ajuda a explicar por que, considerando o conteúdo de calor da superfície do oceano na inicialização dos modelos de previsão do ENOS, reduz a prevalência da "barreira da primavera" com a anomalia da TSM. Também confirmou a defasagem entre a anomalia mensal do WWV e a TSM do Niño 3.4.

Segundo McPhaden (2012), o conteúdo de calor da parte superior do oceano, representou a maior fonte de previsibilidade para o ENOS, com o volume de água quente integrado ao longo do equador, prevendo a anomalia de TSM do ENOS, por 2-3 períodos sazonais, pelo menos, durante os anos 1980 e 1990. Entretanto, o mesmo autor mostrou que, na primeira década do século XXI, as variações do WWV e do Niño 3.4 decresceram no Pacífico reduzindo a previsibilidade do ENOS a um período sazonal (três meses). Ainda, segundo McPhaden (2012), essa mudança estaria ligada à mudança do caráter do El Niño, com predominância do El Niño no Pacífico central (El Niño CP), em relação ao Pacífico leste (El Niño EP).

A Figura 8 evidencia a mudança da variabilidade do WWV e do Niño 3.4, depois do ano 2000. Nessa Figura, se verifica também que, conforme encontrado por Meinen & McPhaden (2000), visto acima, os máximos de TSM, estão defasados dos máximos de WWV (claramente, pelo menos até próximo de 2000). Também, que WWV>0 significa El Niño (recarga) e WWV<0 significa La Niña (descarga), no paradigma do Oscilador Recarga-Descarga, de Jin (1997), que foi derivado a partir das hipóteses de Bjerknes, Wyrtki, Cane e Zebiak (BWCZ).

Também, conforme Bunge & Clarke (2014), o WWV foi um bom preditor do ENOS antes da virada do século, conforme modelos numéricos e resultados teóricos que sugeriam que o WWV exercia crucial papel na dinâmica do ENOS. E que esses resultados foram confirmados por observações. Mas depois de 1998, a relação entre esses índices decresceu, reduzindo o WWV, como previsor ou precursor do ENOS.

Izumo *et al.* (2018), estudaram os processos que conduzem ao ENOS, via o conteúdo de água quente do Pacífico. Consideram que

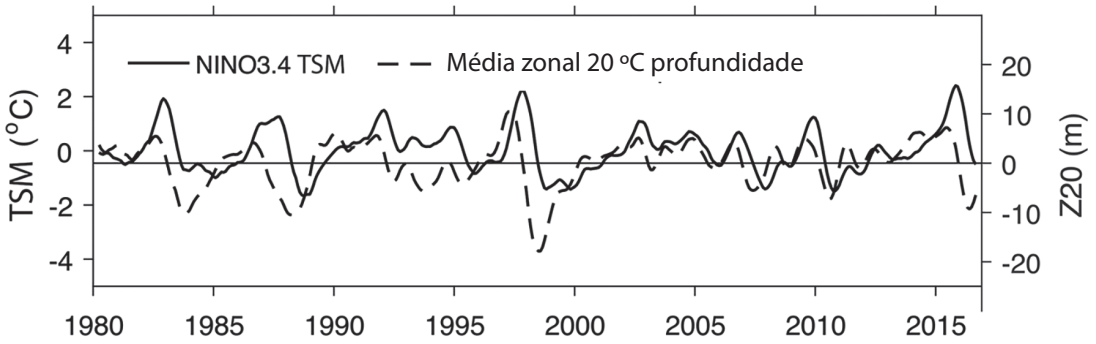


Figura 8. Séries temporais mensais de anomalias da TSM do Niño 3.4 (linhas cheias, ºC) e da anomalia média zonal do WWV, dado pela profundidade da isoterma de 20 ºC (linha tracejada, m), na região 5°N-5°S e 120°E-80°W, com média móvel de 7 meses. Fonte: Adaptado de Clarke & Zhang (2019).

o WWV é o melhor precursor do ENOS durante a "primavera boreal", ou seja, no início do fenômeno. Baseados em seus resultados, afirmam que o volume de água quente no oeste do Pacífico (WWVw), é o melhor precursor oceânico do ENOS de longo prazo (>10 meses). Os autores consideraram que o WWV, apesar de ser amplamente considerado, em vários estudos, não é uma apropriada medida da recarga de longo prazo, sugerindo o uso do WWVw.

Os resultados de Izumo *et al.* (2018), foram confirmados por Planton *et al.* (2018), que analisaram dados observacionais de 1980-2016, do Niño 3 (150°W-90°W; 5°S-5°N) e modelos selecionados (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Considerando o paradigma de recarga-descarga (Wyrtki, 1985; Jin, 1997), encontraram que além do WWVw ser o melhor precursor do ENOS de longo prazo (um ano), a descarga de WWVw no outono boreal (primavera austral) é o melhor previsor de La Niña que a recarga de WWVw o é para o caso de El Niño, tanto em termos de ocorrência como de amplitude. Mostraram, também, tanto em observação, como em modelo, que La Niña tem muito maior probabilidade de ocorrer um ano depois da descarga do conteúdo de calor do Pacífico oeste do que o El Niño depois da recarga do conteúdo de calor.

Mais recentemente, com os estudos da diversidade do ENOS no Pacífico, foram definidos dois tipos de ENOS, em função da longitude de máxima anomalia de TSM, com o ENOS canônico no leste do Pacífico e com o ENOS do Pacífico central. Esses dois tipos de ENOS apresentam teleconexões e impactos muito diferenciados, em diversas regiões do Globo. Em vista disso, as pesquisas têm se concentrado na persistente barreira da primavera boreal (outono austral), desses dois tipos de ENOS.

Ren *et al.* (2016), estudaram o comportamento da persistente barreira da primavera boreal (outono austral) na previsão do ENOS, nos dois tipos de ENOS. A barreira da primavera do ENOS, como já visto, ocorre, geralmente, no final da primavera e início do verão boreal (final do outono e início do inverno austral), em termos do Niño 3.4. Os autores mostraram, entre outros aspectos, que o ENOS EP, apresenta maior restrição à previsão, com a barreira ocorrendo no final da primavera e o ENOS CP, sofre mais quando a barreira acontece no verão. Através de um índice que quantifica a intensidade da barreira de ENOS, mostraram que o ENOS CP,

apresenta barreira muito mais fraca, comparada com a do ENOS EP, e que, em princípio, ENOS CP teria melhor previsibilidade. Entretanto, conforme Ren *et al.* (2016), os modelos correntes apresentam baixo "Skill" na previsão de ENOS CP, apesar do potencial de previsibilidade, considerando a barreira mais fraca.

Conforme Zebiak (1989), Bjerknes não explicou a transição entre as fases do fenômeno, que caracterizam o ciclo de ENOS. A retroalimentação positiva entre as anomalias da atmosfera e do oceano, concebida por Bjerknes, só explica o desenvolvimento dos estados extremos, se quente ou frio.

Durante os tempos de Bjerknes, não eram conhecidas as causas que mudavam um estado quente para um estado frio e vice-versa. A natureza oscilatória do ENOS requer uma retroalimentação positiva e uma retroalimentação negativa. Essa questão não recebeu atenção até os anos 1980.

Na retroalimentação positiva oceano-atmosfera de Bjerknes, os alísios, que sopram de leste para oeste, por algum tempo, acumulam o calor no extremo oeste do Pacífico. Com o enfraquecimento (colapso) dos alísios e as anomalias do vento de oeste há a geração de uma onda Kelvin que se propaga para leste, levando o aquecimento para o Pacífico central e leste e afundando a Termoclina. É o El Niño. Essa situação corresponde a uma instabilidade do sistema acoplado oceano-atmosfera, da bacia do Pacífico.

De acordo com Wang *et al.* (2016), que fizeram uma revisão sobre o El Niño e a Oscilação Sul, a retroalimentação positiva de Bjerknes, no caso de El Niño, conduziria o Pacífico equatorial a um estado quente sem fim. Uma retroalimentação negativa é necessária para trazer o sistema acoplado para a condição normal ou para a fase oposta.

Conforme Kessler (2002), com o advento dos modelos acoplados (simples e intermediários) dos anos 1980 e 1990, surgiram os primeiros modelos conceituais para explicar o ciclo completo do ENOS (incluindo a mudança de fase).

Conforme Wang *et al.* (2016), foram propostos quatro mecanismos, para a retroalimentação negativa do ENOS: o Oscilador Atrasado, o Oscilador Recarga-Descarga, o Oscilador do Pacífico Oeste e o Oscilador Advectivo-Reflexivo.

E, segundo Burgers *et al.* (2005), os dois paradigmas bem conhecidos, para explicar o mecanismo básico da retroalimentação negativa, do ENOS, são o Oscilador Atrasado e o Oscilador Recarga-Descarga.

Segundo Sheinbaum (2003), no Pacífico, o fato da onda Kelvin transitar para leste e a onda de Rossby transitar para oeste, tem tremenda importância no problema da reflexão de ondas. Isso porque a onda Kelvin que atinge a fronteira leste, pode somente refletir sua energia como um conjunto de ondas de Rossby, ao passo que as ondas de Rossby atingindo a fronteira oeste, podem somente refletir como onda Kelvin equatorial.

O mecanismo da retroalimentação negativa do Oscilador Atrasado é ilustrado, qualitativamente, na Figura 9. O enfraquecimento (colapso) dos alísios (1), gera uma onda Kelvin equatorial para leste (2) que aumenta a TSM e afunda a Termoclina, gerando uma instabilidade no sistema ar-oceano. Ao mesmo tempo, ondas de Rossby geradas no sistema acoplado do leste do Pacífico (3) se dirigem para o oeste do Pacífico, são refletidas e retornam como onda Kelvin equatorial (4) que dissipa a instabilidade ao chegar na fronteira leste do Pacífico. O atraso (delay time-scale) se refere ao tempo necessário para as ondas de Rossby atingirem a fronteira oeste do Pacífico, refletir como uma onda Kelvin e alcançar o leste do Pacífico.

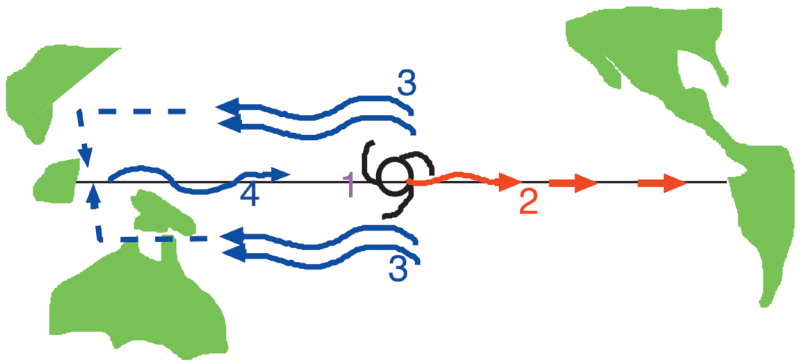


Figura 9. Representação esquemática do mecanismo da retroalimentação negativa, do Oscilador Atrasado. Fonte: Tziperman (2001).

Segundo Wang et al. (2016), o modelo do Oscilador Atrasado leva em conta importantes aspectos do modelo numérico de Zebiak & Cane (1987). O Oscilador Atrasado, enfatiza a importância da reflexão de onda no oeste do oceano. O mecanismo do Oscilador Atrasado explica resultados de alguns modelos e do ENOS observado. Esse mecanismo foi visto como o principal paradigma para explicar o ciclo de ENOS, porque inclui o processo das ondas equatoriais. O modelo da Oscilação Atrasada ganhou credibilidade, também, porque mostrou "Skill" de previsão comparável a dos modelos mais sofisticados. Foi proposto, inicialmente, por Suarez & Schopf (1988) e Schopf & Suarez (1988).

O outro modelo, é o Oscilador Descarga-Recarga. Wyrtki (1975, 1985) sugeriu que o acúmulo de água quente no oeste do Pacífico, levada pelos alísios, é uma pré-condição necessária para o desenvolvimento de um El Niño. Com o colapso dos alísios e com a atuação dos ventos de oeste é gerada uma onda Kelvin para leste contribuindo com o aumento gradativo do volume de água quente em toda a bacia do Pacífico tropical. É o processo de carga. Durante o El Niño a água quente flui para latitudes fora do equador. É o processo da descarga. Baseado nas hipóteses de Bjerknes, Wyrtki, Cane e Zebiak (BWCZ), indicando que o ENOS é uma oscilação natural do sistema Oceano Pacífico equatorial-atmosfera, Jin (1997), propôs o denominado Oscilador Recarga. Jin (1997), diz que o modelo conceitual de ENOS foi construído com base na retroalimentação positiva da interação oceano-atmosfera de Bjerknes, como mecanismo de crescimento, e a recarga-descarga do conteúdo de calor equatorial, como mecanismo de transição de fase, conforme sugerido por Cane e Zebiak e por Wiyrtki. O processo de recarga-descarga faz o sistema acoplado oceano-atmosfera oscilar, em escala interanual. Conforme Meinen & McPhaden (2000), que usaram temperatura subsuperficial, TSM e vento zonal, período 1980-1999, o caráter do ciclo do ENOS, especialmente dos eventos quentes (1982-1983, 1986-1987, 1997-1998) é consistente com o paradigma do Oscilador Recarga-Descarga de Jin (1997). Mais tarde, Jin mostrou que a hipótese de seu Oscilador é consistente com o Oscilador Atrasado.

Detalhes da física desses modelos e derivações matemáticas, podem ser vistos em Suarez & Schopf (1988) e Schopf & Suarez (1988), para o Oscilador Atrasado e em Jin (1997), para o Oscilador Recarga-Descarga.

Ren & Jin (2013), examinaram o comportamento e os processos de retroalimen-

tação dos dois tipos de El Niño, que estão sendo considerados no Oceano Pacífico, nas últimas décadas, o El Niño Canônico ou El Niño EP e o El Niño do Pacífico central ou El Niño CP. Mostraram que a variabilidade interanual do conteúdo de calor do oceano exibe o processo de recarga-descarga, através do ciclo de vida, para ambos os tipos de El Niño.

Segundo Trenberth *et al.* (2002), durante o El Niño, com grande parte do Pacífico quente, o oceano também perde calor para a atmosfera. A maior parte do calor perdido para a atmosfera é através da evaporação e precipitação pluvial, liberando calor latente (processo diabático). Esse calor sensível dirige as teleconexões.

Também, durante La Niña, com o Pacífico com pouca nebulosidade, o oceano é recarregado pela absorção da radiação solar. O calor estocado no Pacífico tropical, aparentemente, aumenta durante La Niña e decresce durante El Niño (Philander, 1990).

A Figura 10, mostra os cientistas Gilbert Thomas Walker, Jacob Aall Bonnevie Bjerknes e Klaus Wyrtki, que contribuíram, decisivamente, para o avanço do conhecimento do fenômeno acoplado oceano-atmosfera, que determina a mais importante variabilidade interanual do clima, em todo o mundo, O EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL (ENOS).

E a Figura 11, mostra os dois cientistas, Mark Cane e Stephen Zebiak, que produziram um avanço no estudo do ENOS de profundo significado prático. Usando as hipóteses de Bjerknes e Wyrtki, realizaram a primeira previsão, com sucesso, do El Niño de 1986.

Caberiam, muito bem, nessa galeria, por suas importantes contribuições, os cientistas Chester F. Ropelewski e Michael S. Halpert. Ropelewski & Halpert (1987, 1989, 1996) e Halpert & Ropelewski (1992), pioneiramente, mostraram as regiões e épocas, em todo o Globo, dos coerentes sinais das teleconexões do Oceano Pacífico, na precipitação pluvial e temperatura, as duas variáveis meteorológicas mais importantes. Isso porque, dada uma previsão de El Niño ou La Niña, já se sabe dos muito prováveis impactos nessas diversas regiões, o que serve de subsídio para os tomadores de decisões em diversos setores de atividade da sociedade.



Gilbert T. Walker (1868-1958) Jacob Bjerknes (1897-1975) Klaus Wyrtki (1925-2013)

Figura 10. Os três cientistas que desvendaram a base do conhecimento do EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL (ENOS).

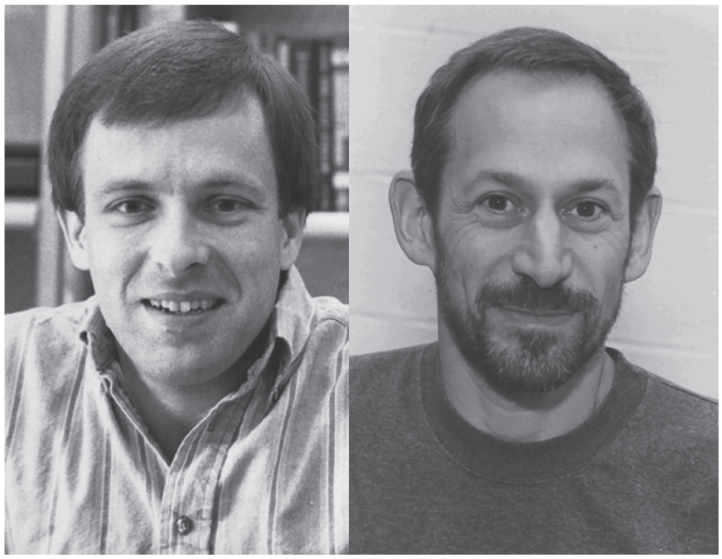


Figura 11. Mark Cane e Stephen Zebiak, criadores do modelo acoplado oceano-atmosfera, com o qual fizeram a primeira previsão, com sucesso, do El Niño.

As três fases do ENOS

A Figura 12, apresenta os três padrões de circulação oceano-atmosfera, do Oceano Pacífico equatorial, que caracterizam as condições normais, as condições de El Niño e as condições de La Niña.

Nas condições neutras ou "normais" do Pacífico equatorial, os alísios de sudeste que emanam da alta subtropical do Pacífico sul, em direção ao equador, transportam a água para fora da costa da América do Sul (Força de Coriolis), ocorrendo a ressurgência da água fria, rica em nutrientes, oportunizando a existência de uma rica cadeia trófica junto à América do Sul equatorial, com abundância de peixes e outros animais marinhos e aves.

Segundo Bjerknes (1969) o Pacífico equatorial leste é o mais frio entre os oceanos das baixas latitudes, devido à ressurgência equatorial e à advecção horizontal da água fria, dirigida pelos ventos alísios de leste ao longo do equador. A Termoclina, inclinada, se aproxima da superfície no leste. A Termoclina, por definição, é a camada de transição entre a região de águas quentes e misturadas da superfície e a água fria profunda do oceano. É onde o gradiente vertical da temperatura da água é mais forte. Normalmente, é utilizada a isoterma de 20°C, como o centro da Termoclina. Sob condições normais, a Termoclina entre o Peru e as Ilhas Galápagos está em uma profundidade de cerca de 40 m, ao passo que no Pacífico oeste sua profundidade é de mais de 150 m (Caviedes, 2001), revelando uma marcada assimetria na espessura da camada aquecida, através do Pacífico (Figura 13). À medida que o vento alísio flui no equador de leste para oeste, empurra as águas superficiais para a região da Indonésia, elevando o nível do oceano no oeste em cerca de 60 cm, em relação ao leste. Também, no fluxo para oeste, a água, sob o sol tropical, se aquece e se acumula no Pacífico oeste. E um gradiente leste-oeste de TSM se estabelece no Pacífico equatorial. No extremo oeste do Oceano Pacífico o ar quen-

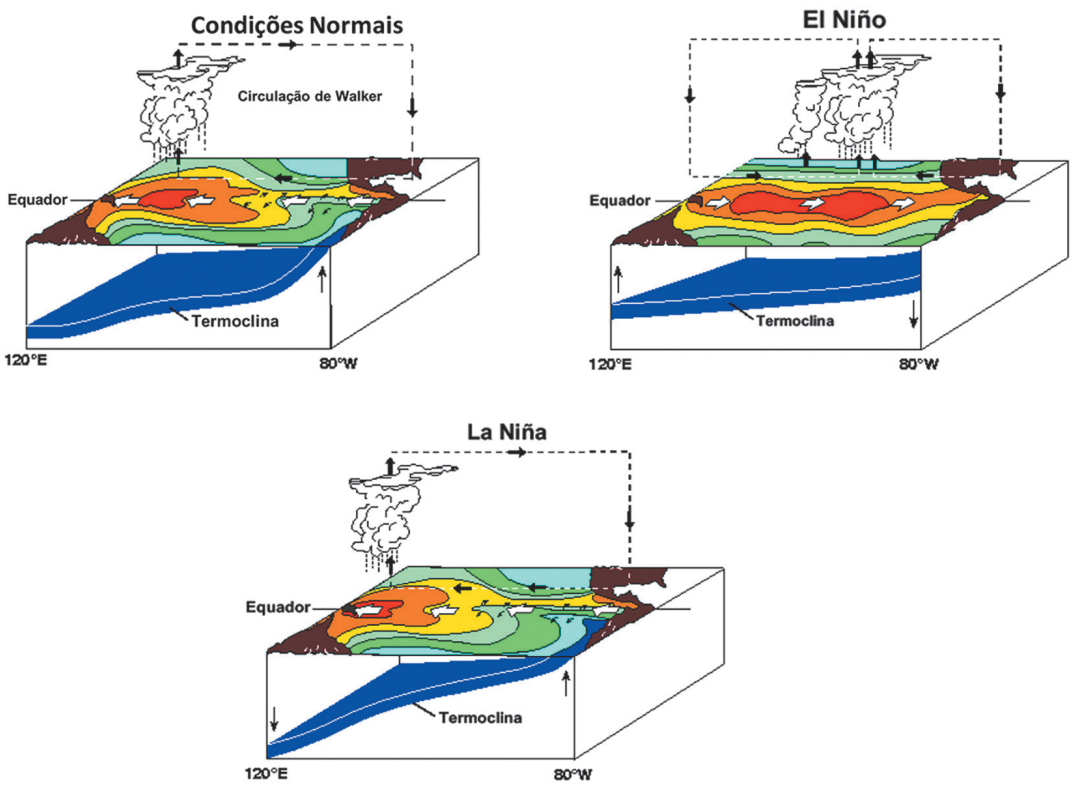


Figura 12. Condições oceânicas e atmosféricas do Pacífico equatorial, em situação normal, em situação de El Niño e em situação de La Niña. Fonte: (*pmel.noaa.gov/elnino/schematic.diagrams*). Data de acesso: setembro de 2019.

te (TSM≥28°C) e úmido, menos denso, ascende em convecção profunda, formando torres de nuvens cumulus e intensas precipitações pluviais. A massa de ar ascendente nessa região de convecção profunda, retorna para leste, no limite da troposfera, fazendo subsidência sobre a água fria do Pacífico leste. À essa circulação atmosférica zonal, no plano equatorial, de natureza térmica, que Bjerknes deu o nome de Circulação ou Célula de Walker, em homenagem a *Sir* Gilbert Walker.

No caso do El Niño, em seu estágio maduro, que ocorre no verão austral (dezembro a fevereiro) as condições acima descritas são drasticamente alteradas. Depois de um longo período (mais de um ano) de fortes alísios acumulando água quente no Pacífico oeste, estão dadas as condições para um El Niño. Há o enfraquecimento dos ventos alísios e a pressão atmosférica aumenta no oeste e cai no leste. Com o colapso dos alísios, que mudam de sentido, passando a fluir de oeste para leste e a água quente que foi "empilhada" no oeste se desloca para leste. Com os fortes ventos de oeste (rajadas), há a geração de uma onda equatorial de Kelvin, que cruza o Pacífico, atingindo as costas do Peru e Equador, afundando a Termoclina no leste (McPhaden, 1999; McPhaden & Yu, 1999). A área de convecção profunda e grande precipitação pluvial é desloca para o Pacífico central e o calor latente é o que excita ondas atmosféricas que transportam o sinal do Pacífico. Nessa fase, acontecem mais os

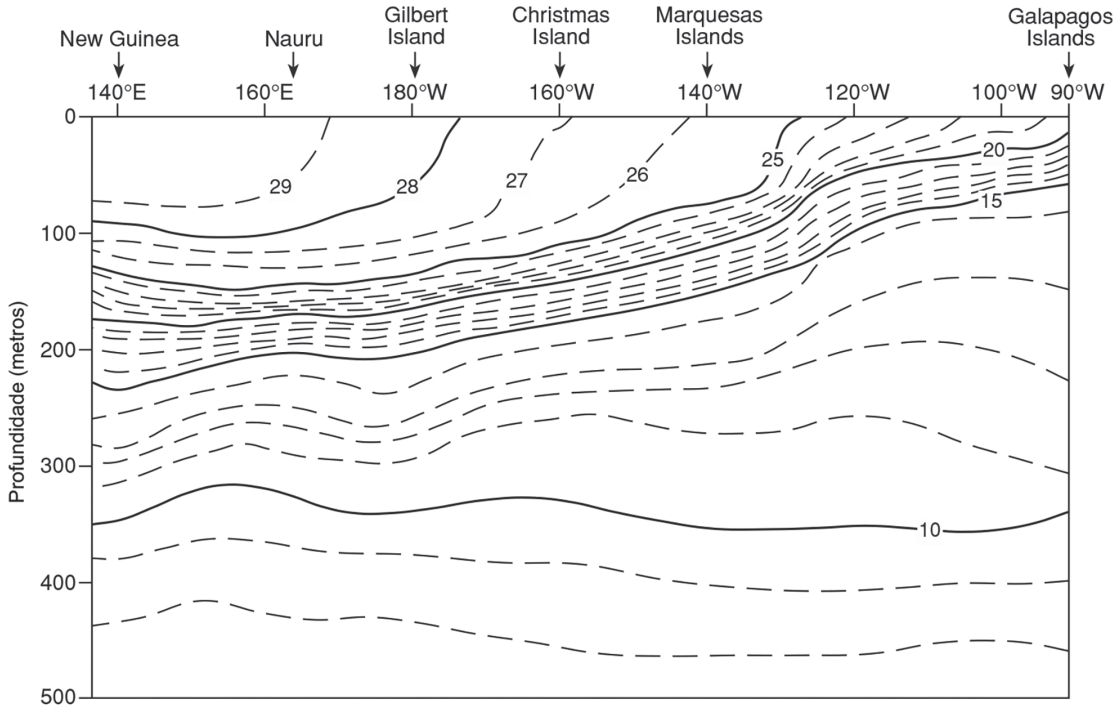


Figura 13. A Termoclina do Oceano Pacífico equatorial, em condições normais (Caviedes, 2001).

seguintes eventos: a TSM no Pacífico central e leste atinge seu pico e a extensa área de TSM acima do normal, do Pacífico equatorial, contribui para o aquecimento da Troposfera do Pacífico equatorial. O contraste térmico leste-oeste e a associada célula de Walker enfraquecem. O ramo da perturbada Célula de Walker, que descia na fria e seca costa oeste da América do Sul, passa a descer no norte do continente sul-americano e Atlântico equatorial. Aumenta o contraste térmico norte-sul e a célula meridional de Hadley fica mais forte. Durante a fase madura do El Niño o Jato Subtropical também fica mais forte que o normal, em ambos hemisférios. A inclinação leste-oeste da Termoclina muda, aprofundando no leste e subindo no oeste do Pacífico. O volume de água quente decresce no oeste e aumenta no centro e leste do Pacífico equatorial. Ao mesmo tempo, o nível do mar aumenta numa grande área na costa oeste da América do Sul. Há um intenso fluxo para sul na costa. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se desloca para o equador no leste, havendo aumento da convergência e precipitação pluvial ao longo do equador, do Peru até 175°E. Também, há o deslocamento para norte da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS). Tanto o movimento da ZCIT, como o movimento da ZCPS, estão associados com o colapso dos alísios. Cessa a ressurgência da água fria e a cadeia alimentar é destruída. No Pacífico oeste seco, ocorrem devastadores incêndios florestais na Austrália e na Indonésia (Bjerkness 1966, 1969; Kousky *et al.*, 1984; Cane, 1986; Kousky & Ropelewski, 1989; Philander, 1990, entre outros). Também, conforme observações de Wyrtki (1979), há uma redistribuição de massa de oeste para leste durante

o El Niño. No El Niño de 1976 isso ocorreu com uma média de $27x10^6$ m^3 s^{-1}.

Nas condições de La Niña, os ventos alísios sopram com intensidade maior do que a média, empurrando as águas quentes mais para oeste, aumentando a ressurgência e enriquecendo a cadeia alimentícia no leste. A Termoclina, mais inclinada, se aproxima da superfície no leste e se aprofunda no oeste. A zona de convecção profunda, nebulosidade e precipitações pluviais se desloca mais para oeste. As águas equatoriais, mais frias que o normal, estão associadas com a troposfera mais fria que o normal. A subsidência é aumentada no Pacífico central e a nebulosidade é suprimida. O gradiente térmico leste-oeste aumenta e a Circulação de Walker fica mais forte. A Troposfera mais fria que o normal do Pacífico equatorial, resulta em um gradiente térmico norte-sul mais fraco, em ambos os hemisférios. Consequentemente, o Jato Subtropical, especialmente no hemisfério de inverno, fica mais fraco (Kousky & Ropelewski, 1989). Também, durante La Niña, a ZCPS se desloca para o sul de sua posição climatológica (Cai *et al*., 2012). Ou seja, as condições de La Niña são a intensificação das condições normais do Oceano Pacífico. Note-se a grande extensão da área aquecida ou resfriada, na maior bacia oceânica do Globo, que é a do Oceano Pacífico, nos casos de El Niño e La Niña, muitas vezes, adquirindo mais de um quarto da circunferência do Globo.

Em resumo, conforme Voituriez & Jacques (2000), o El Niño, na medida que produz quase um colapso da Célula de Walker, perturba e até inverte as características climáticas dominantes na região, ao passo que La Niña, intensificando as condições normais, empurra o sistema climático da região a seu limite.

Em eventos fortes de El Niño, a TSM entre a Linha da Data e a costa oeste da Amé-

NOTA 2

A Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) é uma banda de convergência atmosférica nos baixos níveis, nebulosidade e precipitação pluvial, que representa um dos maiores componentes do clima do Pacífico Sul. A ZCPS é responsável por uma grande fração da precipitação pluvial do Pacífico Sul, especialmente durante o verão austral (DJF). Ela se estende de noroeste a sudeste, em linha diagonal (8 mil a 10 mil km), desde próximo da Nova Guiné (0º;150ºE) ao sudeste do Pacífico (30ºS;120ºW). O fenômeno ENOS modula fortemente os movimentos da ZCPS. Ela se move, alguns graus de latitude para norte, durante eventos moderados de El Niño e para sul durante eventos de La Niña. Durante eventos fortes de El Niño, entretanto, ela pode se mover até mais de dez graus de latitude no sentido do equador e pode se fundir com a ZCIT. Devido que o gradiente de precipitação pluvial é muito forte nas vizinhanças da ZCPS, um pequeno deslocamento de sua posição média, pode implicar drástica variação nas condições hidroclimáticas, como secas ou enchentes, além de ciclones tropicais, que atingem os vulneráveis países-ilha, dessa região (Brown *et al*., 2011; Vincent *et al*., 2011; Cai *et al*., 2012). Mas também, segundo Kousky *et al*. (1984), numa revisão da Oscilação Sul, e referindo Trenberth (1976), que também estudou a OS (variação temporal e espacial) a ZCPS apresenta um deslocamento no sentido leste-oeste. Quando a OS é positiva (forte circulação de Walker), a ZCPS se desloca para oeste de sua posição média, determinando precipitação pluvial acima do normal sobre a Indonésia e leste da Austrália. Quando a OS está na fase negativa (fraca circulação de Walker), a ZCPS permanece à leste da sua posição climatológica, provocando precipitação pluvial acima da normal em muitas ilhas do Pacífico central.

rica do Sul, pode ser 2 °C a 3,5 °C acima da média e no caso de eventos fortes de La Niña de 1 °C a 3 °C, abaixo da média. Fonte: (*cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle.shtml*).

As teleconexões

O termo teleconexão é referente a uma resposta remota e estatisticamente significante, quer simultânea ou defasada no tempo a uma região forçante. No caso do ENOS, essa região forçante é o Pacífico equatorial. As teleconexões atmosféricas do ENOS, apresentam fortes e generalizados impactos no clima global e nos eventos extremos do tempo.

Segundo Cavalcanti & Ambrizzi (2009), as primeiras evidências de teleconexões globais surgiram ainda no final do século XIX, mas foi bem mais tarde que Walker identificou três grandes oscilações atmosféricas: a Oscilação do Atlântico Norte (OAN), a Oscilação do Pacífico Norte (OPN) e a Oscilação Sul (OS), esta última é a que tem centros de ação na região tropical do Pacífico Sul.

No caso do El Niño, o aquecimento anômalo do Oceano Pacífico provoca convecção profunda, e intensas precipitações pluviais, liberando calor na troposfera. O calor liberado na troposfera é a principal força que dirige a circulação global da atmosfera. Com isso, a célula de Hadley é intensificada, além da modificação da célula de Walker. A intensificação da célula de Hadley, fortalece os Jatos Subtropicais de ambos os hemisférios. Os Jatos que são ventos no limite da tropopausa (10-12 km de altura), estão na divisa entre o ar quente equatorial e o ar temperado das latitudes subtropicais, com escoamento de oeste para leste. Os Jatos serpenteiam o Globo, passando por continentes, montanhas e mares (Figura 14). No entender de Caviedes (2001), os Jatos são os transportadores dos sinais das teleconexões da atmosfera. Somente a dinâmica que opera na alta troposfera, pode explicar como um estímulo gerado, por exemplo, no Pacífico tropical, pode ocasionar mudança do tempo e clima de regiões a milhares de quilômetros de distância, como acontece durante eventos fortes de El Niño e La Niña.

Também, conforme citado por Cavalcanti & Ambrizzi (2009), que estudaram as teleconexões atmosféricas gerais: "da teoria das ondas, fica claro que as Correntes de Jato na alta troposfera agem como poderosas guias de ondas e podem orientar a direção de propagação da energia por longas distâncias". Guiadas pela Corrente de Jato, as ondas de Rossby servem de base para padrões de teleconexões, fornecendo caminhos para

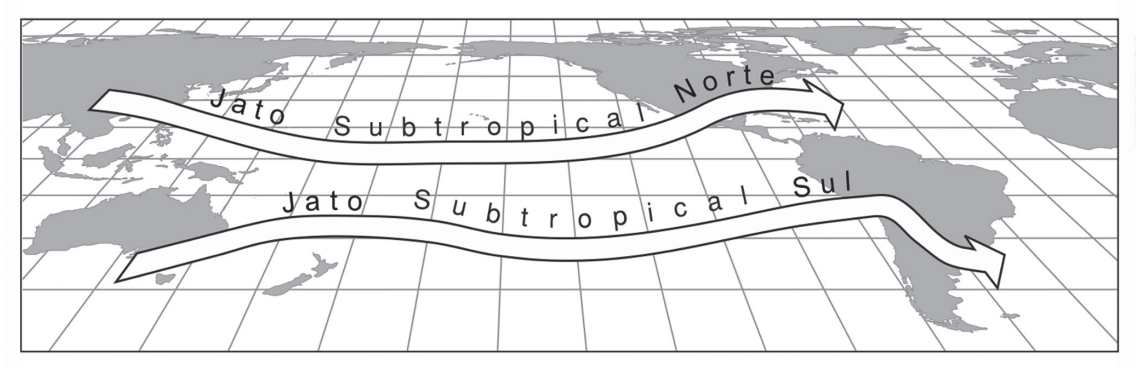


Figura 14. Os Jatos Subtropicais que serpenteiam o Globo, em ambos os hemisférios (Caviedes, 2001).

que informações como temperatura e pressão, por exemplo, sejam transportadas e afetem padrões climáticos de locais a milhares de quilômetros de distância. Cavalcanti & Ambrizzi (2009) mostraram, um resumo esquemático, dos principais guias de ondas e caminhos preferenciais de propagação de ondas de Rossby da alta troposfera, tanto para o Jato Subtropical, como para o Jato Polar, para médias climatológicas de dez anos, de JJA e DJF. Segundo Tom Di Liberato & Nat Johnson (*ENSO Blog, December 22, 2022*): "as ondas de Rossby são veículos que viajam ao longo da nossa superestrada global de informações, que mantêm nosso sistema climático totalmente conectado e em constante comunicação".

Segundo Kousky & Ropelewski (1989), Walker & Bliss, foram os primeiros que documentaram o comportamento global da precipitação pluvial, associado à fase quente do ENOS. Ressalvado o pioneirismo desses autores, as teleconexões globais, do El Niño e La Niña, na precipitação pluvial e temperatura, as duas variáveis meteorológicas mais importantes, foram estabelecidas nos trabalhos de Ropelewski & Halpert (1987, 1989) e Halpert & Ropelewski (1992). Com dados mais recentes e séries históricas mais longas, esses autores delimitaram, no Globo, os sinais coerentes dos dois eventos, além de indicarem o período do ano (meses) em que esses sinais ocorrem. Como critério de classificação dos eventos de ENOS, eles usaram o Índice de Oscilação Sul (Taiti-Darwin) e só tomaram os baixos e altos índices (El Niño e La Niña), definidos, respectivamente, como os 25% menores e os 25% maiores índices da distribuição dos dados mensais, ajustados a uma função Gama, e, por no mínimo, cinco meses ou mais de cada ano.

Em geral, mas nem sempre, as regiões das teleconexões do El Niño e La Niña são mais ou menos as mesmas, só que com o sinal contrário. Também, segundo Ropelewski & Halpert (1987), os meses que indicam o sinal do ENOS, para a precipitação pluvial, são, geralmente, o da estação de maiores precipitações pluviais (estação chuvosa) da região.

Em todo o Globo, o El Niño tem maior número de regiões secas (8) que La Niña (6) e ambos os eventos têm igual número de áreas chuvosas (8). Em relação à temperatura, Halpert & Ropelewski (1992) identificaram as regiões, no globo, com coerentes sinais do ENOS na temperatura. Demarcaram, em todo o Globo, 12 regiões com coerentes sinais de La Niña (frias) e 13 regiões com coerentes sinais do El Niño (quentes).

As Figuras 15 e 16, do CPTEC/INPE, ilustram, de modo esquemático, as teleconexões globais do El Niño e La Niña no clima nas diversas regiões do Globo, para os meses de dezembro-janeiro-fevereiro e junho-julho-agosto. Esses mapas variam ligeiramente, conforme a publicação, com algumas adaptações ou atualizações, mas são todos baseados nos trabalhos pioneiros de Ropelewski & Halpert (1987; 1989; 1996) e Halpert & Ropelewski (1992). Esses mapas do CPTEC/INPE, têm a vantagem de conjugar precipitação pluvial e temperatura e apresentar um maior detalhamento dos impactos de El Niño e La Niña, para a América do Sul.

Descrevendo, com um pouco mais de detalhe, apenas os sinais de ENOS na América do Sul (AS), vemos que o El Niño, no verão (DJF), apresenta uma área chuvosa no Sudeste da América do Sul (SAS), uma área seca na Amazônia-Nordeste, uma área quente no Sudeste do Brasil e uma área chuvosa e quente no Oeste equatorial da América do Sul. El Niño no inverno (JJA), determina duas áreas chuvosas, uma no SAS e outra no oeste

na AS, mais ou menos na mesma faixa latitudinal, duas áreas quentes, uma no Sudeste do Brasil e outra em grande parte da costa Oeste da AS e uma área quente e seca no extremo norte da AS.

A La Niña, no verão (DJF), apresenta sinais coerentes em três regiões da AS: uma área chuvosa na Amazônia e Nordeste do Brasil, uma área seca e fria no Oeste equatorial da AS e uma pequena área fria no Sudeste do Brasil. No inverno (JJA), a La Niña apresenta uma área seca no SAS, uma área fria ao longo da costa Oeste da AS e uma área fria e chuvosa no extremo norte da AS.

Como nesses mapas são apresentados os meses que correspondem as estações do ano, não aparece uma área seca no SAS, no caso de La Niña, na primavera-início de verão, especialmente outubro-novembro-dezembro, como ficará claro, pelos trabalhos apresentados sobre a variabilidade da precipitação pluvial para essa área.

Mason & Goddard (2001) utilizaram 12.000 pontos de precipitação pluvial (grade de 5° x 5°), para estudar a probabilidade de anomalias de precipitação pluvial associadas ao ENOS, período de 1951-1952 a 1995-1996. Usaram apenas os eventos forte do ENOS (11 El Niño e 11 La Niña). Considerando só os eventos fortes de ENOS, suas análises, no nível de significância de 95% de probabilidade, apontaram que a extensão espacial do sinal do fenômeno na precipitação pluvial é maior na primavera austral (setembro-outubro-novembro) e que La Niña afeta ao redor de 5 a 15% mais área em todo o Globo que El Niño. Também concluíram que, em base global, o El Niño está mais associado com precipitação pluvial abaixo do normal do que La Niña. Isso pode ser constatado nas Figuras 15 e 16.

O visto acima se refere, sempre, ao ENOS Canônico (ENOS EP). Segundo Yeh *et al.* (2018), o interesse nas teleconexões do ENOS tem revivido nas últimas décadas, em consideração à diversidade do comportamento espacial do ENOS. O recente foco tem sido nos diferentes impactos, na precipitação pluvial e temperatura, entre eventos nos quais a máxima anomalia de TSM está localizada no leste do Pacífico equatorial (ENOS EP) e eventos em que a máxima anomalia de TSM localiza-se no Pacífico equatorial central (ENOS CP). As teleconexões do ENOS são sensíveis à longitude de máxima convecção, no Pacífico equatorial.

Segundo esses autores, as características do ENOS, bem como o estado médio do oceano, mudaram desde os anos 1990, resultando em mudanças das teleconexões atmosféricas do ENOS. Essas mudanças nas teleconexões, também têm afetado sua previsibilidade e as estatísticas de eventos extremos.

Em recente trabalho de revisão sobre ENOS e clima da América do Sul, Cai *et al.* (2020), entre diversos outros aspectos, mostraram as teleconexões do ENOS EP e do ENOS CP na precipitação pluvial e temperatura, nas quatro estações do ano. Por esses mapas, pode-se ver as diferentes teleconexões do ENOS EP e do ENOS CP, na América do Sul (Figura 38).

Efeitos associados ao El Niño e La Niña no clima do Brasil

As figuras 17 e 18, mostram, com mais detalhes, os efeitos do El Niño e de La Niña nas cinco Regiões Fisiográficas do Brasil.

Mas, como será visto, na realidade os grandes efeitos, principalmente na precipitação pluvial, acontecem em três regiões: no Norte, particularmente na Amazônia, no Nordeste e no Sul. E, nessas regiões, com o sinal contrário, com El Niño produzindo secas na Amazônia e no Nordeste e precipitações abundantes no Sul. A La Niña determina

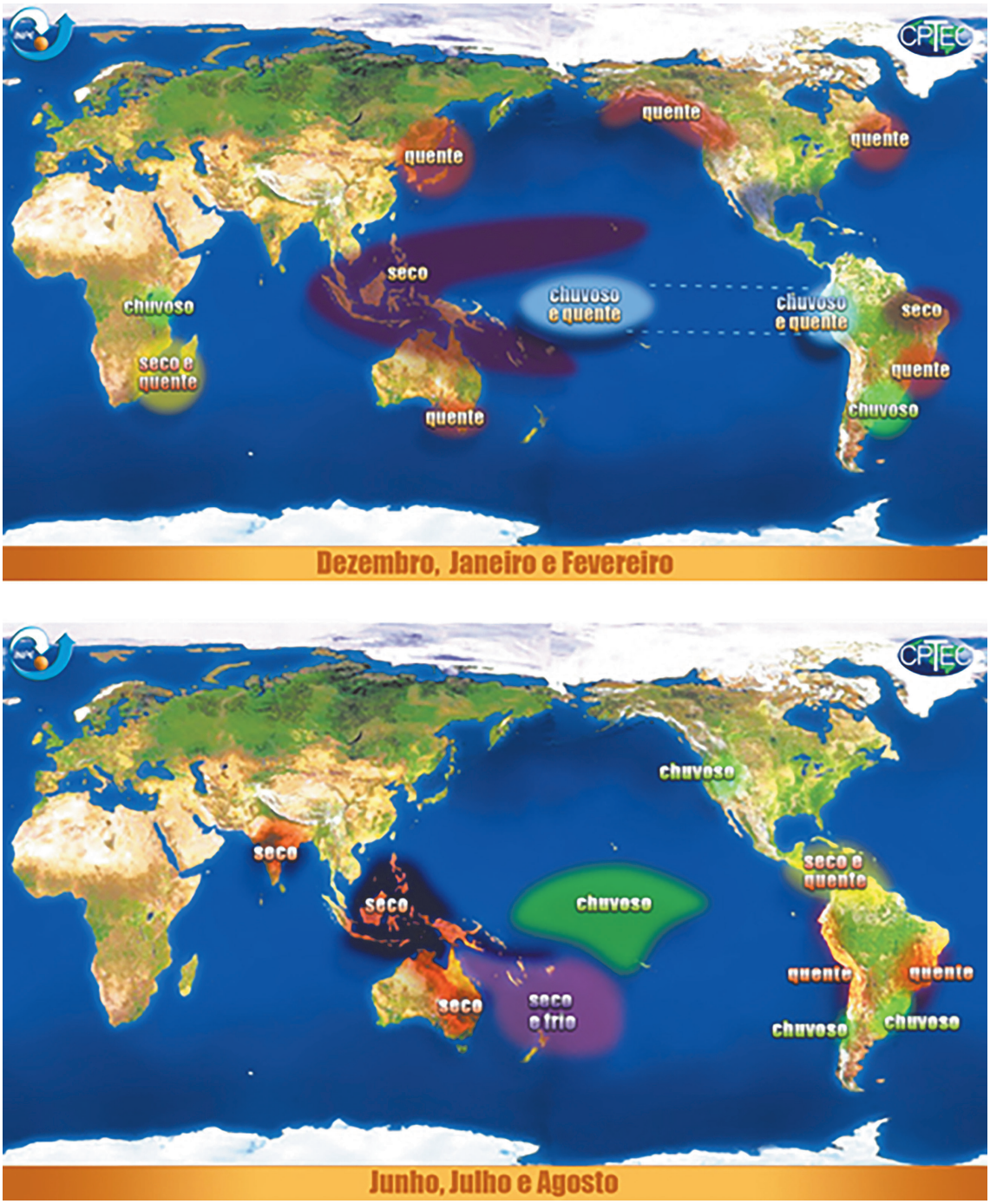


Figura 15. Teleconexão global de El Niño. Fonte: CPTEC/INPE (*www.cptec.inpe.br*). Data de acesso: dezembro de 2018.

precipitações pluviais elevadas, enchentes e altas vazões de rios nas regiões do norte e secas no sul. Aliás, conforme os sinais encontrados por Ropelewski & Halpert (1987).

As regiões dos Niños

Inicialmente, foram delimitadas três regiões para efeito de monitoramento da TSM

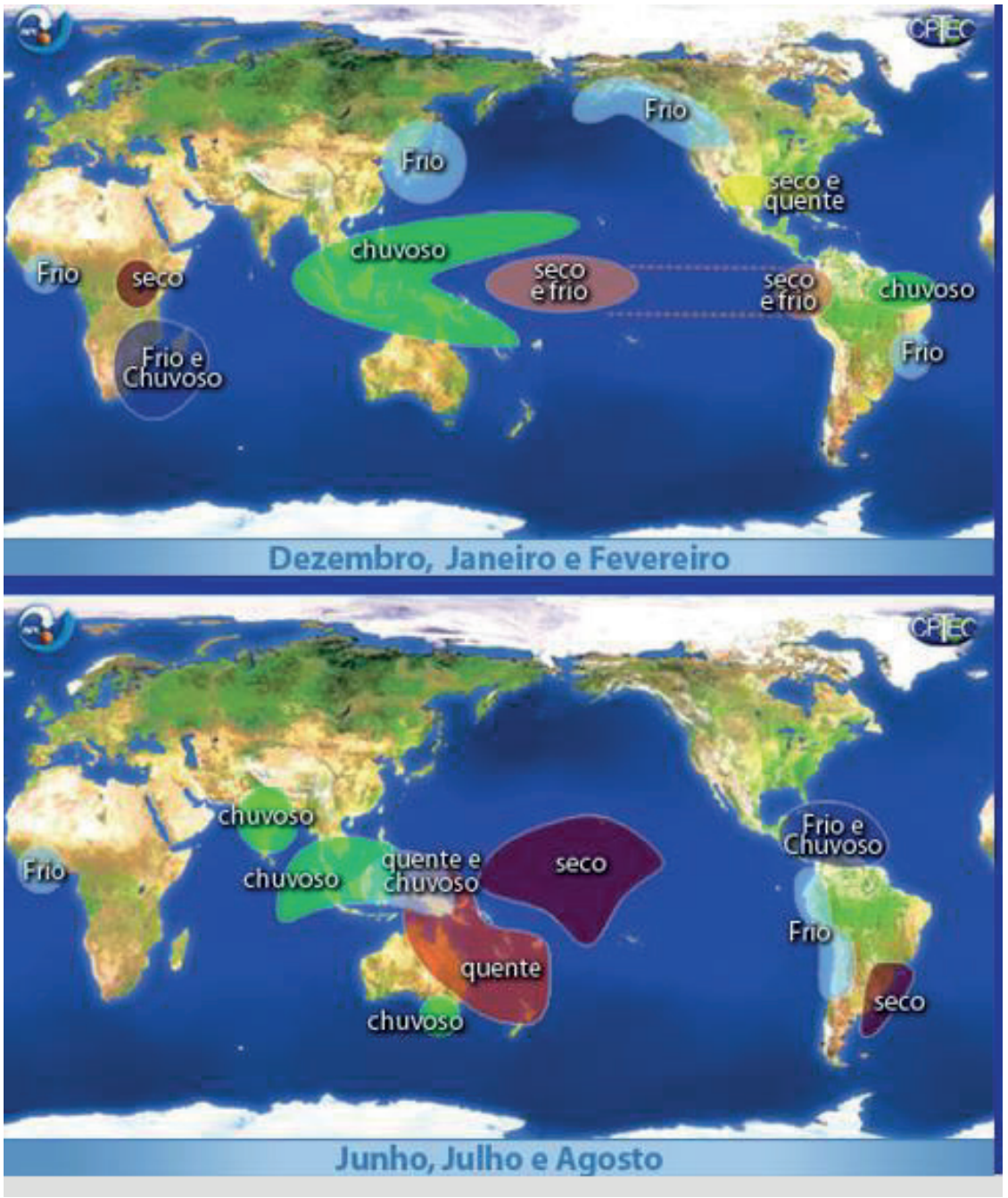


Figura 16. Teleconexão global de La Niña. Fonte: CPTEC/INPE (*www.cptec.inpe.br*). Data de acesso: dezembro de 2018.

e identificação de eventos El Niño e La Niña no Pacífico equatorial. A chamada região do Niño 1+2, junto à costa da América do Sul equatorial, a região do Niño 3 e a região do Niño 4. Segundo Trenberth & Hoar (1996), foi criada pelo CPC/NOAA, em abril de 1976, outra região que tomou uma parte do Niño 3 e uma parte do Niño 4 e é chamada a região

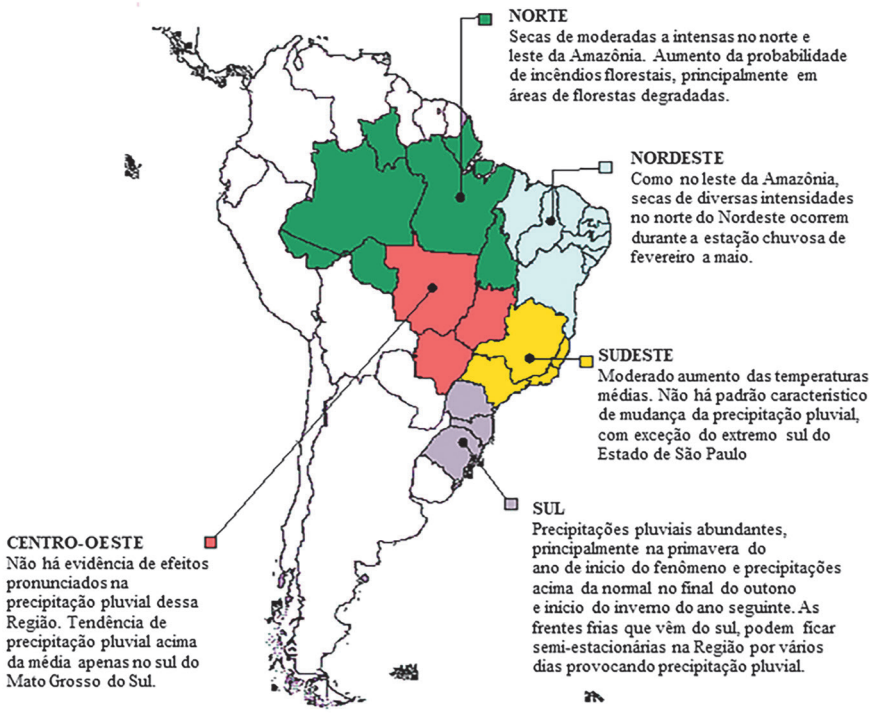


Figura 17. Efeitos associados ao El Niño no clima das regiões brasileiras. Fontes: CPTEC/INPE (*www.cptec.inpe.br*), Oliveira & Satiamurty (1998) e Marengo & Oliveira (1998).

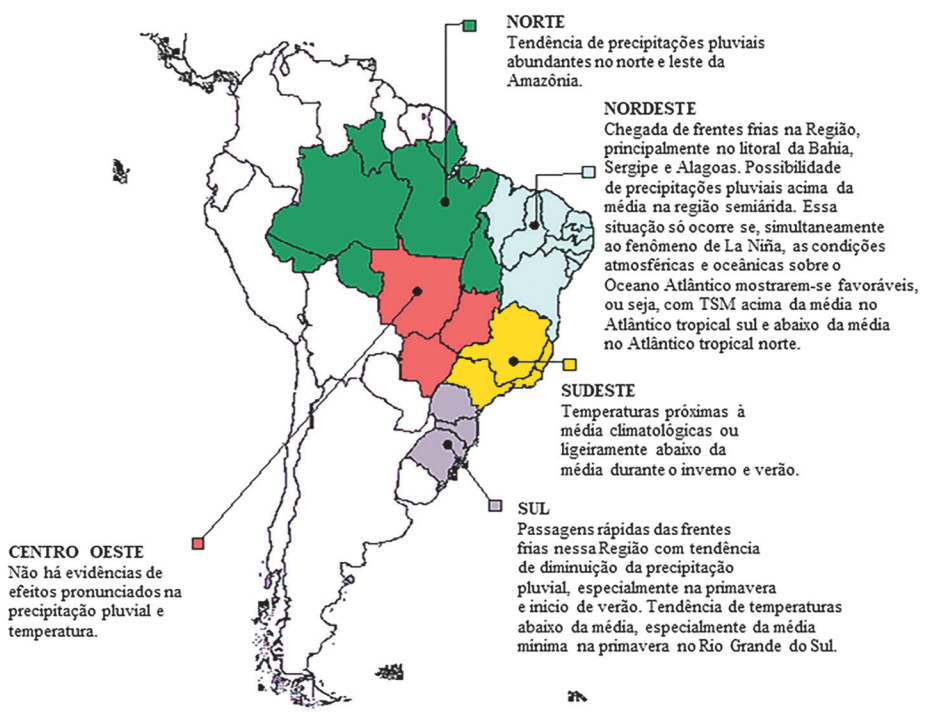


Figura 18. Efeitos associados à La Niña, no clima das regiões do Brasil. Fontes: CPTEC/INPE (*www.cptec.inpe.br*), Oliveira & Satiamurty (1998), Marengo & Oliveira (1998) e Lopes & Berlato (2000).

do Niño 3.4. Isso foi motivado pelos avanços da pesquisa sobre que região do Pacífico a TSM era mais crítica. Segundo CPC/NCEP, um evento de El Niño mostrou que maior mudança ocorria, numa região no limite dos Niño 3 e Niño 4 (150º W).

A região do Niño 3.4 passou a ser a mais usada para caracterizar os eventos ENOS e para as previsões climáticas. A Figura 19 mostra a localização dessas regiões (latitude e longitude).

Estabelecida a conexão oceano-atmosfera, por Bjerknes, dois índices são utilizados, principalmente, para a caracterização dos eventos ENOS: a anomalia de TSM e o IOS. Quando o IOS em Taiti é positivo, a anomalia de TSM do Pacífico equatorial é negativa. É a fase fria ou La Niña. E quando o IOS em Taiti é negativo, a anomalia de TSM do Pacífico equatorial é positiva. É a fase quente ou El Niño. Mas, modernamente, são usadas outras informações complementares, para uma declaração oficial de um evento de ENOS, por parte dos Institutos de Pesquisa e Previsão de El Niño e La Niña. Especialmente depois do Sistema de Monitoramento do Pacífico e do advento dos satélites.

Episódios quentes e frios de ENOS, por trimestres móveis, período 1950-2023

A Tabela 1 mostra o histórico dos eventos de El Niño e La Niña, período de 1950-2023. É adotado o limiar de +/- 0,5 ºC de anomalia na região Niño 3.4 do Pacífico equatorial para a definição de um evento quente (vermelho) ou evento frio (azul) (em relação a um período básico de 30 anos, recalculado a cada cinco anos). Um evento quente ou frio é considerado quando as anomalias de limiares iguais, maiores ou menores do que +/-0,5 ºC, persistirem por, no mínimo, cinco períodos trimestrais contíguos. Essa é a definição operacional usada pela NOAA, também chamado de Índice Oceânico do Niño (ONI - na sigla em inglês). O período de divulgação pela NOAA do índice oceânico no Niño 3.4 iniciou em 1950, quando a área coberta pe-

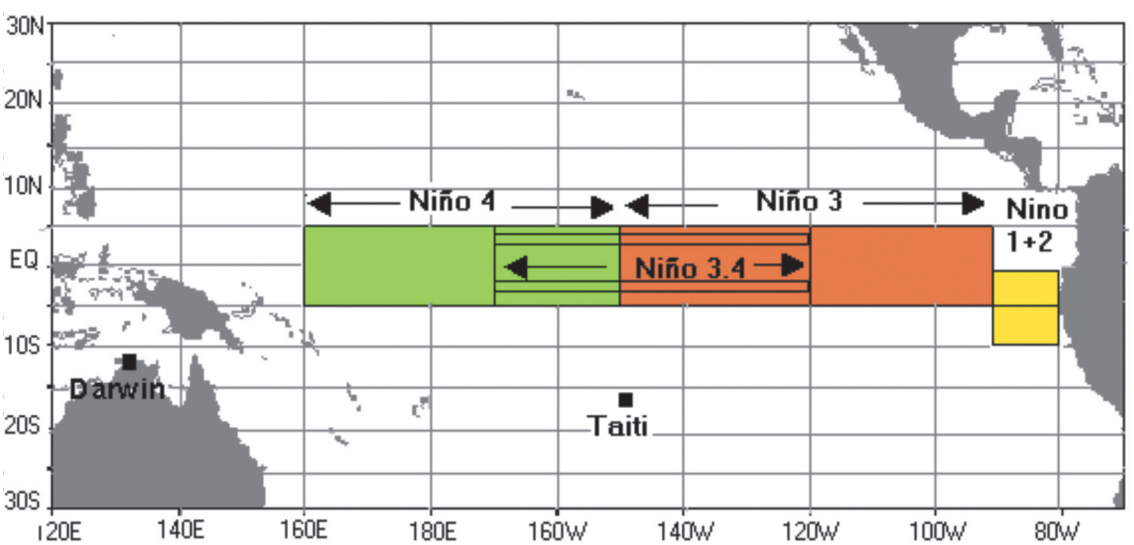


Figura 19. As regiões dos Niños no Oceano Pacífico equatorial: Niño 1+2 (0º-10ºS; 90ºW – 80ºW); Niño 3 (5ºN – 5ºS; 150ºW – 90ºW); Niño 4 (5ºN – 5ºS; 160ºE – 150ºW); Niño 3.4 (5ºN – 5ºS; 170ºW – 120ºW). Também estão assinaladas as localidades de Taiti e Darwin, cujos dados de pressão atmosférica na superfície são utilizados para o cálculo do Índice de Oscilação Sul (IOS).

Tabela 1. Episódios quentes (vermelho) e frios (azul) de ENOS. Fonte: *<cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/oni_v5.php. >*

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1,5	-1,3	-1,2	-1,2	-1,1	-0,9	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6	-0,8
1951	-0,8	-0,5	-0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1	1,2	1	0,8
1952	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0	-0,1	0	0,2	0,1	0	0,1
1953	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
1954	0,8	0,5	0	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7
1955	-0,7	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-1,1	-1,4	-1,7	-1,5
1956	-1,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4
1957	-0,2	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,5	1,7
1958	1,8	1,7	1,3	0,9	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
1959	0,6	0,6	0,5	0,3	0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0	0	0
ANO	**DJF**	**JFM**	**FMA**	**MAM**	**AMJ**	**MJJ**	**JJA**	**JAS**	**ASO**	**SON**	**OND**	**NDJ**
1960	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1
1961	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2
1962	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
1963	-0,4	-0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
1964	1,1	0,6	0,1	-0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
1965	-0,6	-0,3	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,2	1,5	1,9	2	2	1,7
1966	1,4	1,2	1	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3
1967	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,2	0	0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4
1968	-0,6	-0,7	-0,6	-0,4	0	0,3	0,6	0,5	0,4	0,5	0,7	1
1969	1,1	1,1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8	0,9	0,8	0,6
ANO	**DJF**	**JFM**	**FMA**	**MAM**	**AMJ**	**MJJ**	**JJA**	**JAS**	**ASO**	**SON**	**OND**	**NDJ**
1970	0,5	0,3	0,3	0,2	0	-0,3	-0,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9	-1,1
1971	-1,4	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-1	-0,9
1972	-0,7	-0,4	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,1
1973	1,8	1,2	0,5	-0,1	-0,5	-0,9	-1,1	-1,3	-1,5	-1,7	-1,9	-2
1974	-1,8	-1,6	-1,2	-1	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,4	-0,6	-0,8	-0,6
1975	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,6	-1,7
1976	-1,6	-1,2	-0,7	-0,5	-0,3	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,8
1977	0,7	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8
1978	0,7	0,4	0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	0
1979	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0	0	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6

Continuação da Tabela 1. Episódios quentes (vermelho) e frios (azul) de ENOS.

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1980	0,6	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0	-0,1	0	0,1	0
1981	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1
1982	0	0,1	0,2	0,5	0,7	0,7	0,8	1,1	1,6	2	2,2	2,2
1983	2,2	1,9	1,5	1,3	1,1	0,7	0,3	-0,1	-0,5	-0,8	-1	-0,9
1984	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,6	-0,9	-1,1
1985	-1	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4
1986	-0,5	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,2
1987	1,2	1,2	1,1	0,9	1	1,2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1
1988	0,8	0,5	0,1	-0,3	-0,9	-1,3	-1,3	-1,1	-1,2	-1,5	-1,8	-1,8
1989	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1
ANO	**DJF**	**JFM**	**FMA**	**MAM**	**AMJ**	**MJJ**	**JJA**	**JAS**	**ASO**	**SON**	**OND**	**NDJ**
1990	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4
1991	0,4	0,3	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	1,2	1,5
1992	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1
1993	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0,1
1994	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	1	1,1
1995	1	0,7	0,5	0,3	0,1	0	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
1996	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
1997	-0,5	-0,4	-0,1	0,3	0,8	1,2	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,4
1998	2,2	1,9	1,4	1	0,5	-0,1	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
1999	-1,5	-1,3	-1,1	-1	-1	-1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,7
ANO	**DJF**	**JFM**	**FMA**	**MAM**	**AMJ**	**MJJ**	**JJA**	**JAS**	**ASO**	**SON**	**OND**	**NDJ**
2000	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7
2001	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3
2002	-0,1	0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,1
2003	0,9	0,6	0,4	0	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
2004	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
2005	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2006	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0	0,1	0,3	0,5	0,8	0,9	0,9
2007	0,7	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,5	-1,3	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,8	-0,6	-0,3	0	0,3	0,5	0,6	0,7	1	1,4	1,6

Continuação da Tabela 1. Episódios quentes (vermelho) e frios (azul) de ENOS.

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1,5	1,2	0,8	0,4	-0,2	-0,7	-1	-1,3	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6
2011	-1,4	-1,2	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1	-1,1	-1
2012	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	0	0,2	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,2
2013	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
2014	-0,4	-0,5	-0,3	0	0,2	0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7
2015	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,9	2,2	2,4	2,6	2,6
2016	2,5	2,1	1,6	0,9	0,4	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
ANO	**DJF**	**JFM**	**FMA**	**MAM**	**AMJ**	**MJJ**	**JJA**	**JAS**	**ASO**	**SON**	**OND**	**NDJ**
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2
2021	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1	-1
2022	-1	-0,9	-1	-1,1	-1	-0,9	-0,8	-0,9	-1	-1	-0,9	-0,8
2023	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,8	1,9	2,0

las observações ficou mais densa (>30%) no Oceano Pacífico tropical (Huang *et al*., 2016).

O início de episódios de ENOS varia bastante, mas a maior frequência é entre abril-junho (0). Alcançam um máximo de outubro a fevereiro e decaem em março-junho (+1). Tipicamente, duram de 9-12 meses, mas ocasionalmente, podem durar mais de dois anos. A periodicidade é variável, entre 2 e 7 anos (*https://iri.columbia.edu*).

Escala de intensidade dos eventos ENOS

Os eventos de El Niño podem ser classificados na seguinte escala, quanto a sua intensidade:

Evento fraco: 0,5 - 0,9
de anomalia da TSM do Niño 3.4

Evento moderado: 1,0 - 1,4
de anomalia da TSM do Niño 3.4

Evento forte: 1, 5 - 1,9
de anomalia da TSM do Niño 3.4

Evento muito forte: ≥ 2,0
de anomalia da TSM do Niño 3.4

Para La Niña, a mesma escala, porém com o sinal negativo. Para serem classificados nesta escala, há necessidade de, pelo menos, três períodos consecutivos de média móvel de três meses, com o sinal de ENOS, em cada nível.

A Tabela 2, mostra os eventos de El Niño e La Niña desde os anos 1950, bem como a intensidade. Por ela se pode verificar que, os eventos fracos ocorrem em número bem maior, tanto para El Niño, como La Niña. Também, que eventos considerados muito fortes só ocorrem em El Niño, como o de 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016. Mas, na categoria de fortes, ocorrem, em maior número, em eventos de La Niña, que também apresenta o mais longo evento, que foi a La Niña de 1998-2001 (32 trimestres móveis).

Tabela 2. Episódios de El Niño e La Niña e intensidades, desde 1950.

El Niño				La Niña		
fraco - 11	moderado - 7	forte - 5	muito forte - 3	fraco - 12	moderado - 6	forte - 7
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84	2020-21	1999-00
1977-78	2002-03			1984-85	2021-22	2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
2018-19				2017-18		
				2022-23		

Ciclo de vida de ENOS fortes e muito fortes, desde 1950

A Figura 20, ilustra o desenvolvimento dos oito maiores eventos de El Niño, desde 1950, conforme anomalias de TSM do Niño 3.4, do Oceano Pacífico equatorial e os correspondentes IOS. Os destaques da Figura 20, são os eventos de El Niño de 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016. O evento de 1997-1998, foi chamado de "o evento climático do século XX". Por diversas medidas ele foi recorde em intensidade no século XX (McPhaden, 1999). Mas o de 2015-2016 recebeu considerável atenção, porque se especula que ele foi o evento recorde. E foi bem previsto. Numa parte do período de desenvolvimento eles andaram juntos, embora 2015-2016 tenha começado antes. No pico, as anomalias de TSM do El Niño de 2015-2016, foram superiores às do El Niño de 1997-1998. Ambos tiveram decaimento rápido.

A Figura 21, mostra o desenvolvimento dos oito maiores eventos de La Niña, desde 1950, e os correspondentes IOS. Dois eventos de La Niña se destacam pelos seus mínimos de TSM: 1955-1956 e 1973-1974. A duração dos eventos La Niña, em geral, é maior que a duração dos eventos de El Niño. O El Niño, em geral, decai logo após sua fase madura, ainda no final do verão. A maioria dos eventos de La Niña, persiste até o segundo ano.

Conforme o trabalho de Okumura & Deser (2010), que estudaram a assimetria da duração do El Niño e La Niña, período de 1948-2008, com o índice do Niño 3.4, La Niña registra valores negativos que persistem por mais de 22 meses, ao passo que no caso do El Niño os valores positivos persistem por somente 15 meses. Também afirmam que, conforme dados observacionais do século passado, há uma robusta assimetria na duração de El Niño e La Niña. Também observaram que após um forte El Niño segue uma La Niña, como 1972-1973, 1982-1983 e 1997-1998.

Conforme Clarke & Zhang (2019), desde 1873, grande El Niño tende a ser seguido por

La Niña e grande evento de La Niña tende ser seguido por La Niña. Nas últimas quase sete décadas (Tabela 1/definição operacional da NOAA), os eventos de El Niño considerados fortes e muito fortes de 1972-1973, 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016, foram seguidos por eventos de La Niña. E dos 23 eventos de La Niña, do mesmo período, houve somente seis eventos isolados de La Niña.

Verifica-se, como já observado, que não há dois eventos de El Niño, ou dois eventos de La Niña, iguais. Cada evento de ENOS é único. Eles podem diferir no tempo, amplitude, duração, padrão e intensidade. O início, desenvolvimento, pico e o decaimentos dos eventos de ENOS, variam muito. Segundo Philander (1990), a TSM é o mais complexo dos parâmetros do oceano e os processos que a determinam variam com o tempo e espaço. Por isso, cada El Niño e cada La Niña tende a se desenvolver de maneira diferente. Isso significa que em diferentes tempos, diferentes acoplamentos, oceano-atmosfera, são envolvidos na Oscilação Sul e, portanto, diferentes teleconexões.

Também se observa, que há uma correlação inversa entre El Niño e La Niña e o Índice de Oscilação Sul. Durante o El Niño o IOS é negativo e durante La Niña o IOS é positivo. Durante o El Niño, a anomalia de pressão é negativa no leste do Pacífico (Polinésia Francesa). Durante La Niña a anomalia de pressão é negativa no norte de Austrália (Darwin).

Essa correlação varia com o tempo e com as regiões dos Niños. Barnston *et al.* (1997) mostraram as correlações sazonais (trimestres móveis), entre IOS e Niño 3.4 e IOS e Niño 3, para o período 1950-1996. A correlação é maior com o Niño 3.4, mas este é, estatisticamente, superior ao Niño 3, apenas nos trimestres móveis de junho-julho-agosto e julho-agosto-setembro. No ano, a correlação do IOS e Niño 3 é de -0,77 e com o Niño 3.4 é de -0,83. Esse, considerado pelos autores, robusto comportamento, ocorre usando períodos de 20 ou mais anos, desde 1950. A correlação entre as TSM do Niño 3 e do Niño 3.4, excede 0,85, na maioria dos trimestres sazonais, mas isso é devido, em

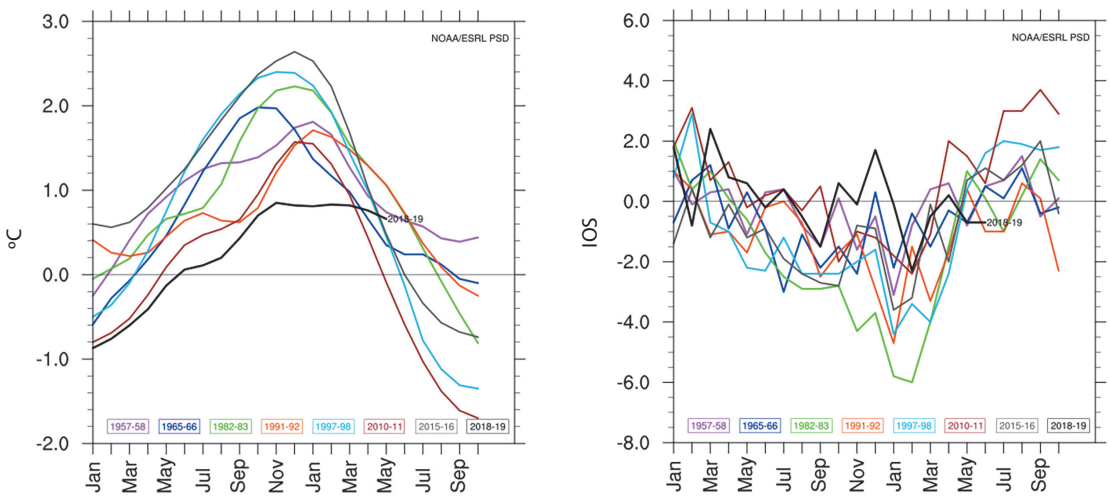


Figura 20. À esquerda, as anomalias de TSM do Niño 3.4, do desenvolvimento dos oito maiores eventos de El Niño e à direita os correspondentes Índices de Oscilação Sul (Taiti-Darwin), desde 1950. Fonte:(*https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/dashboard.html*). Data de acesso: maio de 2019.

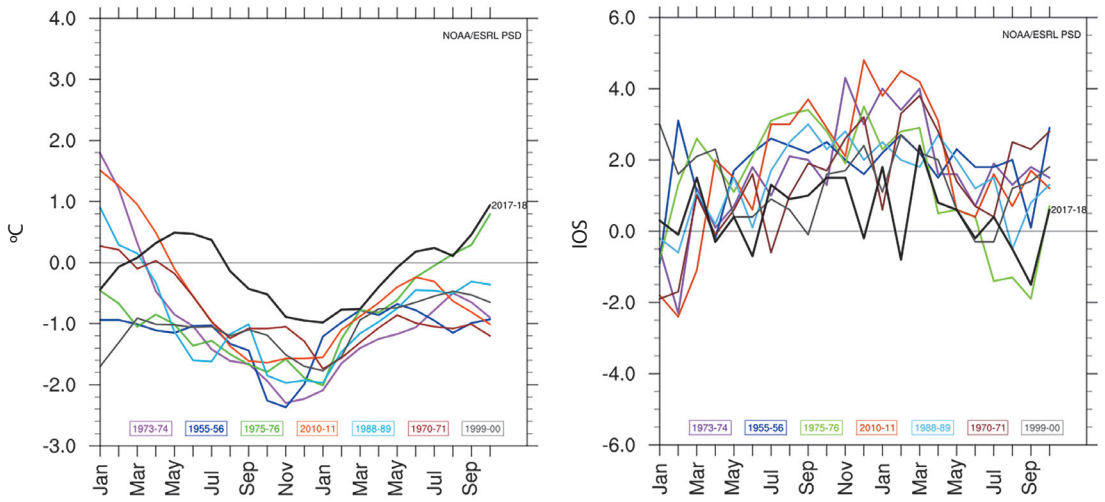


Figura 21. À esquerda as anomalias de TSM no Niño 3.4, do desenvolvimento dos oitos maiores eventos de La Niña e à direita os correspondentes Índices de Oscilação Sul (Taiti-Darwin), desde 1950. Fonte: (*https://esrl.noaa.gov/psd/enso/dashboard.lanina.html*). Data de acesso: maio de 2019.

parte, à área de sobreposição dos dois Niños entre 120ºW e 170ºW.

Comparação de dois Niños gigantes

O último muito forte El Niño do século XX, já referido, o de 1997-1998, teve, no pico, anomalia da TSM, na região do Niño 3.4, de 2,4ºC. E o primeiro muito forte El Niño do século XXI teve, no pico, anomalia de TSM, no Niño 3.4, de 2,6ºC. Segundo L'Heureux *et al.* (2017), no pico, o El Niño de 2015-2016, teve uma anomalia, no Niño 3.4, de +2,5ºC em NDJ (2015-2016). O El Niño de 2015-2016, além de, aparentemente, mais forte, foi mais extenso. No El Niño de 1997-1998, houve 13 trimestres móveis com limiares de anomalias de TSM, no Niño 3.4, que caracterizam eventos quentes de ENOS. O El Niño de 2015-2016 perdurou por 19 trimestres móveis (Tabela 1).

O El Niño de 2015-2016, foi o previsto com maior antecipação. Em meados de 2015 os Serviços Operacionais de Previsão Climática, de todo o mundo, foram quase unânimes em anunciar que seria um El Niño muito forte, com potencial para igualar os de 1982-1983 e 1997-1998, como de fato aconteceu. Foi considerado um dos eventos mais fortes, desde 1950 (L'Heureux *et al.,* 2017).

A Figura 22, compara esses dois maiores eventos de El Niño, dos últimos tempos, em seu estágio maduro, não utilizando a temperatura para estimar intensidade e área de abrangência do fenômeno, mas sim altura do oceano. A altura do oceano é medida por altimetria, via satélite. A altura ou "relevo" do oceano é causada, principalmente, pela circulação do oceano (correntes oceânicas) cuja ondulação varia permanentemente, pela ação dos ventos e pela temperatura, modificando sua "topografia" conforme as estações do ano. Mudanças de ano a ano ou mesmo de década a década no oceano que indicam eventos climáticos como El Niño, La Niña e Oscilação Decadal do Pacífico, por exemplo, são perfeitamente visualizadas. Esses satélites que calculam a altura do oceano, também permitem o cálculo da quantidade de calor, que é estocada no in-

terior do oceano, através da teoria dinâmica do oceano. Segundo a NASA, é considerada a mais moderna e poderosa ferramenta para tomar o "pulso" dos oceanos (*https://sealivel.jpl.nasa.gov/elnino2015/index.html*).

A área na cor branca é a de maior altura do oceano (em mm), e mostra que o El Niño 2015-2016, teve uma abrangência maior no Pacífico do que o de 1997-1998.

Conforme a *NASA's Goddard Space Flight Center*, dos EUA, que comparou esses dois eventos: 1997 iniciou com TSM mais fria que a média e 2015 iniciou com TSM mais quente que a média. Também a variação da temperatura da água abaixo da superfície de 2015 foi diferente, comparada com 1997. Maior altura da água, representa água mais quente subsuperficial.

Pereira *et al.* (2017) analisaram a primavera austral (SON) de 2015, quando do El Niño de 2015-2016, em termos oceânicos e atmosféricos. Foi um El Niño tipo MIX. Segundo esses autores, as anomalias negativas de precipitação pluvial na Amazônia e no Nordeste do Brasil foram mais intensas que nos dois eventos anteriores muito fortes de El Niño, 1982-1983 e 1997-1998. Mas as anomalias positivas da precipitação pluvial no Sudeste da América do Sul, em SON/2015 se restringiram a uma menor área, comparadas aos dois eventos anteriores citados. A intensificação do gradiente de temperatura do ar entre os trópicos e subtrópicos do Oceano Pacífico contribuiu para a intensificação do Jato Subtropical. No Oceano Pacífico, próximo ao sul da América do Sul, as anomalias positivas da altura geopotencial atuaram bloqueando os sistemas transientes (sistemas frontais). O aumento da ciclogênese na costa sudeste da América do Sul ajudou na canalização do Jato de Baixos Níveis (JBN), a leste dos Andes, que transporta umidade

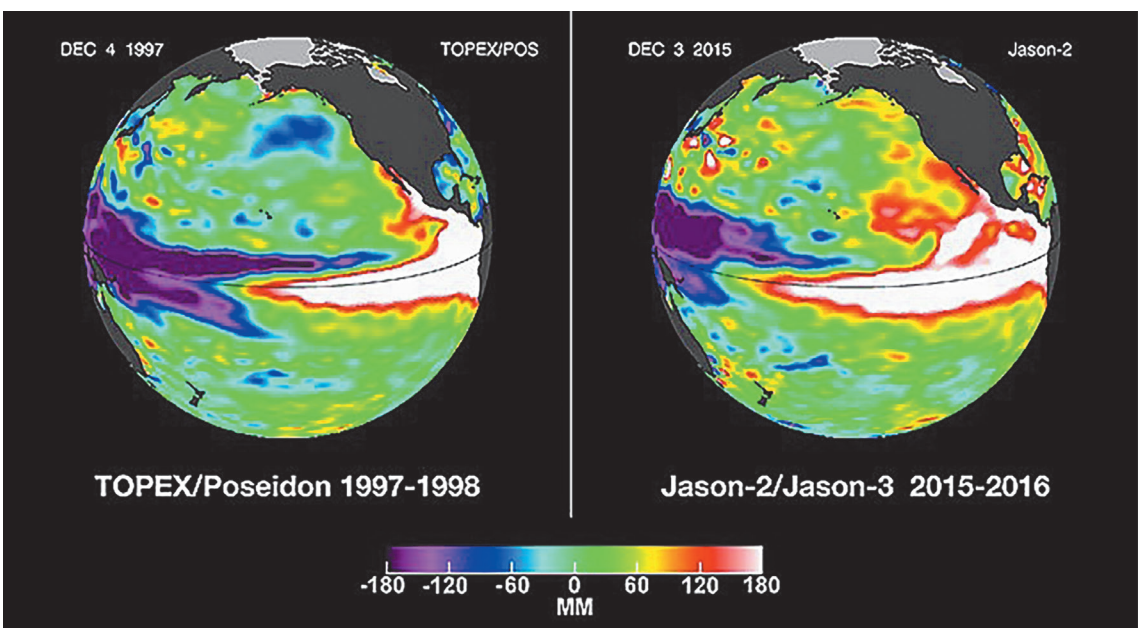


Figura 22. Altura (mm) e área de abrangência, no Oceano Pacífico central e leste, dos eventos de El Niño 1997-1998 e 2015-2016, medida por dois tipos de satélite (TOPEX/Poseidon e Jason-2/Jason-3). Fonte: NASA (*https://sealevel.jpl.nasa.gov/elnino2015.index.html*). Data de acesso: abril de 2018.

da região tropical para as regiões subtropicais. Essa conjugação de fenômenos oceânicos e atmosféricos determinou anomalias positivas de precipitação pluvial no SAS. No Norte-Nordeste (N-NE), a célula de Walker perturbada e deslocada para leste, com um ramo subsidente na longitude de 60ºW, inibiu a convecção e ocasionou a seca na Amazônia e no Nordeste do Brasil.

Os fenômenos oceânicos e atmosféricos que ocorreram, na primavera austral, por ocasião do muito forte El Niño de 2015-2016, são muito bem ilustrados na Figura 23.

O resultado, em termos de precipitação pluvial no Brasil, da configuração oceano-atmosfera da primavera austral acima descrita por Pereira *et al.* (2017), é o da Figura 24. E é compatível com a teleconexão de El Niño, ou seja, precipitação pluvial acima da média no sul e deficiência pluviométrica no norte.

Sobre o El Niño 2015-2016, o Secretário Geral da World Meteorological Organization (WMO), Petteri Taalas disse: "An exceptionally strong El Niño and global warming caused by greenhouse gases joined forces with dramatic effect on the climate system in 2015" (WMO, janeiro de 2016).

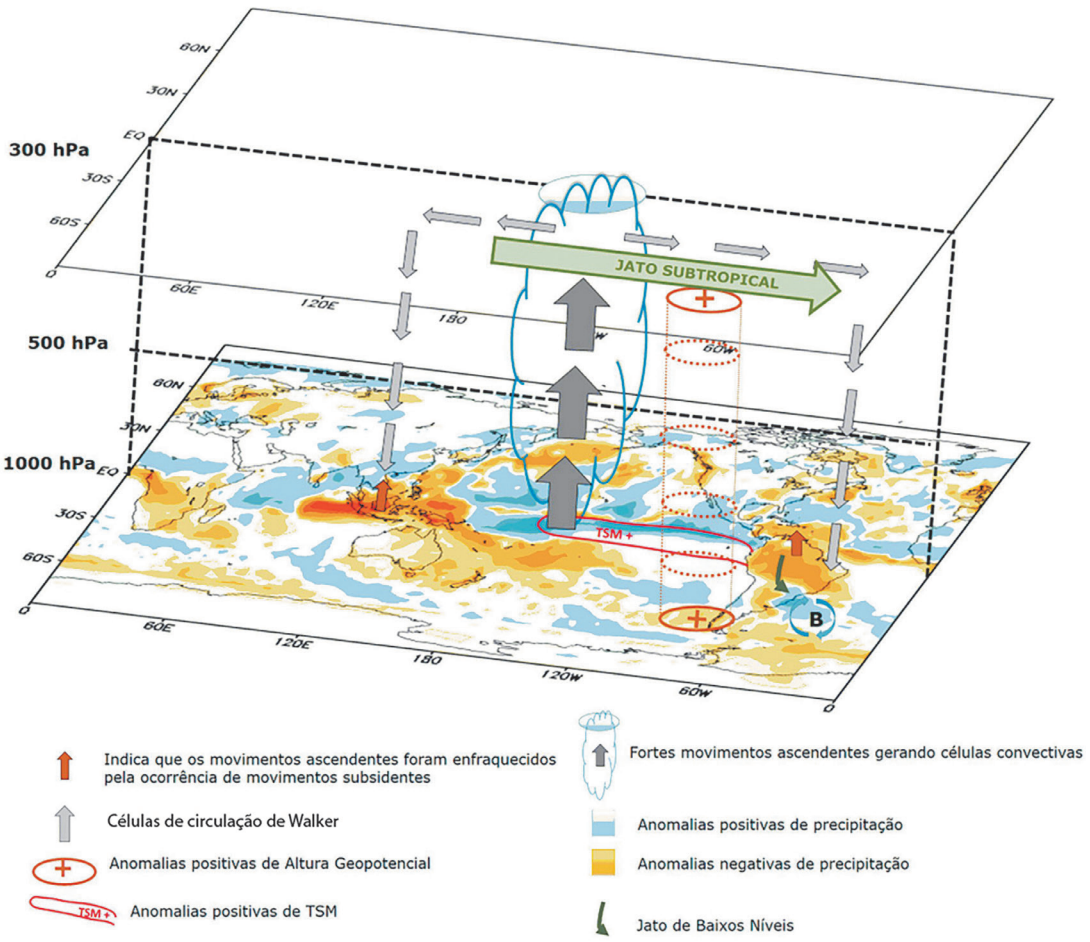


Figura 23. Efeitos do El Niño 2015-2016 na circulação geral da atmosfera, na primavera austral (setembro-outubro-novembro) de 2015 (Pereira *et al.*, 2017).

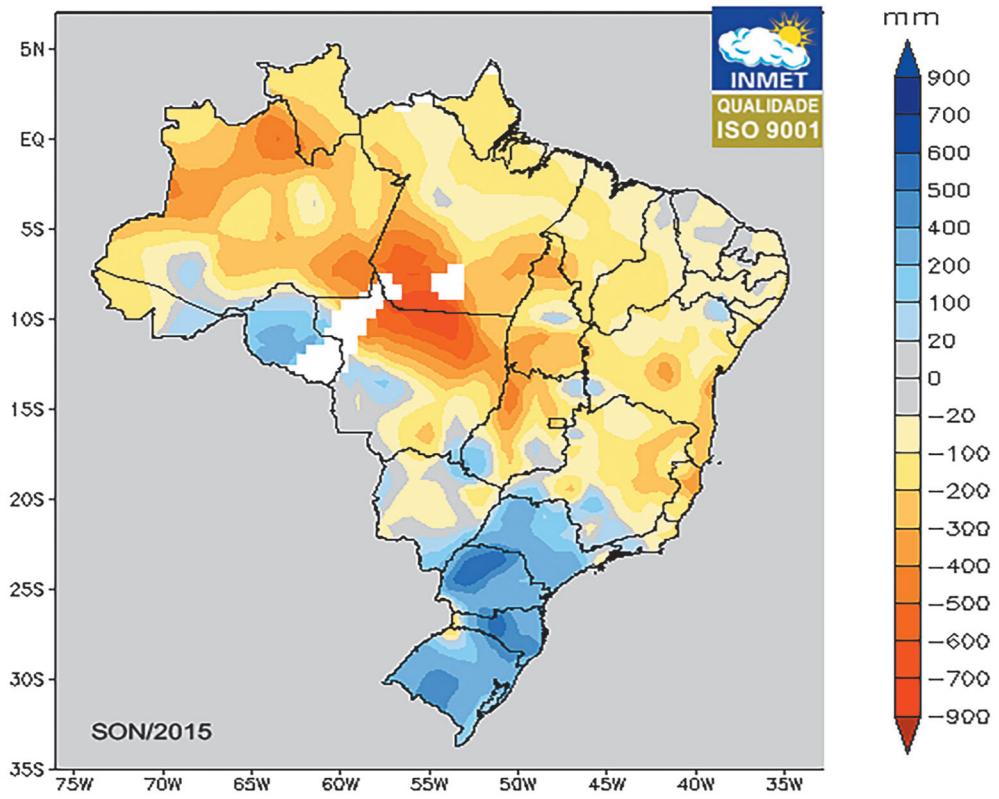


Figura 24. Anomalias da precipitação pluvial (mm) do trimestre setembro-outubro-novembro de 2015, no Brasil, El Niño 2015-2016. Fonte: INMET (w*ww.inmet.gov.br*). Data de acesso: agosto de 2018. A anomalia é em relação a 1961-1990.

NOTA 3

Os Jatos de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS) são ventos que têm origem nos alísios do nordeste que, inicialmente, carregam a umidade do Atlântico tropical norte e passam pela Amazônia, onde adquirem mais umidade, pela evapotranspiração da floresta e encontrando a barreira dos Andes, giram para o sul-sudeste, e vão contribuir para grande aumento da precipitação pluvial no Sudeste da América do Sul (SAS) e na Bacia do Prata (são, também, chamados de rios voadores). Segundo Marengo *et al.* (2009), têm velocidade máxima entre 1 e 2 km de altura, participando do Sistema de Monções da América do Sul. São mais intensos nos meses de final de primavera-verão (NDJF), transportando mais umidade da Amazônia. Segundo Nogués-Paegle & Mo (1997), o JBNAS desempenha papel essencial na intensidade e localização da ZCAS, propiciando uma gangorra de precipitação pluvial entre o Sudeste do Brasil e o Sudeste da América do Sul (Rio Grande do Sul, Paraguai, norte da Argentina e Uruguai). Gangorra, pois quando há anomalias positivas de precipitação pluvial num setor, há redução em outro. O ramo do JBNAS que se dirige para a Região Sudeste vai fortalecer a ZCAS. Conforme Marengo *et al.* (2004), que estudaram a climatologia do JBNAS a leste dos Andes, foi observado que em 1999 (La Niña) houve poucos episódios de JBNAS, comparado com 1998 (El Niño). Também obtiveram associação positiva e com significância estatísticas a 95% de probabilidade, entre anomalias de TSM do Niño 3.4 e número de JBNAS, durante a estação quente (NDJF).

O irmão menor do ENOS: O Niño do Atlântico

O El Niño do Pacífico tem um irmão pequeno no Oceano Atlântico equatorial, denominado Niño do Atlântico, que apresenta semelhança com seu "big brother" do Pacífico. Vallès-Casanova *et al.* (2020) estudaram a variabilidade espaço-temporal das anomalias de TSM do Atlântico e seus impactos no clima dos continentes vizinhos, usando dados do período 1948-2019. Nesse período foram classificados 22 eventos de Niño do Atlântico. O fenômeno é caracterizado pelo aparecimento de anomalias positivas de TSM e ventos alísios mais fracos que a média, no Atlântico equatorial leste e central. Ele se desenvolve usualmente na primavera boreal (MAM), tem seu pico no verão (JJA) e se dissipa no outono boreal.

É mais fraco, tem menor duração e seus impactos são mais modestos e localizados que seu grande irmão do Pacífico. E, também, tem uma irmã, a Niña do Atlântico. Como o El Niño do Pacífico, ele apresenta também a retroalimentação positiva de Bjerknes. Os ventos alísios, próximos da superfície, sopram de leste para oeste ao longo do equador no Atlântico. Quando os alísios enfraquecem no oeste da bacia do Atlântico, uma onda equatorial Kelvin propaga-se para leste da bacia, afundando a Termoclina. Como resultado, a TSM mais quente que o normal se desenvolve no Atlântico equatorial leste, configurando uma retroalimentação positiva atmosfera-oceano, ou seja, água mais quente na superfície resulta em mais enfraquecimento dos alísios, que por sua vez resulta em maior aquecimento da superfície do Atlântico equatorial.

Vallès-Casanova *et al.* (2020) mostraram que o Niño do Atlântico tem maior diversidade que o El Niño do Pacífico, com quatro tipos: término mais cedo, persistente, início mais cedo e início tardio. Esses tipos do Niño do Atlântico têm diferentes impactos nos continentes vizinhos, principalmente, na precipitação pluvial. Por exemplo, redução da precipitação pluvial na região do Saara e aumento da precipitação pluvial no nordeste da América do Sul (Figura 25B).

Tanto no Pacífico equatorial leste e no Oceano Atlântico, pronunciadas anomalias de TSM, ocorrem em escala interanual. Essas anomalias são expressões do ENOS (Pacífico) e do Niño do Atlântico. Segundo a análise de Lübbecke & McPhaden (2017), o Niño do Atlântico é muito mais simétrico que o ENOS do Pacífico, em relação à amplitude, localização e evolução temporal dos eventos quentes e frios. No Atlântico, os eventos frios são imagens de espelho de eventos quentes, com retroalimentação de Bjerknes de similar intensidade, com anomalias máximas de semelhantes amplitudes e mesma localização durante o mesmo mês do ano.

Embora os cientistas tenham avançado muito, no conhecimento sobre o "little brother" do Atlântico, muita coisa ainda é desconhecida. Por exemplo, o Niño do Atlântico foi muito ativo nos anos 1990, mas esteve dormente depois de 2000, até tornar-se ativo novamente em 2016, 2018 e 2019. O que causou essa longa pausa de, aproximadamente, 16 anos do Niño do Atlântico?

O chamado El Niño do século XX que não foi previsto

A Figura 26 mostra as características do Pacífico do chamado El Niño do século XX, o de 1997-1998, que foi seguido por uma longa La Niña de 1998-2001. Essa figura mostra que, no início de 1997, a água quente (vermelho) estava concentrada no Pacífico oeste (Piscina de Água Quente no Pacífico oeste), rasa e fria camada de água no Pacífico leste e

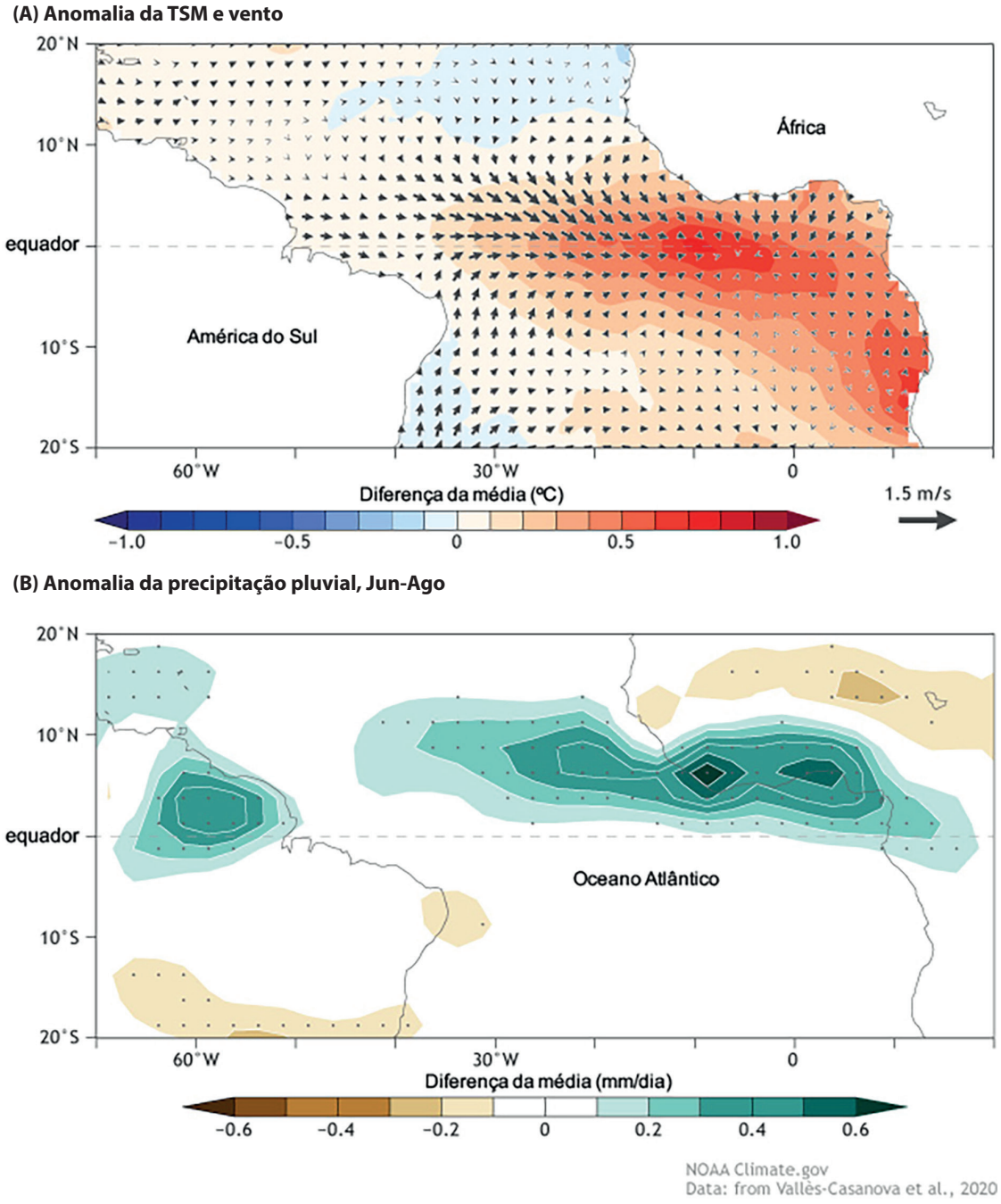


Figura 25. Anomalia da TSM e vento (A) e anomalia da precipitação pluvial, de junho-julho-agosto (B), do Niño do Atlântico. Adaptado de Vallès-Casanova *et al*. (2020).

ressurgência. No final de 1997, a água quente já tinha refluído para leste (relaxamento dos alísios) e cessado a ressurgência, com aumento do nível do mar no Pacífico leste, caracterizando o El Niño. Em março de 1998, parte da água quente havia drenado para fora do Pacífico equatorial, iniciando a longa La Niña de 1998-2001.

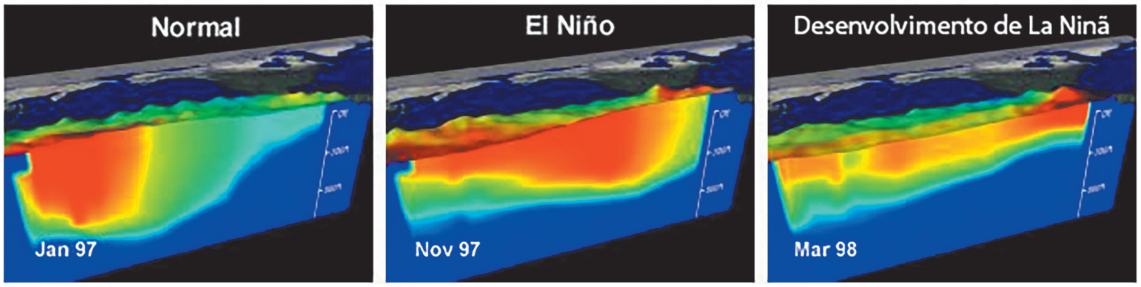


Figura 26. Temperatura da superfície e perfil de temperatura subsuperficial no Oceano Pacífico equatorial, ilustrando como a água do oceano muda, durante a transição de um El Niño ao estágio de desenvolvimento de uma La Niña (caso do El Niño 1997-1998 e La Niña de 1998-2001). Água quente (vermelho) e fria (azul) do Oceano Pacífico. Nessas três imagens, a topografia da superfície foi obtida pelo satélite TOPEX da NASA, a TSM, pelo sensor AVHRR, do satélite NOAA e a temperatura abaixo da superfície foi medida pela rede de boias fixas TAO (*Tropical Atmosphere Ocean*) da NOAA. Fonte: NOAA/PMEL. Data de acesso: dezembro de 2019.

Barnston *et al.* (1999a) fizeram uma análise crítica das previsões do El Niño de 1997-1998, em que foram usados 15 modelos (8 dinâmicos e 7 estatísticos). A maioria dos modelos não identificou a tendência do início do evento até março de 1997, quando o rápido aquecimento já estava ocorrendo. Tampouco, que seria um evento muito forte, até julho de 1997. O melhor desempenho, tanto dos modelos estatísticos, como os dinâmicos, em prever as anomalias da TSM foi de ao redor de +1 ºC, quando o observado foi de 2,5-3,0 ºC, no Niño 3.4. Outra crítica dos autores, foi no anúncio para a mídia, que só ocorreu em maio, não dando tempo ao usuário para preparar medidas de mitigação.

Entretanto, segundo Barnston *et al.* (1999b), os impactos desse evento na temperatura e precipitação pluvial, foram corretamente antecipados, em até seis meses, para várias regiões dos EUA, pelos Serviços de Previsão de Tempo e Clima da NOAA. Mas, possivelmente, os impactos foram mais baseados nas conhecidas teleconexões do El Niño, em diversas regiões daquele País.

Segundo Landsea & Knaff (2000), o muito forte El Niño de 1997-1998, foi o primeiro grande evento em que numerosos grupos participaram de sua previsão, em tempo real. Landsea & Knaff (2000), também, avaliaram 12 modelos de previsão do muito forte El Niño de 1997-1998. E os resultados foram muito semelhantes aos de Barnston *et al.* (1999a).

Esse evento se desenvolveu muito rápido, e cada mês entre junho e dezembro de 1997, era mais quente que o anterior. No final de 1997, a maior parte do Pacífico foi coberta com águas com temperaturas entre 28-29 ºC, que segundo McPhaden *et al.* (2010), essas temperaturas estão próximas do máximo permitido, em oceano aberto.

Descreve-se aqui, o El Niño 1997-1998, baseado em dois trabalhos, publicados no mesmo ano, que analisaram o fenômeno, o de McPhaden (1999) e o de McPhaden & Yu (1999). Os dados utilizados foram as observações *in situ* das boias da rede TAO (*Tropical Atmosphere Ocean*) e de satélites, especialmente altimetria do satélite TOPEX/Poseidon, entre 2°N-2°S, ao longo do equador. As variáveis utilizadas foram anomalias do vento zonal, temperatura da superfície, profundida da isoterma de 20 °C, conteúdo de calor

(0-400m), anomalias do nível do mar com os altímetros do TOPEX/Poseidon e radiação de onda longa (OL↑).

Segundo McPhaden (1999), por várias medidas, o El Niño de 1997-1998 foi um evento recorde, com grandes impactos ao redor do mundo, que surpreendeu a comunidade científica e a sociedade em geral. O recém completado sistema de observação oceano-atmosfera do Pacífico tropical, documentou esse El Niño desde seu rápido surgimento até seu abrupto final, com grande detalhe, não possível antes.

A análise de McPhaden & Yu (1999), do El Niño 1997-1998, enfatizou a atuação das ondas oceânicas equatoriais (Kelvin e Rossby). Segundo esses autores, virtualmente, todas as teorias do ciclo do ENOS consideram o papel central dos processos das ondas oceânicas equatoriais que afetam a TSM e a subsequente interação oceano-atmosfera, através da redistribuição do calor do oceano superficial. Eles usaram modelos oceânicos e os dados *in* situ nas análises.

Por, pelo menos, um ano antes do início do El Niño 1997-1998, houve o acúmulo de calor no oeste do Pacífico equatorial, pela atuação dos anormalmente fortes ventos alísios, em associação com a fraca La Niña de 1995-1996. Esse é um estágio para acontecer um El Niño (conforme já ensinara Wirtky, 1975, 1985), embora não seja suficiente. Para acontecer um El Niño é necessário a atuação de ventos de oeste. Segundo McPhaden (1999), todos os eventos de El Niño, desde os anos 1950, estão associados com elevados níveis de ventos superficiais intrasazonais de oeste. O início do El Niño de 1997-1998, coincidiu com uma série de eventos de ventos intrasazonais de oeste ao longo do equador, as chamadas rajadas ou explosão de vento de oeste (do inglês *Westerly Wind Bursts* – WWBs). Esses ventos de oeste, no El Niño de 1997-1998, segundo os autores, estavam associados à Oscilação de 30-60 dias de Madden-Julian, um distúrbio atmosférico que se propaga para leste, com origem no Oceano Índico. Esse episódio de forçante do vento, excitou uma sequência de ondas equatoriais de Kelvin se propagando para leste, transferindo o calor armazenado no oeste, cruzando a bacia em cerca de dois meses e ultimando com o afundamento da Termoclina no leste do Pacífico por mais de 90m, no final de 1997, quando águas com 28 a 29 ºC, ocupavam toda a bacia do Pacífico e a máxima anomalia de TSM excedia 5 ºC na região normalmente fria do leste do Pacífico ("cold tongue"), um recorde para a região. O afundamento da Termoclina favoreceu o aquecimento da superfície porque o reservatório de água fria que alimenta a ressurgência na região da "cold tongue" foi levado à grande profundidade. No Pacífico oeste a termoclina subiu em cerca de 20 a 40 m em 1997. As TSMs baixaram no oeste, presumidamente por causa da perda evaporativa de calor do oceano. Conforme McPhaden & Yu (1999), as ondas de Rossby, preconizadas pelo paradigma do Oscilador Atrasado, estiveram presentes tanto nos dados do TOPEX/Poseidon, como no modelo, mas foram de importância secundária, nas fases de início e terminação do El Niño de 1997-1998. Mas ressalvaram que essa conclusão poderia não ser válida para todos os eventos de El Niño, necessitando mais pesquisas. O resultado final desses processos foi um nivelamento da Termoclina e o desaparecimento do gradiente leste-oeste da TSM no equador. Não foi senão quando os alísios voltaram abruptamente ao normal, no leste do Pacífico, em meados de maio de 1998, que a água fria subsuperficial pôde subir, com grande eficiência e se misturar à camada superficial, com intenso resfriamento. Em um local (0º, 125º

W), a TSM caiu 8 ºC, em 30 dias, mais de dez vezes a taxa de resfriamento normal, nessa época do ano. O El Niño chegou ao final, dando lugar à longa La Niña de 1998-2001.

McPhaden (1999) disse que as observações sugerem que o súbito surgimento e a grande amplitude do El Niño de 1997-1998 foram, ao menos em parte, relacionados com forças de oscilação atmosférica intrasazonais, que dispararam a erupção da intensa anomalia positiva da TSM, não captadas pelos modelos.

Conforme Meinen & McPhaden (2000), que usaram temperaturas subsuperficiais da rede TAO, durante o El Niño 1997-1998, aproximadamente, 25% do total do WWV foi perdido do Pacífico, perto da região equatorial. Esses autores, também afirmaram que a despeito do aumento da evidência da relação de eventos intrasazonais (WWBs e OMJ) e El Niño, nenhuma das teorias correntes do ENOS, até então, incluía as WWBs. O que está de acordo com McPhaden (1999).

Mais recentemente, Puy *et al.* (2019) estudaram a influência dos ventos de oeste nos eventos de El Niño. Afirmam que eventos de El Niño recordes são precedidos por anormalmente grande quantidade de calor armazenado no oeste do Pacífico, combinado com excepcionalmente forte variabilidade de eventos de ventos do oeste, como foi o caso de 2015.

ODP, ENOS e Aquecimento Global

Segundo Trenberth (2015), cada década, desde 1960, tem sido mais quente que a anterior e a década de 2000-2009 foi recorde de aquecimento. Tanto ENOS como ODP, modulam a trajetória da curva da temperatura do aquecimento global da Terra.

A oscilação decadal do Pacífico (ODP) (Mantua *et al.*, 1997), semelhante aos eventos El Niño e La Niña, ocorre no Pacífico e apresenta, também, duas fases. A fase fria é caracterizada por anomalias negativas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Pacífico tropical e, simultaneamente, anomalias positivas da TSM no Pacífico extratropical (acima de 20ºN). A fase quente

NOTA 4

A Oscilação de Madden-Julian (OMJ) é uma célula da circulação zonal da atmosfera no plano equatorial, em escala planetária, com regiões de aumento e regiões de supressão da convecção profunda e precipitações. O sinal mais forte da convecção ocorre nas águas mais quentes do Oceano Índico e do oeste do Oceano Pacífico. Propaga-se em volta do Globo, sempre de oeste para leste a uma velocidade de ~5 $m.s^{-1}$. Tem origem no Oceano Índico central e alcança o Oceano Pacífico oeste em duas semanas. É o maior fenômeno de variabilidade intrasazonal, da atmosfera tropical, com impactos na distribuição anômala da precipitação pluvial nos trópicos e subtrópicos. Foi descoberta em 1971 por Roland Madden e Paul Julian do NCAR (*National Center for Atmospheric Research* - EUA), através de análise espectral de observações de radiossondas e pressão da superfície, inicialmente na ilha de Canton (3ºS-172ºW). A frequência dessa oscilação, determinada por Madden & Julian (1971), foi de 40 a 50 dias. Essa análise foi expandida pelos mesmos autores (Madden & Julian,1972) para diversas ilhas, ao longo do equador, e a frequência de 40-50 dias, com pequenas variações, foi repetida. Mas um valor que aparece, seguidamente, na literatura meteorológica, é de 30 a 60 dias. Ela participa de diversos sistemas meteorológicos nos trópicos, principalmente, e interfere no El Niño, como forçante associada aos ventos de oeste no início do fenômeno, conforme relatado acima, para o evento de 1997-1998.

apresenta configuração contrária (Figura 27). Diferente do El Niño e La Niña que têm duração de meses a um ou dois anos e, infrequentemente, duração maior, os eventos de ODP, em geral, podem durar por 20 ou até 30 anos. Mas são duas oscilações do Oceano Pacífico, uma de alta frequência (ENOS) e outra de baixa frequência (ODP). No século XX, houve três períodos bem distintos na série temporal da ODP, um período de ODP positiva que foi de 1925-1946, um período de ODP negativa de 1947-1976, seguido de um período de ODP positiva de 1977-1999.

Trenberth (2015), apresenta, na Figura 28, período 1920-2015, a curva da temperatura média global sazonal e sua variabilidade decadal (A) e também para a ODP (B). Em (C), apresenta outra representação da variação decadal da temperatura média global e a representação da ODP como regressão linear segmentada. A combinação da ascensão da temperatura média global, pelos gases de efeito estufa (GEE), combinada com a variabilidade decadal, mostra a ascensão da temperatura média global parecer mais com uma escada que com uma ascensão monotônica. Nessa mesma figura, Trenberth (2015), colocou segmentos de regressão linear, representando o regime da ODP. A ascensão da temperatura média global, tem sido descontinuada, por algum período, por outros fatores, parecendo ser a ODP o principal. São os chamados hiatos. Na Figura 28 aparece o "grande hiato" da curva do aquecimento global, que foi o período de 1947 a 1976. Molion (2005), usando o Índice Multivariado do ENOS (IME), observou predominância de eventos de La Niña no período de 1950-1976, em contraste com a alta frequência de eventos fortes de El Niño, entre 1977-1998.

Segundo Trenberth (2015), a variabilidade interna do clima mascara a tendência de aumento da temperatura global. E o ENOS influi na variabilidade interanual da temperatura global. E a outra oscilação do Pacífico, essa, multidecadal, a ODP, jogou importante papel nos dois "hiatos" do aquecimento global.

Dong & McPhaden (2017), também, dizem que períodos positivos de ODP (décadas dominadas por El Niño) levam à anomalias positivas da temperatura média global da

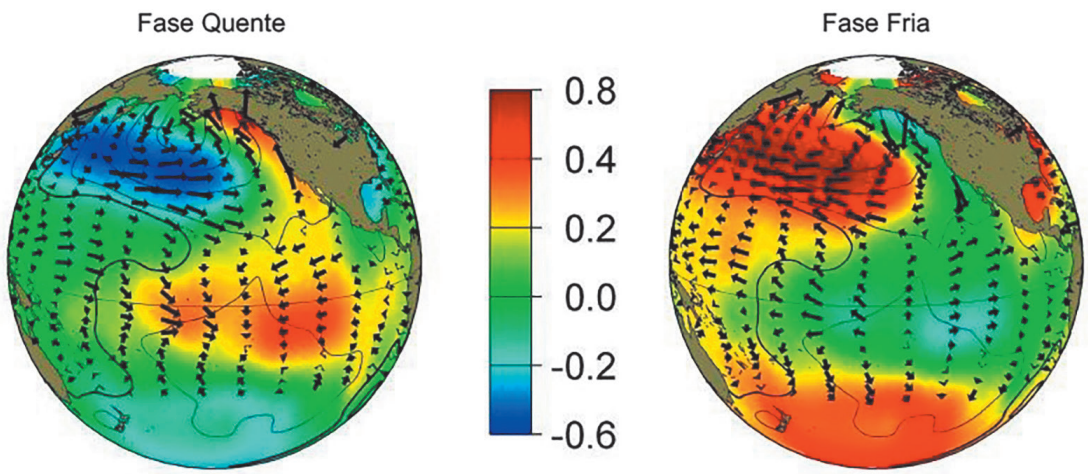


Figura 27. As duas fases da Oscilação Decadal do Oceano Pacífico (ODP). Esquerda: fase quente; Direita: fase fria. Fonte: (*jisao.washington.edu*).

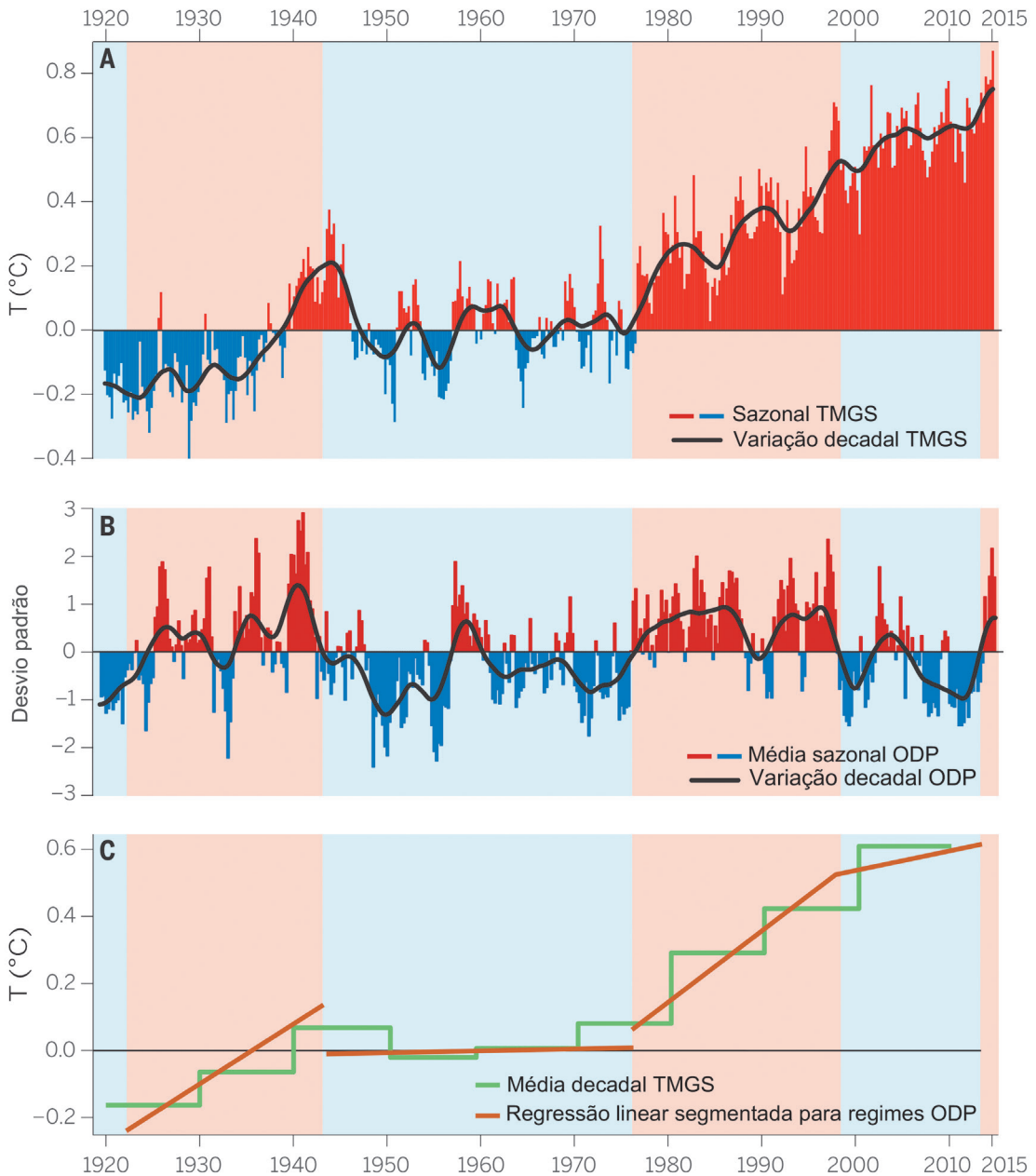


Figura 28. (A) transcurso sazonal e variabilidade decadal da temperatura média global, (B) média sazonal e variação decadal da ODP, (C) média decadal da temperatura média global e segmentos de retas de regressão linear (*Piecewise linear regression*) de ODP (Trenberth, 2015). Faixas azuis e faixas rosas, são de ODP negativa e ODP positiva, respectivamente.

superfície, ao passo que períodos negativos de ODP (décadas dominadas por La Niña), ocasionam anomalias negativas da temperatura média global da superfície.

Segundo Trenberth & Hoar (1996), a tendência de maior frequência de El Niño e menor de La Niña desde o final dos anos 1970 e o mais recente aquecimento do Pa-

cífico tropical de 1990-1995, não observado em registros prévios, abre a possibilidade de que a mudança do ENOS pode ser, parcialmente, causada pelo aumento dos GEE.

Há resultados de simulação de modelos, sugerindo que o ciclo de ENOS poderá ser mais energético num mundo mais quente. Por exemplo, simulação de modelos por Timmermann *et al.* (1999), permite afirmar que o sistema climático do Pacífico tropical sofrerá grande mudança se as emissões dos GEE continuarem crescendo e é muito provável que eventos típicos de El Niño também ficariam mais frequentes.

Também, Fedorov & Philander (2000), após considerações sobre a aparente mudança nas propriedades do El Niño, afirmam que a possibilidade de o aquecimento global estar afetando essa variação, não deve ser excluída.

Entretanto, segundo Collins *et al.* (2010), um estudo que envolveu doze pesquisadores de seis países (Austrália, França, Índia, Reino Unido, Coreia do Sul e Estados Unidos) concluiu, que, a despeito dos progressos no entendimento dos efeitos das mudanças climáticas em vários processos, que contribuem com a variabilidade do El Niño, não é possível dizer se a atividade do El Niño será maior ou menor ou se sua frequência mudará.

McPhaden *et al.* (2011) estudaram um período de 31 anos de El Niño (1980-2010). Em relação à maior frequência de El Niño CP em relação a El Niño EP, concluíram que uma interpretação plausível dos resultados é que o caráter do El Niño nesse período variou naturalmente.

O certo é que o cientista tem pouca confiança em sua capacidade de predizer exatamente como um mundo mais quente pode afetar o El Niño. Até porque a série instrumental existente, de dados sobre ENOS, é muito curta para saber se as recentes mudanças do ciclo de ENOS são reais ou fazem parte da natural variabilidade desse fenômeno. Para saber se ENOS tem mudado, a estatística só ajudará com 200 anos ou mais de dados observados (Guilyardi, 2015).

Wang *et al.* (2016), numa revisão sobre o El Niño Oscilação Sul, afirmam que o aumento dos GEE mudaria o estado médio do Pacífico tropical, o que levaria a uma mudança no ENOS. Mas, devido ao fato de que mudanças no estado médio no Pacífico tropical, sob aquecimento global, ser incerta, mesmo durante as últimas décadas, mudanças no ENOS também são incertas. As simulações sobre a sensibilidade do ENOS, ao aumento dos GEE, mostram resultados muito reduzidos.

Trenberth & Fasullo (2013), que abordaram "o aparente hiato no aquecimento global", também chamado de "pequeno hiato" (período após 2000, especialmente), usaram a Figura 29. Por ela se pode depreender que o ENOS modula a ascensão da temperatura média global. Em geral, seguindo um El Niño a temperatura global aumenta e seguindo um evento de La Niña diminui. O destaque desse gráfico é a temperatura média global de 1998 (o muito forte El Niño de 1997-1998) seguido pela longa La Niña de 1998-2001 que derrubou a temperatura global por longo período (ver a largura da faixa azul-celeste). Segundo Trenberth & Fasullo (2013), a maior flutuação da temperatura global média é devido ao ENOS.

Em trabalho anterior, sobre ENOS e temperatura média global da superfície, Trenberth *et al.* (2002), usando correlação e regressão, encontraram que, no período 1950-1998, o El Niño foi responsável por um acréscimo linear de 0,06 ºC na temperatura média global, resultado um pouco menor que trabalhos prévios.

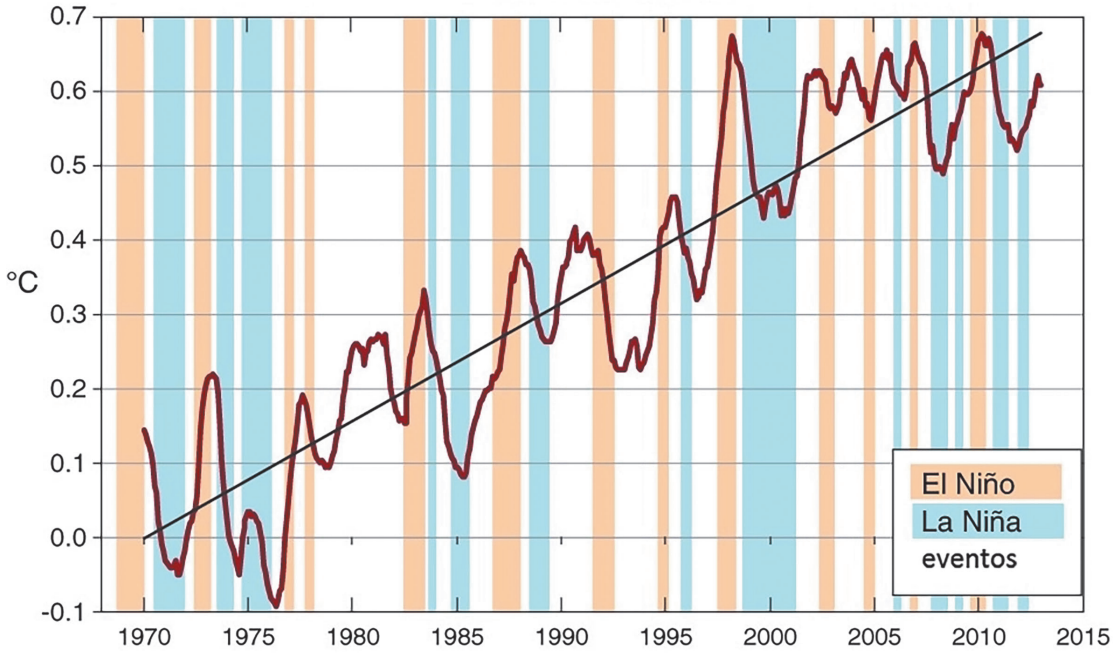


Figura 29. Anomalias (em relação ao período 1901-2000) da temperatura média global (média móvel de 12 meses), segundo NOAA, desde 1970, mostrando a tendência linear da temperatura. Assinalados no gráfico os eventos de El Niño (cor cáqui) e La Niña (cor azul-celeste), definidos conforme critério da NOAA da anomalia de TSM no Niño 3.4. Fonte: Adaptado de Trenberth & Fasullo (2013).

Ressalte-se, também, que outros fatores influenciam a temperatura média global, como a erupção de vulcões. Por exemplo, El Chichón, em março-abril de 1982, no México, reduziu a temperatura média global em 0,2 ºC, e o Pinatubo, em junho de 1991, nas Filipinas, em 0,5 °C, a despeito da presença do El Niño.

Em um evento no IRI (*Internatinal Research Institute for Climate and Society*), realizado em novembro de 2015, para avaliar o muito forte El Niño de 2015-2016, Trenberth disse que o El Niño é um miniaquecimento global e, no final da palestra, arrematou: "How ENSO itself changes with climate change is not very clear, but it is clear that the consequences became greather (in terms of drought and floods)".

Pela Figura 30, observa-se que a temperatura média, de períodos de 30 anos, num passo de cinco anos, da região do Niño 3.4 do Pacífico equatorial, vem aumentando, especialmente a partir dos 30 anos de meados dos anos 1960 em diante (curvas tracejadas). A curva tracejada superior é a média de 1986-2015. No pico, entre a mais baixa curva e a mais alta, houve um aumento ao redor de 0,3 ºC.

Wang *et al.* (2017), analisaram modelos do "*Climate Model Intercomparison Project's Phase 5* (CMIP5)," com os mais prováveis cenários de emissões. Mostraram que a frequência de eventos de El Niño extremos continuará aumentando neste século. Atribuíram como causa a profundidade da Termoclina, que sustentaria o aquecimento do Pacífico equatorial leste. Para La Niña, afirmam que a mudança seria pequena ou

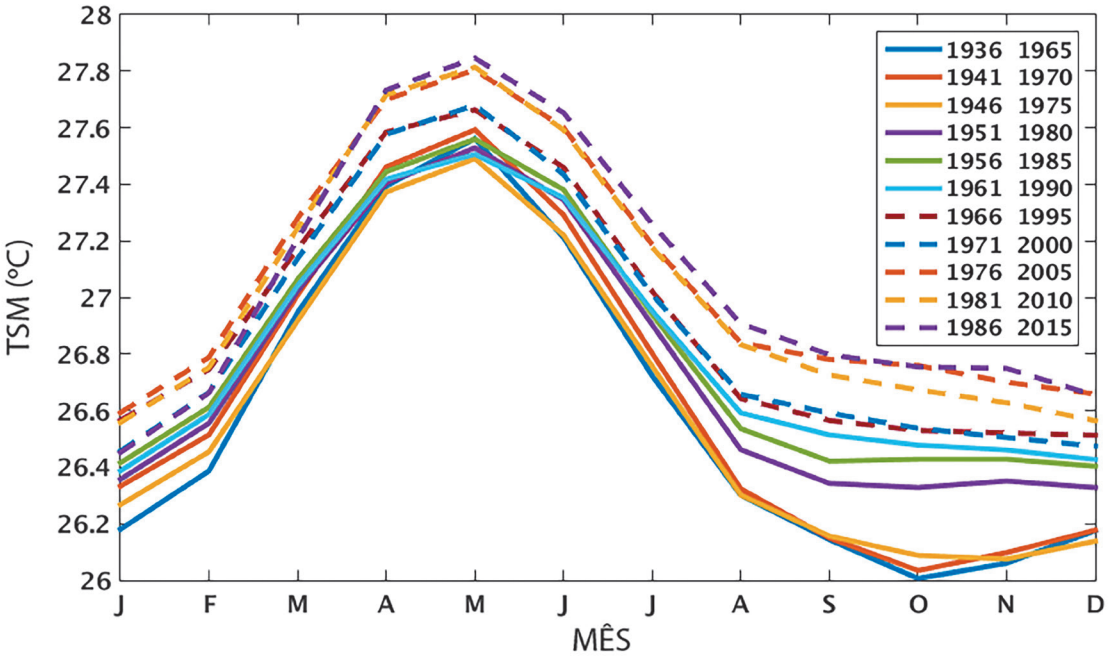


Figura 30. Temperatura média mensal, de períodos de 30 anos, da região do Niño 3.4, no Pacífico equatorial. Fonte: (*http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml*). Data de acesso: abril de 2019.

nula, sob 1,5 ºC-2,0 ºC, de aquecimento.

Segundo Cai *et al.* (2015), a resposta do ENOS ao aquecimento, provocado pelos GEE, tem desafiado os cientistas, por décadas. Algumas das principais consequências da mudança do estado médio do Pacífico, incluem a progressão para leste de eventos de El Niño, acompanhado de deslocamento da zona de convecção e precipitação pluvial, aumento da frequência de eventos de El Niño extremos e também alta frequência de La Niña. Também, o deslocamento para o equador das convergências de grande escala (ZCIT e ZCPS), que é uma das características de eventos extremos de El Niño, contribuiriam para precipitações pluviais intensas no leste do Pacífico. Longos registros paleoclimáticos da variabilidade do ENOS, sugerem que a atividade do ENOS do século XX, foi significativamente mais forte do que em séculos anteriores. Isso está de acordo com os achados de Gergis & Fowler (2009), em seus estudos paleoclimáticos nas regiões que apresentam coerentes sinais do ENOS (Figura 4). Há, entretanto incertezas, que colocam essas projeções em nível médio ou baixo, segundo as definições do IPCC.

Conforme McPhaden *et al.* (2019), cientistas se reuniram na Austrália, em janeiro de 2019, concluindo que indiferentemente se o ciclo do ENOS já tenha sido afetado ou será afetado no futuro, os efeitos do ENOS, hoje, parecem estar vinculados à mudança climática. Salientaram a necessidade de reduzir as incertezas das previsões do ENOS e dispensar mais esforços para a manutenção das observações *in situ* e expandir a base de dados de paleo-reconstrução.

Nos últimos 40 anos, ocorreram três eventos extremos de El Niño (1982-1983,

1997-1998 e 2015-2016), o que não aconteceu em período comparável dos últimos 150 anos de registro instrumental.

Segundo o IPCC/AR5, de 2013, há alta confiança que o ENOS continuará sendo o modo dominante da variabilidade interanual no Pacífico tropical, com efeitos globais no século XXI. É provável que, em escala regional, se intensifique a variabilidade das precipitações pluviais ligadas ao ENOS. Entretanto, como a variação natural da amplitude e padrão espacial desse fenômeno são grandes, persiste um nível de confiança baixo, em qualquer mudança projetada para o século XXI, em relação ao fenômeno ENOS e fenômenos regionais conexos.

O recente relatório do IPCC/AR6, de 2021, foi mais enfático: é virtualmente certo, que o ENOS continuará como modo dominante da variabilidade interanual do clima num mundo mais quente. E que é muito provável que a variabilidade da precipitação pluvial relacionada ao ENOS, aumentará, significantemente, na segunda metade do século XXI.

Tipos (diversidade) de ENOS e suas teleconexões

Rasmusson & Carpenter (1982), pioneiramente, usando dados da superfície do mar, de satélites e estações, além de séries de dados de seis rotas de navios, do Pós-Segunda Guerra Mundial (por mais completos), que cruzavam o Pacífico, desde o oeste da América do Sul, até 170ºW, identificaram e descreveram, com amplo detalhe (antecedentes, início, transição e fase madura), seis eventos quente de ENOS (período 1951-1972) no leste do Pacífico, com anomalias de TSM se expandindo para o Pacífico central. Esses eventos ficaram conhecidos como eventos de El Niño Canônicos. Durante mais de duas décadas, a comunidade científica fez grandes progressos na observação, no entendimento e simulação do El Niño (e La Niña) da costa oeste da América do Sul equatorial, usando como indicador, principalmente, a anomalia máxima de TSM do Niño 3.4 (5ºN-5ºS; 170ºW-120ºW). Segundo Barnston *et al.* (1997), a área do Niño 3.4 é a região do Pacífico que está melhor associada à variabilidade do clima global.

Mas, segundo Trenberth *et al.* (2002), um importante acontecimento, em 1976-1977, foi o chamado salto climático (*climate shif*), que mudou as condições do Pacífico. A partir de então, a anomalia máxima de TSM passou a ocorrer, também, no Pacífico oeste, junto à Linha da Data e do Niño 4, com as anomalias de TSM fluindo no sentido leste, mudando, abruptamente, a evolução do ENOS.

McPhaden & Zhang (2009), que estudaram a série do período de 1981-2008, confirmaram que a propagação da anomalia da TSM do El Niño, ao longo do equador, mudou da direção oeste para leste, depois do salto climático do Pacífico, também com eventos de El Niño mais fortes, nos anos 1980 e 1990, comparados aos dos anos 1950 até 1970.

Conforme Kao & Yu (2009), Trenberth & Stepaniak (2001), estão entre os primeiros a reconhecerem que o diferente caráter e evolução dos eventos de ENOS não poderiam ser totalmente avaliados, sem considerar o contraste da TSM entre o leste do Pacífico e o Pacífico equatorial central. Segundo Trenberth & Stepaniak (2001), a avaliação dos distintos caracteres de evolução de eventos de El Niño ou La Niña requer, no mínimo, dois índices: eles sugeriram a anomalia de TSM da região do Niño 3.4 e um novo índice que denominaram de índice Trans-Niño (TNI, da sigla em inglês), para representar o gradiente das anomalias de TSM entre o leste e o Pacífico

central. Esse índice foi definido como a diferença entre as anomalias normalizadas, do Niño 1+2 e do Niño 4.

Capotondi *et al*. (2015) disseram que, um grande interesse na diversidade do ENOS, foi estimulado pelos trabalhos de Larkin & Harrison (2005) e Ashok *et al.* (2007), quando esses autores relataram uma incomum anomalia de TSM do Pacífico tropical central durante o verão (boreal) de 2004, que estava associada a impactos remotos na temperatura da superfície e na precipitação pluvial, diferentes dos relatados, no caso do El Niño tradicional ou Canônico.

Ashok *et al.* (2007), analisando dados do oceano e da atmosfera, do período de 1979-2005, descreveram um novo tipo de El Niño, chamado El Niño Modoki, caracterizado por um aquecimento no Pacífico central, ladeado por águas mais frias a oeste e leste. Modoki é um vocábulo japonês que significa "coisa similar, mas diferente". É também chamado de pseudo-El Niño. A palavra Modoki foi introduzida pelo Professor Toshio Yamagata, da Universidade de Tóquio, um dos coautores do trabalho de Ashok *et al*. (2007). Conforme os autores, o El Niño Modoki é um fenômeno de acoplamento oceano-atmosfera distinto do El Niño Canônico, com teleconexões diferentes em várias regiões. Com o deslocamento do máximo de anomalias de TSM para o Pacífico central, a Célula de Walker é dividida em duas na troposfera equatorial, com um ramo ascendente no Pacífico central e dois ramos descendentes a oeste e leste do Pacífico. O El Niño Modoki está associado à distribuição da precipitação pluvial e temperatura em regiões diferentes do El Niño Canônico. Por exemplo, dependendo da estação do ano, os impactos em regiões como Japão, Nova Zelândia e costa oeste dos Estados Unidos, entre outras, são de natureza oposta à do El Niño Canônico. A temperatura de inverno nos EUA é caracterizada por um dipolo leste-oeste, ao contrário do conhecido dipolo norte-sul, associado ao El Niño EP. E a frequência desse tipo de ENOS, tem aumentado nas últimas décadas. A Figura 31, mostra a configuração média das anomalias de TSM no Pacífico, de sete eventos fortes de El Niño Modoki, no verão boreal, mostrando o aquecimento do Pacífico Central (área em vermelho), ladeada por áreas mais frias, tanto a leste, como a oeste.

Ashok *et al*. (2007), definiram um índice, de natureza tripolar de anomalias da TSM (ATSM), para representar o El Niño Modoki, denominado Índice do El Niño Modoki (EMI, sigla em inglês), dado por:

$$EMI = (ATSM)_A - 0{,}5\,(ATSM)_B - 0{,}5\,(ATSM)_C \quad (2)$$

Os parênteses da equação (2) representam a ATSM média sobre cada região: A (165º E - 140ºW; 10ºS – 10ºN), B (110ºW -70ºW; 15ºS -5ºN) e C (125ºE – 145ºE; 10ºS – 20ºN).

Larkin & Harrison (2005), também, mostraram que as anomalias sazonais de precipitação pluvial e temperatura, do El Niño CP (Pacífico central), no outono e inverno, nos EUA, são, substancialmente, diferentes das do El Niño Canônico (El Niño EP). Embora regiões apresentem similares anomalias, no comportamento geral são diferentes, em amplitudes, em abrangência de áreas e, também, em sinal.

Esse evento, do Pacífico central, recebeu diversas denominações, conforme os autores, como El Niño da Linha da Data, El Niño do Pacífico Central (CP), El Niño da Piscina Térmica e El Niño Modoki.

Alguns autores identificam, na configuração do Pacífico, casos em que convivem o El Niño EP e o El Niño CP, denominado El Niño MIX. O El Niño MIX apresenta impactos

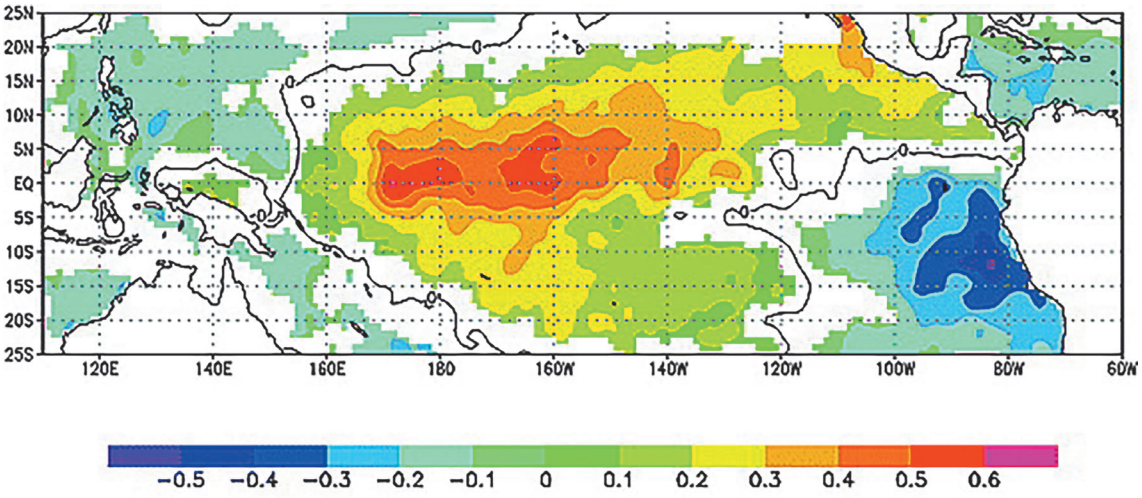


Figura 31. Anomalias (ºC), médias, de TSM do verão boreal (JJAS), dos eventos fortes de El Niño Modoki de 1986, 1990, 1991, 1992, 1994, 2002 e 2004. Adaptado de Ashok *et al.* (2007).

contrários do El Niño CP e do El Niño EP, em alguns mecanismos do clima da América do Sul. Andreoli *et al.* (2017) estudaram, para a América do Sul, uma longa série de dados, de 1901-2010, encontrando, nesse período, 5 El Niño EP, 12 El Niño CP e 15 El Niño MIX. Constataram que as maiores anomalias de TSM ocorrem nos EL Niño EP e CP, em todas as estações do ano. Também, verificaram que a anomalia de TSM do El Niño MIX é semelhante à do El Niño EP, durante o estágio de surgimento do El Niño e semelhante ao El Niño CP, durante os estágios maduro e decaimento. Aqui, serão abordados apenas alguns dos possíveis impactos diferenciados dos outros dois tipos de El Niño (EP e CP), que são abordados em diversos trabalhos.

Segundo os autores, os resultados mostrados, para o El Niño MIX, não discutidos antes, podem ser úteis, principalmente, para o caso de monitoramento climático. Por exemplo, o intenso ciclone em altos níveis que se estende sobre a área da Alta da Bolívia, enfraquece esse sistema, o que justifica o sinal de anomalia negativa da precipitação pluvial nessa região, em SON (0), ao contrário do El Niño EP. Para o El Niño EP e El Niño CP, as anomalias de TSM no Atlântico tropical norte são importantes para a definição das anomalias de precipitação pluvial sobre o Nordeste, ao passo que para o El Niño MIX essa associação não existe. O sinal positivo de precipitação pluvial no NEB, em DJF(+), do El Niño MIX, é coerente com as anomalias positivas e significativas da TSM no Atlântico tropical sul e a convergência de umidade junto da costa leste do Nordeste.

Outro exemplo, o El Niño de 1997-1998, inundou as costas do Peru e Equador, ao passo que o de 2015-2016, que foi um El Niño MIX, embora muito forte, determinou condições próximas ao normal, naquela região (Cai *et al.*, 2020).

Segundo Wang *et al.* (2016), o foco mais recente do estudo do ENOS é separar os eventos de ENOS EP e os eventos de ENOS CP. Esses dois tipos de ENOS têm diferentes impactos no tempo e clima do Globo, por causa da localização da máxima anomalia de TSM (e o associado aquecimento da atmosfera).

Kao & Yu (2009) usaram dados de TSM, temperatura subsuperficial de até 100 m de

profundidade, profundidade da Termoclina, ventos de superfície e precipitação pluvial, para examinar o contraste dos tipos de ENOS do Pacífico leste e do Pacífico central, que denominaram ENOS EP (o Canônico) e ENOS CP, respectivamente. Usaram análise de regressão e de Componentes Principais, para examinar a estrutura, evolução e as teleconexões desses dois tipos de ENOS. Entre vários outros aspectos, seus resultados mostram que o tipo de ENOS EP, no extremo leste do Pacífico, está associado à Termoclina e à variação do vento na superfície. O tipo de ENOS CP, apresenta as anomalias de vento na superfície, TSM e condições subsuperficiais confinadas no Pacífico central. Tem a tendência de início, desenvolvimento e decaimento *in loco*. Parece menos relacionado com a variação da Termoclina e pode ser mais relacionado com forçantes atmosféricas. A diferença, no tempo de início desses dois tipos de ENOS, pode ser causada pelo tempo do mecanismo disparador dos dois eventos. Eles classificaram os tipos de ENOS, do período 1950-2006, encontrando 7 El Niño EP, 14 La Niña EP, 17 El Niño CP e 10 La Niña CP. Verificaram, também, que a duração do ENOS CP é menor que ENOS EP. Eles encontraram que a série temporal do ENOS CP está altamente correlacionada (coeficiente de correlação de 0,8) com o índice El Niño Modoki (EMI, sigla em inglês), apresentado por Ashok *et al*. (2007). Também, o El Niño CP é menos seguido por uma La Niña que o El Niño EP.

Segundo Lee & McPhaden (2010), dados de TSM derivadas de satélite, período de 1982 a fevereiro de 2010, sugerem que a intensidade de eventos de El Niño, no Pacífico equatorial central (CP), quase duplicou nessas três décadas, com maior aquecimento em 2009-2010. Os dados mostram aumento da intensidade e, também, da frequência de ocorrência do El Niño CP, desde os anos 1990. Enquanto a TSM, na região CP, durante os anos de El Niño, tem mostrado acréscimo, durante os anos de La Niña e neutros, não. A estimativa de tendência de acréscimo linear da intensidade do El Niño foi de, aproximadamente, 0,2 ºC/década, significante a 90% de confiança. Os autores concluem que a tendência de aquecimento da região do Niño 4 (que representa a região do El Niño CP) é, principalmente, consequência dos mais intensos e frequentes eventos de El Niño CP. Conforme esses autores, o conhecimento de mudanças no comportamento do El Niño no Pacífico, é importante para o entendimento e previsão do fenômeno, bem como seus impactos.

Conforme Timmermann *et al*. (2018), que escreveram sobre a complexidade do ENOS, estudos sugerem que a diversidade do ENOS, pode ser causada por fenômenos climáticos fora do Pacífico equatorial. Por exemplo, as anomalias de ventos de oeste no Pacífico equatorial oeste, tende favorecer a existência de El Niño CP, ao passo que anomalias de vento de oeste, na região central-leste do Pacífico, favorece a ocorrência de El Niño EP. Como essas influências externas podem preceder o pico de um El Niño por 2-3 períodos sazonais, podem prover adicional previsibilidade, de uma relação característica espacial de um emergente El Niño.

McPhaden *et al.* (2011), examinaram a ocorrência dos dois tipos de El Niño, numa série de 1980-2010. Concluíram que, estatisticamente, o período de 1980-1999 foi caracterizado por predominância de El Niño EP e o período de 2000-2010 por El Niño CP. Também afirmaram que a comparação com as duas últimas décadas do século XX, os ventos alísios foram mais intensos, a Termoclina foi mais profunda no oeste e mais rasa no leste; e a TSM foi ligeiramente mais fria

no leste a mais quente no oeste, durante a primeira década do século XXI.

Também, Yeh *et al.* (2009), que avaliaram uma série longa (1854-2007), mostraram que o El Niño Canônico tem sido menos frequente e que um El Niño, de características diferentes, tem sido mais frequente desde o final do século XX. Ele difere do El Niño Canônico (EP) pela localização da anomalia máxima de TSM e, também, nas suas teleconexões tropical e de latitudes médias.

Freund *et al.* (2019), identificaram o comportamento temporal e espacial da TSM, que distingue a evolução de eventos El Niño no Pacífico leste (EP) e no Pacífico central (CP), utilizando uma rede de registros de corais (paleoclimáticos) e dados observados. Fizeram uma reconstrução da atividade de El Niño de quatro séculos. Conforme os resultados desses autores, simultâneo aumento de eventos CP e decréscimo de eventos EP tem ocorrido, desde o final do século XX. Confirmam que os dois tipos de El Niño (CP e EP) diferem em seus impactos, na localização e intensidade das anomalias de temperatura e precipitação pluvial, globalmente.

Algumas possíveis causas, desse aquecimento do Pacífico central, têm sido levantadas, como a variabilidade decadal e multidecadal do clima (Lee & McPhaden, 2010) ou a mudança provocada pela forçante dos GEE antrópicos (Yeh *et a*l., 2009). Segundo Cai *et al.* (2020), isso é devido à variabilidade interdecadal do clima.

Viegas *et al.* (2019), usaram dados observados e três modelos para uma caracterização dos tipos de El Niño e seus impactos na América do Sul, para o período 1901-2005. Abordam-se aqui, por maior interesse, apenas os dados observados sobre tipos de El Niño, anomalias de TSM do Pacífico equatorial (ATSM) e precipitação pluvial.

Em relação aos tipos de El Niño, os autores classificaram, no período, 10 El Niño tipo EP e 14 El Niño tipo CP (Tabela 3), mostrando um maior número de eventos no Pacífico central. Isso está de acordo com o trabalho de Lee & McPhaden (2010), que observaram a tendência de aumento do El Niño CP.

Os autores usaram padrões sazonais, em trimestres móveis, para suas análises, desde JJA(0) até MAM(+1). E usaram o El Niño oceânico (ONI, em inglês).

Referente à Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (ATSM), os padrões sazonais observados de ATSM associados ao El Niño EP, foi verificado que já em JJA(0) ocorreram ATSM positivas próximo à costa da América do Sul. Em D(0)JF(+1), estabeleceu-se a fase madura do evento EP, com ATSM mais intensas.

Em relação ao El Niño CP, as ATSM positivas configuraram-se no oeste do Pacífico equatorial, também, em JJA(0). O aquecimento anômalo sobre a região central do Pacífico em D(0)JF(+1), caracterizou o El Niño Modoki, segundo Ashok *et al.* (2007).

Com a precipitação pluvial e dados observados, foi confirmado o conhecido efeito associado ao El Niño na precipitação pluvial da América do Sul e do Brasil, ou seja, ano-

Tabela 3. Eventos de El Niño do Pacífico leste (EP) e do Pacífico central (CP) observados, no período 1901-2005 (Viegas *et al*., 2019).

El Niño EP	El Niño CP
1905-1906; 1911-1912	1902-1903; 1904-1905
1918-1919; 1930-1931	1914-1915; 1923-1924
1939-1940; 1972-1973	1940-1941; 1941-1942
1976-1977; 1982-1983	1957-1958; 1963-1964
1986-1987; 1997-1998	1965-1966; 1968-1969
	1991-1992; 1994-1995
	2002-2003; 2004-2005

malias negativas da precipitação pluvial no Norte e Nordeste e anomalias positivas no Sudeste da América do Sul.

Para o El Niño EP e o trimestre D(0) JF(+1), fortes anomalias negativas de precipitação pluvial, caracterizaram-se na parte central do Norte e Nordeste da América do Sul e fortes anomalias positivas de precipitação pluvial, caracterizaram-se no SAS.

Para o El Niño CP e o trimestre D(0) JF(+1), intensas anomalias negativas caracterizaram-se na região central e norte da América do Sul e positivas sobre o sul do Brasil e Uruguai.

Brito (2011) estudou os impactos do El Niño Canônico e El Niño Modoki na circulação atmosférica e na precipitação pluvial da América do Sul, através de modelos e dados observacionais do período de janeiro de 1979 a julho de 2008. Concluiu que, de fato, o El Niño Modoki é um mecanismo distinto do El Niño Canônico, pela posição longitudinal (Pacífico central) do máximo aquecimento, pela circulação oceano-atmosfera e pelas distintas teleconexões na precipitação pluvial da América do Sul. O autor conclui, com base em seus resultados, que o sinal do El Niño Modoki explica uma importante porção da variabilidade da precipitação pluvial da América do Sul, através das estações do ano. Ele mostra muitos contrastes dos impactos das anomalias da variabilidade da precipitação pluvial do El Niño Modoki em relação ao El Niño Canônico, tanto nas regiões tropicais como nas subtropicais.

A Figura 32, à esquerda, ilustra esquematicamente, o que acontece, no outono austral, no El Niño Canônico e no El Niño Modoki. No El Niño Canônico (parte superior da Figura, à esquerda), como reportado, há tempo, a circulação de Walker perturbada e deslocada para leste, faz subsidência sobre a região tropical do continente, inibindo a convecção associada à ZCIT e determinando anomalia negativa da precipitação nos trópicos. Em adição, um forte Jato de Baixos Níveis (JBN) (seta verde) transporta umidade da região tropical para o Sudeste da América do Sul (SAS), contribuindo com o aumento da precipitação pluvial nessa região. Esse JBN, apesar de não ser o único mecanismo que determina precipitações pluviais acima da média no SAS, em anos de El Niño, também foi relatado, entre outros, por Pereira *et al.* (2017), que estudaram o muito forte El Niño de 2015-2016, na primavera austral.

No El Niño Modoki (parte inferior da Figura 32, à esquerda), com deslocamento do máximo aquecimento para o Pacífico central, aparece um ramo subsidente da Célula de Walker no Pacífico leste, que facilita a migração sazonal da ZCIT, que com o reforço das condições do gradiente TSM do Atlântico (frio no norte e quente no sul), proporciona anomalias positivas de precipitação pluvial. E, conforme o autor, aparece um anticiclone (preto) anômalo no Atlântico, junto à costa subtropical da AS, como consequência de uma propagação semelhante uma onda, emanada do Pacífico central que interage com um, também, anômalo ciclone no interior do continente (verde), resultando em divergência e anomalias negativas da precipitação pluvial no SAS.

À direita da Figura 32, a precipitação pluvial observada no caso do evento El Niño Canônico (a) e do El Niño Modoki (b), também para o outono austral (MAM). Observa-se o sinal contrário, na precipitação pluvial, dos dois tipos de El Niño, nas Regiões Norte-Nordeste e na Região Sudeste da AS.

Na Figura 33, o caso do verão austral (DJF), de interesse especial do SAS. Observa-se o efeito, bem conhecido, do El Niño Canônico na AS, com forte anomalia negativa

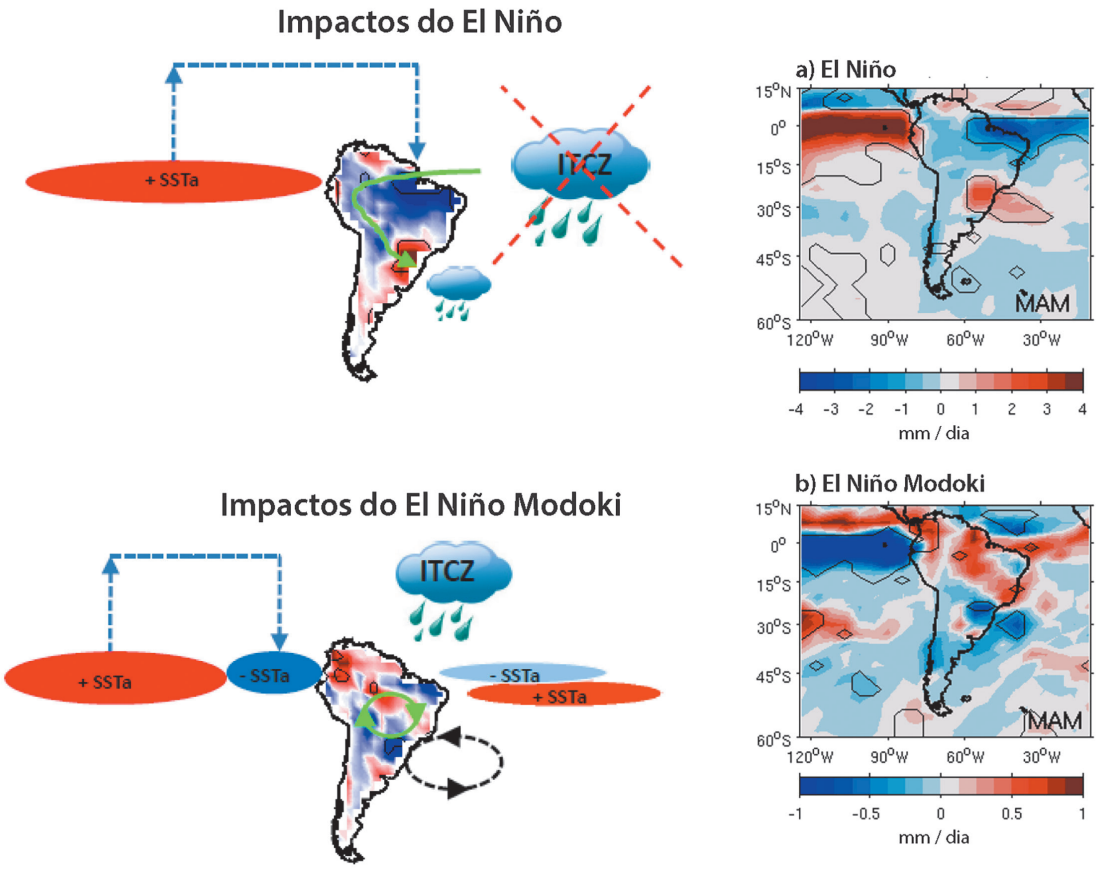


Figura 32. À esquerda, uma representação esquemática dos efeitos associados ao El Niño Canônico (acima) e ao El Niño Modoki (abaixo) na circulação do oceano e da atmosfera, no outono austral, da América do Sul. À direta a) precipitação pluvial observada em El Niño Canônico e b) em El Niño Modoki, no outono austral da AS. Fonte: Brito (2011). No continente, a cor vermelha indica anomalia positiva da precipitação pluvial e a cor azul indica anomalia negativa da precipitação pluvial.

sobre a bacia Amazônica, se estendendo ao Atlântico equatorial sobre a região da ZCIT e com anomalias positivas sobre o sul do Brasil.

As mais destacadas diferenças do El Niño Modoki, em relação ao Canônico, são encontradas nas regiões do SAS e da ZCAS, onde no SAS ocorre anomalia negativa da precipitação pluvial e na ZCAS ocorre anomalia positiva.

O El Niño do Pacífico central, de 2004-2005, determinou intensa estiagem no Rio Grande do Sul, levando à frustração da safra, em que o Estado perdeu 66% da produção de grãos prevista, num valor direto de 3,64 bilhões de reais (Fonte: Relatório sobre a estiagem de 2004-2005, feito pelo autor deste capítulo, a convite do COPAAERGS--Conselho Permanente de Agrometeorologia Aplicada do Rio Grande do Sul, vinculado à hoje Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação).

A situação dos oceanos Pacífico e Atlântico, no trimestre DJF, do ano 2004-2005, é mostrada na Figura 34. No Pacífico, a configuração é de um El Niño tipo Modoki,

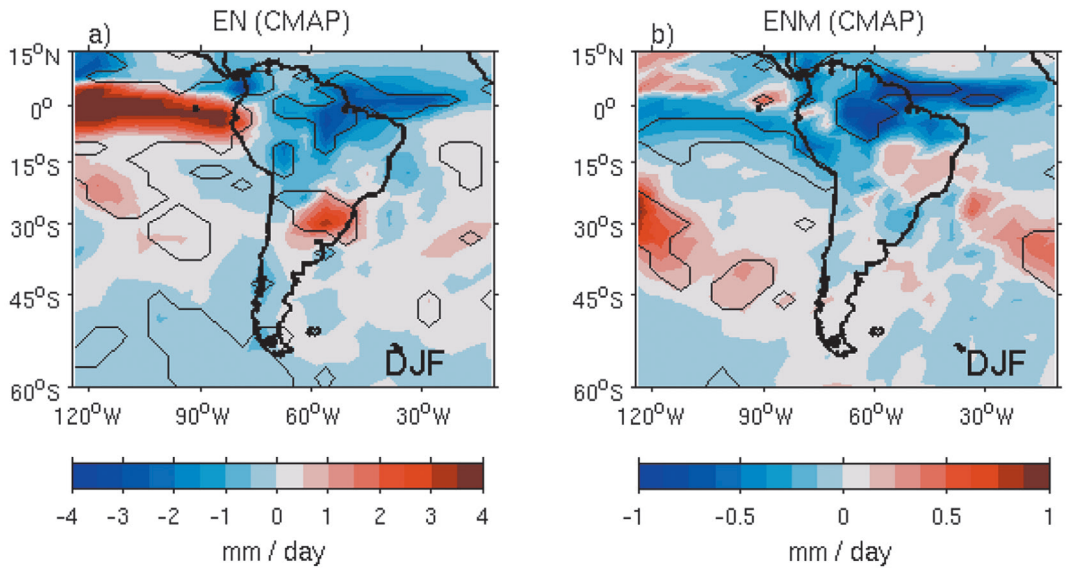


Figura 33. Efeitos associados ao El Niño Canônico (a) e ao El Niño Modoki (b), na precipitação pluvial observada (mm dia^{-1}), no verão austral (DJF). Adaptado de Brito (2011).

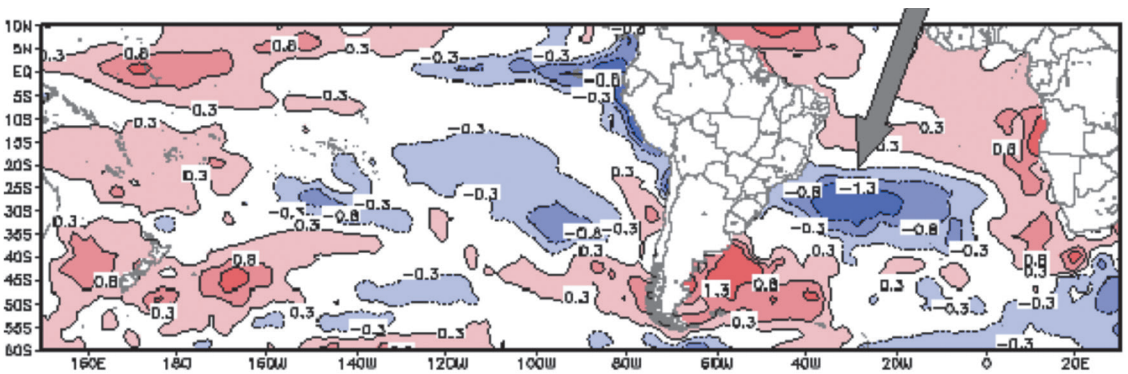


Figura 34. Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), no trimestre dezembro-2004 a fevereiro-2005. Fonte: CPMET/UFPel-8º DISME/INMET.

com aquecimento no Pacífico central (180) e águas com anomalias negativas à leste. À época do relatório mencionado, ainda não tinha aparecido esse "novo" tipo de El Niño. No Atlântico sul aparece uma área de águas frias junto à costa sul do Brasil, que podem ter contribuído para redução das precipitações pluviais no Estado. Marques (2005) encontrou correlações positivas e significativas entre TSM dessa região e precipitação pluvial da região sudeste do Rio Grande do Sul, para dezembro, janeiro e fevereiro.

A Figura 35, mostra a anomalia negativa de precipitação pluvial no Rio Grande do Sul, no período dezembro/2004 a fevereiro/2005 (El Niño CP 2004-2005). Note-se que, nesse período, o de maiores anomalias negativas de precipitação pluvial do ano, o déficit de precipitação pluvial foi de 200 a 250 mm, justamente na região maior produtora de grãos.

NOTA 5

Conforme Carvalho & Jones (2009), uma das características marcantes do clima tropical da América do Sul, no verão, é a presença de uma banda de nebulosidade e precipitação pluvial, com orientação noroeste-sudeste, desde a intensa convecção da Amazônia até o Sudeste do Brasil e o Atlântico subtropical. Ela é resultado da convergência de umidade nos baixos níveis da troposfera e divergência nos altos níveis, e foi chamada de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS--pronúncia zacas). A ZCAS é um componente importante do Sistema de Monções Sul-Americano. A ZCAS, normalmente, é dividida em três partes: a ZCAS Amazônica, a ZCAS Costeira e a ZCAS Oceânica. Sua extensão e intensidade, normalmente, são avaliadas pela emissão de radiação de ondas longas da superfície (OL↑), em imagens de satélites. Esse sistema meteorológico produz precipitações pluviais intensas no verão e, principalmente na Região Sudeste do Brasil, a de maior densidade populacional do País, podendo provocar eventos severos, com alagamentos e deslizamento de terras.

Segundo Carvalho & Jones (2009), a persistência da ZCAS parece que depende de vários fatores, de diversas escalas espaço-temporal. Um desses fatores, de escala de tempo interanual, é o El Niño Oscilação Sul (ENOS). A fase quente do ENOS (El Niño), pode favorecer a persistência da ZCAS oceânica por mais de quatro dias, em oposição à fase fria (La Niña) e fase neutra. Segundo Carvalho et al. (2004), considerando seis anos em cada fase de ENOS, o número de persistência da ZCAS oceânica (≥ 4 dias), no caso de El Niño, foi o dobro que nos casos de La Niña e neutro. Também, Rodrigues (2012), em estudo observacional e numérico de dois casos de ZCAS (de 02-06 de dezembro de 2009 - El Niño e de 27-31 de dezembro de 2010 - La Niña), concluiu que em eventos de El Niño, a ZCAS fica mais intensa e estende-se bem mais em direção ao oceano, ao passo que em eventos La Niña a ZCAS fica menos intensa e situa-se mais ao sul da sua posição climatológica, além de ter fraca configuração sobre o oceano, comparada com a configuração sobre o continente.

Gandu & Silva Dias (1998), usando modelo numérico, mostraram que quando a ZCAS está intensa, um ramo faz subsidência sobre o sul do Brasil e Argentina, inibindo a precipitação pluvial nessa região. E Barros et al. (2000) mostraram que, ressalvadas outras forçantes, a variabilidade interanual da precipitação pluvial, durante o verão (principalmente janeiro), no SAS, está relacionada com a intensidade e posição da ZCAS, bem como com a TSM do vizinho Oceano Atlântico. Em relação à posição da ZCAS, esses autores mostraram que aumento da precipitação pluvial nessa região acontece quando a ZCAS é fraca e deslocada para o Sul.

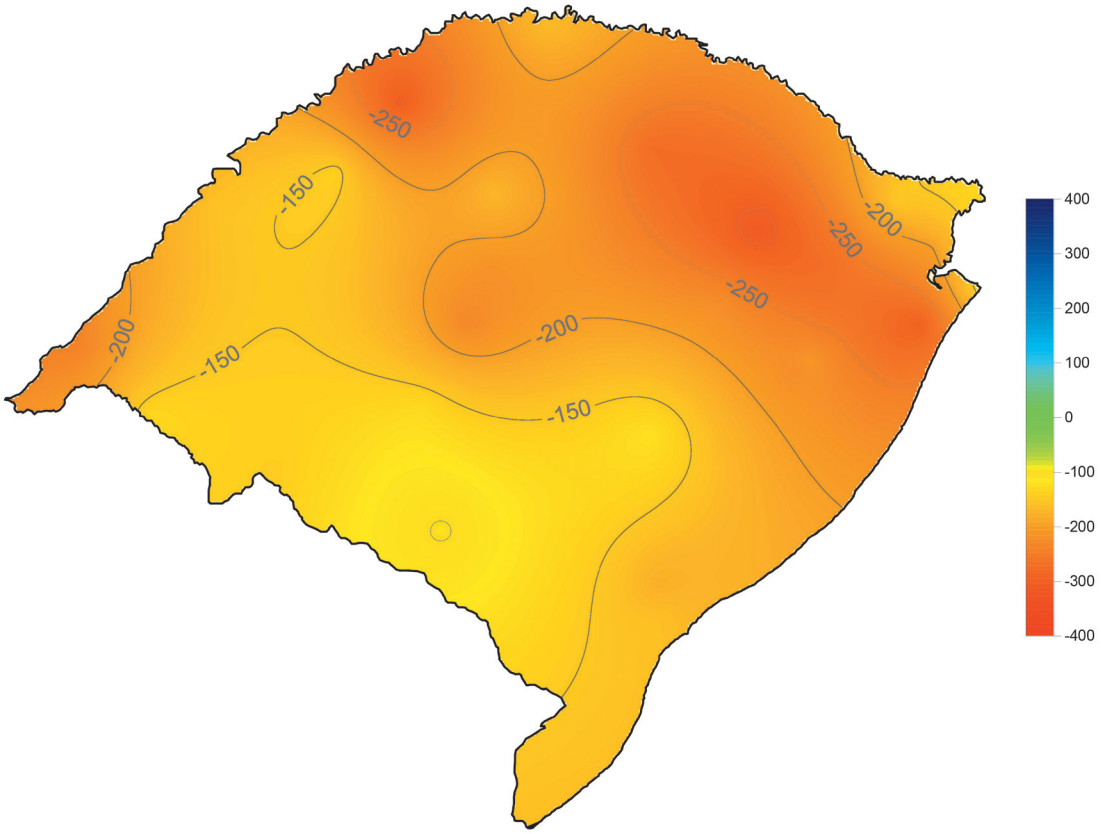


Figura 35. Anomalias de precipitação pluvial de dezembro-2004 a fevereiro-2005 (mm), no Rio Grande do Sul (El Niño CP 2004-2005). Fonte: FEPAGRO/RS. Data de acesso: maio de 2005.

O trimestre DJF, é crítico em relação à disponibilidade de água para as culturas produtoras de grãos, não irrigadas, como a soja e o milho, as duas maiores culturas do Estado.

Em verdade, um El Niño muito "seco", como no verão de 2004-2005, foi um evento inédito no estado do Rio Grande do Sul, pelo menos desde os registros desse fenômeno.

O fenômeno El Niño tem suas raízes históricas na costa do Peru e Equador, e, por muitos anos, foi conhecido como um fenômeno local, que causava grandes impactos naquele ecossistema costeiro, e por isso foi denominado de El Niño Costeiro. O El Niño Costeiro é um aquecimento intenso junto às costas do Peru e Equador, que lembra a descrição dos primórdios do fenômeno na literatura científica, apresentada pelo Dr. Luis Carranza na Sociedade de Geografia de Lima, em 1891, como visto pelos pescadores que lhes deram o nome: uma corrente quente vinda do norte, chamada de "corrente do El Niño", que, em alguns anos, era mais forte e provocava grandes impactos ao ecossistema costeiro.

Um tipo característico de El Niño Costeiro ocorreu em 1925, descrito, recentemente, por Takahashi & Martínez (2019). Segundo esses autores, 1925 foi o terceiro mais forte El Niño do século XX, no extremo leste do Pacífico, conforme seus impactos, com

intensas precipitações pluviais e inundações na costa norte do Peru e Equador, de fevereiro a abril de 1925. Em contraste com os muito fortes eventos de El Niño de 1982-1983 e 1997-1998, o El Niño Costeiro de 1925 foi caracterizado por condições muito quentes na costa da AS (Peru e Equador) e condições normais no resto Pacífico equatorial.

Em 2017, segundo os comunicados oficiais do ENFEN (*Estudio Nacional del Fenómeno El Niño*), um Comitê Multisetorial do Peru, ocorreu um El Niño Costeiro, com grandes impactos econômicos e sociais. Eles usam a região do Niño 1+2, que abrange a zona norte do mar peruano, para monitoramento de um El Niño Costeiro. Um evento é declarado, quando a anomalia da TSM mensal dessa região é > 0,4ºC, por, no mínimo, três meses consecutivos. O El Niño Costeiro de 2017, provocou um dos maiores desastres naturais da costa norte do Peru e da costa sul de Equador, espalhando destruição, fome e morte. Vinte e quatro dos vinte e cinco Departamentos do Peru foram atingidos por chuvas torrenciais durante três meses (fevereiro-março-abril/2017), pelo aquecimento anormal das águas das costas peruanas e o enfraquecimento inusual dos ventos alísios. Os impactos desse El Niño atingiram 1,1 milhão de pessoas, com o total de 162 mortes. Cerca de um terço (315.000) dos atingidos, só no Departamento de Piura. Quase 5 mil quilômetros de rodovias danificadas, 489 pontes destruídas, 372.020 casas danificadas, 27.635 casas totalmente destruídas, 2.150 escolas danificadas, 726 postos de saúde danificados, com um prejuízo econômico de 3,9 bilhões de dólares (Fonte: *https://www.zurich.com/en/corporate-responsibility/flood-resilience/learning-from-post-flood-events*).

A Figura 36 mostra as anomalias de TSM, junto da costa oeste da América do sul, do El Niño Costeiro de 2017.

Capotondi *et al.* (2015), reportaram os avanços do entendimento da diversidade do ENOS, discutidos no *Workshop* que teve lugar em *Boulder, Colorado*, em fevereiro de 2013. Conforme essa revisão, os eventos de ENOS diferem em amplitude, evolução temporal e comportamento espacial. Segundo Capotondi *et al.* (2015), significantes pesquisas têm sido conduzidas para identificar, descrever, entender e simular esses tipos de El Niño.

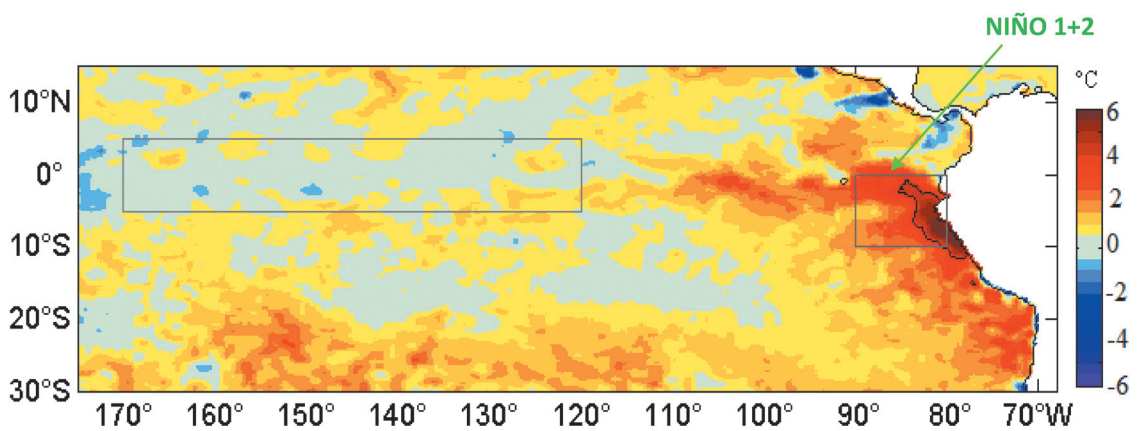


Figura 36. Anomalias de TSM (ºC), de 19 de março de 2017 (máxima intensidade), mostrando o aquecimento nas costas do Peru e Equador, região do Niño 1+2, por ocasião do El Niño Costeiro de 2017. Fonte: Salva & Guevara (2018).

Segundo esses autores, a maneira comum de salientar a diversidade do ENOS é contrastar as anomalias de temperaturas no pico dos eventos. Eles apresentaram um gráfico esquemático e didático, com a distribuição dos eventos de máxima anomalia de TSM, tanto positivas, como negativas, no plano longitude-intensidade (Figura 37, esquerda). Como se verifica, tanto os eventos quentes como os eventos frios, ocorrem numa ampla gama de longitudes, que podem ter diferentes intensidades, diferentes evoluções, diferentes teleconexões e impactos. Os autores descrevem dois eventos de ENOS EP e dois eventos de ENOS CP, no pico das anomalias de TSM (Figura 37, direita).

O El Niño de 1997-1998, teve seu pico de anomalia máxima da TSM na costa oeste

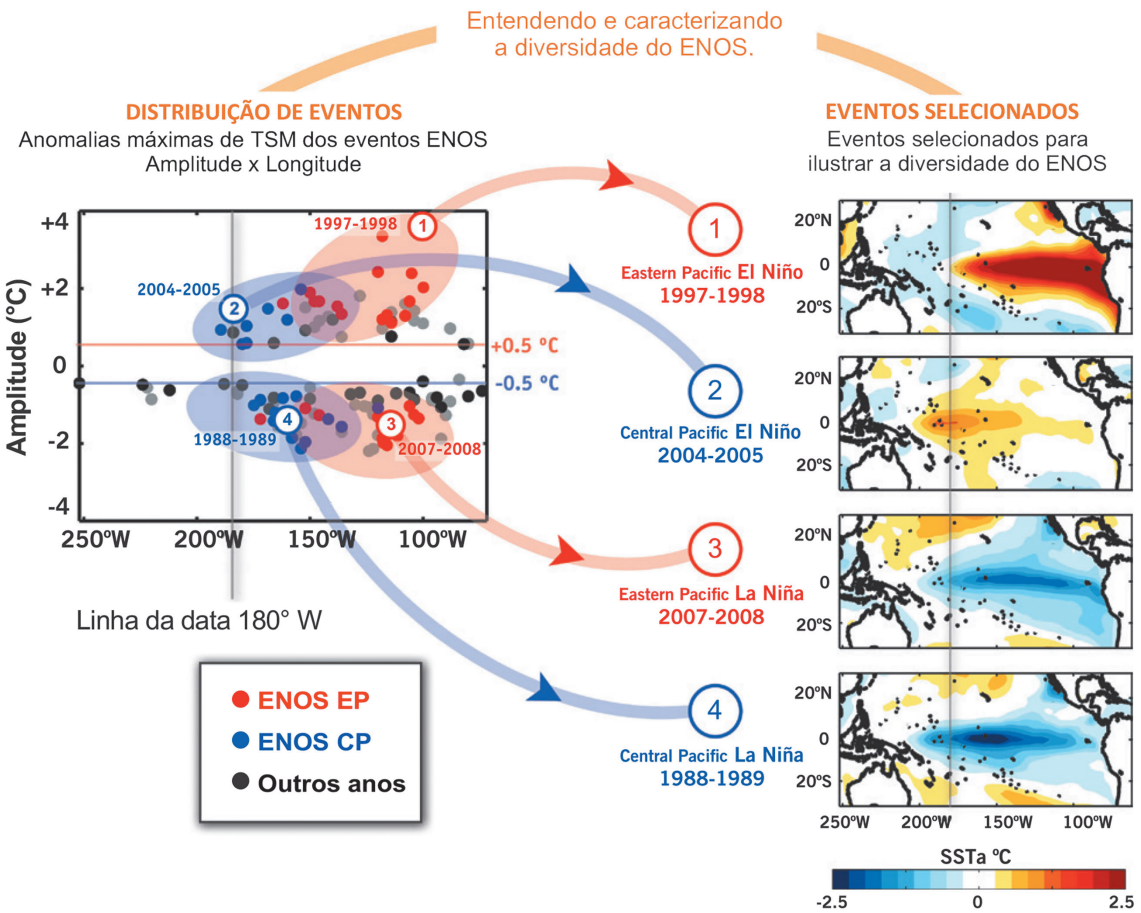


Figura 37. Ilustração esquemática da diversidade de ENOS. (Esquerda): Distribuição das anomalias máximas (positivas ou negativas) de TSM de NDJ, no plano longitude-amplitude. As anomalias do período 1900-2013, são em relação à climatologia de 1945-2013. Cada ponto representa os valores máximos, positivos ou negativos da TSM de NDJ. Os eventos antes de 1945 são os de cor cinza. Eventos após 1945 são os eventos EP (vermelho) e os eventos CP (azul). (Direita): representado o comportamento espacial das anomalias de dois eventos quentes e dois eventos frios, no intervalo de -2,5 a 2,5 ºC (barras de cores abaixo). Fonte: Capotondi *et al.* (2015).

da América do Sul, se estendendo para oeste ao longo do equador, com decréscimo de amplitude, um comportamento similar ao El Niño Canônico, descrito, pioneiramente, por Rassmusson & Carpenter (1982). No El Niño de 2004-2005, por outro lado, as anomalias positivas máximas de TSM foram significativamente mais fracas, mas com um pico perto da Linha da Data (180º), sem aquecimento significante no leste do Pacífico.

Os eventos de La Niña, tiveram desenvolvimento até mais a oeste que os eventos de El Niño e mostram sutil diferença de comportamento espacial. Segundo Capotondi *et al.* (2015), por essa razão, maior ênfase nas pesquisas de diversidade do ENOS tem sido dada aos eventos quentes.

Segundo Guan & McPhaden (2016), os esforços da pesquisa têm sido concentrados no exame das diferenças entre El Niño EP e CP, em termos dinâmicos e termodinâmicos. É de fundamental importância esclarecer por que essas mudanças do ciclo de ENOS têm ocorrido e quais os processos responsáveis, pela implicação dessas mudanças na previsibilidade e previsão do ENOS.

Em teleconexão e impactos, Capotondi *et al.* (2015), descreveram várias regiões fora dos trópicos em que o El Niño CP, ou do Pacífico central, apresenta efeitos contrários aos do El Niño Canônico ou El Niño EP, na precipitação pluvial e temperatura.

Relata-se, duas teleconexões e impactos em que o El Niño CP apresenta efeitos contrários em relação ao El Niño EP, na região tropical, pelo significado econômico e social. No Atlântico norte, é sabido que o El Niño (EP) reduz a atividade dos ciclones tropicais e La Niña aumenta. Conforme revisão de Capotondi *et al.* (2015), o aquecimento do Pacífico central (El Niño CP), tem sido associado com mudança na trajetória e aumento da frequência de ciclones tropicais do Atlântico norte, aumentando a probabilidade de penetração no continente ao longo do Golfo do México e América Central, embora em alguns anos de El Niño tenha havido aumento de uma região de águas quentes (denominada *Atlantic Warm Pool* - AWP), ficando dúvidas sobre qual dos dois fenômenos tem sido a causa da atividade dos ciclones tropicais.

Outro impacto contrário, acontece no Pacífico leste. Aqui, também se sabe, que durante eventos fortes de El Niño Canônico (EP), a ZCIT se desloca para o sul (e a ZCPS se desloca para o norte), resultando intensas precipitações pluviais no leste do Pacífico, que é normalmente seco, com enchentes catastróficas no norte do Peru e parte do Equador. Durante o El Niño CP, ao contrário, existem condições frias, produzindo secas no Peru e Equador, durante a estação chuvosa, com impactos destrutivos na agricultura da região.

Recente trabalho de revisão sobre ENOS e Clima da América do Sul, que contou com a participação de nada menos que 23 autores, com 193 trabalhos científicos revisados, Cai *et al.* (2020) apresentam, o estado-da-arte das pesquisas do El Niño Oscilação Sul e o clima da América do Sul. Afirmaram que a diversidade do ENOS afeta diretamente os impactos climáticos na América do Sul. O mecanismo responsável por essa diversidade do ENOS, segundo os autores, envolve vários processos atmosféricos e oceânicos, incluindo a ressurgência equatorial, que é mais ativa no El Niño EP, o deslocamento zonal da água quente acumulada no oeste do Pacífico, induzido pelo vento, que influi mais nas TSMs do El Niño CP e a resposta da convecção atmosférica à TSM, que explica a maior magnitude dos eventos de El Niño em relação aos eventos de La Niña.

Mostraram que a diversidade do ENOS

(CP e EP), pode ter profundas diferenças e, em alguns casos extremos, produzir anomalias opostas na precipitação pluvial. Citaram o exemplo do El Niño de 1997-1998 e o El Niño MIX de 2015-2016, já referidos. Os autores determinaram a diversidade do ENOS na América do Sul, tanto de El Niño como La Niña, ou sejam El Niño CP e EP e La Niña CP e EP.

Em relação à precipitação pluvial, conforme se observa na Figura 38 (que, também, mostra as anomalias de temperatura), o El Niño EP impõe impactos maiores, tanto positivos, como negativos, na precipitação pluvial da América do Sul, em todas as estações do ano, o que está de acordo com dados observados do período de 1901-2005, por Viegas *et al.* (2019). Na análise de Cai *et al.* (2020), também, é visível o conhecido dipolo norte-sul, da precipitação pluvial, no El Niño Canônico. Segundo esses últimos autores, no Sudeste da América do Sul (SAS), que inclui o sul do Brasil, no verão (DJF), o El Niño EP mostra anomalias positivas da precipitação pluvial três vezes maior que o El Niño CP. A causa é atribuída ao mais pronunciado deslocamento para leste da Célula de Walker, em eventos de El Niño EP. O El Niño CP, entretanto, mostra precipitações pluviais significativas, na primavera (SON) na região Sudeste da América do Sul (SAS), mas no verão (DJF) mostra fracas anomalias positivas e no outono (MAM) mostra anomalias negativas de precipitação pluvial do SAS, de acordo com os dados de Brito (2011), para o El Niño Modoki.

Ao contrário do El Niño, a La Niña CP, apresenta, em geral, maior impacto que a La Niña Canônica (La Niña EP), em todas as estações do ano. Por exemplo, a La Niña CP apresenta uma área relativamente maior e mais forte de impacto negativo, na precipitação pluvial, na primavera (SON) do SAS, que a La Niña Canônica (La Niña EP), embora não apresente impactos negativos nas outras estações do ano dessa região. Em MAM, a La Niña CP mostra uma área relativamente maior de anomalias positivas de precipitação pluvial, na Amazônia e parte do Nordeste, que a La Niña EP.

Quanto à temperatura, em geral, os eventos de El Niño (EP e CP) mostram anomalias positivas (isolinhas vermelhas) e os eventos de La Niña (EP e CP) mostram anomalias negativas (isolinhas azuis).

Cai *et al.* (2020), confirmam que o El Niño CP tem sido mais frequente que o El Niño EP, nas recentes décadas e atribuem esse fato à variabilidade interdecadal natural do clima. O aumento da frequência do El Niño CP tem sido mostrado por diferentes autores, já abordados neste texto (Ashok *et al.*, 2007; Kao & Yu, 2009; Yeh *et al.*, 2009; Lee & McPhaden, 2010; McPhaden *et al.*, 2011; Freund *et al.*, 2019; Viegas *et al.*,2019, entre outros), embora, sobre a causa ou causas, não há unanimidade.

Cai *et al.* (2020), afirmam, também, que o impacto do ENOS na América do Sul é modulado por múltiplos fatores, incluindo a diversidade do próprio ENOS e outros mecanismos de variabilidade climática, dentro e fora do Pacífico, como a interação interbacias oceânicas e o aquecimento global (que embora existam incertezas, há projeções de intensificação dos seus impactos na AS), que fazem a previsão sazonal do ENOS, ainda um desafio. Sobre a previsibilidade do ENOS, informam que ela tem diminuído (menor 'Skill") nos anos 2000, sendo uma possível causa o aumento do El Niño CP.

Os autores sugerem que, para um melhor entendimento do ENOS e sua previsão, devem ser estendidos os estudos paleoclimáticos, devem ser melhoradas as simulações da diversidade do fenômeno e suas telecone-

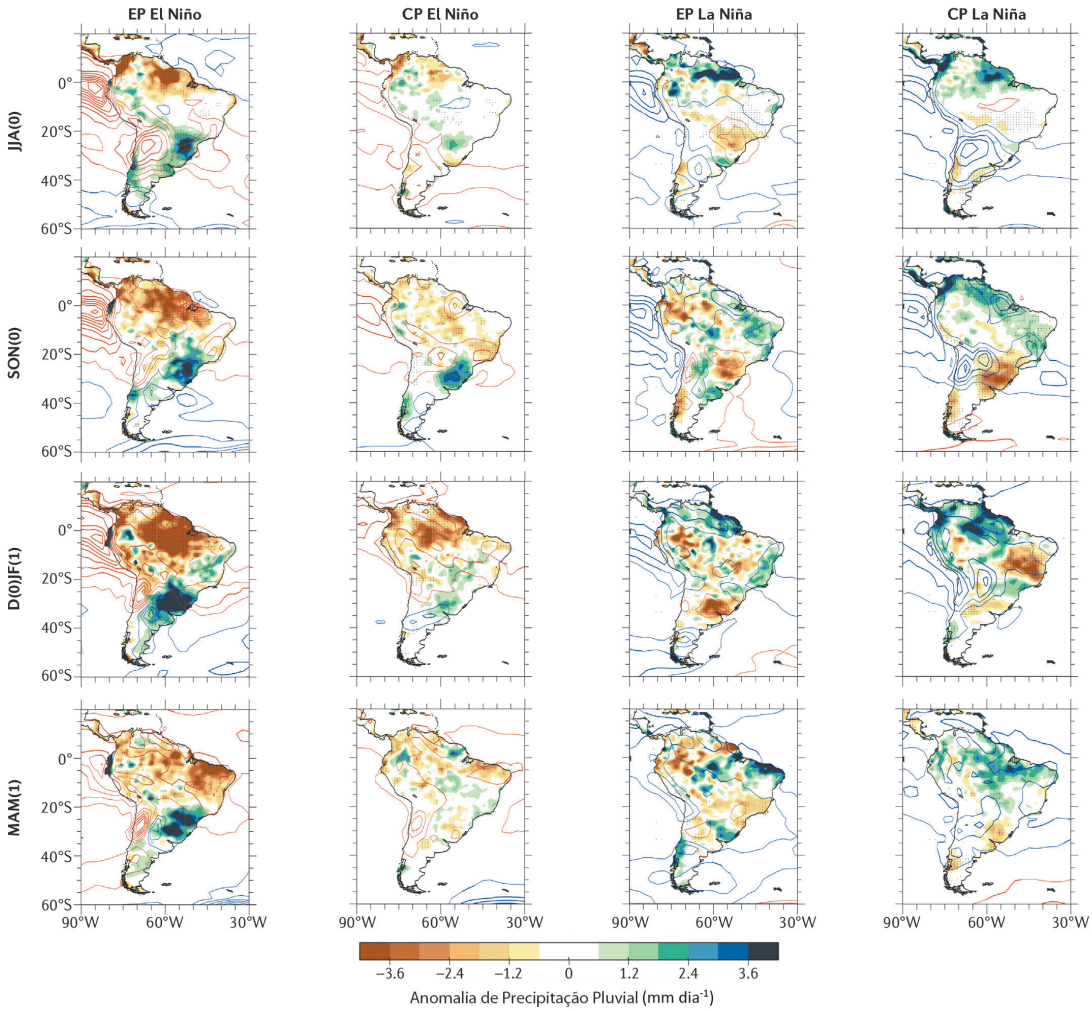


Figura 38. Impactos do El Niño EP, do El Niño CP, da La Niña EP e da La Niña CP, na precipitação pluvial e temperatura da América do Sul, nas quatro estações do ano (Cai *et al*., 2020). As áreas coloridas têm significância estatística de 90%. As isolinhas representam as anomalias de temperatura, positivas (vermelhas) e negativas (azuis), com intervalos de 0,2 ºC. As anomalias são referentes ao período 1948-2016.

xões (principalmente pelo fato que o ENOS CP, em várias regiões, apresenta impactos contrários do ENOS Canônico). Na América do Sul, deve ser melhor entendida a interação Pacífico-Atlântico. E, de modo geral, devem ser corrigidos os erros sistemáticos dos modelos. Também, enfatizam que, dados os impactos econômicos e sociais, nesse continente de 420 milhões de habitantes, estudos mais aprofundados do ENOS e sua previsão, são altamente necessários.

Rede de observação do Oceano Pacífico para estudo do El Niño e La Niña

O El Niño de 1982-1983, surpreendeu os meteorologistas e oceanógrafos, bem como a sociedade em geral, por sua intensidade e pelos seus efeitos catastróficos. Segundo Ackerman & Knox (2007), dos cinco maiores eventos de El Niño, desde o final do século XIX e todo o século XX (1877-1878, 1899-1900, 1972-1973, 1982-1983, 1997-1998), o El

Niño de 1982-1983 foi o que atingiu maior número de regiões em todo o mundo, com secas e enchentes extremas. E não foi previsto e nem detectado, até próximo de seu pico.

Philander (1990), no Prefácio de seu excelente livro "El Niño, La Niña and the Southern Oscillation", conta um interessante fato sobre esse El Niño: quando um grupo de cientistas reunidos em Princeton, New Jersey, em outubro de 1982, para discutir um plano de um programa para estudar o El Niño, nenhum deles estava informado do muito severo evento que estava ocorrendo, naquele momento.

A não previsão e detecção desse fenômeno, despertaram, na comunidade científica, a urgente necessidade de montar no Oceano Pacífico uma rede de monitoramento, capaz de permitir um melhor conhecimento da física do ENOS e a perspectiva de sua previsão. Sob os auspícios do WCRP (*World Climate Research Programme*), foi criado o Projeto, que ficou conhecido pela sigla em inglês TOGA (*Tropical Ocean Global Atmosphere*).

Segundo McPhaden *et al.* (2010), que escreveram uma retrospectiva do TOGA, o Projeto foi um esforço internacional de pesquisa climática que durou 10 anos (1985 a 1994). O primeiro foco do TOGA foi instrumentar o Pacífico para estudar a variabilidade interanual do sistema acoplado oceano-atmosfera associada ao ENOS. Antes do TOGA, o entendimento dos processos físicos responsáveis pelo ciclo do ENOS era limitado e não existia a capacidade de previsão. Segundo McPhaden *et al.* (1998), que descreveram essa rede de monitoramento, nos seus 10 anos ininterruptos de funcionamento, os dados obtidos no Pacífico permitiram avanços do conhecimento da física do ENOS e o desenvolvimento de Modelos Acoplados oceano-atmosfera, de várias complexidades, para sua previsão. Os conhecimentos da física do fenômeno ENOS foram tão grandes que certos pesquisadores passaram a chamar esse período de dez anos de observação do Pacífico de a "era TOGA". Isso permitiu que o El Niño de 1997-1998, tido como o evento recorde em intensidade, do século XX, apesar de não ter sido previsto corretamente, fosse muito bem documentado. O El Niño de 1997-1998, serviu para mostrar os benefícios científicos do sistema de observação do Pacífico, na detecção, monitoramento e melhor entendimento do ENOS. O Projeto TOGA foi continuado pelo Projeto TAO (*Tropical Atmosphere Ocean*) e a partir de 2000, seguido pelo Projeto TAO/TRITON (TRITON, de *TRIangle Trans-Ocean Buoy Network*), com uma rede de boias fixas e mantido pelos EUA e Japão. Essas boias, ancoradas no fundo do mar, são do tipo ATLAS (*Autonomous Temperature Line Acquisition System*), construídas pela NOAA/PMEL e seus dados são transmitidos em tempo quase real.

As principais observações são: radiação de ondas longas, radiação de ondas curtas, precipitação pluvial, umidade relativa, pressão, temperatura da superfície, temperaturas subsuperficiais em 10 profundidades do oceano, até 500 metros, correntes oceânicas, direção e velocidade dos ventos e salinidade, dados esses transmitidos por satélite.

Completando essa rede, os satélites coletam informação do espaço, com cobertura quase global. Incluída nas observações e medidas por satélite está a missão do satélite TOPEX/Poseidon (EUA/França), o primeiro a medir a "topografia" ou "relevo" do oceano por altimetria de satélite, que segundo a NASA, é uma poderosa tecnologia, que permite tomar o "pulso" dos oceanos.

As Figuras 39 e 40, mostram a estrutura dessa rede.

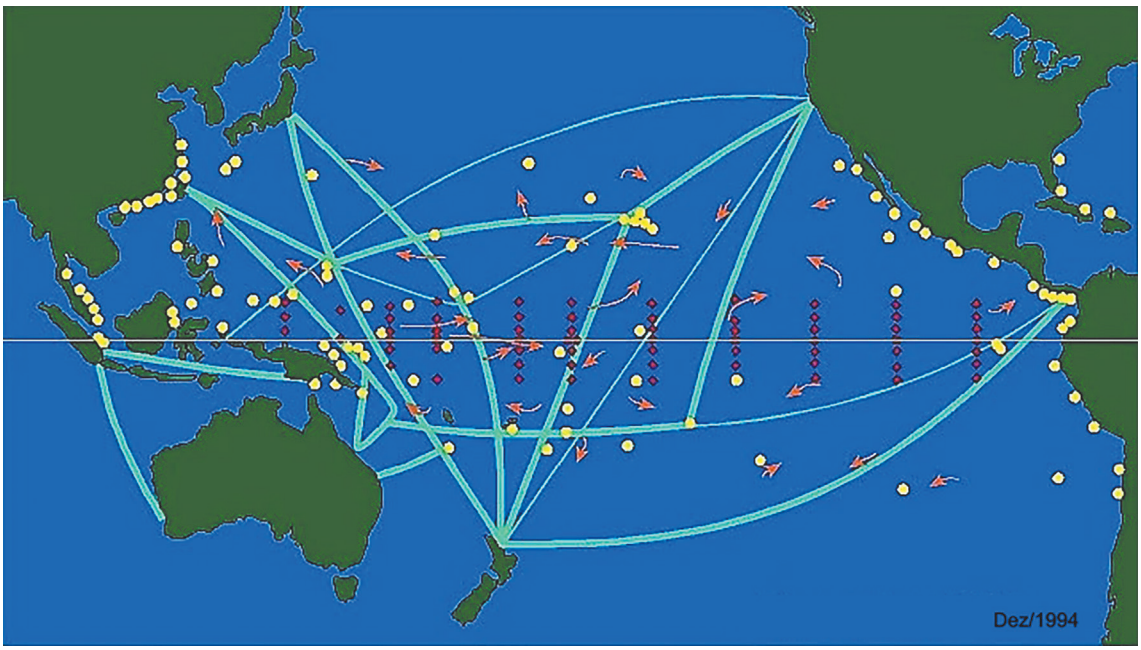


Figura 39. Rede TOGA de Observação no Pacífico para estudo e previsão do ENOS (McPhaden *et al*., 1998). Os principais componentes desse sistema são: programa de navios voluntários (linhas azuis), medidores do nível do mar nas ilhas e costa (círculos amarelos), boias à deriva (setas laranjas curvas) e o conjunto TAO de boias ancoradas (losangos e quadrados vermelhos).

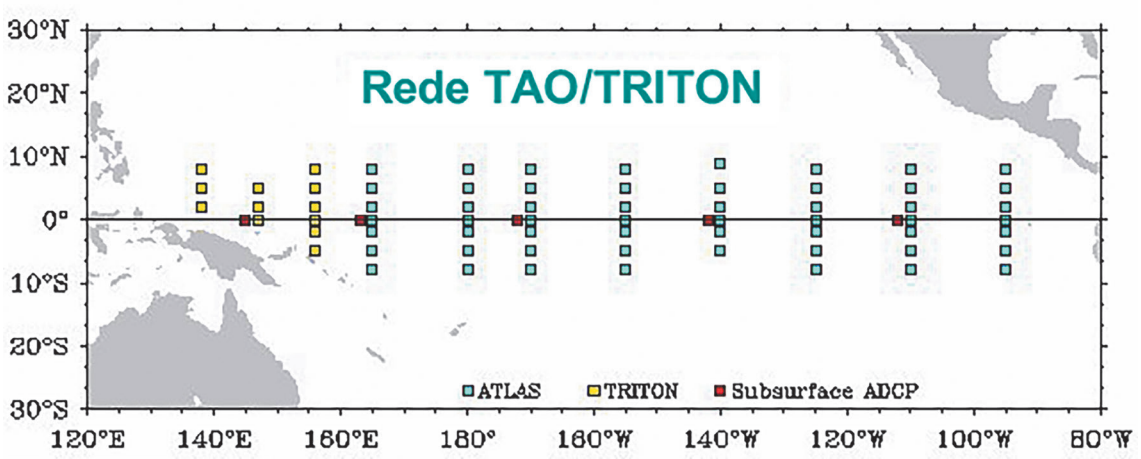


Figura 40. Detalhe da Rede TAO/TRITON do Pacífico. Fonte: *(http://www.pmel.noaa.gov/gtmba/taotriton.map*). Data de acesso: novembro de 2019.

Entretanto, entre 2012-2014, a rede TAO/TRITON começou a ter problemas, como a deterioração de grande quantidade das boias fixas (repostas, em parte, só no final de 2014). Isso mostrou o risco do sistema, para as pesquisas no Pacífico tropical e as previsões do ENOS.

Em vista disso, em 2014, em um "workshop", foi decidido a criação de um ambicioso Projeto Internacional de observação

e pesquisa no Pacífico. Esse Projeto passou a ser conhecido como TPOS 2020 (*Tropical Pacific Observing System*-2020), com marco de tempo para sua completa estruturação até 2020. Esse projeto foi ancorado no GOOS (*Global Ocean Observing System*).

A principal inovação incorporada à rede de observação do Oceano Pacífico são as boias do Projeto ARGO (*Array for Realtime Geostrophic Oceanography*). O ARGO é um Projeto Internacional, criado em 1999, num consórcio de 26 países, para coleta de informação de todos os oceanos do mundo. Essas "boias inteligentes" lançadas ao mar afundam até uma profundidade pré-programada (de até 2.000 m), e retornam à superfície, medindo os perfis de temperatura e salinidade da água. Na superfície os dados são transmitidos para os satélites. E as boias voltam a se aprofundar, para novas medidas. A Figura 41 mostra um exemplo desse sistema.

Novas tecnologias, com novos e mais sensíveis sensores, são constantemente incorporadas ao Sistema de Observação do Pacífico Tropical. Um exemplo é um veículo autônomo, denominado de "Saildrone". É o resultado de uma parceria dos cientistas da NOAA/PMEL (*National Oceanic and Atmosphere Administration/Pacific Marine Environmental Laboratory*) e uma indústria privada (*Saildrone* inc.). Os sensores levados a bordo desse veículo, não tripulado, fazem observações do oceano, abaixo e acima da superfície, como salinidade, CO_2, temperatura, veloci-

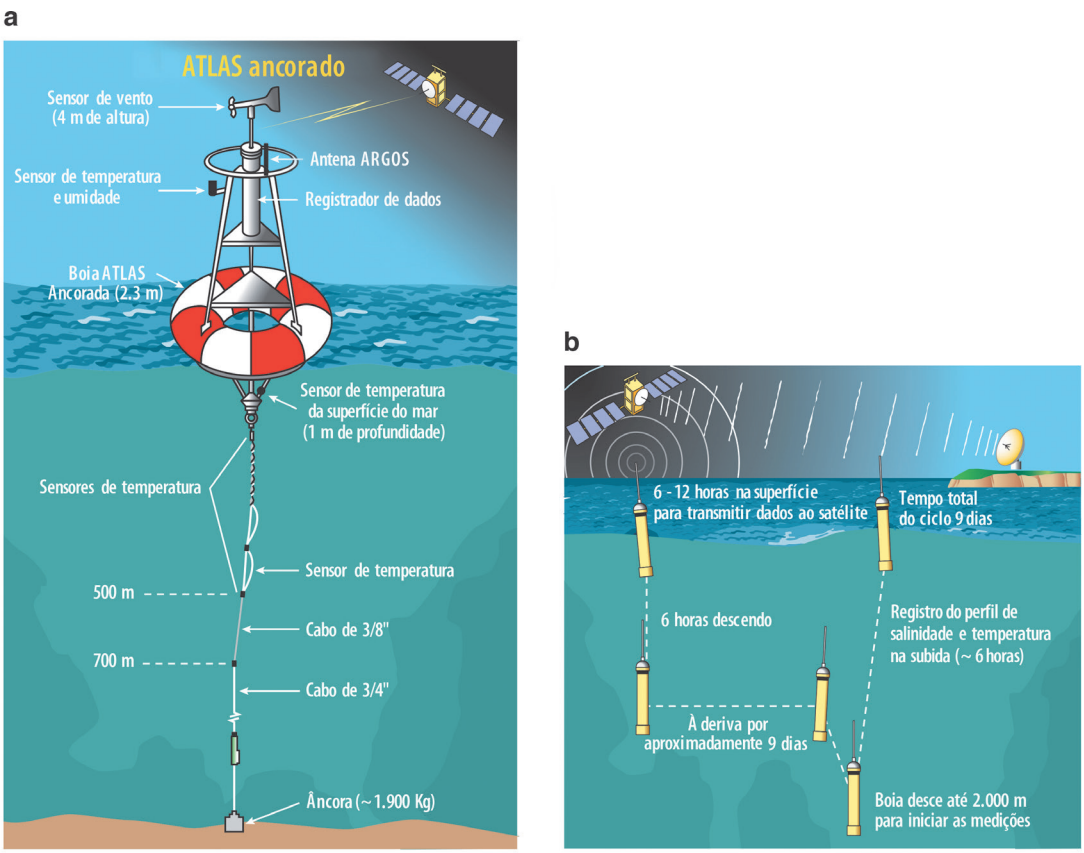


Figura 41. Ilustração das Boias ATLAS (a) e das Boias do Sistema ARGO (b). Fontes: (*www.pmel.noaa.gov*) e (*www.argo.ucsd.edu*), respectivamente. Data de acesso: março de 2020.

dade e direção dos ventos, pressão, umidade, altura das ondas e período, entre outras. Os dados são transmitidos aos satélites, em tempo real.

Em setembro de 2017, numa primeira missão, dois "Saildrone" partiram de um Porto da Califórnia, com destino à região equatorial do Pacífico, num esforço para melhorar o TPOS (*Tropical Pacific Observing System*) e depois de oito meses voltaram, com sucesso, ao Porto de partida, com seus instrumentos carregados de novas e inéditas observações das águas do mar e da atmosfera. Por exemplo, os cientistas da NOAA ficaram surpresos do quão abruptamente varia a temperatura do mar, em curtas distâncias. A Figura 42 mostra um dos "saildrone", de volta da missão no Pacífico.

Em setembro de 2021, um "saildrone", especialmente equipado, tomou medidas, inclusive fez um incrível vídeo, do furacão SAM, de categoria 4. Mediu rajadas de vento de mais de 222 km/hora e ondas de quase 20 m de altura (*noaa.gov/news-release*). Ainda, segundo a NOAA, medições de satélites e boias, mostraram que as medições do "saildrone" do furacão SAM foram corretas.

Um dos grandes desafios da previsão dos furacões, é prever sua rápida intensificação, que é quando a velocidade do vento



Figura 42. Exemplo de "Saildrone", que voltava de uma missão, de oito meses, no Pacífico equatorial. Fonte: *(pmel.noaa.gov/ocs)*. Data de acesso: junho 2020.

do furacão aumenta, pelo menos, 35 mph, em um período de 24 horas. Tormentas que se intensificam rapidamente podem causar extensos danos e perdas de vidas, sendo a observação em tempo real crucial para um melhor entendimento dos processos atmosféricos e oceânicos que levam à formação e intensificação desses furacões, disse John Cortinas, Diretor do Laboratório de Oceanografia e Meteorologia do Atlântico, da NOAA (Fonte: NOAA *Research News*, agosto de 2022). Com isso em vista, a NOAA e a Saildrone inc. lançaram mais sete "saildrone" para seguir o caminho dos furacões, e com isso melhorar as previsões desses destrutivos fenômenos.

ENOS e as secas e enchentes da Amazônia e do Nordeste

Na Amazônia

Ropelewski & Halpert (1987) mostraram o sinal do El Niño e de La Niña na precipitação pluvial no norte da América do Sul, que abrange a Amazônia e o Nordeste brasileiros, onde o El Niño pode causar seca e La Niña precipitação pluvial acima da média. O mecanismo dinâmico clássico, que provoca a deficiência de precipitação pluvial na Amazônia e na Região Nordeste do Brasil, no caso de El Niño, é o ramo da Célula de Walker perturbada e deslocada para leste, que desce (subsidência) no norte da América do Sul e Oceano Atlântico equatorial, inibindo a convecção e as precipitações pluviais. Isso é o que, geralmente, ocorre no caso de fortes e muito fortes eventos de El Niño e de longa duração.

Grandes secas na Índia, no Nordeste do Brasil, na Amazônia, na Austrália, na Indonésia e na África, bem como enchentes no sul do Brasil, no Peru e no Equador, normalmente, são decorrentes da fase quente de ENOS (El Niño) (Marengo & Nobre, 2009).

Cavalcanti *et al.* (2013) classificaram como sendo predominante devido à teleconexão do Pacífico central e leste, as secas ocorridas nos anos de 1982-1983, 1991-1992, 1994-1995 e 1997-1998.

A Figura 43 mostra a climatologia da precipitação pluvial da Amazônia para El Niño, La Niña e neutro, para a estação chuvosa (janeiro-fevereiro-março) e para a estação seca (julho-agosto-setembro), período de 1950-1995, segundo Foley *et al.* (2002). Em geral, a Amazônia é mais seca nos anos de El Niño e mais úmida nos anos de La Niña. Os impactos na precipitação pluvial são maiores no período chuvoso, embora espacialmente heterogêneo. Aliás, isso está de acordo com Ropelewski & Halpert (1987) que mencionaram que as teleconexões globais de ENOS, coincidem com o período ou estação de maiores precipitações pluviais. Na estação chuvosa, no centro e norte da Amazônia há anomalias negativas de precipitação pluvial, em anos de El Niño e em anos de La Niña predominam anomalias positivas no norte da Amazônia. Na estação seca, o El Niño determina uma área no centro-leste da Amazônia com anomalias positivas de precipitação pluvial e La Niña ocasiona anomalias positivas no norte da Amazônia.

A Figura 43 é uma climatologia dos impactos de ENOS na precipitação pluvial da Amazônia. Esse comportamento médio pode mudar em eventos específicos do ENOS.

Kayano & Moura (1986) analisaram a precipitação pluvial da América do Sul durante todo o muito forte evento de El Niño de 1982-1983, mostrando que a Amazônia sofreu uma seca em que a precipitação pluvial foi, aproximadamente, 50% menor que a média climatológica. No período de janeiro-fevereiro (estação chuvosa) a precipitação pluvial foi a menor, dos últimos 50 anos (antes da década dos anos 1980).

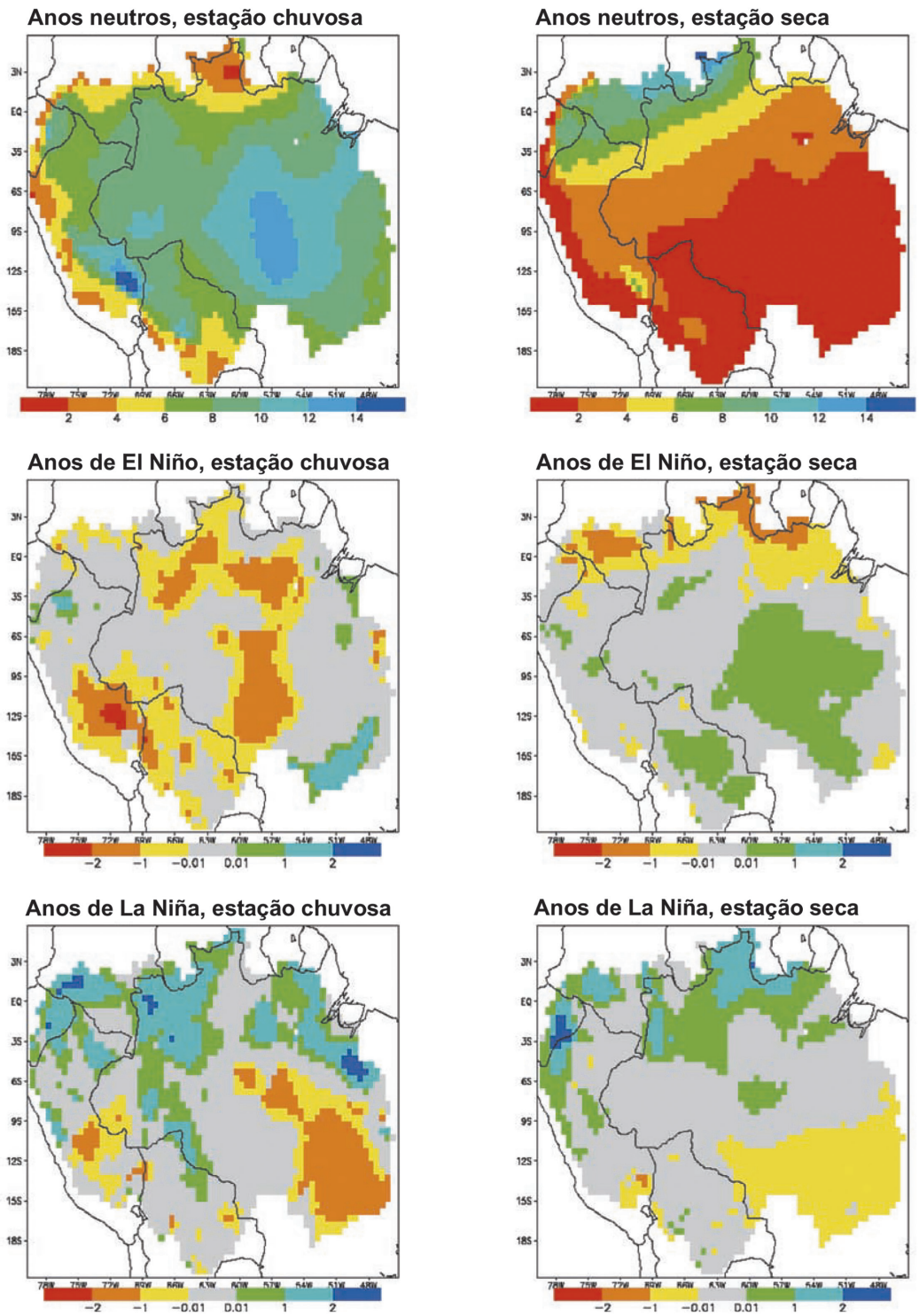


Figura 43. Média da precipitação pluvial para anos neutros na estação chuvosa (janeiro-fevereiro-março) e estação seca (julho-agosto-setembro), para anos de El Niño na estação chuvosa e estação seca e para anos de La Niña na estação chuvosa e estação seca, para a Amazônia, período de 1950-1995 (Foley *et al.,* 2002). As áreas assinaladas são as que têm um grau de confiança de 90%. Os valores, na escala de cores, abaixo das figuras são em mm/dia.

Conforme relato de Marengo (2009), a seca de 1998 (El Niño 1997-1998) foi considerada a mais intensa dos 118 anos anteriores. Mas conforme Williams *et al.* (2005), citado pelo próprio Marengo (2009), a maior seca da Amazônia tropical do século XX aconteceu durante o El Niño de 1925-1926, com quedas nas vazões do Rio Negro em Manaus de 30-40% em 1926 e incêndios florestais que duraram um mês.

Os eventos muito fortes de El Niño tornam a Amazônia seca e quente, o que favorece os incêndios florestais. O CPTEC/INPE, que monitora, há tempo, as queimadas no País, através de satélites com sensores óticos, na faixa termal (4 μm), detectou, através do satélite AQUA M-T, que em setembro de 2015 (El Niño 2015-2016), houve 72.100 focos de incêndios no Brasil, correspondendo a um aumento de 82%, em relação a agosto do mesmo ano (INFOCLIMA, ano 22, n.10, de 26 de outubro de 2015). Outro agravante é que a vegetação, em estado de estresse hídrico, deixa de ser um sumidouro de CO_2, pelo processo da fotossíntese, aumentando o CO_2 na atmosfera.

Zeng *et al.* (2008) estudaram as causas e os impactos da seca da Amazônia de 2005. As observações mostraram que a precipitação pluvial foi abaixo da normal, mas o déficit hídrico não foi particularmente grande. Mas 2005, foi o último ano de um longo período seco, que vinha ocorrendo desde 2002 (El Niño de 2002-2003). Por quatro anos a precipitação abaixo do normal, determinou severa redução da umidade do solo, afetando seriamente o nível dos rios do alto Amazonas e grande aumento dos incêndios em relação aos últimos sete anos. As análises dos dados atmosféricos, de superfície, de satélites e modelos, sugeriram que a seca de 2005 foi largamente causada pelo Atlântico tropical norte quente, em contraposição à ideia de que a TSM do Pacífico é o único fator que controla a precipitação pluvial da Amazônia, via ENOS.

Usando análise do período 1979-2005, os autores mostraram que a maior participação do Oceano Atlântico tropical na precipitação pluvial da Amazônia, não é caso tão raro e ocorre, tipicamente, em eventos de ENOS fracos. Conforme os autores, os dados analisados do período 1979-2005, sugeriram que quando há intensos eventos de ENOS (eventos de El Niño de 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1997-1998 e eventos La Niña de 1988-1989, 1999-2000), a precipitação pluvial na Amazônia foi determinada pelo Oceano Pacífico. Esses resultados, entre outros, sobre o El Niño, estão de acordo com resultado anterior de Kayano & Moura (1986), para o El Niño de 1982-1983 e com resultados posteriores de Cavalcanti *et al.* (2013), que citaram os fortes eventos de El Niño de 1982-1983, 1991-1992, 1994-1995, e 1997-1998, como únicos determinantes das secas na Amazônia.

Em eventos ENOS fracos e Atlântico norte quente (1979-1980, 1984, 1994, 2005) a TSM do Atlântico tem grande impacto. Em 2005, ambos ENOS e Atlântico sul foram fracos, mas o Atlântico norte quente levou a seca para a região.

Conforme Zeng *et al.* (2008), em uma análise de regressão múltipla, com os três índices (IOS, Atlântico norte e Atlântico sul), do período 1979-2005, o coeficiente de regressão foi de 0,73, ou seja, explicando 53% da variância da precipitação pluvial da Amazônia, percentagem bem mais alta que somente o IOS (27%), o que sugeriu que a influência do Atlântico na Amazônia foi altamente significativa.

Segundo Marengo & Espinoza (2016), situação de seca na Amazônia, em ausência de El Niño e com Atlântico tropical norte

quente, é devido a um anômalo deslocamento para norte da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e um enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste, limitando o transporte de umidade para a Amazônia.

No caso de La Niña, conforme mostraram Ropelewski & Halpert (1987), as precipitações no norte do País, abrangendo a Amazônia e o Nordeste, são acima da média. Como visto na Figura 43, na Amazônia, as precipitações pluviais são acima da média, principalmente, no norte da região.

Marengo & Oliveira (1998) fizeram a climatologia da precipitação pluvial média de seis eventos de La Niña no Brasil (1964-1965, 1070-1971, 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989, 1995-1996). Observaram abundante precipitação pluvial na estação chuvosa da Amazônia, especialmente no norte e leste da região. Segundo os autores, o sul da Amazônia não mostra associação, porém mostra muito clara associação com os extremos da Oscilação Sul.

A Figura 44 mostra a distribuição das anomalias da precipitação pluvial anual do Brasil dos três eventos de El Niño, considerados os mais fortes dos últimos tempos. Em 2015 (El Niño 2015-2016), a área com anomalias negativas foi maior e mais uniforme. Em 1983 (El Niño de 1982-1983), as anomalias negativas foram maiores no extremo norte e as anomalias positivas atingiram uma área bem mais ampla no sul do País. Conforme Kousky *et al.* (1984), que, entre outros, estudaram esse El Niño, o El Niño de 1982-1983 foi diferente dos outros eventos quentes de ENOS, porque as anomalias positivas de TSM apareceram primeiro no Pacífico central durante o inverno austral e não perto da costa da América do Sul e no verão, como é o comum desses episódios. No item sobre teleconexão, no Sudeste da América do Sul (SAS), o trabalho de Kousky *et al.* (1984), será abordado, com mais detalhe. Considerando as anomalias de TSM do Niño 3.4, o El Niño de 2015-2016 (que na realidade começou no final de 2014) foi o mais longo de todos os episódios quentes de ENOS, desde 1950, com 19 trimestres móveis contíguos com anomalias de TSM que caracterizam o El Niño (Tabela 1).

Na Figura 45, é apresentada a precipitação pluvial do Brasil, na estação chuvosa da Amazônia (JFM), para os três eventos de El Niño abordados acima. Ressalvadas as diferenças, um anual e outro trimestral

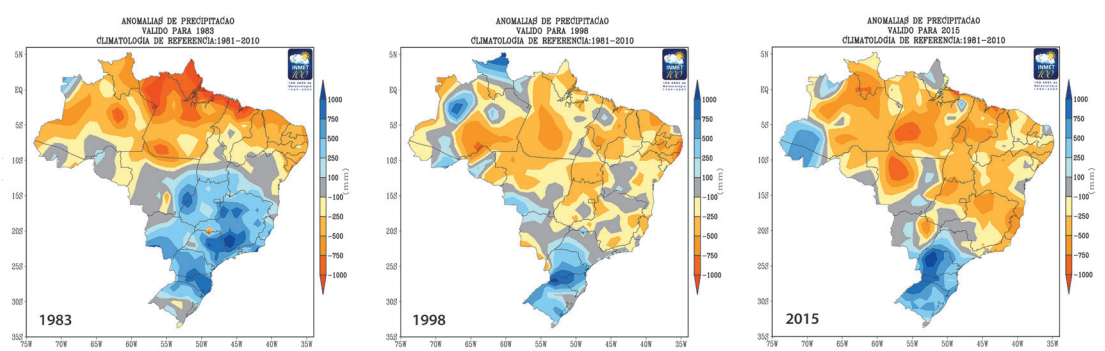


Figura 44. Anomalias (em relação à climatologia de 1991-2010) da precipitação pluvial anual (mm) do Brasil dos três mais fortes eventos de El Niño das últimas décadas (1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016). Fonte: INMET (*www.inmet.gov.br*). Data de acesso: agosto de 2018. De cada El Niño foi tomado o ano de maiores anomalias.

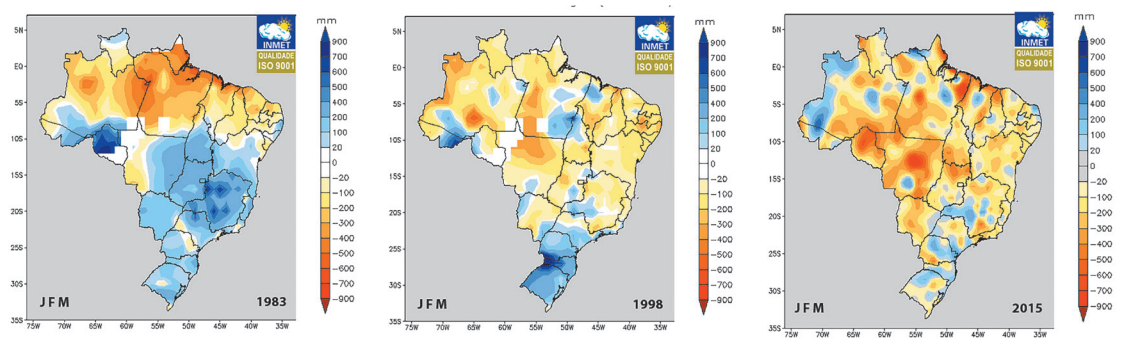


Figura 45. Anomalias da precipitação pluvial (mm) do Brasil, do trimestre chuvoso da Amazônia (janeiro-fevereiro-março), em relação à normal climatológica padrão de 1961-1990, nos três eventos mais fortes de El Niño das últimas décadas (1982-1983, 1997-1998, 2015-2016). Fonte: INMET (*www.inmet.gov.br*). Data de acesso: agosto de 2018.

e o período básico usado para calcular as anomalias, a distribuição da precipitação pluvial do trimestre para 1983 (El Niño de 1982-1983) é semelhante ao caso anual, com uma área maior no sul, com precipitação acima do normal. No trimestre JFM de 2015 houve uma área mais ampla com deficiências pluviométricas, embora mais heterogênea.

Marengo & Espinosa (2016) fizeram uma exaustiva revisão (156 referências) de mais de 100 anos (1906-2014) das secas e enchentes extremas na Amazônia e suas causas. A Tabela 4, traz uma síntese desse estudo. Nesse período, houve 19 eventos extremos, 12 de secas e 7 de enchentes. Quanto às causas, 5 eventos de seca extrema estiveram associados ao El Niño (1906, 1912, 1916, 1925-1926, 1948), 3 eventos de enchente extrema estiveram associados à La Niña (1976, 1989, 1999), 4 eventos de seca extrema estiveram associados ao El Niño+Atlântico Tropical norte quente (1982-1983, 1995, 1997-1998, 2010), 1 evento de enchente extrema esteve associado à La Niña+Atlântico tropical sul quente (2012), 3 eventos extremos de seca estiveram associados ao Atlântico tropical norte quente (1963-1964, 1979-1981, 2005), 1 evento de enchente extrema esteve associado ao Atlântico tropical sul quente (2009), 1 evento de enchente extrema esteve associado ao Pacífico oeste-Oceano Índico quentes+Atlântico subtropical quente (2014). A enchente de 1953 não teve a causa determinada. Para quem quiser saber mais detalhes dos mecanismos da circulação atmosférica e oceânica que determinaram cada evento, a última coluna da Tabela 4, traz as referências usadas pelos autores.

A enchente do verão de 2014 (DJFM) foi um evento extremo, sem precedentes, no noroeste da Amazônia. Segundo Espinoza *et al.* (2014), que estudaram essa enchente, a precipitação pluvial foi cerca de 100% maior do que a normal da região, com descargas recordes de importantes tributários do Amazonas. E não esteve associada aos mecanismos normais de produção de enchentes na região. Segundo os autores, essa enchente, esteve relacionada ao Pacífico oeste e Oceano Índico quentes, mais o Atlântico subtropical excepcionalmente quente. Os dados dos autores sugerem que o gradiente Atlântico tropical e Atlântico subtropical foi o modo de transporte de umidade do Atlântico para o noroeste da Amazônia.

Tabela 4. História de eventos extremos de secas e enchentes da Amazônia, período 1906-2014, e suas causas. Fonte: Marengo & Espinoza (2016).

Ano	Evento sazonal extremo	Relacionado a	Referências
1906	secas	El Niño	Sombroek (2001)
1912	secas	El Niño	Williams et al. (2005), Marengo et al. (2008a)
1916	secas	El Niño	Sombroek (2001), Jenkins (2009)
1925-26*	secas	El Niño	Sternberg (1987), Meggers (1994), Williams et al. (2005), Marengo et al. (2008), Sheffield and Wood (2011)
1948	secas	El Niño	Sombroek (2001)
1963-64	secas	Atl. Tropical Norte quente	Sombroek (2001), Marengo et al. (2008), Sheffield and Wood (2011)
1979-81	secas	Atl. Tropical Norte quente	Sheffield and Wood (2011)
1982-83	secas	El Niño + Atl. Tropical Norte quente	Sombroek (2001), Richey et al. (1989), Ronchail et al. (2005), Marengo (1992, 2008)
1995	secas	El Niño + Atl. Tropical Norte quente	Espinoza et al. (2011)
1997-98	secas	El Niño + Atl. Tropical Norte quente	Sombroek (2001), Marengo et al. (2008), Marengo et al. (2011), Zeng et al. (2008), Espinoza et al. (2011), Tomasella et al. (2011, 2013), Coelho et al. (2013)
2005*	secas	Atl. Tropical Norte quente	Marengo et al. (2008), Marengo et al. (2011), Zeng et al. (2008), Espinoza et al. (2011), Cox et al. (2008), Tomasella et al. (2011), Yoon and Zeng (2010), Aragão et al. (2007), Coelho et al. (2013)
2010*	secas	El Niño + Atl. Tropical Norte quente	Lewis et al. (2011), Marengo et al. (2011), Espinoza et al. (2011), Coelho et al. (2013)
1953	inundações	?	Salati and Vose (1984), Ronchail et al. (2005), Marengo et al. (2010a)
1976	inundações	La Niña	Marengo et al. (2010a), Satyamurty et al. (2013b)
1989	inundações	La Niña	Ronchail et al. (2006), Marengo et al. (2011, 2013a, 2013b), Espinoza et al. (2013)
1999	inundações	La Niña	Ronchail et al. (2006), Marengo et al. (2011, 2013a, 2013b), Espinoza et al. (2013), Satyamurty et al. (2013b)
2009*	inundações	Atl. Tropical Sul quente	Marengo et al. (2010a), Filizola et al. (2014), Sena et al. (2012), Vale et al. (2011)
2012*	inundações	La Niña + Atl. Tropical Sul quente	Marengo et al. (2013a, 2013b), Espinoza et al. (2013), Satyamurty et al. (2013a)
		Indo-Pacífico quente	
2014	inundações	+Atl. Subtropical Sul quente	Espinoza et al. (2014)

Com base nos dados dessa ampla revisão, os autores constataram, também, que eventos hidrológicos extremos ficaram mais frequentes nas últimas duas décadas. Por exemplo, enchente de 2012 ultrapassou o recorde que era a de 2009 e o nível dos rios das secas de 2005 e 2010 foram os menores em 40 anos. Os autores abordaram os impactos ecológicos, econômicos e sociais desses extremos, nas áreas rurais e urbanas, durante as últimas décadas. Em relação às mudanças climáticas, os estudos dizem que há grandes incertezas, mas sugerem que as secas, na região, podem se intensificar durante o século XXI.

Nordeste Semiárido

Historicamente, a Região do Nordeste do Brasil, de baixas precipitações pluviais e secas severas, foi chamada de **Polígono das Secas.** Conforme o geógrafo Aziz Nacib Ab'Sáber, a isoieta de 750 mm, demarcaria, grosso modo, o Polígono das Secas (IEA/USP-Dossiê Nordeste Seco, Estudos Avançados 13 (36), 1999).

Catarina de Oliveira Buriti e Humberto Alves Barbosa, publicaram, recentemente, o excelente livro, com uma pertinente pergunta no subtítulo, denominado "UM SÉCULO DE SECAS: por que as políticas hídricas não transformaram o semiárido brasileiro?".

No item histórico da delimitação da região semiárida do Brasil, eles descrevem, com riqueza de detalhes, a abrangência espacial e os municípios integrantes da área semiárida, em diferentes períodos históricos, segundo as agências governamentais responsáveis pela definição, bem como os critérios técnicos utilizados. A primeira aproximação do que passou a ser conhecido como o **Polígono das Secas**, foi estabelecida, pelos engenheiros da IOCS (Inspetoria de Obras Contra as Secas), em 1936, através de lei que regulamentou o artigo 177 da Constituição Federal de 1934, que tratava do plano sistemático e permanente de defesa contra os efeitos das secas em parte dos estados do Norte (hoje Nordeste), com uma área de 670.000 km^2. Segundo Ab'Sáber (1999) "Quando os engenheiros da antiga Inspetoria de obras contra a seca introduziram a noção de **Polígono das Secas,** estavam realizando a própria delimitação grosseira da área nuclear do domínio morfoclimático, fitogeográfico, hidrológico e geológico dos sertões secos".

Conforme Buriti & Barbosa (2018), em 2005 um Grupo de Trabalho Interministerial, coordenado pelo Ministério da Integração Nacional, redefiniu o traçado do **Semiárido**, com a recomendação de abolir a expressão **Polígono das Secas**, como instrumento legal de delimitação das áreas do Nordeste sujeitas às secas. Essa delimitação seguiu critérios técnicos: precipitação pluvial média anual inferior a 800 mm, Índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,5, percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano, do período 01/01/1991 a 31/12/2020. A nova região ficou com os municípios distribuídos em partes do espaço geográfico de nove unidades da Federação (Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Minas Gerais). Em 2017 e 2019, duas outras resoluções, resultaram numa nova configuração da região do **Semiárido**, com 1.262 municípios.

Em dezembro de 2021, por decisão do Conselho da SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste), foram incluídos mais municípios, ficando um total de 1.427 municípios. Os critérios técnicos, para a definição da área, permanecem os mesmos. A Figura 46 mostra a mais recente área

do **Semiárido** Brasileiro, elaborada pelo Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélite (LAPIS).

Segundo os autores: "A abordagem interdisciplinar, holística e multidimensional das políticas hídricas, permitiu encontrar lições do passado que podem ser fornecidas aos atuais formuladores de políticas de águas. O estudo crítico do processo histórico ofereceu subsídios que contribuem para uma apreciação mais qualificada quanto à identificação e superação dos atuais desafios à implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos no **Semiárido** brasileiro".

Conforme Kousky & Chu (1978), essa região apresenta grande flutuação da precipitação pluvial anual, mormente no interior, onde muitas estações têm média anual entre 500-750 mm. Os baixos índices de precipitação pluvial anual, aliados à grande variabilidade interanual (de até 40%) resulta, muitas vezes, em situação de seca "crítica, se não desastrosa" para uma região cuja agricultura é a base da economia. Mas também, há alta variabilidade espacial e temporal durante a estação das chuvas no Nordeste (Uvo *et al.*, 1998). O centro e norte da Região Nordeste têm um pico de precipitação pluvial em março-abril, quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está na sua posição mais ao sul. A Influência do deslocamento da ZCIT na precipitação pluvial regional, segundo Moura & Shukla (1981), foi mostrada por Serra & Ratisbona, ainda em 1942. Serra

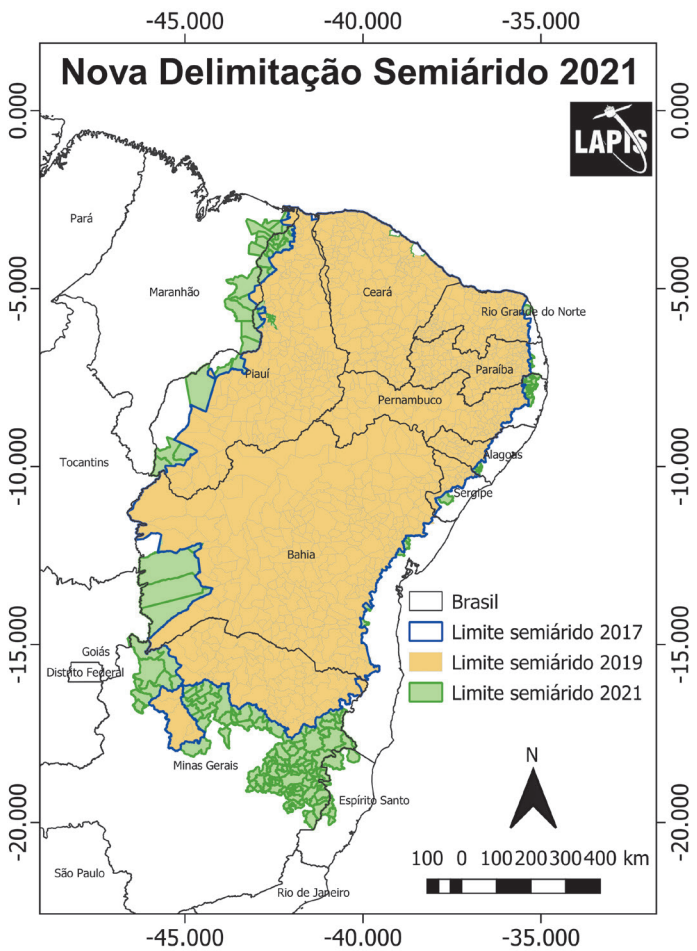


Figura 46. Atual delimitação do **Semiárido** do Brasil. Fonte: Letras Ambientais-LAPIS (*https://letrasambientais.org.br/)*.

Em tempo:
Em janeiro de 2024, foram incluídos mais 50 municípios, ficando a região do Semiárido com 1.477 municípios. E foi incluído um novo critério de caracterização dessa região: a continuidade territorial. Fonte: (https://letrasambientais.org.br).

(1945), um dos pioneiros no estudo do clima e das secas do Nordeste, em seu artigo denominado Meteorologia do Nordeste Brasileiro, publicado na Revista Brasileira de Geografia, diz na primeira frase de seu extenso trabalho que "as chuvas do Nordeste brasileiro são produzidas pelo deslocamento do **Doldrum**, que depende das oscilações da Frente Polar Sul-Americana (FPA)". Ele analisou, em 300 cartas sinóticas, o percurso dos sistemas frontais de um ano seco (1932) e de um ano de precipitações pluviais abundantes (1935), na região, concluindo que os sistemas frontais que penetram até latitudes mais baixas, provocam chuva no Nordeste.

Mais tarde, Kousky (1979), com dados observacionais de 10 anos (1961-1970), mostrou que os sistemas frontais que penetram no sul do Nordeste durante o ano, desempenham papel importante nos máximos de precipitação pluvial, em dezembro e janeiro, especialmente na Bahia, e estão associados com o aumento da precipitação pluvial ao longo da costa nordestina, da Bahia ao Rio Grande do Norte, nos meses de outono e inverno.

Hastenrath & Heller (1977), estudando as características da circulação atmosférica associada ao "climatic hazards" do Nordeste, também abordaram a ZCIT e o pico de chuva da região (março-abril). Eles afirmaram, também, que existe uma forte relação negativa entre a precipitação pluvial do Nordeste do Brasil e a TSM ao longo da costa do Equador e Peru.

A ZCIT é um dos principais sistemas meteorológicos da circulação geral da atmosfera, das regiões equatoriais. Ela está situada na convergência dos alísios de sudeste e dos alísios de nordeste. Sua posição média está um pouco ao norte do equador, onde há maior TSM, baixa pressão e intensa nebulosidade. Estando localizada no ramo ascendente da célula de Hadley, tem influência na transferência de calor e umidade (dos oceanos) para a alta troposfera e para latitudes médias e altas, contribuindo com o balanço térmico da Terra. Ela se movimente no sentido meridional, alguns graus, conforme as estações do ano. Os estudos sobre a ZCIT se desenvolveram muito após o advento dos satélites meteorológicos, com cujas imagens é possível acompanhar o deslocamento, a estrutura e a intensidade dessa banda de nebulosidade equatorial. No Brasil, segundo Hastenrath & Heller (1977) e Moura & Shukla (1981) a ZCIT é o principal sistema meteorológico modulador da precipitação pluvial do Nordeste brasileiro. Outros mecanismos atmosféricos interagem com a ZCIT, na expressão da chuva no Nordeste. Como se vê na ilustração da Figura 47, as temperaturas das águas do Atlântico norte e do Atlântico sul, que determinam o denominado gradiente meridional da TSM do Atlântico tropical, estão associadas à ZCIT, na determinação da chuva do Nordeste. Por exemplo, quando há anomalias negativas de temperatura no Atlântico tropical norte (gradiente meridional de TSM negativo) e Atlântico tropical sul com anomalias positivas de TSM (quente), a ZCIT migra para o sul, causando a chuva no Nordeste. E, quando há anomalias de TSM positivas no Atlântico tropical norte e negativas no Atlântico tropical sul, a ZCIT se desloca para o norte, afetando negativamente a estação chuvosa no Nordeste.

Uvo (1989) fez uma detalhada análise observacional da influência do deslocamento da ZCIT, no Oceano Atlântico, sobre a precipitação pluvial na região norte do Nordeste, usando dados de 116 estações meteorológicas espalhadas pelo Nordeste. Concluiu que a permanência mais longa ou mais curta da ZCIT, em sua posição mais ao sul, é o fator mais importante que define a

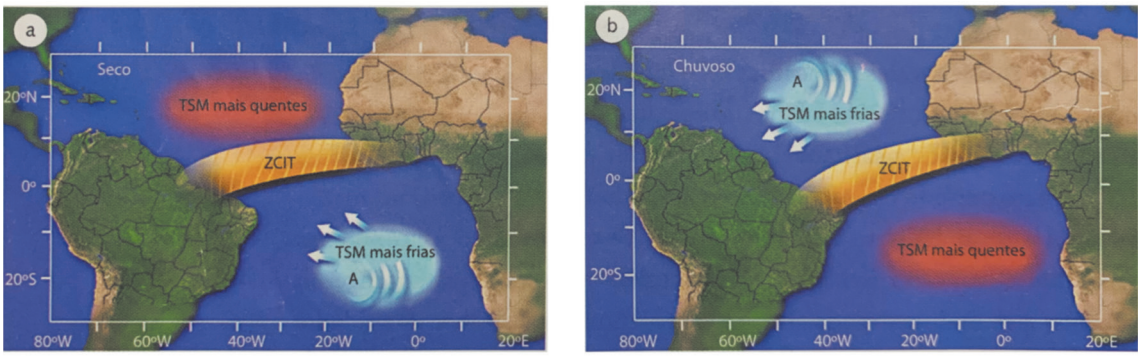


Figura 47. Representação esquemática do posicionamento da ZCIT em anos secos (a) e anos chuvosos (b) (Melo *et al*., 2009, adaptado de Nobre & Molion, 1988). As circulações dos sistemas de ambos os hemisférios estão indicadas por setas que representam os ventos alísios de sudeste (HS) e alísios de nordeste (HN).

qualidade da estação chuvosa no norte do Nordeste. Quando a ZCIT inicia sua migração para o norte em fins de fevereiro ou início de março, as precipitações pluviais são, em geral, deficientes. Mas quando a ZCIT inicia sua migração para o norte em fins de abril e início de maio, as precipitações pluviais serão, muito provavelmente, abundantes. Uvo *et al.* (1998), citam vários autores, cujos estudos indicam que a precipitação no Nordeste está relacionada com: (1) eventos de ENOS; (2) TSM do Oceano Atlântico, ventos alísios e pressão ao nível do mar; (3) posição da ZCIT sobre o Atlântico e (4) frentes frias.

Moura & Shukla (1981), com dados observacionais e experimentos numéricos, propuseram um mecanismo regional para explicar as secas seculares da Região Nordeste do País. Eles usaram 25 anos de TSM (média de uma quadrícula de 10º de latitude e longitude), período 1948-1972, do Atlântico sul e Atlântico norte, para calcular a correlação entre as anomalias de TSM do mês de março e a média da precipitação pluvial para março, abril e maio, de Fortaleza e Quixeramobim. A Figura 48 mostra as correlações. No Atlântico sul foi encontrada uma grande área com correlações positivas e no Atlântico norte, uma região com correlação negativa, sugerindo que simultânea ocorrência de anomalias quentes de TSM no norte (15ºN; 45ºW) e anomalias frias de TSM no sul do equador (15ºS; 5ºW) está relacionada com seca no nordeste. Conforme os autores, o mecanismo sugerido para a ocorrência de seca no Nordeste, seria uma circulação de natureza térmica local, com ramo ascendente no Atlântico norte e ramo descendente (subsidência) no Nordeste e Atlântico sul frio adjacente. Essa condição atmosférica e oceânica inibe a ocorrência de precipitação pluvial. Esse trabalho de Moura & Shukla (1981), ficou conhecido como o Dipolo do Atlântico.

Outro mecanismo da circulação geral, que interfere com a ZCIT, determinando seca no Nordeste é o mesmo que afeta a Amazônia, que é o El Niño, quando a circulação de Walker, como já visto, perturbada e deslocada para leste faz subsidência no norte da América do Sul e no Atlântico equatorial.

Walker, citado por Kousky *et al.* (1984), já em 1928, considerava que as anomalias de precipitação pluvial no nordeste brasileiro estavam relacionadas com a Oscilação Sul (OS). Isso foi resultado dos cálculos de

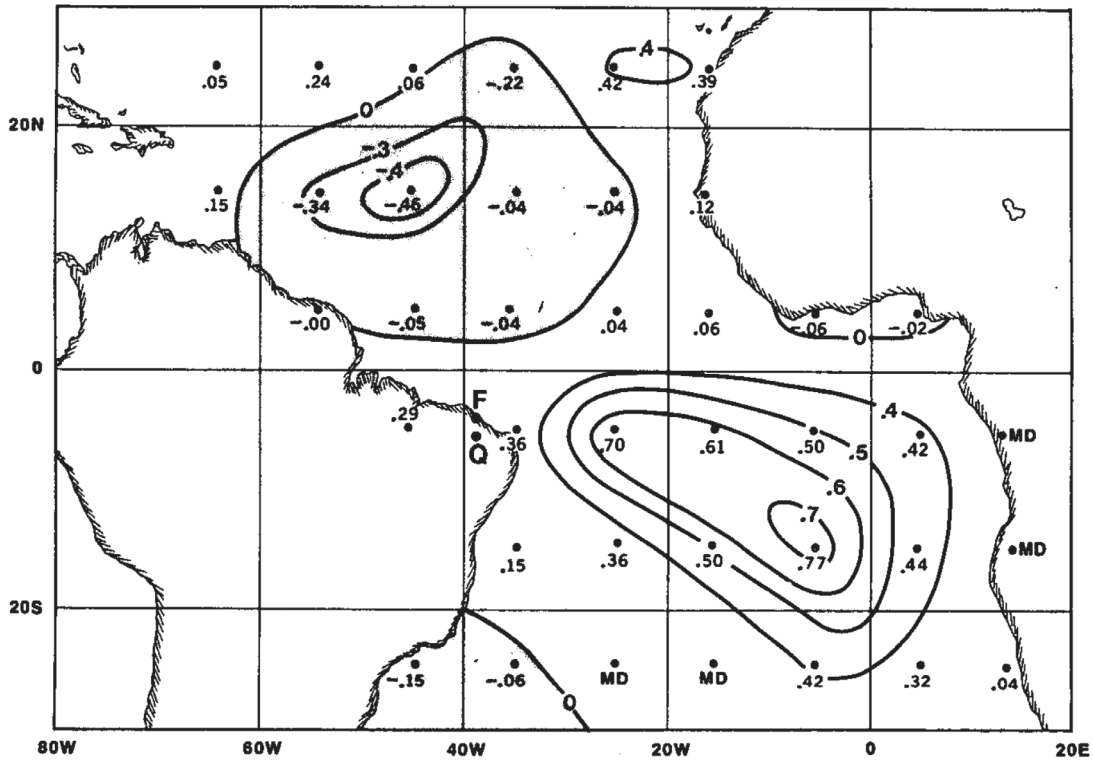


Figura 48. Coeficientes de correlação entre TSM do Atlântico e a média da precipitação pluvial de Fortaleza e Quixeramobim (Moura & Shukla, 1981). Valores maiores que 0,33 e 0,39 são significativos, nos níveis de confiança de 90 e 95%, respectivamente.

correlação e regressão que ele fez entre as variáveis meteorológicas de diversas regiões do mundo, como já foi visto.

Caviedes (2001), depois de verificar que desde o século XVI, a maioria dos eventos de El Niño ocasionavam seca no Nordeste, disse que a repetição de simultâneas secas nessa região e El Niño em 1982, 1992, 1997-1998, agora com riqueza de observações oceânicas e atmosféricas, conexões que eram consideradas espúrias, tornaram-se peças centrais do quebra-cabeça das teleconexões globais.

Kousky *et al.* (1984) compararam as anomalias de precipitação pluvial de janeiro a maio de 1972, 1976 e 1983 (anos de El Niño) de estações selecionadas da bacia Amazônica e do Nordeste. Houve anomalias negativas em todas, mas muito maiores deficiências pluviométricas em 1983. Eles afirmaram que, assumindo que esse comportamento seja mais ou menos representativo de um El Niño muito forte, fica evidente que secas severas no Nordeste estão relacionadas ao El Niño.

Caviedes (1973) afirmou que quando há grande convecção e pesadas precipitações pluviais no litoral do Peru, há seca no Nordeste brasileiro, com o que concordaram Hastenrath & Heller (1977). Portanto, El Niño e seca no Nordeste Semiárido.

Um estudo de Kane (2001), entretanto, contabilizou que dos eventos de El Niño ocorridos de 1871-1998 (52 eventos), cerca de 40% não estavam associados à seca no Nordeste, mas sim a seca estava relacionada com o Atlântico.

Segundo Marengo *et al.* (2018), as primeiras duas décadas do século XXI foram caracterizadas por eventos climáticos extremos, com desastres na América do Sul. Secas no Nordeste do Brasil durante 2010-2016; seca no Sudeste do Brasil em 2014-2015; secas na Amazônia em 2005, 2010 e 2016; enchentes na Amazônia em 2009 e 2014; seca na Bolívia em 2016. A seca compromete a segurança em água, energia e a agricultura de subsistência no Nordeste, além de, na Amazônia, causar impactos na biodiversidade e na população, bem como aumentar o risco de incêndios florestais.

A Figura 49 mostra as anomalias de precipitação pluvial de uma seca considerada a mais severa, não vista há várias décadas, no semiárido do Nordeste do Brasil, com enorme impacto na economia e na sociedade, que durou 5 anos (de 2011-2012 a 2015-2016).

Segundo os autores desse trabalho, a análise de dados indicadores de secas, bem como variáveis meteorológicas, mostram que desde meados de 1990 a 2016, 16 anos tiveram precipitação pluvial abaixo do normal. Na área semiárida, demarcada da Figura

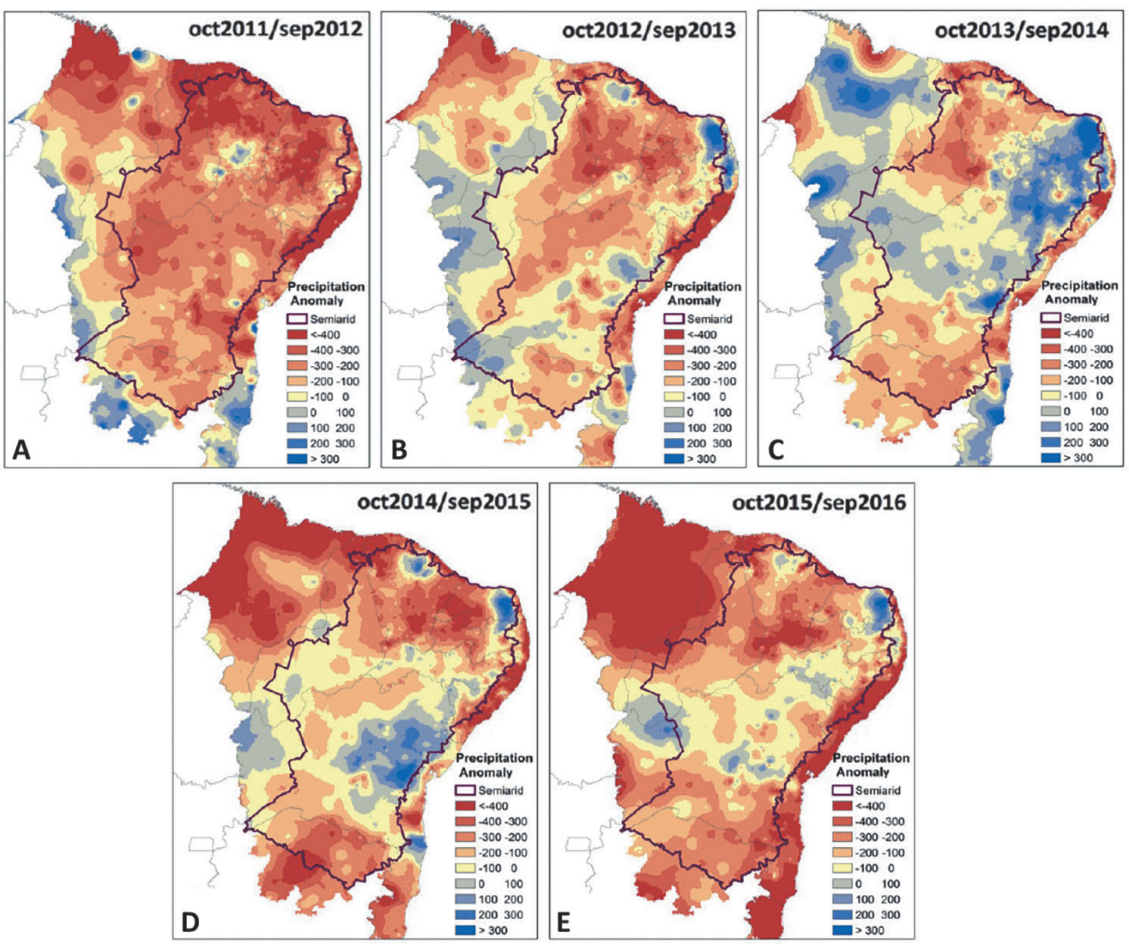


Figura 49. Anomalia da precipitação pluvial (mm), na Região Nordeste do Brasil, no ano hidrológico outubro-setembro de (A) 2011-2012 (B) 2012-2013, (C) 2013-2014, (D) 2014-2015, (E) 2015-2016 (Adaptado de Marengo *et al*., 2018).

49, 2011-2012 foi a mais severa. Já a de 2015-2016, foi a descrita no Boletim Técnico do INMET (*www.inmet.gov.br*), como seca extrema, com grande impacto na região.

Segundo Marengo *et al*. (2016), a seca do período de 2012-2015, atingiu 1.100 municípios e 9 milhões de pessoas. Devastadora para os setores da agricultura e pecuária, até 2015, os prejuízos desses setores estavam estimados em seis bilhões de dólares. Em grandes cidades do Nordeste, houve escassez de água potável para a população e fornecimento de energia.

Embora a seca seja um fenômeno recorrente no Nordeste, é percebido que os riscos e vulnerabilidade continuam altos, especialmente, nas áreas rurais semiáridas. A integração do monitoramento com as previsões climáticas sazonais (hora disponíveis), seria uma maneira de prever possíveis impactos da seca, identificando riscos e vulnerabilidade e permitindo melhor tomada de decisão em termos de garantir água, energia e segurança alimentar para a população nordestina (Marengo *et al*., 2018). Mas, esses mesmos autores, admitem que não há solução simples para os problemas da região mais populosa e de maior área de clima semiárido do mundo.

Um índice muito indicado para caracterizar a seca meteorológica, é o Índice Padronizado de Precipitação (IPP) (ou do inglês SPI, de *Standardized Precipitation Index).* Foi desenvolvido por McKee *et al.* (1993). No método proposto por McKee *et al.* (1993), a precipitação pluvial ocorrida, na escala de tempo escolhida, é ajustada a uma função gama, que relaciona a probabilidade de ocorrência com o montante acumulado de precipitação pluvial. O valor de probabilidade encontrado é utilizado em uma função normal acumulada (média zero e desvio padrão um), e o número de desvios padrão que o evento se afasta da normal é o valor do IPP ou do inglês o SPI.

Buriti & Barbosa (2018), calcularam esse índice para caracterizar a seca do **Semiárido**, de um período de mais de cem anos (1901-2016). Considerando anos secos quando o IPP é igual ou menor que -1, os autores identificaram, no período 1901-2016, 32 secas, sendo três classificadas como condição anormal de seca (índice muito próximo de -1), 14 classificadas como secas moderadas, 12 considerada secas severas (1907, 1908, 1915, 1919, 1942, 1980, 1983, 1990, 1992, 1993, 1998 e 2016), duas secas extremas (1932 e 2012) e uma seca excepcional (1903). Segundo a estatística dos autores, nove eventos de secas, desse período (quase 30%), ocorreram sem a presença de El Niño (1904, 1907, 1908, 1909, 1915, 1936, 1942, 2012 e 2013). Também é destaque na Figura 50, a intensidade excepcional da seca que assolou o **Semiárido** brasileiro, de 2010 a 2017, sendo considerado um dos mais longos e mais intensos, durante mais de um século. Desse período, somente em 2016, houve correlação entre o forte El Niño de 2015-2016 e seca severa no **Semiárido**. Nos demais anos, a seca esteve correlacionada com o Oceano Atlântico (dipolo positivo). No gráfico do IPP também são mostrados os anos de máximas precipitações pluviais.

Ainda, segundo Buriti & Barbosa (2018), "desde o início do século XX, foram registrados eventos climáticos de impactos severos ou extremos no **Semiárido** brasileiro. E apesar disso, o País ainda não desenvolveu uma capacidade adequada de resposta para a gestão desses eventos climáticos extremos".

Moura & Shukla (1981), já haviam afirmado que a precipitação pluvial no Nordeste do Brasil (e sua variabilidade interanual), é um desafio, ainda não resolvido, da meteorologia tropical.

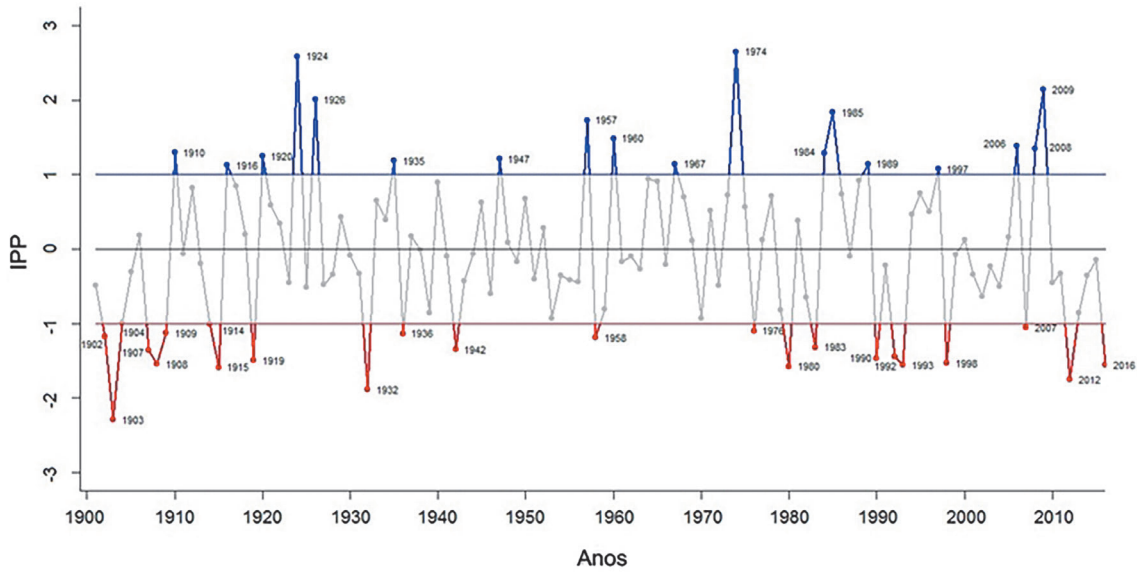


Figura 50. Índice Padronizado de Precipitação (IPP), da região do **Semiárido** do Nordeste, período 1901-2016 (Buriti & Barbosa, 2018).

E Caviedes (1973) afirmou que "Among the most disastrous climate hazards affecting South America are El Niño of north--western Peru and the Secas (droughts) of northeastern Brazil". Esse autor enfatizou, novamente, que a seca do Nordeste é um evento simultâneo com a ocorrência do El Niño nas costas do Equador e Peru.

Também, foi sugerido que esses dois problemas climáticos estão relacionados com a Oscilação Sul de Walker (Hastenrath & Heller, 1977; Bjerknes, 1969, entre outros).

Na Amazônia e no Nordeste do Brasil, a marcada variabilidade na precipitação pluvial é atribuída, em parte, à variação da TSM do Pacífico tropical, nas manifestações dos extremos do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) e, em parte, ao gradiente meridional da TSM do Atlântico tropical, escreveram Marengo *et al.* (2013), apoiando essa assertiva em 18 trabalhos, de nada menos que 14 autores principais, que escreveram sobre o assunto, nas últimas décadas. Um dos mecanismos dinâmicos que controlam as anomalias de precipitação pluvial nessas regiões é a variação da zonalmente orientada circulação Walker, devido a mudanças na anomalia da TSM do Oceano Pacífico tropical. O outro mecanismo dinâmico associado é a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) no seu deslocamento norte-sul, influenciada pelo gradiente meridional da TSM do Atlântico tropical.

Diversos estudos têm mostrado que, na maior parte do Nordeste, La Niña provoca chuva acima do normal. Mas, no ano de 2012, a La Niña (La Niña 2011-2012) não seguiu esse padrão no Nordeste. A severa seca no Nordeste do País e as intensas precipitações pluviais e enchentes na Amazônia, ambas foram consideradas recordes (Marengo *et al.*, 2013). No Nordeste foi decretado estado de emergência na seca mais severa dos últimos 30 anos, que afetou mais de 4 milhões de pessoas em 1.100 cidades e ocasionou uma corrida, nas áreas rurais, em demanda de água. As perdas do setor agrícola foram estimadas em 6 bilhões de dólares.

O diagrama da Figura 51, mostra a relação entre TSM do Niño 3.4 de JF e precipitação pluvial em FMAM no Nordeste, contabilizando o número de eventos que se enquadram nas categorias frio/úmido, quente/úmido, frio/seco e quente/seco.

Segundo Marengo *et al.* (2013), anos secos ocorrem no Nordeste durante o El Niño. A seca tão intensa da La Niña de 2011-2012 no Nordeste foi uma exceção. Ela iniciou em dezembro de 2011 no setor norte do Nordeste e se estendeu por toda região, no pico da estação chuvosa do Nordeste, de fevereiro a maio de 2012. Conforme esses autores, o mais importante aspecto da circulação atmosférica foi o sistema de alta pressão do Atlântico sul (Anticiclone do Atlântico sul), intenso e deslocado para norte, junto do continente do Nordeste, determinando subsidência em baixos níveis, e inibindo a precipitação pluvial no Nordeste do Brasil. Também o dipolo do Atlântico da TSM foi positivo em 2012, com ligeiro aquecimento do Atlântico norte (que é uma situação desfavorável para precipitação pluvial no Nordeste, como já visto).

Como se verifica, a maioria dos eventos de La Niña, determina anomalias positivas de precipitação pluvial no Nordeste (canto superior esquerdo do diagrama), mas a La Niña de 2012 (marcada com seta), determinou uma das maiores secas do NE (em torno de -50 mm/mês, no período fevereiro a maio). Mas também se constata que vários outros eventos de La Niña determinam anomalias negativas de precipitação pluvial na

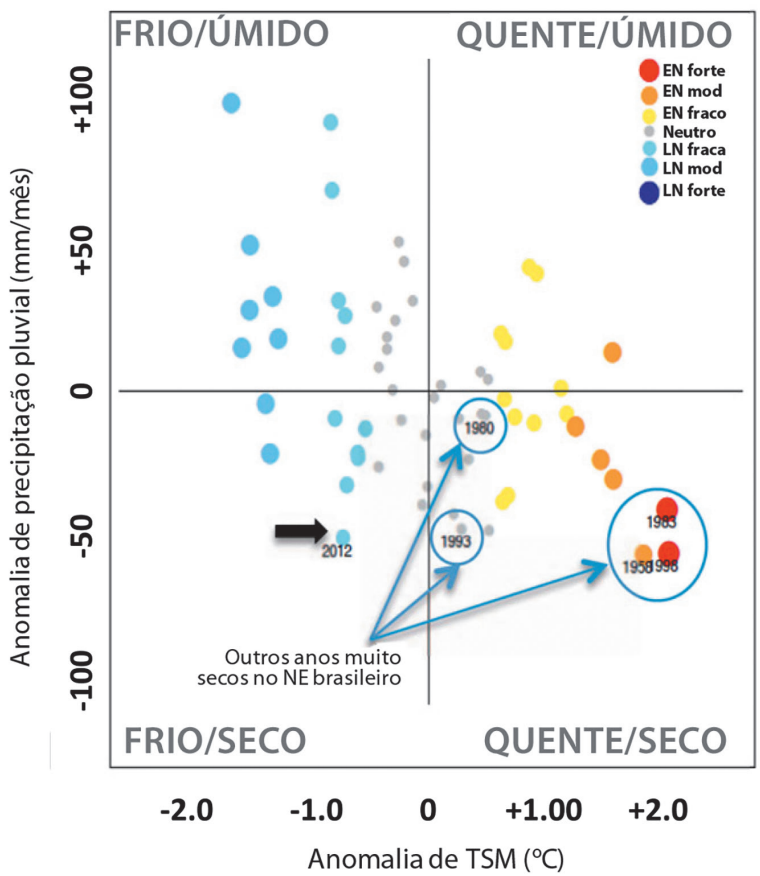


Figura 51. Anomalias de TSM do Niño 3.4 (ºC) de janeiro e fevereiro e anomalias de precipitação pluvial (mm mês^{-1}) de fevereiro-março-abril-maio, no Semiárido. Adaptado de Marengo *et al.* (2013). As anomalias de TSM e precipitação pluvial, são em relação ao período 1961-1990.

região. Por outro lado, os eventos de El Niño, especialmente os eventos fortes, em geral, determinam seca no Nordeste (canto inferior direito do diagrama), mas anos neutros podem ser secos, como 1980 e 1993 (assinalados no diagrama).

Rodrigues & McPhaden (2014), procuraram uma explicação para a La Niña de 2011-2012, que produziu uma das grandes secas, que não ocorria há décadas no Nordeste. Os autores usaram observações e simulações numéricas, com dados de longo período (1900-2012), para saber o que aconteceu de diferente com a La Niña de 2011-2012. Encontraram que a La Niña do leste do Pacífico ou La Niña Canônica (La Niña EP), causa resfriamento no Atlântico tropical norte e aquecimento no Atlântico tropical sul, o que permite o deslocamento para sul da ZCIT, trazendo precipitação pluvial para o Nordeste. Mas, a La Niña em que o resfriamento é concentrado no Pacífico central (La Niña CP), causa o oposto no gradiente meridional da TSM no Atlântico tropical, levando seca para o Nordeste. Foi o caso da La Niña de 2011-2012. Ou seja, é a teleconexão oposta dos dois tipos de ENOS.

Marengo *et al.* (2018), compilaram, de várias fontes, e publicaram uma atualizada cronologia das secas do Nordeste, desde o final dos anos 1500, conforme segue:

1583, 1603, 1624, 1692, 1711, 1723–1724, 1744–1746, 1754, 1760, 1772, 1766–1767, 1777–1780, 1784, 1790–1794, 1804, 1809, 1810, 1816–1817, 1824–1825, 1827, 1830–1833, 1845, 1877-1879, 1888–1889, 1891, 1898, 1900, 1902–1903, 1907, 1915, 1919, 1932–1933, 1936, 1941–1944, 1951–1953, 1958, 1966, 1970, 1976, 1979–1981, 1982–1983, 1992–1993, 1997–1998, 2001–2002, 2005, 2007, 2010 e 2012–2015.

Como se pode verificar, foram 48 eventos de seca, sendo que há várias secas com duração de 2, 3 e 4 anos. Mas a de 1790-1794 teve duração de 5 anos.

Segundo esses autores, intensas secas, durante anos de fortes eventos de El Niño, reportados foram: 1877-1879, 1897, 1899, 1902-1903, 1919, 1951, 1959, 1966, 1982-1983, 1986-1987, 1997-1998, 2005, 2010 e 2015 (estes compilados da página da NOAA).

Portanto, nem todos os eventos de El Niño, determinam seca no Nordeste. Um estudo de Kane (2001), já havia contabilizado, que dos eventos de El Niño ocorridos de 1871-1998 (52 eventos), cerca de 40% não estavam associados à seca no Nordeste, mas sim a seca estava relacionada com o Atlântico.

Marengo *et al.* (2017), fizeram, também, uma compilação dos destacados impactos, especialmente das grandes secas. Alguns exemplos: na de 1777-1780, morreu cerca de 85% do rebanho e a metade da população morreu de fome. Em 1877-1879 (período da grande fome no mundo, já referido), cerca de 200.000 pessoas morreram, apenas em Fortaleza, capital do Ceará. Em 1915, mais de 278.000 pessoas morreram no estado do Ceará e cerca de 75.000 pessoas migraram para outras regiões. Em 1997-1998, 57% da produção agrícola total foi perdida. Em 1998, a seca assolou dez estados da região, atingindo, drasticamente a produção dos cultivos e ameaçando o suprimento de alimento. A última grande seca, dessa desafortunada região, que começou em 2012, atingindo a máxima intensidade 2012-2013 e continuou até 2015-2016, atingiu 1.100 cidades, tendo o governo declarado estado de emergência em 997 dos 1.794 distritos da região. Segundo a análise desses autores, essa foi considerada a maior seca de vária décadas.

Aceituno *et al.* (2009), avaliaram os impactos do El Niño de 1877-1878 na América do Sul. Em relação ao Nordeste do Brasil,

afirmaram que, sem dúvida, a extraordinária seca que iniciou em 1877, no Nordeste do Brasil, foi a mais destrutiva consequência do El Niño de 1877-1878 na América do Sul. Essa seca, segundo os autores, modulou o futuro político e econômico dessa região, que, nesse tempo, continha em torno de 48% da população brasileira. Com a dizimação das culturas de subsistência, surgiu avassalador o espectro da fome, da morte e a migração em massa, despovoando o sertão. Dezenas de milhares de retirantes, migraram para a Amazônia a procura de trabalho na emergente indústria da borracha, ao passo que muitos outros foram a procura de melhor futuro nos estados mais a sul do País.

Joaquim de Sampaio Ferraz (1882-1966), foi pioneiro da meteorologia brasileira, elaborando, no início de 1915, as primeiras cartas sinóticas e previsões do tempo para o Rio de Janeiro. Foi, também, pioneiro do estudo do Nordeste seco. Baseado em seus longos estudos, apostou na periodicidade dos eventos severos de secas e na correlação das grandes secas com a atividade solar (manchas solares). Num artigo na Revista Brasileira de Geografia (Ano XII, N. 1, janeiro-março de 1950), ele anunciou a iminência de uma "grande seca" no Nordeste para meados dos anos 1950, tendo declarado: "Na média, tem tocado uma desgraça para cada geração, não contando as secas menores, em muito maior número. Não nos iludamos! As "grandes" retornarão - breve ou mais tarde - e por séculos". E elas retornaram...

Segundo o Boletim Técnico do INMET (*www.inmet.gov.br*), de fevereiro de 2017, o impacto do El Niño 2015-2016 na Região Nordeste, foi de seca extrema, que determinou uma situação inédita no principal rio da região, o São Francisco. A Agência Nacional de Águas (ANA) autorizou a redução do volume de água liberado pelo reservatório de Sobradinho (BA) para 700 m^3 s^{-1}, caracterizando uma situação crítica, que não acontecia desde 1979, quando fecharam a barragem do rio para formar o maior lago artificial do Brasil e um dos maiores do mundo. Na época da publicação desse Boletim Técnico do INMET, Sobradinho estava com 7% de sua capacidade total de 34,1 bilhões de m^3 de água. Além de ser a principal fonte de água do Nordeste, o reservatório responde por 58% da geração de energia consumida na região.

A Figura 52, é da precipitação pluvial anual de 2015 (El Niño 2015-2016). Mostra que a seca mais intensa envolveu, totalmente, os Estados da região do Semiárido.

A seca de 1915, marcada acima (vermelho) na listagem das secas de Marengo et al. (2018), é descrita por Wagner G. Barreira, autor do Livro "Lampião & Maria Bonita: uma história de amor e balas" (Editora Planeta do Brasil, 2018, p. 49 e 50): "Em 1915, o Nordeste enfrentou uma seca catastrófica. Pelo menos 100 mil pessoas morreram, outras 250 mil migraram. No Ceará, as autoridades contabilizavam 150 mortes por dia - e os efeitos da devastação se faziam sentir por todo o sertão. Com a perda dos animais e das colheitas, famílias abandonavam suas casas em busca de abrigo e comida nas capitais. Nos arredores de Fortaleza, foi criado o que ficou conhecido como currais humanos ou currais do governo, com o objetivo de evitar que os retirantes ocupassem e saqueassem a capital. Entre os 8 mil **molambudos**, despossuídos alojados na região do Alagadiço, nas aforas de Fortaleza, muitos foram forçados a trabalhar em frentes de emergências, em troca de água e comida. Os campos eram vigiados por soldados armados, com ordem para atirar em caso de desordem. Os estados vizinhos não escaparam do infortúnio do clima e do caos social causado pela seca. A

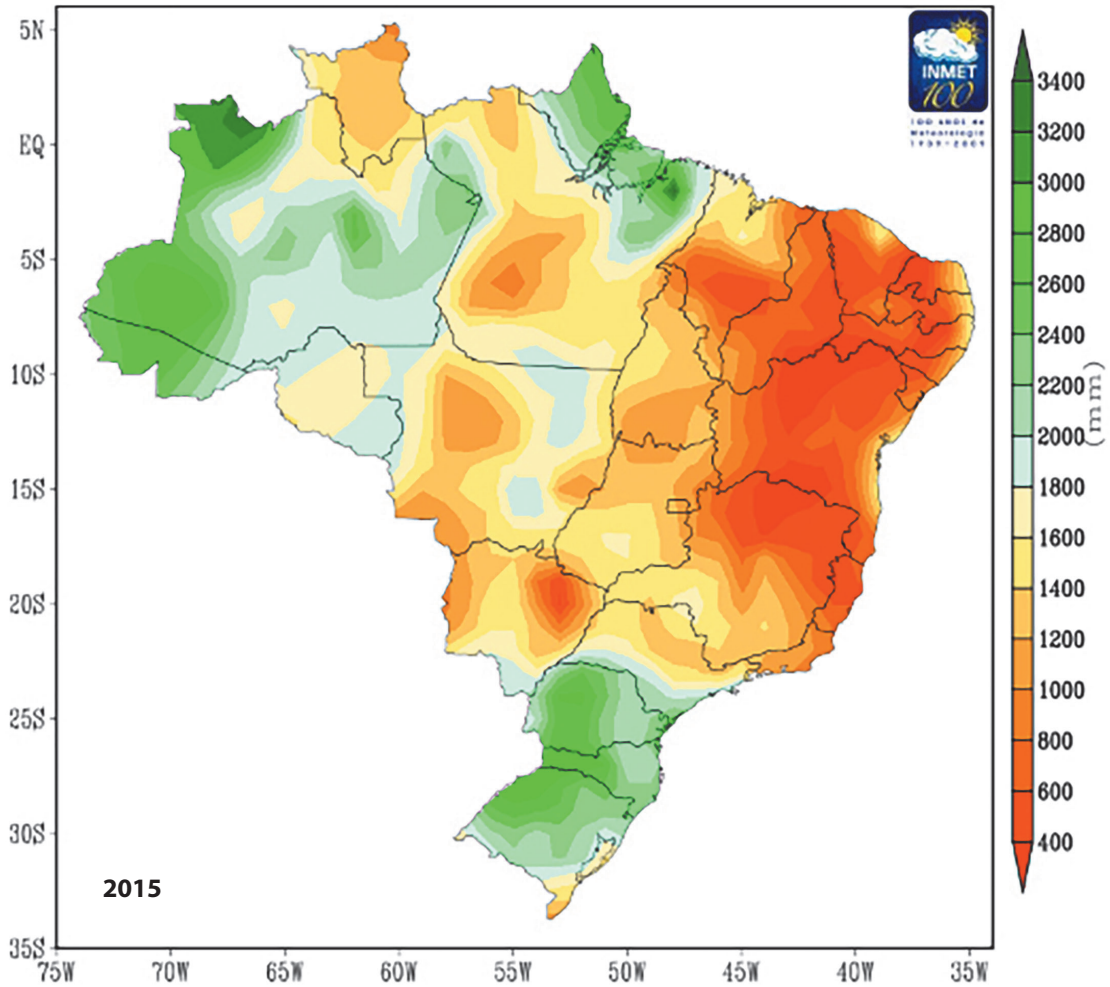


Figura 52. Precipitação pluvial anual (mm) do Brasil de 2015 (El Niño 2015-2016), mostrando a área seca do **Semiárido**. Fonte: INMET (*www.inmet.gov.br*).

jovem romancista cearense Rachel de Queiroz transformou a tragédia em literatura: **Chegou a desolação da primeira fome. Vinha seca e trágica, surgindo no fundo sujo dos sacos vazios, na descarnada nudez das latas raspadas**, escreveu em **O Quinze**, romance que a projetou como um dos expoentes da Geração de 1930". A menção ao romance de Rachel de Queiroz, aparece também, no Livro de Buriti & Barbosa (2018), que dizem: "O romance contém um forte teor social, narrando o drama de uma família de trabalhadores rurais que, em razão do desastre natural provocado pelo fenômeno, migra para a capital, onde enfrenta, durante o trajeto, muito sofrimento, como sede, fome, miséria e até morte".

Marco Antonio Villa escreveu um Livro denominado "Vida e morte no Sertão: história das secas do Nordeste nos séculos XIX e XX." Esse Livro foi resenhado em um artigo por Paulo Henrique Martinez (Revista Brasileira de História vol. 22, n. 43. São Paulo. 2002). Ele diz que, em mórbida matemática,

Villa estimou em três milhões de pessoas mortas nesses dois séculos. E compara: um novo holocausto, o equivalente a duas guerras do Vietnã. Somente a seca de 1877-1878 (ano da Grande Fome), conforme esse autor, teria dizimado cerca de 4% da população nordestina, considerando-se, desde então, o Nordeste como "região problema", uma "região sem história, dada a permanência e imutabilidade dos problemas." O autor diz que o Livro é portador de "uma triste história em que a morte rondou diuturnamente a vida dos sertanejos".

Ou, como diz o Professor Aziz Nacib Ab'Sáber, no "Dossiê Nordeste seco" (IEA/USP, n. 36, 1999): "Com uma frequência maldita, surge a figura sofredora da viúva de marido vivo. No começo, os que migram, enviam uma pequena ajuda em dinheiro, pelo correio, para as suas distantes famílias, dentro de suas limitadas possibilidades. Logo, porém, por diversas razões, cessa essa generosidade. Não convém detalhar a trajetória dramática dos acontecimentos que se sucedem, tanto para as famílias abandonadas no sertão, quanto para os migrantes."

Uns não mais voltam, outros, como cantou Luiz Gonzaga, esperam a chuva cair de novo...

Quando olhei a terra ardendo
Qual fogueira de São João
Eu perguntei a Deus do céu ai
Por que tamanha judiação

Eu perguntei a Deus do céu, ai
Por que tamanha judiação

Que braseiro, que fornalha
Nem um pé de plantação
Por falta d'água perdi meu gado
Morreu de cede meu alazão
Por falta d'água perdi meu gado
Morreu de sede meu alazão

Até mesmo a asa branca
Bateu asas do sertão

Entonce eu disse, adeus Rosinha
Guarda contigo meu coração

Entonce eu disse, adeus Rosinha
Guarda contigo meu coração

Hoje longe muitas léguas
Numa triste solidão
Espero a chuva cair de novo
Pra mim voltar pro meu sertão

Espero a chuva cair de novo
Pra mim voltar pro meu sertão

Asa Branca de Luiz Gonzaga

"Alguns avistam a seca,
mas poucos a enxergam"

Ariano Suassuna

As teleconexões do ENOS no clima do Sudeste da América do Sul (SAS)

A região que foi denominada Sudeste da América do Sul (SAS), vai de 20ºS a 40ºS e do leste dos Andes ao Atlântico. Toda a Região Sul do Brasil pertence ao SAS.

Ropelewski & Halpert (1987; 1996) mostraram coerentes sinais de teleconexões no Sudeste da América do Sul, onde El Niño produz precipitação acima da média e La Niña produz estiagens e Halpert & Ropelewski (1992) indicaram as teleconexões para a temperatura, em que El Niño produz anomalias positivas e La Niña produz anomalias negativas da temperatura, nessa região.

Kousky *et al.* (1984), fizeram uma revisão sobre a Oscilação Sul (OS), com ênfase na circulação oceano-atmosfera e variabilidade da precipitação pluvial da América do Sul. Em condição de El Niño (IOS negativo), o aque-

cimento anômalo da superfície do Oceano Pacífico central e leste, devido à zonalmente simétrica distribuição da água anormalmente quente do Pacífico equatorial, gera uma intensificação da célula de Hadley e, como consequência, o fortalecimento e maior persistência que o normal do Jato Subtropical, em altos níveis, em ambos os hemisférios, especialmente no outono e inverno. Esses autores, estudaram o El Niño de 1982-1983, com base em cartas diárias de superfície e de altitude, mais imagens de satélite. O El Niño de 1982-1983 foi um evento um pouco diferente do El Niño Canônico, teve aquecimento maior primeiro no Pacífico central, no inverno austral e não na costa da América do Sul, durante o verão austral. Notaram que ao lado do forte Jato Subtropical, muitos bloqueios de latitudes médias ocorriam na vizinhança da América do Sul e a leste do Pacífico. Esses bloqueios, em combinação com o Jato Subtropical, favoreceram a permanência de ativos sistemas frontais no sul do Brasil, contribuindo com o excesso de precipitação pluvial nessa região.

O El Niño de 1982-1983, apesar das diferenças acima citadas, em relação à precipitação pluvial, o comportamento foi semelhante a outros eventos, como os de 1972 e 1973, com o mesmo sinal para o norte-nordeste e para o sul do Brasil, porém com os valores de anomalias negativas (Bacia Amazônica e Nordeste) e anomalias positivas (leste e sul do Brasil) muito maiores.

Pereira *et al.* (2017), estudaram as características da atmosfera na primavera austral (setembro-outubro-novembro) do primeiro muito forte El Niño do século XXI, o de 2015-2016, que foi um El Niño do tipo MIX. Concluíram que as anomalias de precipitação pluvial em SON/2015, estiveram relacionadas com anomalias positivas de TSM no Oceano Pacífico central e leste, favorecendo a intensificação do gradiente horizontal da temperatura do ar entre os trópicos e subtrópicos, do Oceano Pacífico sul. Isso auxiliou na intensificação do Jato Subtropical. No Oceano Pacífico próximo ao sul da AS. Uma anomalia positiva de altura geopotencial, atuou bloqueando a passagem dos sistemas frontais, que acabaram seguindo a trajetória zonal do Jato e aumentando a precipitação pluvial no SAS. Ou seja, descrição da circulação atmosférica, parecida com a de Kousky *et al.* (1984), para o El Niño de 1982-1983.

O bloqueio atmosférico é, comumente, referido como uma situação quando o fluxo normal zonal é interrompido por forte e persistente fluxo meridional. Por exemplo, a normal progressão para leste dos sistemas sinóticos é obstruída, levando a episódios de prolongadas condições extremas de tempo, podendo durar por vários dias e até semanas, sempre com o acompanhamento de anomalias significativas de temperatura e precipitação pluvial.

Segundo Ambrizzi *et al.* (2009), em condições de bloqueios, a presença de um anticiclone, quase estacionário, em torno da latitude de 45ºS, interrompe a progressão normal dos sistemas sinóticos. A característica da circulação atmosférica associada à situação de bloqueio é a divisão do Jato em dois ramos, ocasionando um rompimento do padrão zonal, impedindo o deslocamento de oeste dos sistemas sinóticos.

Com base numa série de 14 anos (1980-1993), Marques & Rao (1996) mostraram que nos setores a leste e oeste da América do Sul, a frequência de bloqueios, em 500 hPa, é maior durante os meses de inverno e primavera. A variação interanual dos bloqueios, também é modulada pelo ENOS. Marques & Rao (1996), relacionando frequência e latitude, leste e oeste, encontraram um pico cerca de 180º, tendo frequência maior nos três

anos de La Niña (1984/1985/1989) que nos três anos de El Niño (1983/1987/1990).

Mendes *et al.* (2005), estudaram a climatologia de uma série mais longa de bloqueios (1960-2000), para cinco regiões do Hemisfério Sul. Das cinco regiões, a do Pacífico sul (180º W; 80º W) foi a que apresentou maior frequência de bloqueios. Para o Pacífico sudoeste e sudeste (este último, próximo ao sul da América do Sul), a maior frequência de bloqueios ocorreu nos meses de inverno e primavera, de acordo com Marques & Rao (1996). Entretanto, em relação à variabilidade interanual e ENOS, os dados foram contrários. Em ambas as regiões do Pacífico e para todas as estações do ano, o número de bloqueios foi maior nos anos de El Niño e menor nos anos de La Niña. Diferença atribuída ao tamanho das séries usadas.

Gan & Rao (1991) estudaram a frequência de ciclogênese na América do Sul (aproximadamente a 15°S–50°S e 30°W-90°W), período de 1970-1988. Mostraram, entre outros aspectos, que a ocorrência de ciclogênese é maior em anos de IOS negativo (El Niño), o que explica a correlação negativa entre IOS e a precipitação pluvial no sul do Brasil. Pereira *et al.* (2017), também, declararam que a ocorrência de ciclogênese na costa sudeste da AS, pode auxiliar na canalização do Jato de Baixos Níveis (JBN), a leste dos Andes, que transporta umidade dos trópicos para os subtrópico.

No caso de La Niña, muitas das anomalias são de natureza oposta às de El Niño. Segundo Kousky & Ropelewski (1989), a Troposfera mais fria que o normal no Pacífico equatorial, resulta em um gradiente norte-sul mais fraco que o normal, em ambos os hemisférios. Então, o Jato Subtropical é mais fraco que o normal, também, em ambos os hemisférios, que provavelmente contribui com os ciclones da superfície também mais fracos que o normal e a precipitação pluvial fica abaixo do normal nas latitudes subtropicais, como exemplos, na parte leste e central da Argentina, Uruguai e sul do Brasil. Ainda conforme Kousky & Ropelewski (1989), o exame de uma série histórica de dados, mostrou que de 20 episódios de La Niña, 17 estiveram associados com condições de estiagem no SAS. Essa tendência foi evidente com a seca de 1988 no Uruguai, norte da Argentina e extremo sul do Brasil. Também, a passagem mais rápida das frentes frias contribui com as estiagens na primavera-início de verão, especialmente no Rio Grande do Sul, Uruguai e centro-nordeste da Argentina (Marengo & Oliveira, 1998).

Sansigolo (2006) calculou as anomalias da precipitação pluvial do sul do Brasil associadas ao ENOS. Para isso, utilizou dados mensais de 70 estações meteorológicas, bem distribuídas, da Região Sul do Brasil, período 1949-1950 a 1998. Desse período, foram analisados oito eventos extremos de El Niño e oito eventos extremos de La Niña. Foram tomadas as médias estacionais, tanto da precipitação pluvial como do Índice de TSM do Niño 3.4 (conforme Kaplan *et al.*, 1998). Como metodologia, usou a Tabela de Contingência e a Função de Distribuição de Probabilidade Hipergeométrica, por considerar essa metodologia simples e robusta e mais adequada para esse tipo de dados. A Tabela de Contingência fornece medida para identificar a influência de uma variável independente (ENOS) e a probabilidade de um pré-definido evento (como exemplo, tercis de precipitação pluvial). As precipitações médias, consideradas por estação do ano, foram colocadas em tercis da distribuição (abaixo da normal, em torno da normal e acima da normal). Os impactos de El Niño e La Niña, foram estimados pelo número de

vezes que a precipitação pluvial estacional ficou no tercil superior e no tercil inferior, respectivamente.

A Figura 53 mostra os resultados para o caso de El Niño, ou seja, a frequência da precipitação pluvial estar acima da normal, nas quatro estações do ano. Verifica-se que o impacto do El Niño, associado com precipitação pluvial acima do normal, é maior no sul da região e na primavera (fase de de-

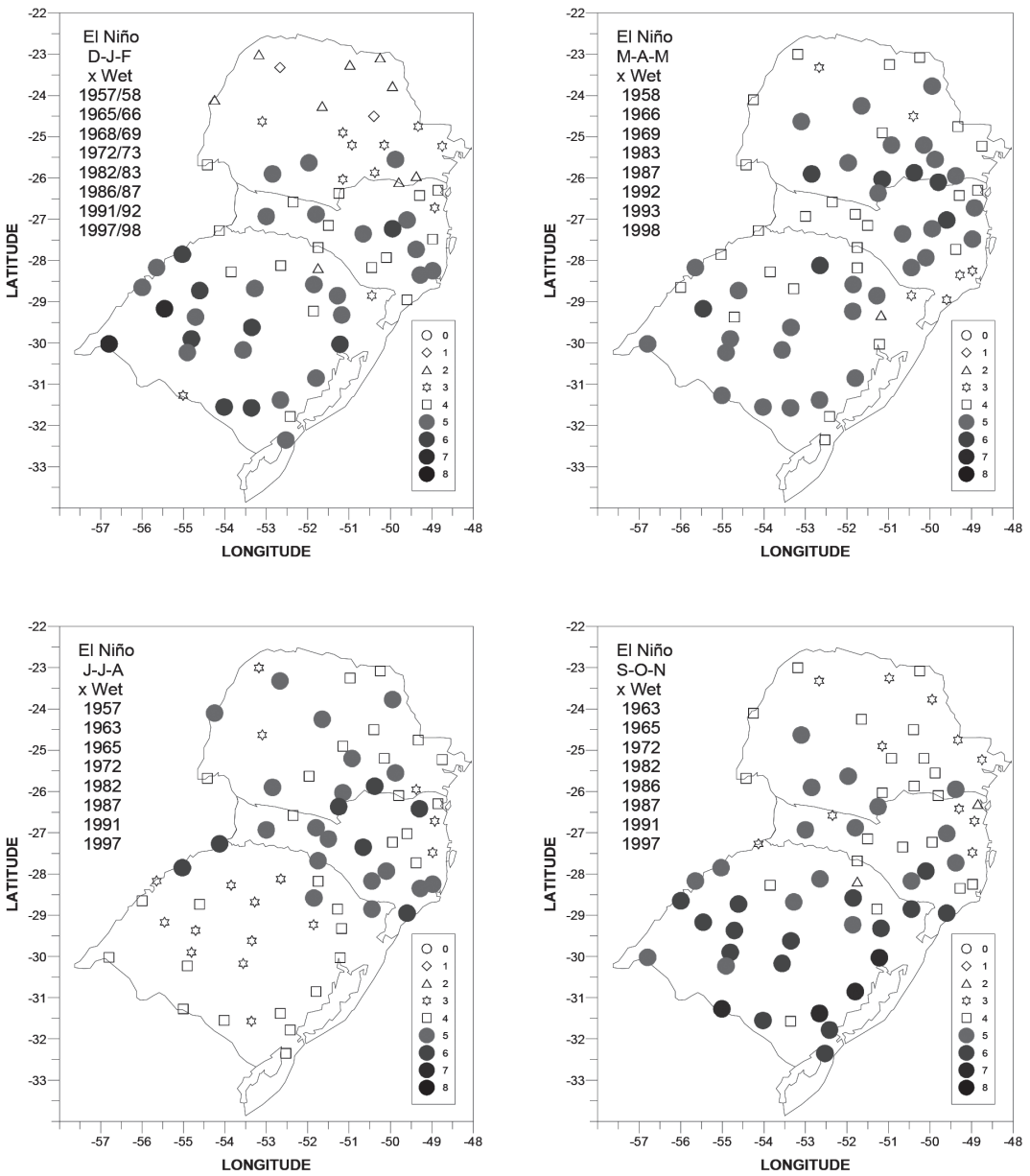


Figura 53. Frequência das anomalias de precipitação pluvial estarem acima da normal, nas quatro estações do ano, dos oito muito fortes eventos de El Niño, na Região Sul do Brasil, durante o período 1949-1950 a 1998 (Sansigolo, 2006). Frequências iguais ou superiores a cinco, são significativas a 90% (círculos cheios).

senvolvimento do evento) e no verão (fase madura do evento), sendo mais significativo no Rio Grande do Sul. No outono (fase de decaimento do evento), também, há razoável impacto na região.

Nos eventos de La Niña (Figura 54), a frequência da precipitação pluvial estar abaixo da normal, ocorreu em poucas estações da região, tendo significância na primavera e no Rio Grande do Sul, especialmente.

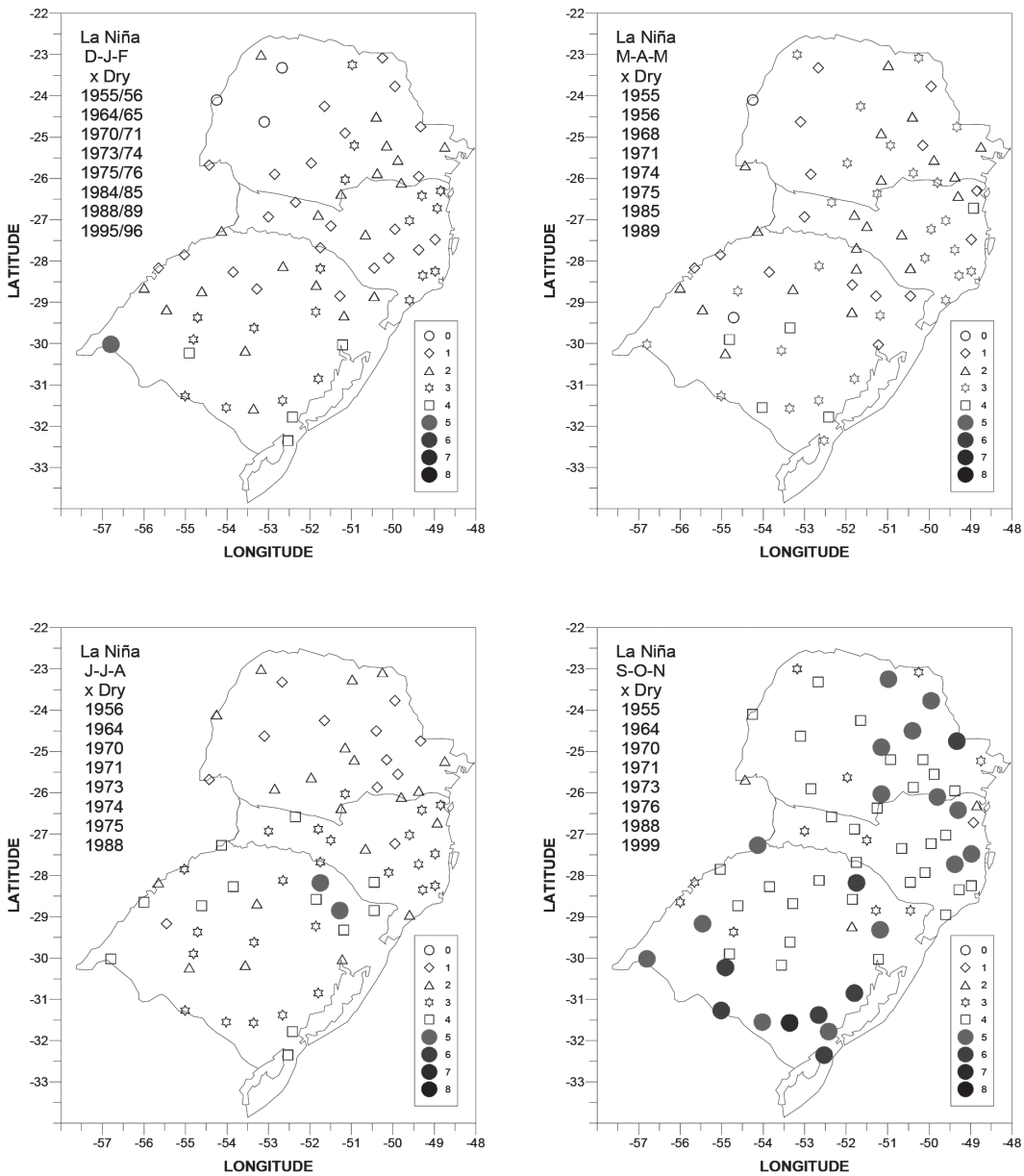


Figura 54. Frequência das anomalias de precipitação pluvial estarem abaixo da normal, nas quatro estações do ano, de oito muito fortes eventos de La Niña, na Região Sul do Brasil, período 1949-1950 a 1998 (Sansigolo, 2006). Frequências iguais ou superiores a cinco, são significativas a 90% (círculos cheios).

A pesquisa de Sansigolo (2006) foi apresentada nesse tópico, porque toda a Região Sul do Brasil pertence ao Sudeste da América do Sul, como já dito.

Grimm *et al.* (2000), estudaram a variabilidade climática do Sudeste da América do Sul (SAS), associada ao ENOS. Para estudo da precipitação pluvial, usaram dados mensais de 134 estações meteorológicas selecionadas da Argentina, Brasil, Chile, Uruguai e Paraguai, período 1956-1992. Nesse período ocorreram 10 eventos de El Niño (1957, 1963, 1965, 1969, 1972, 1976, 1979, 1982, 1986 e 1991) e oito eventos de La Niña (1956, 1964, 1970, 1971, 1973, 1975, 1985 e 1988). Verificaram que, tanto El Niño quanto La Niña, apresentam as maiores associações com a precipitação pluvial no mesmo trimestre (outubro-novembro-dezembro), só que com o sinal trocado. No El Niño, os percentis estão acima da mediana (percentil 50%), em uma área significativa do sul do Brasil, parte do Uruguai, nordeste da Argentina e sul do Paraguai, com percentis que atingem 70%, em outubro-novembro-dezembro. No caso de La Niña, no mesmo trimestre, a área de estiagem do nordeste da Argentina é maior, e onde os percentis caem significativamente, para até 30 e 20% (Figura 55).

Mason & Goddard (2001), utilizando uma série de dados de 1950-2002, classificaram a precipitação pluvial em tercis da distribuição, para os eventos de El Niño e La Niña, da região do Niño 3.4, em escala global, numa grade de 5° x 5°. Na Figura 56, é mostrado o resultado, num recorte que corresponde ao SAS, para dois casos: a probabilidade da precipitação pluvial estar no tercil inferior da distribuição (seco) nos eventos de La Niña e no tercil superior da distribuição (chuvoso) nos eventos de El Niño. Como se pode observar, a probabilidade de seca (tercil inferior) em anos de La Niña, abrange uma área bem maior (o que concorda com

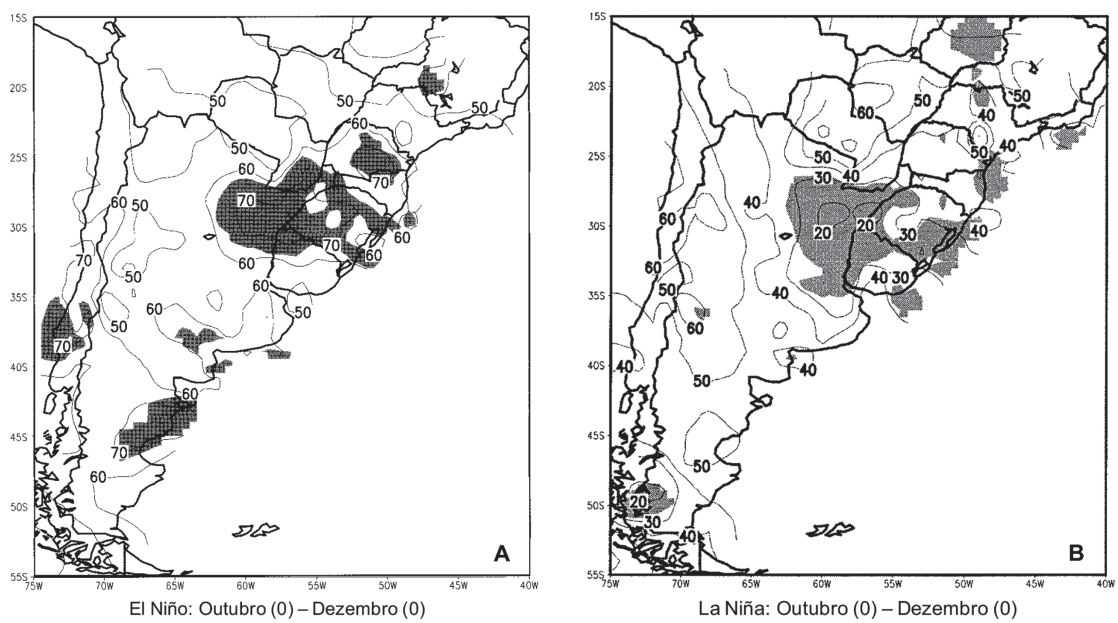


Figura 55. Percentis de precipitação pluvial para o Sudeste da América do Sul, para eventos de El Niño (A) e La Niña (B), no trimestre outubro-novembro-dezembro (Adaptado de Grimm *et al*., 2000). Áreas escuras têm significância estatística maior que 90%.

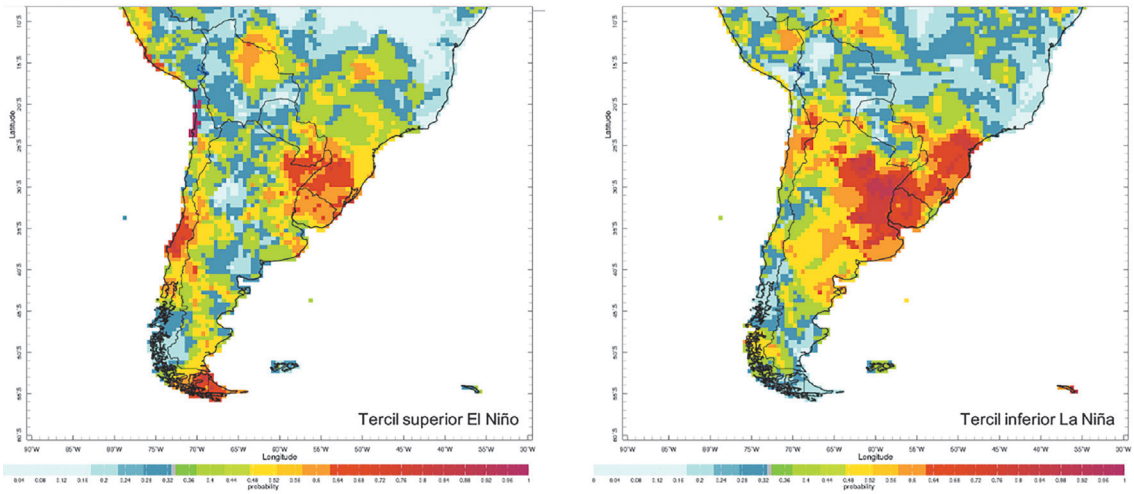


Figura 56. Probabilidade da precipitação pluvial estar no tercil superior (chuvoso) em eventos El Niño e no tercil inferior (seco) em eventos La Niña, no trimestre outubro-novembro-dezembro, no SAS, período 1950-2002. Adaptado de Mason & Goddard (2001).

Grimm *et al*., 2000), com maior probabilidade, incluindo toda a Região Sul do Brasil, o Uruguai e sudeste e nordeste da Argentina. No El Niño, a probabilidade de precipitações pluviais no tercil superior (chuvoso), ocorre numa área menor, com o Rio Grande do Sul, parte do Uruguai e nordeste da Argentina.

Montecinos *et al.* (2000), encontraram correlações significativas entre a TSM do Pacífico central e precipitação pluvial no Sudeste da América do Sul, em outubro-novembro e novembro-dezembro em áreas parecidas (mas não iguais) às encontradas por Grimm *et al* (2000) e Mason & Goddard (2001), com maiores correlações para outubro e novembro (Figura 57), principalmente no Rio Grande do Sul, onde grande número de estações meteorológicas tiveram sinal significativo. Esses autores também afirmaram que essa é a área de melhor previsibilidade da precipitação pluvial, nesses dois meses, com base na TSM do Pacífico central.

Um El Niño muito forte, especialmente, com precipitações pluviais muito acima da média, costuma provocar enchentes nos rios tributários do Rio da Prata (Paraguai, Paraná, Uruguai). Na Figura 58 (Imagem Landsat), vê-se o Rio Paraguai no seu leito, em um ano normal (2013) e no dia 14 de janeiro de 2016, como consequência do El Niño de 2015-2016.

O Rio Paraná é o maior tributário do Rio da Prata. Conforme Camilloni & Barros (2003), dois terços das maiores descargas do Rio Paraná, em Corrientes, ocorreram em anos de El Niño na Primavera (0) e outono (+1). E nenhuma em anos de La Niña.

Ainda, segundo Barros *et al.* (2008), a resposta da precipitação pluvial ao El Niño, no SAS, mudou, na segunda metade do século XX, não somente visto pelos campos da precipitação pluvial, mas também pela descarga dos rios. Três dos quatro maiores picos de descarga do Rio Paraná, ocorreram nos últimos 20 anos do século XX, em anos de El Niño, que foram em 1983 (El Niño de 1982-1983), 1992 (El Niño de 1991-1992) e 1998 (El Niño de 1997-1998). Barros *et al.* (2008), também mencionam que o aumento da precipitação pluvial anual do Sudeste da

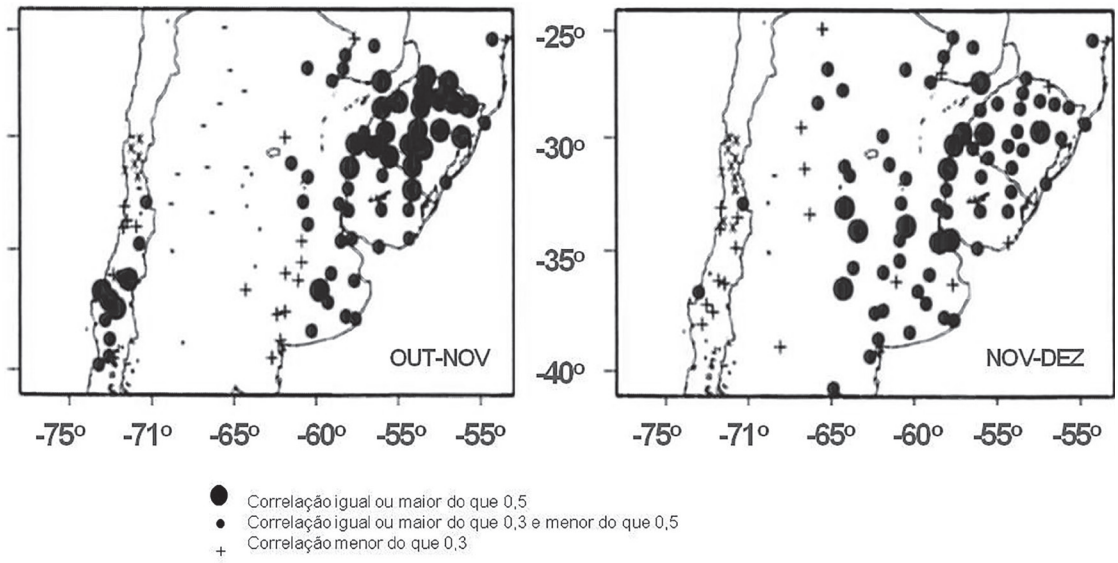


Figura 57. Correlação entre a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Pacífico central e a precipitação pluvial no Sudeste da América do Sul (Adaptado de Montecinos *et al*., 2000). Correlações iguais ou maiores que 0,3 são significativas no nível de 6%.

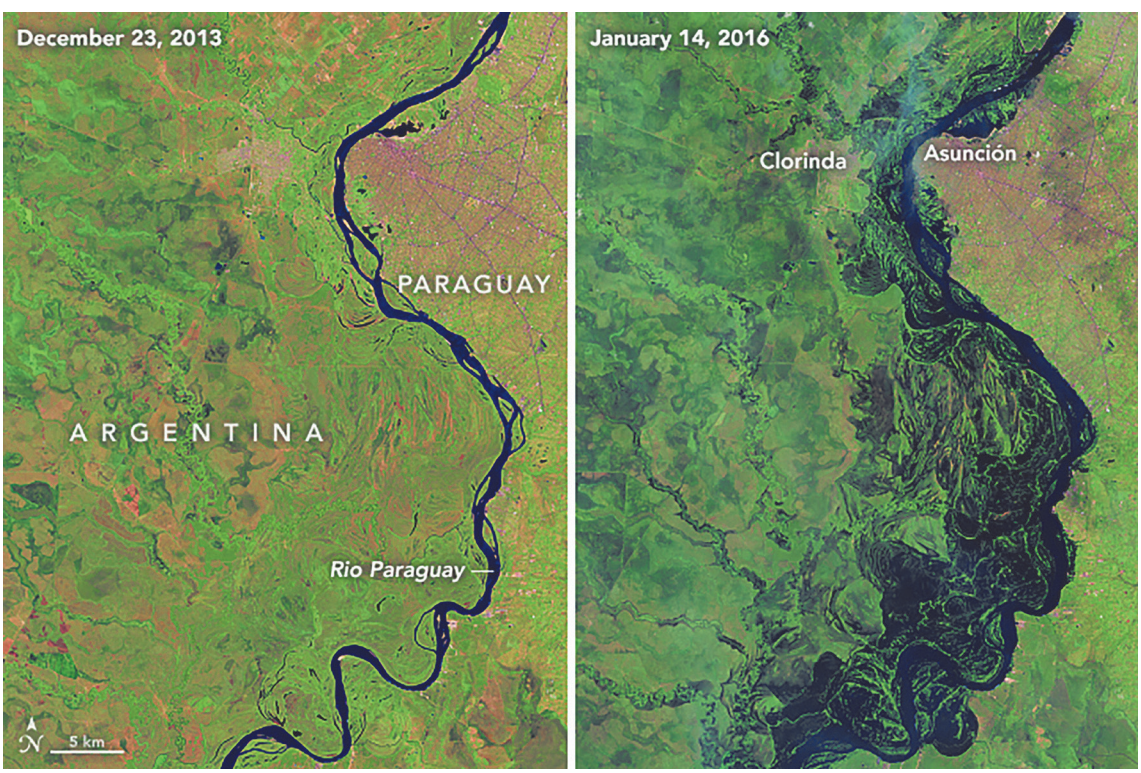


Figura 58. Enchente do Rio Paraguai (imagem Landsat) no El Niño 2015-2016. Fonte: (*https://earthobservatory.nasa.gov/Features/El Niño*). Data de acesso: setembro de 2018.

América do Sul, entre 22º e 45º, desde o leste dos Andes, oportunizou a expansão da fronteira agrícola no sentido oeste, aumentando a área de terras produtivas.

Molion (2008), com dados da Agência Nacional de Águas (ANA/BRASIL), mostrou que as flutuações do nível do rio Paraguai (em Ladário), mostraram sua relação com a ODP, com cotas baixas, no período 1947-1976 (fase fria da ODP) e altas no período 1977-1998 (fase quente da ODP). Foi verificado um incremento médio de 75% nas cotas do rio Paraguai (Ladário) da fase fria para a fase quente da ODP, devido à maior precipitação pluvial ocorrida, nesse último período.

Barros *et al.* (2002), analisaram as anomalias da circulação regional e a variabilidade interanual da temperatura da superfície no SAS, associadas ao ENOS, período de 1963-1990. Verificaram que o sinal do ENOS na temperatura é bem mais modesto que na precipitação pluvial, nessa região. Apenas no inverno (JJA) uma área extensa, com anomalias positivas e significativas de temperatura, em eventos El Niño (de 20°S a ~35°S), com máximo no norte da Argentina, e anomalias negativas e significativas em eventos La Niña, em uma área maior (20°S até ~40°S), com mínimo também no norte da Argentina. No sul do Brasil, quase todo o Rio Grande do Sul apresenta anomalia positiva no inverno em anos de El Niño (Figura 59 a) e no caso de La Niña, uma área negativa no oeste e parte do centro do Estado (Figura 59 b). As Figuras 59 (c) e 59 (d) são as correspondentes anomalias de vento em 925 hPa. Vê-se que nas áreas que correspondem às anomalias positivas e significativas de temperatura, em eventos de El Niño, há advecção de ar quente do norte e em eventos de La Niña há advecção de ar frio do sul, que justificam os resultados da Figura 59 (a) e (b).

A participação do Oceano Atlântico

Até aqui, foram tratadas as relações do ENOS (fenômeno que ocorre no Oceano Pacífico equatorial), com as condições climáticas do Brasil, por ser esse o objeto dessa revisão. Mas, para a Região Sudeste da América do Sul (SAS), aborda-se, ainda que brevemente, a participação do Oceano Atlântico, na expressão climática dessa região.

Studzinski (1995) fez um estudo da precipitação pluvial da Região Sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) e sua relação com os oceanos Pacífico e Atlântico. Utilizou dados de precipitação pluvial de 51 estações meteorológicas, período 1945-1989, bem distribuídas na Região. Os métodos estatísticos utilizados para a análise foram o das Funções Ortogonais Empíricas (Componentes Principais) e Correlação Canônica, técnicas estatísticas multivariadas, usadas, normalmente, nas ciências atmosféricas.

As conclusões de Studzinski (1995), foram que, primeiramente, as variações interanuais das anomalias das precipitações pluviais da Região Sul do Brasil, estão relacionadas com o fenômeno ENOS, de acordo com trabalhos anteriores. Detalhando mais, encontrou que os episódios quentes do ENOS atuam de outubro a fevereiro, mas também no inverno austral (JJA). Os episódios frios de ENOS, atuam durante os meses de outubro e novembro e também no inverno (JJA). Ressaltou, entretanto, que apesar da grande evidência da relação da precipitação pluvial e ENOS na Região Sul, aparentemente, determinados picos de anomalias da precipitação pluvial não estão relacionados ao ENOS.

Em relação ao Atlântico, encontrou que durante o outono (MAM) e inverno (JJA), a inclusão do Atlântico não alterou a configuração encontrada com o Pacífico somente,

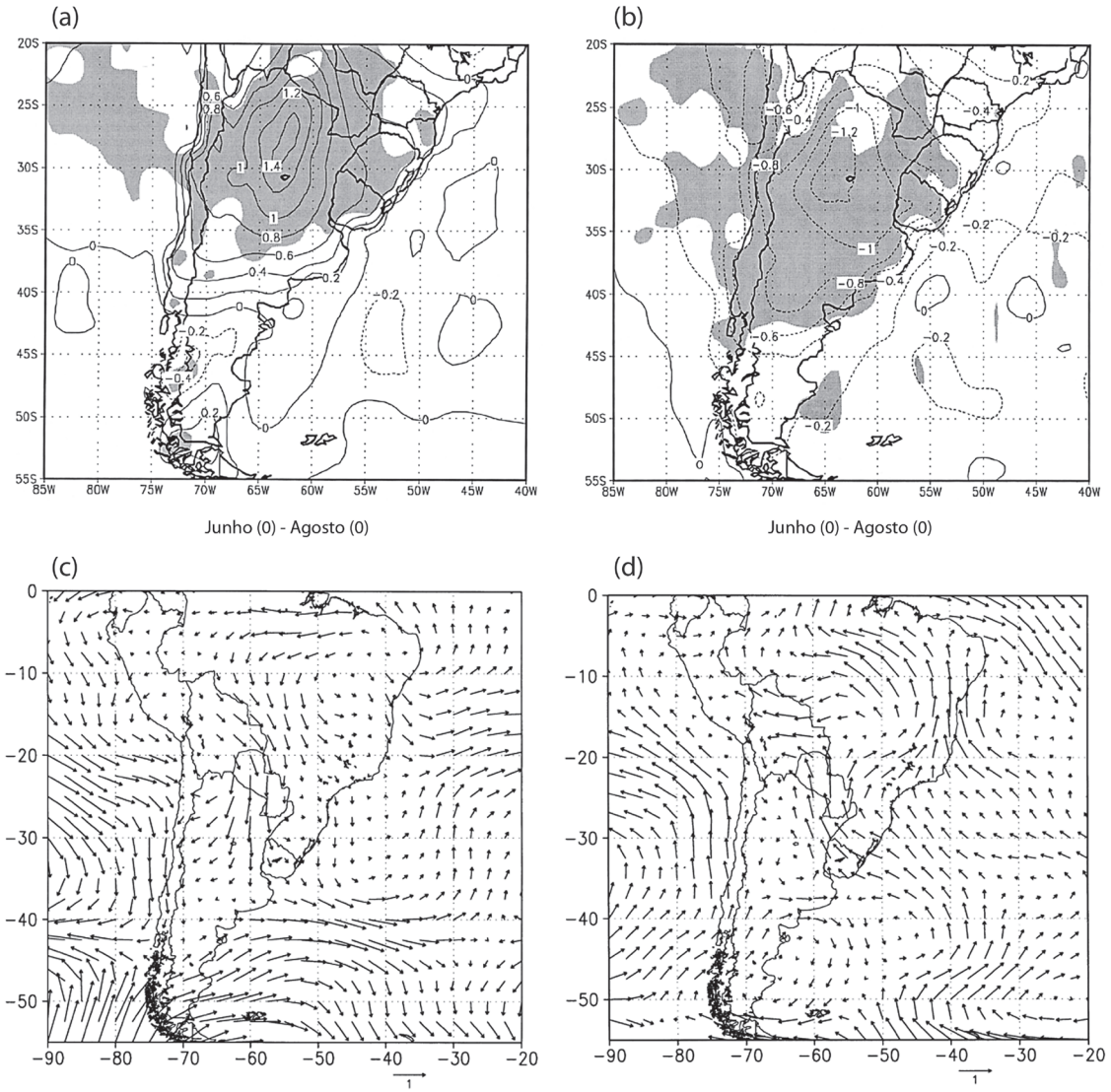


Figura 59. Anomalias da temperatura da superfície no inverno (JJA) (0), em eventos El Niño (a) e La Niña (b), período de 1963-1990; (c) e (d) são as correspondentes anomalias de vento em 925 hPa. Fonte: Adaptado de Barros *et al.* (2002).

como preditor. No entanto, na primavera (SON) a influência do Atlântico parece ter papel mais destacado que o Pacífico. Concluiu, também, que no período dezembro-fevereiro, os dois oceanos devem ser considerados. A inclusão do Atlântico amplia a área de significância entre anomalias de TSM e anomalias de precipitação pluvial, na Região Sul do Brasil. O diferencial do trabalho de Studzinski (Dissertação de Mestrado em Meteorologia no INPE), foi a inclusão do Oceano Atlântico.

Diaz *et al.* (1998), em trabalho que contou, também, com Studzinski, usaram séries mensais de precipitação pluvial de 40 estações meteorológicas, período 1917-1980, do Uruguai e do Rio Grande do Sul, relacionando com anomalias de TSM do Pacífico e

Atlântico, através das técnicas estatísticas de Componentes Principais e Correlação Canônica. Resultados indicam que há significante relação entre anomalias de precipitação pluvial e anomalias de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico. Mas, confirmam a relação da precipitação pluvial com o ENOS do Pacífico equatorial, no final da primavera e início de verão, conforme encontrado em trabalhos anteriores. Os resultados de Diaz *et al.* (1998), também sugerem que de novembro-fevereiro, condições mais úmidas prevalecem quando as TSMs são, inusualmente, altas nas vizinhanças da ZCAS. Quando os dois oceanos são considerados simultaneamente, há casos em que a anomalia positiva de precipitação pluvial é aumentada e casos que ela é enfraquecida.

Marques (2005), usou a precipitação pluvial mensal de 40 estações meteorológicas, período de 1950-2000, do Rio Grande do Sul. Para análise, utilizou as técnicas estatísticas de Regressão Múltipla e de Componentes Principais. Inicialmente, corroborou os achados anteriores das relações entre precipitação pluvial e ENOS, em que no trimestre outubro-novembro-dezembro, El Niño apresenta precipitações pluviais acima da média e La Niña precipitações pluviais abaixo do normal. Em relação ao Atlântico, encontrou correlações positivas e significativas. entre TSM do Atlântico com a precipitação pluvial, para a Região Sudeste do Rio Grande do Sul (Região mais próxima do Oceano Atlântico), nos períodos de dezembro a janeiro e de junho a agosto.

Barros *et al*. (2000), também, mostraram que no nordeste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil, a precipitação pluvial de verão tem clara dependência da TSM do Oceano Atlântico próximo, onde anomalias positivas do contíguo oceano contribuem para acréscimo de precipitação pluvial no continente.

Efeitos associados ao El Niño e La Niña no clima do Rio Grande do Sul

Efeitos na precipitação pluvial e nas condições hídricas

Fontana & Berlato (1997), utilizando uma série histórica de precipitação pluvial mensal de 29 estações meteorológicas do Rio Grande do Sul, período de 1913-1995, estudaram a climatologia dos impactos do ENOS nessa variável meteorológica. Encontraram que o maior impacto do ENOS, ocorre na primavera, principalmente nos meses de outubro-novembro-dezembro do ano (0), mas com maior intensidade em outubro-novembro do ano (0) para ambas as fases do fenômeno, com El Niño apresentando precipitação pluvial acima da média climatológica e La Niña com precipitação abaixo da média climatológica. Encontraram, também, um período secundário no final do outono-início do inverno do ano (+1), ao qual chamaram de "repique" do ENOS e com o mesmo sinal do período principal, ou seja, com El Niño apresentado precipitação pluvial acima da média climatológica e La Niña, abaixo da média climatológica. Esse segundo período, no caso do El Niño, quando apresenta anomalias positivas de precipitação pluvial muito grandes, prejudica a agricultura do Estado, porque ainda pega a atividade de colheita das culturas de verão. O caso mais prejudicial aconteceu no El Niño de 1982-1983, em que no mês de maio de 1983, choveu praticamente todos os dias, na principal região agrícola da época, impedindo a colheita de, aproximadamente, 1,2 milhão de toneladas de grãos, só de soja e milho. Felizmente, situação extrema como essa, em anos de El Niño, no Estado, é de baixa frequência. Esses resultados de uma longa série, de mais de 80 anos, e com uma extensa rede de estações meteorológicas, cobrindo adequadamente

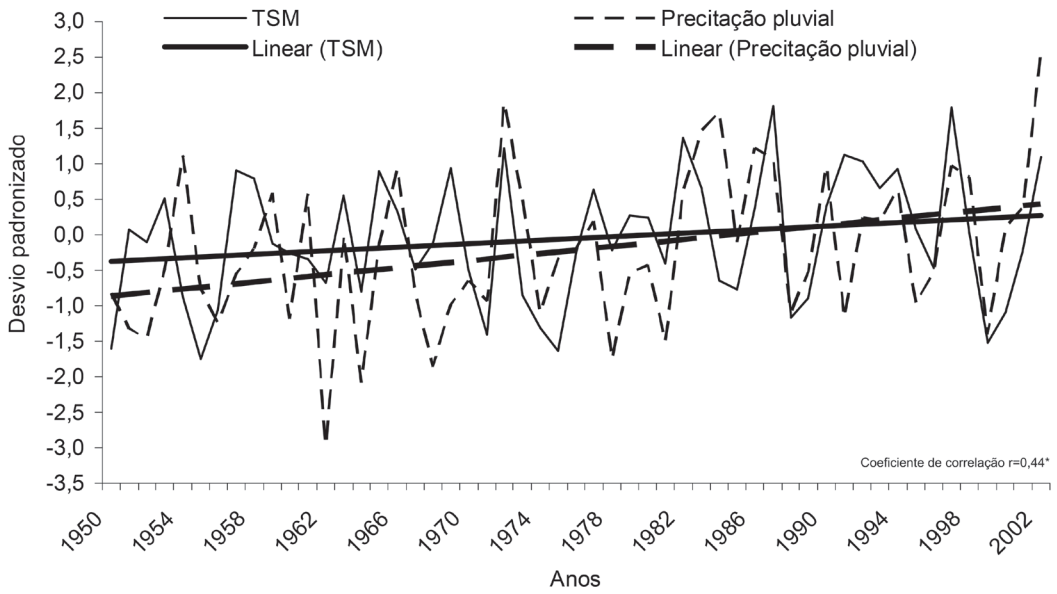


Figura 60. Relação entre a TSM da região do Niño 3.4 e a precipitação média do estado do Rio Grande do Sul, período de 1950-2002 (Berlato *et al*., 2007). *Significativo a 1%.

todo o Estado, foram, e continuam sendo, confirmados pelos estudos posteriores sobre a climatologia ENOS-precipitação pluvial.

A Figura 60, mostra a relação entre a precipitação pluvial anual do Rio Grande do Sul e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da região do Niño 3.4, do Pacífico equatorial, para o período de 1950-2002, evidenciando a relação positiva e significativa, entre essas duas variáveis (Berlato *et al*., 2007).

A Figura 61, mostra a distribuição do número de dias com precipitação pluvial nos eventos de El Niño, Neutro e La Niña no mês de novembro (a) no bimestre outubro-novembro (b) e no trimestre outubro--novembro-dezembro (c). Verifica-se, que nos eventos de El Niño ocorre um número de dias de precipitação pluvial bem maior que nos eventos de La Niña. Por exemplo, em novembro (a) no El Niño cerca de 75% dos dados estão acima da mediana dos anos neutros e na La Niña mais de 75% dos dados estão abaixo da mediana dos anos neutros. No trimestre outubro-novembro-dezembro (c), em El Niño, mais de 90% dos dias com precipitação pluvial estão acima da mediana dos anos neutros. Esses dados estão em total acordo com os da precipitação total. E, também, confirmam que novembro é o mês mais crítico em relação à disponibilidade pluviométrica.

A Figura 62, mostra a distribuição (diagramas de caixa) da precipitação pluvial para o trimestre outubro a dezembro (a), para o bimestre outubro e novembro (b) e para o mês de novembro (c). Além de confirmar que nos eventos de El Niño a precipitação pluvial é sempre maior, mostra que em eventos La Niña há grande deficiência pluviométrica nesse trimestre. Esse período é muito importante para a agricultura não irrigada do Estado, pois é o período de implantação e desenvolvimento da soja e milho (primeira safra), os dois cultivos não irrigados que, juntos, representam 76% da área cultivada e 68% da produção de grãos

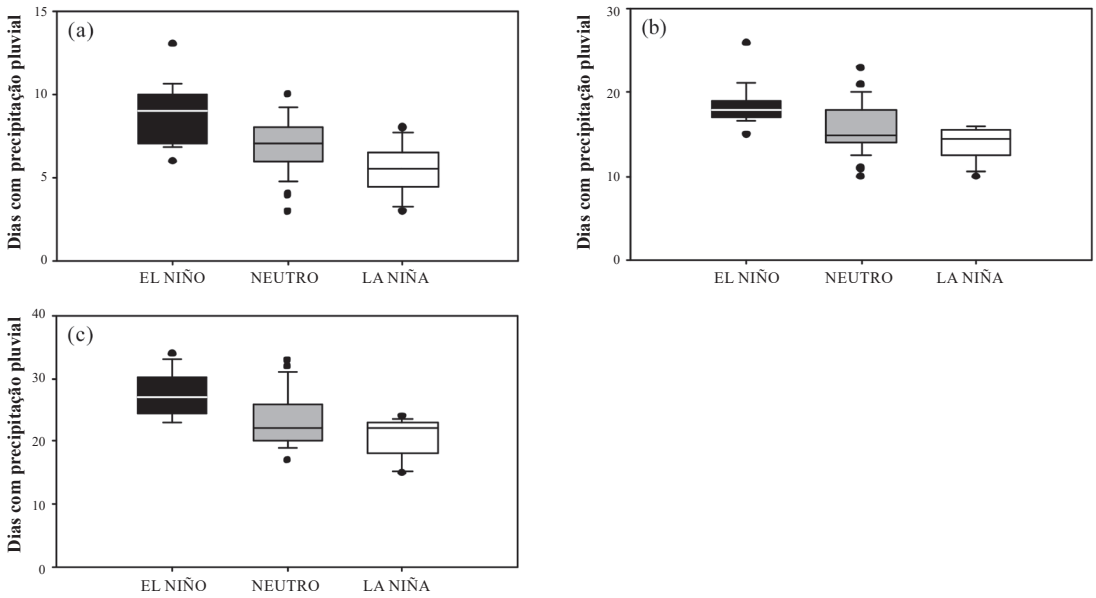


Figura 61. Distribuição (diagramas de caixa) do número de dias com precipitação pluvial nos eventos de El Niño, Neutro e La Niña, em novembro (a) em outubro-novembro (b) e em outubro-novembro-dezembro (c), no Rio Grande do Sul, período 1913-1998 (Fontana & Almeida, 2002).

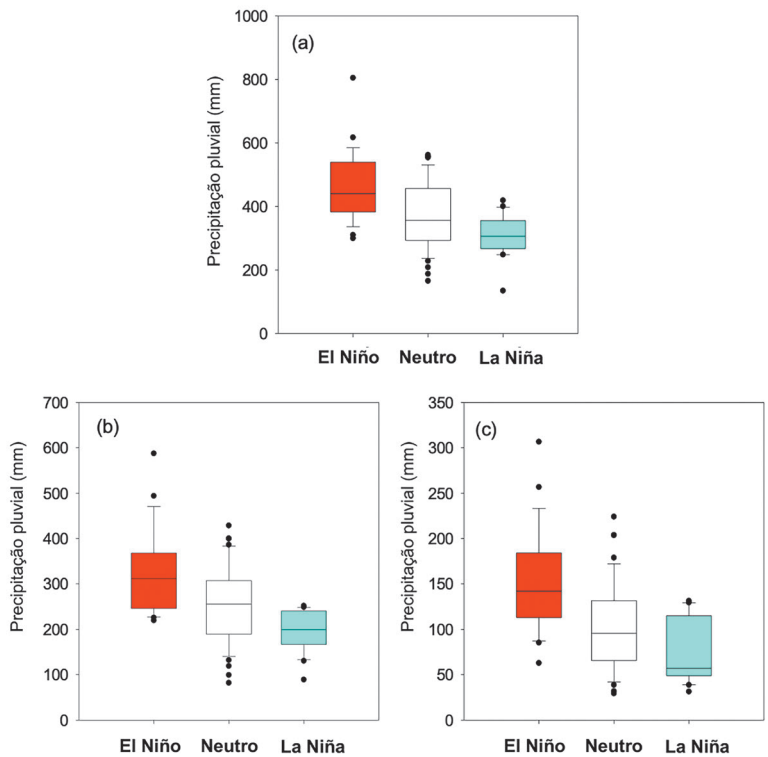


Figura 62. Distribuição da precipitação pluvial (diagramas de caixa) (mm) de outubro a dezembro (a), de outubro e novembro (b) e novembro (c) no Rio Grande do Sul, período 1914-1998 (Puchalski, 2000).

do Rio Grande do Sul (Fonte: CONAB, safra 2020-2021, publicado no Jornal Correio do Povo de 10/4/2022). Novembro confirma como o mês mais crítico, pois como se constata na Figura 62c, a mediana da precipitação pluvial, de todo o Estado, é de apenas 50 mm.

A Figura 63, mostra a distribuição espacial da mediana da precipitação pluvial (mm) do trimestre outubro-novembro-dezembro, no Rio Grande do Sul, com as frequências da precipitaçãp pluvial acima da mediana em anos de El NIño e abaixo da mediana em anos de La Niña. No caso do El Niño, há uma grande área do Estado com frequência de 70 e 80% da precipitação pluvial acima da mediana (Figura 63B) e no caso de La Niña também uma grande área, com frequência de 80% da precipitação pluvial abaixo da mediana (Figura 63C).

Segundo Marques (2005), as correlações dos meses de outubro e novembro, confirmam a maior influência dos eventos ENOS nas precipitações pluviais do Rio Grande do Sul, durante a primavera. Marques (2005), também mostrou as correlações entre TSM do Pacífico e precipitações pluviais de duas regiões homogêneas do Rio Grande do Sul, com defasagem (0), (1) e (2) meses.

A Figura 64, mostra essas correlações, para as regiões noroeste (Iraí, Santa Rosa, Santo Ângelo, Ijuí, Cruz Alta, Júlio de Castilhos e São Luiz Gonzaga) e sudeste (Santa Vitória do Palmar, Rio Grande, Pelotas, Porto Alegre e Osório). Estes resultados de Marques (2005) estão de acordo, principalmente, com os de Montecinos *et al.* (2000) que encontraram, para o Rio Grande do Sul, muitas estações meteorológicas com correlações significativas para os bimestres outubro-novembro e novembro-dezembro, confirmando que esses meses são os que apresentam melhores teleconexões com o Pacífico, para a precipitação pluvial. As mais altas correlações para a região noroeste está de acordo com a climatologia do fenômeno no Estado, segundo Matzenauer *et al.* (2021) (Figura 65). E mais, as correlações defasadas de TSM do Pacífico de até dois meses (Figuras 64 c, d, e, f) têm caráter preditivo.

Em relação à TSM do Atlântico, perto da costa da Região Sul do Brasil, Marques (2005), encontrou maiores correlações positivas com a precipitação pluvial, para a Região Sudeste do Rio Grande do Sul (Região mais próxima do Oceano Atlântico), nos períodos de dezembro a janeiro e de junho a agosto.

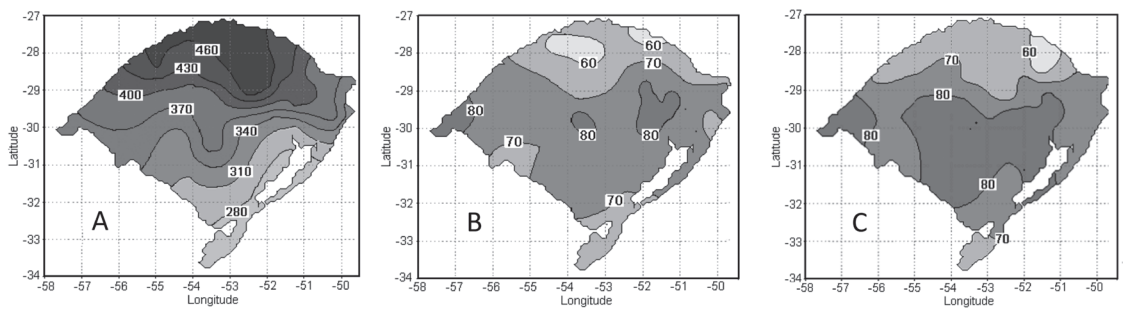


Figura 63. Distribuição espacial da mediana da distribuição da precipitação pluvial no trimestre outubro--novembro-dezembro (A), percentagem (%) da precipitação pluvial estar acima da mediana em anos de El Niño (B) e percentagem (%) da precipitação pluvial estar abaixo da mediana em anos de La Niña (C), no estado do Rio Grande do Sul, período 1950-2000 (Marques, 2005).

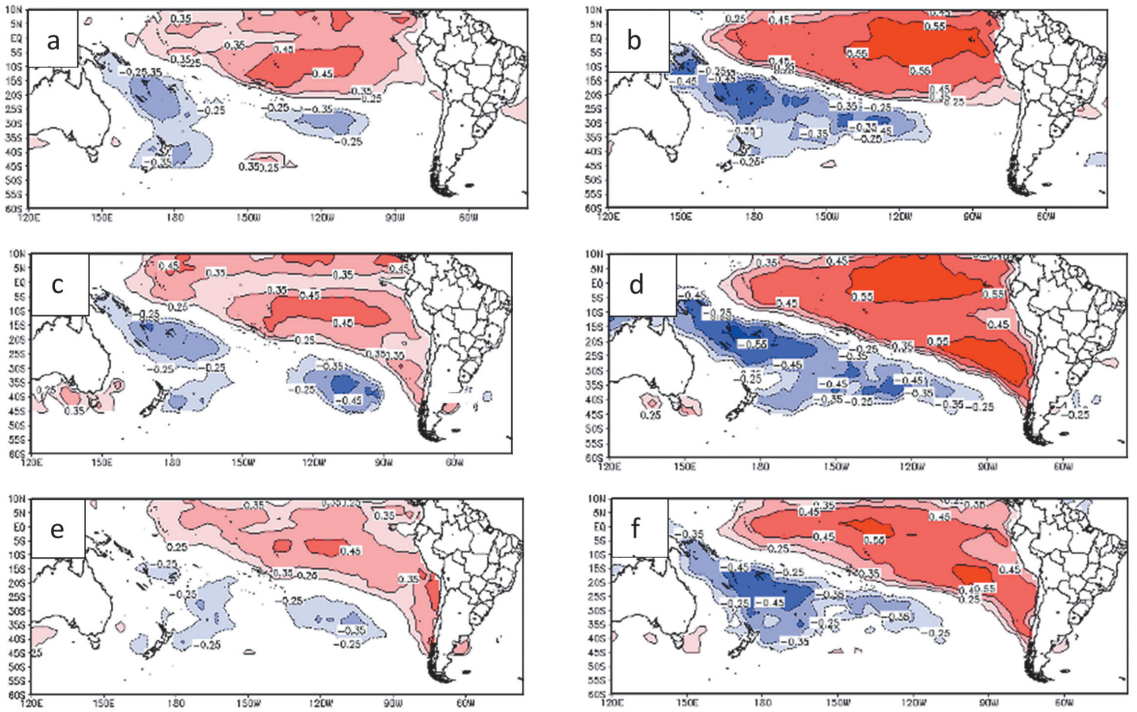


Figura 64. Correlação entre TSM do Pacífico do mês de novembro e precipitação pluvial de novembro para a região sudeste (a) e região noroeste (b); correlação entre a TSM do Pacífico do mês de outubro e precipitação pluvial do mês de novembro para a região sudeste (c) e para a região noroeste (d); correlação entre a TSM do Pacífico do mês de setembro e precipitação pluvial de novembro para a região sudeste (e) e para a região noroeste (f), do Rio Grande do Sul, período de 1950-1995 (Adaptado de Marques, 2005).

Matzenauer *et al.* (2021), usaram uma série de dados de 50 anos (1961-2010), de 28 estações meteorológicas, atualizaram a climatologia da precipitação pluvial relacionada com o ENOS, no Rio Grande do Sul. A precipitação média anual dos anos de El Niño foi de 1.858 mm e dos anos de La Niña 1.480 mm. A média climatológica do Estado foi de 1.622 mm. Portanto, nos anos de El Niño a precipitação pluvial anual supera a média em 236 mm (+15 %) e nos anos de La Niña o déficit em relação à normal é de 142 mm (-9%).

A Figura 65, mostra a distribuição espacial da precipitação pluvial anual nos anos de El Niño, La Niña e média climatológica. No caso do El Niño, as maiores precipitações pluviais ocorrem no norte-noroeste do Estado, chegando a 2.000-2.200 mm. O noroeste do Estado é a área tradicional de produção de grãos e está entre as de maiores produtividades. Mesmo que a precipitação pluvial anual normal dessa região seja adequada, no verão ocorre, com frequência, deficiência hídrica para as culturas. É por isso que em anos de El Niño a produção de grãos de culturas não irrigadas, principalmente milho e soja, é favorecida.

No caso de La Niña, as precipitações pluviais são baixas, especialmente no sudoeste do Estado, sendo o extremo sul mais seco. Nesses anos, ocorrem estiagens que causam grandes impactos negativos à produção agropecuária gaúcha. Mas, estiagens também ocorrem em anos ditos neutros

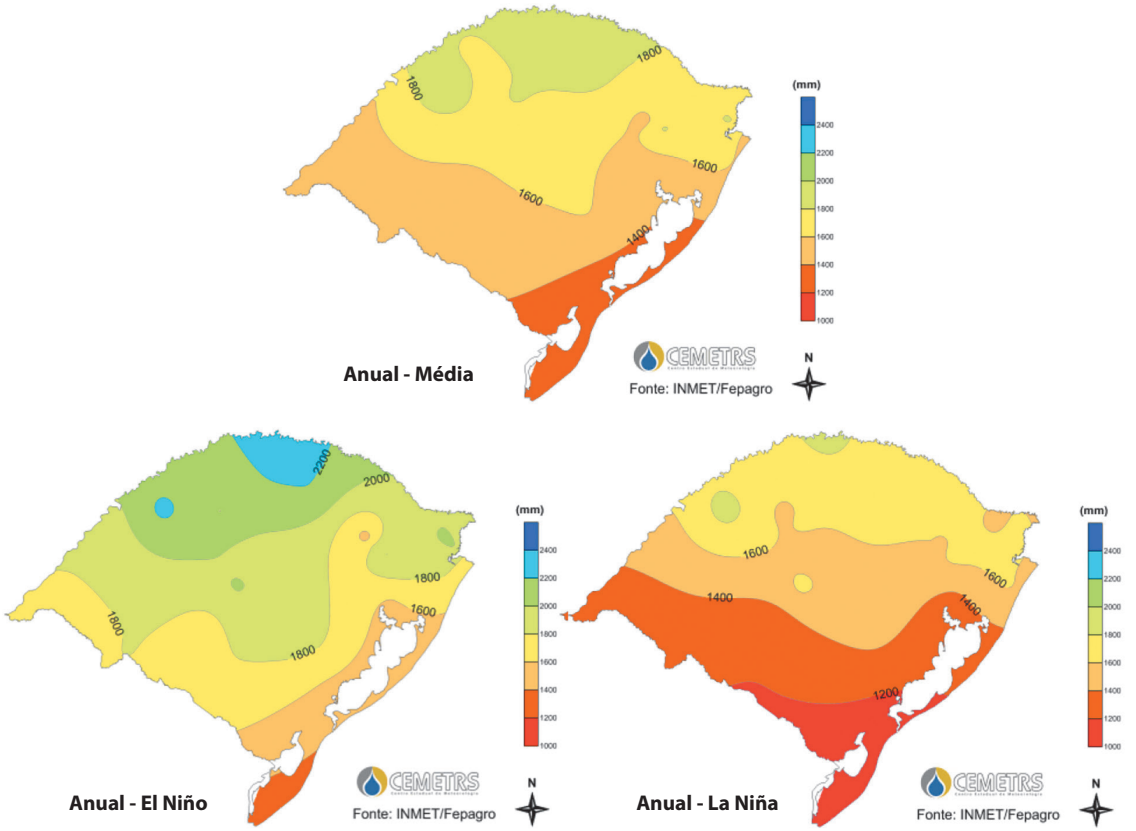


Figura 65. Distribuição da precipitação pluvial (mm) para a média do Estado, para anos de El Niño e para anos de La Niña, Rio Grande do Sul, período de 1961-2010 (Matzenauer *et al*., 2021).

ou "normais". Aliás, em anos neutros tudo pode acontecer e para esses não há previsão. A grande vantagem em eventos de ENOS é que, atualmente, existe boa previsibilidade, com alguns meses de antecedência. Isso possibilita, pela primeira vez, que o produtor rural possa tomar diversas providências, no sentido de minimizar prejuízos ou tirar vantagem, em caso de uma previsão favorável.

A Figura 66, mostra a precipitação pluvial média nas estações do ano em eventos de El Niño, La Niña e Neutro. Aqui, mais um recente resultado demonstrando que no extremo sul do Brasil, a primavera é a estação do ano de maior impacto tanto de El Niño como de La Niña. Como se vê na Figura 66, a primavera é a estação que apresenta as maiores diferenças entre El Niño e Neutro e entre La Niña e Neutro. E, também, confirma que El Niño determina maiores precipitações pluviais em todas as estações do ano.

Tanto o trabalho de Montecinos *et al.* (2000) como os de Grimm *et al.* (1998), Grimm *et al.* (2000), Grimm (2009) e Mason & Goddard (2001) mostraram que a primavera é a estação que apresenta melhor teleconexão do Oceano Pacífico com a precipitação pluvial do SAS, que inclui a Região Sul do Brasil, e, portanto, também, o Rio Grande do Sul, com El Niño determinando anomalias positivas da precipitação pluvial e La Niña ocasionando anomalias negativas da precipitação

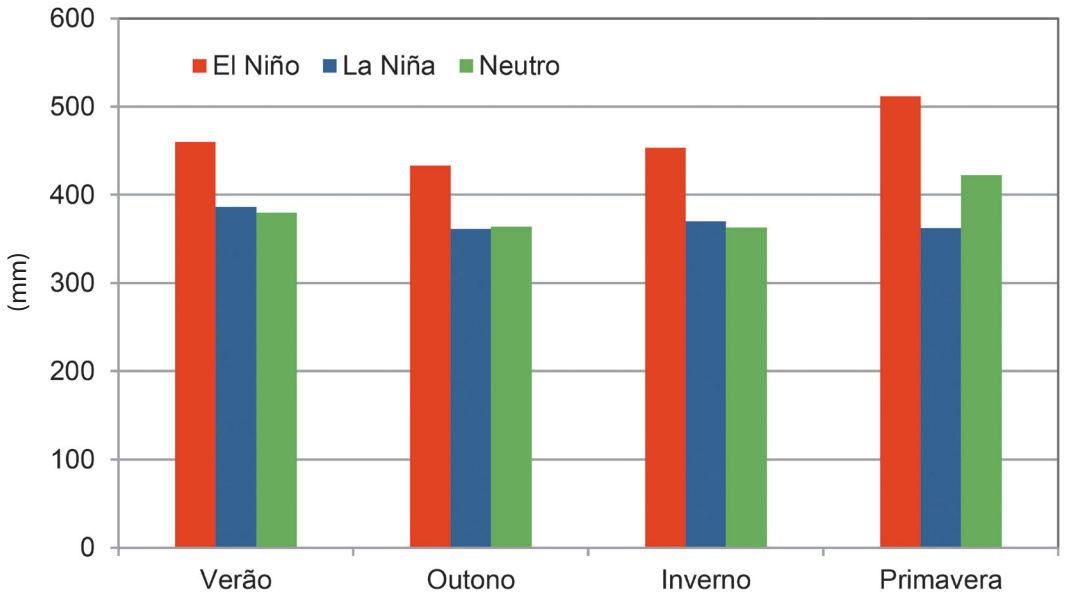


Figura 66. Precipitação pluvial (mm) média em eventos El Niño, La Niña e neutros, nas estações do ano, Rio Grande do Sul, período de 1961-2010 (Matzenauer *et al.,* 2021).

pluvial. Grimm (2009) citou novembro como o mês mais crítico, tal como vimos, especialmente para La Niña.

A Figura 67, mostra a distribuição média da precipitação pluvial dos eventos ENOS para os meses do ano, onde se comprova que outubro e novembro são os meses de maiores diferenças, tanto de El Niño, como La Niña, em relação aos anos neutros, voltando a ocorrer, em menor intensidade, em maio do ano seguinte ao fenômeno. O mês de novembro é o que melhor responde às anomalias de TSM do Pacífico, tanto positivas como negativas. Os resultados, especialmente de outubro e novembro, estão completamente de acordo com os resultados de Montecinos *et al.* (2000) para o Rio Grande do Sul. Também se observa que o El Niño apresenta as maiores precipitações pluviais em oito dos 12 meses do ano.

Na Figura 68, é apresentado o Índice Hídrico (ETR/ETo), da primavera, no Rio Grande do Sul, onde ETR é a evapotranspiração real, determinada em balanço hídrico seriado e ETo é a evapotranspiração de referência ou potencial, estimada pelo método de Priestley-Taylor (1972). Nela se pode observar a tendência significativa de aumento do Índice, no período estudado (1971-2009), sendo que foram os anos de El Niño que determinaram essa tendência, em que praticamente todos os anos de El Niño tiveram índices altos, além de uma predominância de El Niño sobre La Niña (14 El Niño e 11 La Niña). A maioria dos eventos de La Niña, determinaram índices hídricos baixos.

A metade sul do Estado do Rio Grande do Sul é a região onde as precipitações pluviais anuais são menores e onde ocorre a maior frequência de estiagens. A Figura 69, mostra a ocorrência dos déficits hídricos anuais (mm) associados a dois eventos extremos de ENOS, o El Niño de 1982-1983 e a La Niña de 1988-1989. Esses déficits foram determinados em balanços hídricos seriados, com uma capacidade de armaze-

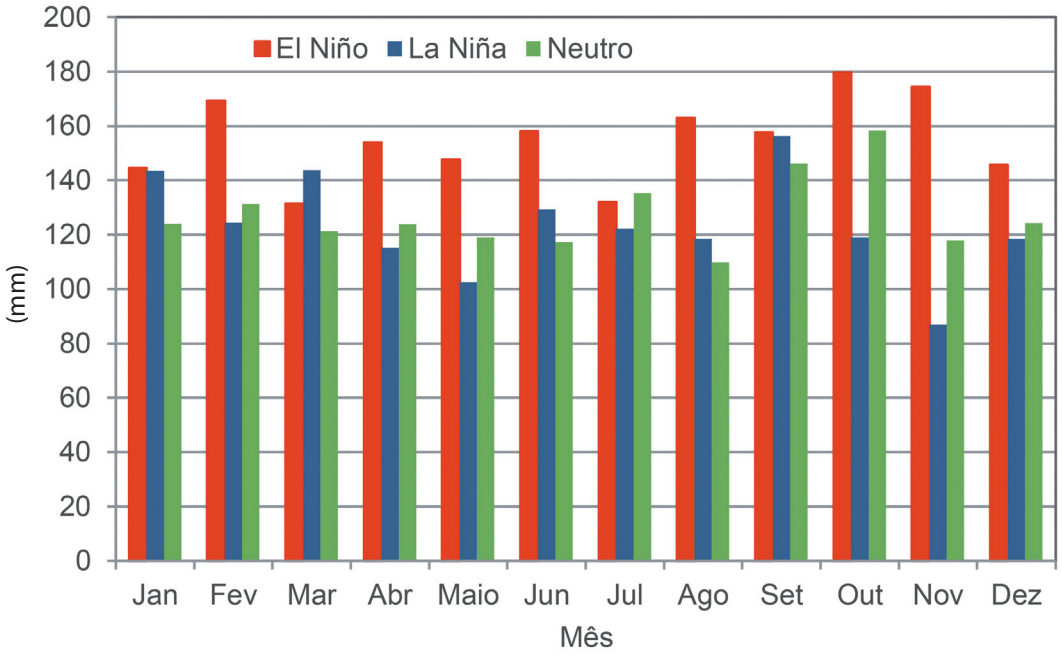


Figura 67. Precipitação pluvial, média mensal (mm), em eventos El Niño, La Niña e neutro, no Rio Grande do Sul, período 1961-2010 (Matzenauer *et al.*, 2021).

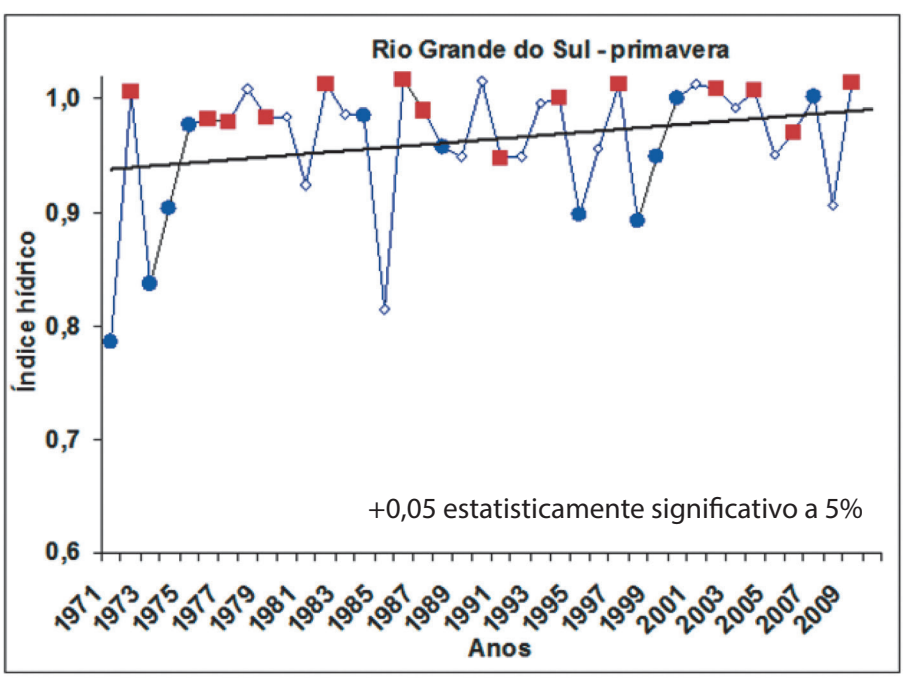


Figura 68. Impactos do ENOS no Índice Hídrico, na primavera, Rio Grande do Sul, período de 1971-2009 (Cordeiro *et al*., 2018). Vermelho El Niño, azul La Niña. Linha cheia grossa é a reta de regressão, indicando a tendência do Índice Hídrico.

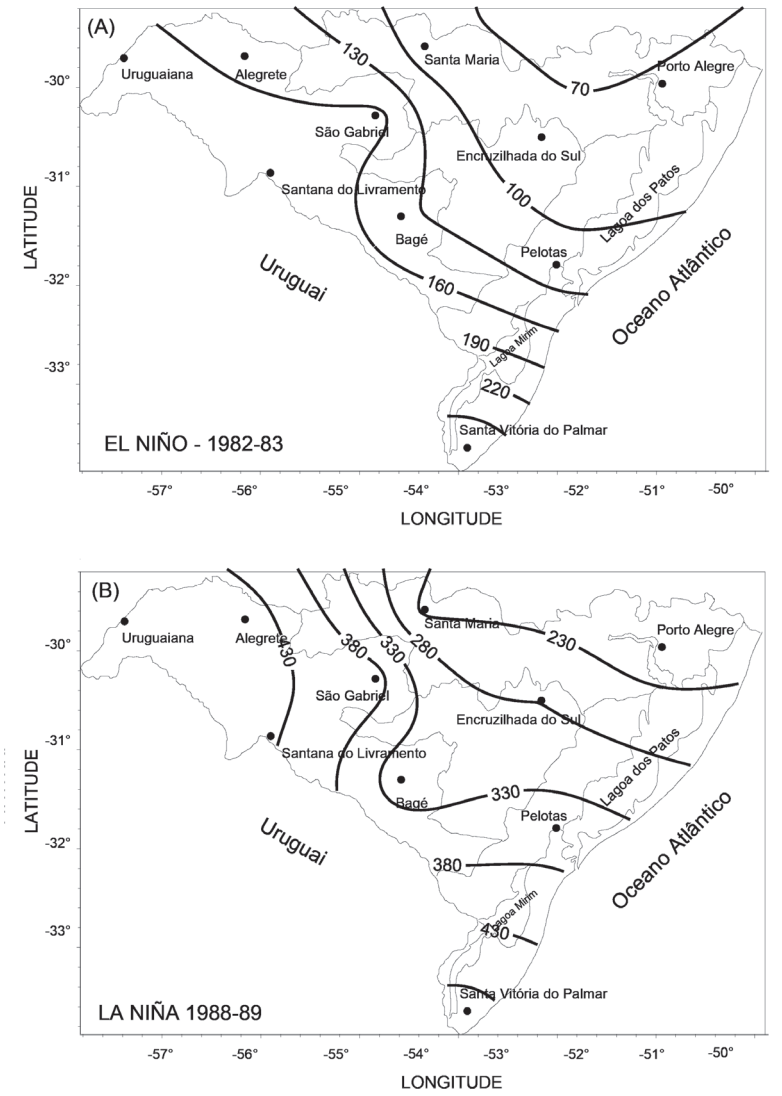


Figura 69. Deficiência hídrica anual (mm) (CAD=75mm) durante o El Niño de 1982-1983 (A) e La Niña de 1988-1989 (B) na metade sul do Rio Grande do Sul (Leivas, 2003).

namento de água disponível (CAD) no solo de 75 mm, o que é usada, em geral, para culturas anuais e forrageiras. Nota-se que um evento forte de La Niña, provoca deficiências hídricas anuais de até mais que 400 mm. No caso de um El Niño muito forte, como foi o de 1982-1983, esses déficits anuais são menores que 160 mm, na maior parte da região.

A Figura 70, mostra o número total de eventos com precipitação pluvial diária ≥50mm, em anos de El Niño (A) e anos de La Niña (B), no Rio Grande do Sul, no período de 1983-2012. Em anos de El Niño, há maior número de precipitações pluviais intensas do que em anos de La Niña., especialmente no centro-oeste do Estado. Há uma grande área, englobando Cruz Alta e Santa Maria, com mais de 50 eventos intensos de precipitação pluvial, no período analisado de 30 anos, ou seja, em média, mais de um evento e meio por ano (Figura 70A). Cruz Alta, em El Niño, apresenta o máximo valor de intensidade, das estações meteorológicas do Estado incluídas no estudo (12). La Niña, também tem uma grande área, do centro-noroeste

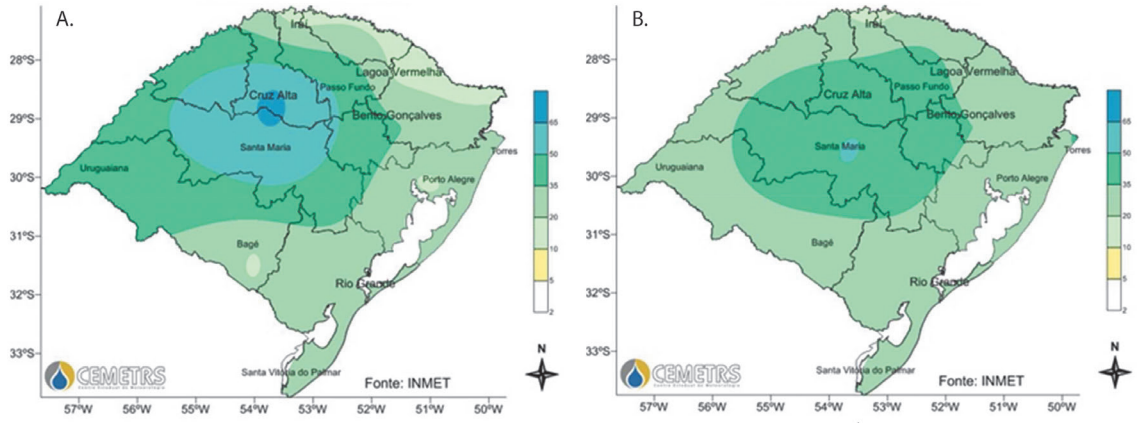


Figura 70. Número de eventos de precipitação pluvial ≥ 50 mm em anos de El Niño (A) e em anos de La Niña (B), período 1983-2012, no Rio Grande do Sul (Tuchtenhagen *et al*., 2015).

do Estado, com números altos de eventos intensos de precipitação pluvial, mas menores que El Niño (Figura 70B).

Enchentes e secas

Em geral, nos fortes e muito fortes eventos de El Niño, ocorrem enchentes do Rio Uruguai e outros rios da bacia do Uruguai e da bacia do Oceano Atlântico e alagamentos de terras baixas da metade sul do Rio Grande do Sul, que à época da maior intensidade do fenômeno encontram-se com o cultivo de arroz irrigado e, mais recentemente também com soja, com prejuízos na produção agrícola.

Mas, a enchente que ficou marcada na história hidrológica do Rio Grande do Sul foi a ocorrida nos idos de 1941. O muito forte El Niño de 1939/1941 provocou grandes enchentes no Estado, especialmente com as intensas precipitações pluviais dos meses de abril e maio de 1941. Como se pode verificar na Tabela 5, nesses dois meses ocorreram precipitações pluviais acima de 700mm em quase todas as regiões climáticas do Estado. Essas precipitações pluviais corresponderam, em média de todas as localidades consideradas, a mais de 50% do total normal anual e em algumas regiões, foi igual ou maior do que 60% (o normal, considerando que as precipitações pluviais são bem distribuídas durante o ano no Rio Grande do Sul, seria 16 a 17%!).

Em Porto Alegre, houve a maior e mais famosa enchente vivida pela capital do Estado. Em maio de 1941 choveu durante 22 dias seguidos na cidade e simultaneamente choveu intensamente em toda a bacia hidrográfica dos rios formadores do Guaíba. Segundo o Jornal Correio do Povo (Edição de 8 de maio de 2001) o auge da enchente em Porto Alegre ocorreu no dia 8 de maio de 1941, quando as águas alcançaram o ponto mais alto da régua da Administração Portuária, com 4,73 metros. Naquele dia todo o centro da cidade foi inundado (inclusive foram atingidas as oficinas gráficas do "Correio do Povo", que deixou de circular por sete dias), transformando Porto Alegre na "Veneza gaúcha" (Figura 71).

Os impactos econômicos e sociais dessa enchente, que atingiu um terço da cidade, com milhares de flagelados, motivou a administração pública a iniciar os estudos de pro-

Tabela 5. Precipitação pluvial (mm) de abril e maio de 1941 (El Niño de 1939/1941) no Estado do Rio Grande do Sul. Tomadas as localidades com mais de 700 mm de precipitação pluvial no bimestre abril-maio.

LOCAIS	ABRIL	MAIO	TOTAL	% sobre a normal do ano
Soledade	617	490	1107	56
Santa Maria	616	454	1070	63
Encruzilhada do Sul	551	382	933	62
Guaporé	447	418	865	51
Júlio de Castilhos	432	406	838	53
Taquari	394	413	807	57
Porto Alegre	387	404	791	60
Caxias do Sul	376	414	790	48
Caçapava do Sul	392	392	784	49
Santo Ângelo	486	292	778	45
Cachoeira do Sul	406	360	766	53
São Francisco de Paula	316	448	764	35
São Luiz Gonzaga	487	272	759	46
Santiago	387	360	747	49

Fonte de dados: 8º DISME/INMET.



Figura 71. Enchente de 1941 em Porto Alegre. Na foto a Rua dos Andradas, junto à Praça da Alfândega, lembrando a cidade italiana de Veneza. Fonte: Jornal Correio do Povo, edição de 8 de maio de 2001.

teção da Capital contra as cheias, que culminou com a construção do dique, conhecido hoje como o "muro da Mauá."

O grande El Niño de 1982/1983 ocasionou no Rio Grande do Sul, como de resto em toda a Região Sul do País, grandes enchentes. O período chuvoso de abril e maio de 1983 (ano +1) (coincidente com o ano de 1941) foi muito prejudicial à agricultura do Estado, porque essa é, ainda, época de colheita das culturas de verão. No mês de maio, em muitas localidades do centro, do norte e nordeste do Estado choveu durante mais de 20 dias, algumas localidades com até 27 dias de precipitação pluvial (Tabela 6).

O El Niño de 1997/1998, foi considerado o evento do século XX. Segundo Trenberth (2019) foi o maior do século XX, conforme várias medidas. Teve grande impacto em diversas regiões do Globo, inclusive no Brasil. A Figura 72, apresenta as anomalias da precipitação pluvial ocorrida no Rio Grande do Sul, de julho de 1997 a junho de 1998. Pode-se verificar que houve grandes excessos de precipitação pluvial em todo o Estado, mas a região noroeste foi a mais atingida, com excedentes pluviométricos iguais ou maiores do que 1.000 mm, nesse período de 12 meses, ocasionando grandes enchentes, especialmente, no médio e baixo vales do Uruguai.

O primeiro muito forte El Niño do século XXI, o de 2015-2016, ocasionou, também, grandes anomalias na precipitação pluvial no Rio Grande do Sul, embora um pouco menores que 1997-1998. A Figura 73, mostra a distribuição das anomalias da precipitação pluvial de julho de 2015 a junho de 2016. Verifica-se que, semelhante ao El Niño de 1997-1998, que o noroeste do Estado teve anomalias de mais de 600 mm. Mas, no sudoeste do Estado (parte da região da Campanha) os excedentes chegaram a mais de 700 mm. No trimestre de dezembro de 2015 a fevereiro de 2016, a precipitação pluvial esteve acima do percentil 85 (chuvoso e muito chuvoso), em grande parte do oeste do Estado (*inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/quantís2*). E para os que, ainda, possam pensar que o ENOS não está relacionado com a agricultura de primavera-verão, não irrigada, do Estado, uma série histórica de rendimento da soja, período 1970-2017 (IBGE/EMATER-RS) mostra que os anos de El Niño continuam, na grande maioria dos casos, produzindo altos rendimentos dessa cultura, como mostrado em trabalhos anteriores. E que La Niña continua ocasionando frustração das safras, conforme acontecido nos recentes três anos desse evento, especialmente, 2021-2022.

O El Niño é prejudicial aos cultivos de primavera-verão, do Rio Grande do Sul, quando o sinal na precipitação pluvial é forte no período de maturação e colheita (outono) do ano (+1), como foi o caso do El Niño de 1982-1983.

A enchente do El Niño 2015-2016, provocou um fato inédito em Porto Alegre. No dia 12 de outubro de 2015, foram fechadas as 14 comportas do dique da Mauá, pela primeira vez desde sua construção, para evitar uma grande enchente na cidade. Nessa ocasião, o medidor do nível do Guaíba no Cais, marcava 2,88 metros, chegando a 2,92 metros, com ondas que invadiram o Cais. A decisão de fechar as comportas foi do Prefeito da Capital, José Fortunati, de forma preventiva, pois a Prefeitura entendia que se o nível chegasse a 3 metros, a água poderia invadir o Cais. Naquela data, as águas avançaram sobre áreas de lazer, como a Usina do Gasômetro, Parque Marinha do Brasil e a praia de Ipanema no sul da Capital. As chuvas que continuaram, depois das comportas fechadas, alagaram a cidade, inclusive o parque gráfico do Correio do Povo e suspenderam serviços essenciais, como a coleta de

Tabela 6. Precipitação pluvial diária (mm) em maio de 1983 (El Niño 1982-1983), no Rio Grande do Sul.

Dia	Iraí	Cruz Alta	Passo Fundo	Lagoa Vermelha	Santa Maria	Caxias do Sul	Veranópolis
1	5,1	8,3	14,7	21,2	2,2	35,0	82,2
2	0,5	68,4	31,9	36,2	96,8	25,8	1,8
3	35,2	15,1	11,9	13,0		2,7	1,5
4					29,5	0,4	0,3
5	1,0	14,9			44,3	0,6	0,9
6	1,3	1,9	1,4	0,6		2,4	
7	3,1	0,1					1,7
8	49,0	29,1	2,1	1,0	0,3	1,1	0,9
9	0,5	5,7	3,0	1,3	0,3	1,7	15,6
10	58,2	19,2	24,7	55,2	16,0	8,4	6,5
11	9,4	6,8	0,3	0,7	16,5	4,6	8,5
12	2,4	2,0	8,1	18,0	0,3	30,0	
13	0,1	0,3		0,1	0,3	0,2	
14		0,3					0,4
15	6,2	23,8	1,1	0,5	26,0		19,8
16	54,3	89,1	32,6	35,2	27,5	18,4	15,8
17	6,8	4,6	18,3	20,2	0,9	11,4	
18	0,2	0,4		0,2	0,1		3,2
19	46,2	2,0	14,2	70,4	2,8	3,1	31,6
20	94,8	17,8	27,0	28,4		46,8	1,6
21	0,9	3,9	11,0	0,8	2,0	1,0	1,1
22	0,1	0,3		0,2	0,2	0,1	0,4
23	4,2	17,0			0,2	0,5	3,2
24	0,1	0,4		0,1	2,0	2,0	2,0
25	0,3	0,4				5,5	
26	0,1	0,1					0,8
27	1,2	16,5		0,2	40,3	3,7	45,0
28	37,1	22,3	57,9	47,6	19,3	40,6	
29	0,1		1,1	0,2		2,6	
30							
31			0,2	4,2		0,2	
Mês	415	366	262	356	328	249	234

Fonte de dados: 8° DISME/INMET e FEPAGRO-RS

lixo e o transporte fluvial (Barco Catamarã). Conforme a Agência Brasil, a Capital gaúcha tinha mais de 10 mil pessoas com as residências alagadas. Fonte: reportagem do Jornal Correio do Povo, de 11 de junho de 2023.

Em 26 de setembro de 2023, o Jornal Correio do Povo, em letras garrafais, traz a manchete "COMPORTAS FECHADAS". Dada

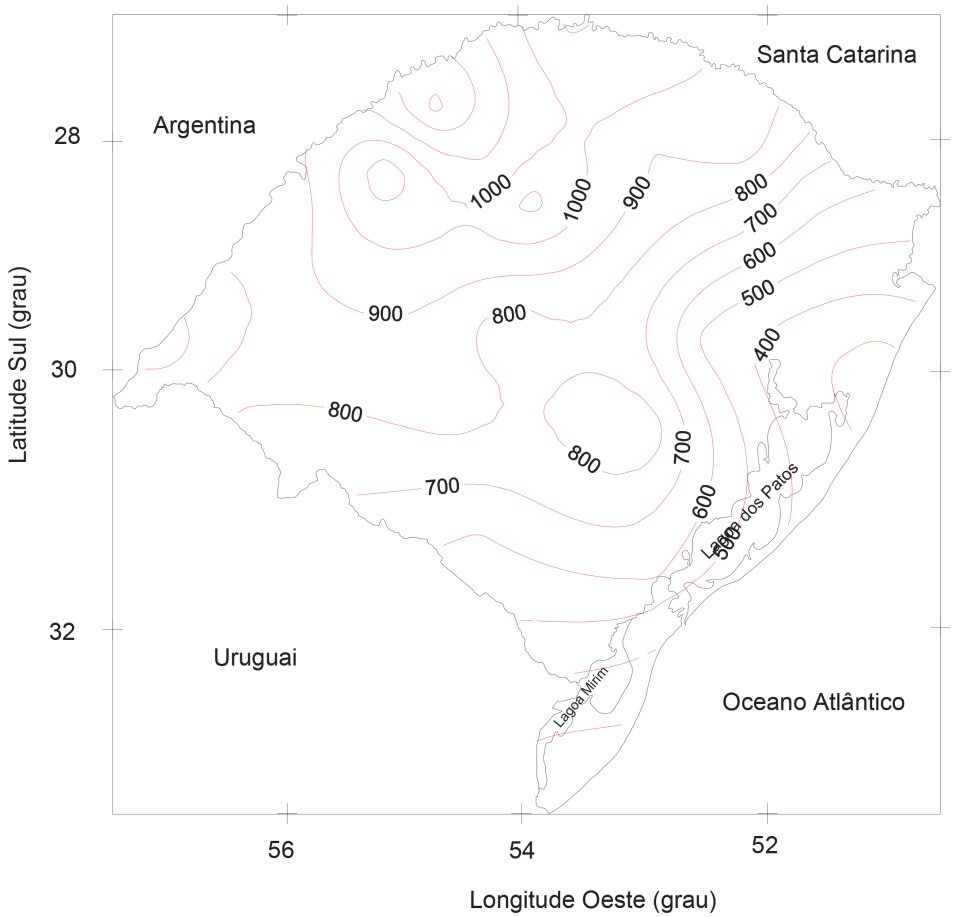


Figura 72. Anomalias de precipitação pluvial (mm) do período de julho/1997 a junho/1998 (El Niño 1997/1998) no Estado do Rio Grande do Sul. As anomalias são em relação ao período 1961-1990. Fonte de dados: INMET (*www.inmet.gov.br*).

a grave situação da enchente (El Niño 2023), que assolou todo o Estado e o nível do Guaíba, no Cais Mauá, atingir 2,76 metros, o Prefeito de Porto Alegre, Sebastião Melo, decidiu pelo fechamento das comportas do Cais Mauá, à tarde de 25 de setembro, de forma preventiva. E agiu de forma acertada, pois no dia 28 de setembro, devido ao represamento das águas, pelo vento sul, o Guaíba atingiu o nível de 3,18 metros (número que é superior à cota crítica, que é de 3,00 metros), transbordou e inundou o Cais Mauá. Mas, as comportas funcionaram, evitando a inundação do Centro Histórico da Capital, como aconteceu em 1941.

O dito ciclone extratropical do início de setembro de 2023 varreu o Estado, com enormes prejuízos e mortes. Segundo a Defesa Civil, o Decreto do Governador do Estado, Eduardo Leite, de 15 de setembro, traz a relação dos municípios atingidos, sendo que 20 estavam em situação de calamidade pública e 63 em situação de emergência.

Conforme Boletim da Defesa Civil *(https://www.defesacivil.rs.gov.br)* de 27 de outubro de 2023, em todo o Estado, foram

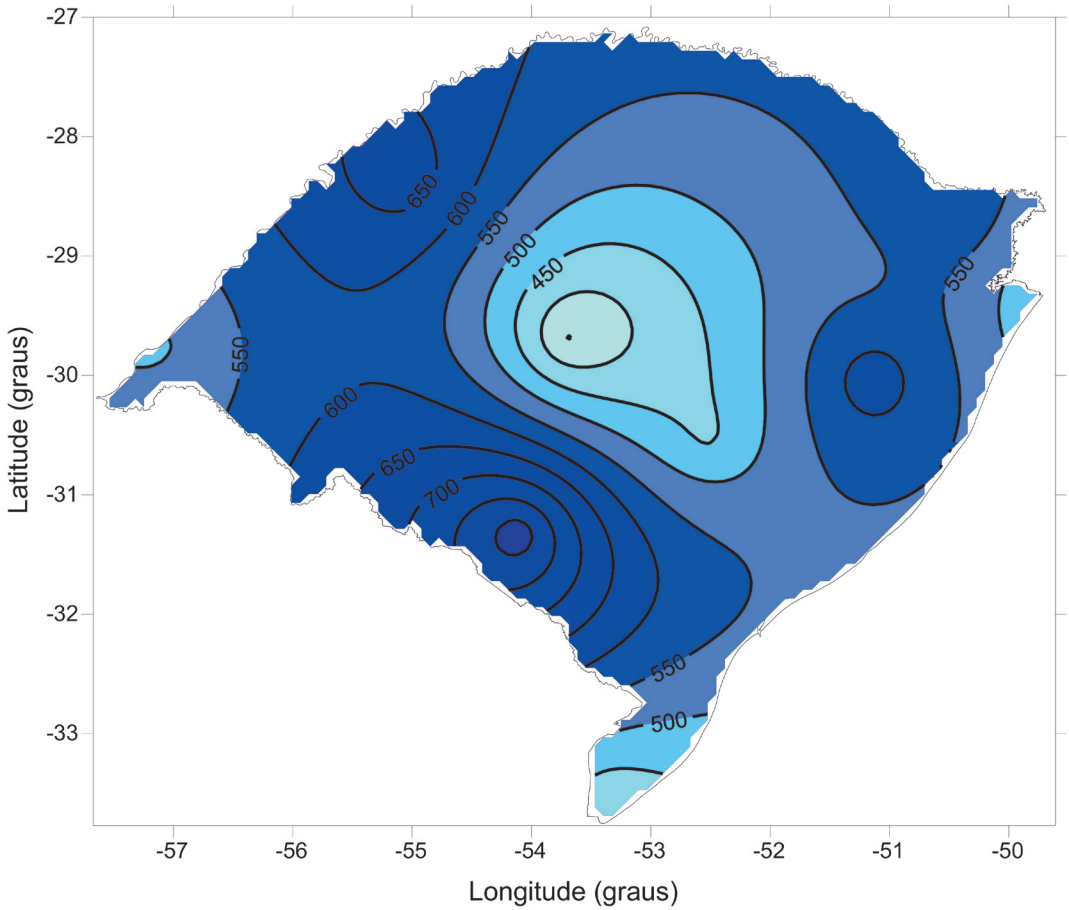


Figura 73. Anomalias da precipitação pluvial (mm) ocorridas de julho de 2015 a junho de 2016 (El Niño 2015-2016), no Rio Grande do Sul. As anomalias são em relação à normal 1961-1990. Fonte de dados: INMET (*www.inmet.gov.br*).

afetados 107 municípios, com 5.216 desabrigados registrados, 22.283 desalojados, 402.297 afetados, 943 feridos, 6 desaparecidos e óbitos de 52 pessoas.

Mas, a Região mais atingida foi o vale do Rio Taquari (rio que nasce nos Campos de Cima da Serra, nordeste do Estado, percorre 530 km, recebe diversos afluentes e deságua no Rio Jacuí, em Triunfo). A cidade mais atingida foi Muçum, distante 156 km de Porto Alegre e com uma população de 4.601 habitantes. Na noite de 4 e madrugada de 5 de setembro de 2023, os habitantes da cidade foram surpreendidos com uma inundação jamais vista. A cidade foi literalmente arrasada pela fúria das águas transbordadas do Rio Taquari. Casas, lojas, grandes mercados, bancos e prédios públicos viraram escombros. Até o cemitério da cidade foi destruído. Das 510 residências vistoriadas, depois do sinistro, 119 foram totalmente destruídas e 90 atingidas com necessidade de reforma, antes de voltar a ser habitável. E das 52 mortes do Estado, 16 foram de Muçum. Roca Sales, também no vale do Taquari, teve 13 óbitos. Então, só essas duas cidades vizinhas, tiveram 56% do total de

óbitos. Uma tragédia, nunca presenciada!

O Estado do Rio Grande do Sul, em geral, não é atingido por secas de longa duração. É por essa razão, que é adotado o termo estiagem, para a falta de precipitações por algum período, como uma estação do ano, por exemplo, embora essas estiagens sejam a adversidade climática mais séria para a agricultura gaúcha, provocando quebra de safras agrícolas, com grandes impactos econômicos e sociais

Nos registros históricos do Estado, desde 1913, por exemplo, ocorreram dois episódios que se pode chamar de seca, a de 1917 e 1962. A de 1917 (La Niña de 1916-1918), classificada como forte, foi o evento, possivelmente, de maior impacto sobre a precipitação pluvial do século XX no Estado. O efeito maior foi no ano de 1917. A Figura 74, mostra a distribuição espacial da percentagem da precipitação pluvial anual ocorrida, em relação à normal climatológica de 1961-1990, da seca que assolou o Estado em 1917. Na maior área do Rio Grande do Sul, choveu, no ano, menos de 60% da normal, com áreas, como parte da Campanha, centro da Depressão Central e parte da Missões em que esse percentual caiu para 50%.

A outra seca ocorreu em 1962, um ano neutro, ou seja, sem o sinal de La Niña, onde grande porção da superfície do Rio Grande do Sul, teve precipitação pluvial menor que 60% da normal climatológica de 1961-1990 (Figura 75). Segundo a análise da climatologia da precipitação pluvial do Estado, com dados de 50 anos (1961-2010), já citada, de Matzenauer *et al*. (2021), no ano de 1962, 75% das 28 estações meteorológicas, tiveram 1962 como o ano mais seco de toda a série. Portanto, as secas ou mesmo fortes estiagens, também ocorrem em anos sem a presença de eventos de La Niña, no Rio Grande do Sul.

Embora as estiagens ocasionem maiores impactos na produção de grãos no Estado, elas também afetam a produção pecuária. Não há, entretanto, séries históricas de informações suficientes para se fazer uma análise quantitativa de seus impactos na produção pecuária. À semelhança de Luiz Gonzaga, que cantou a seca do Nordestina, os versos do saudoso poeta e *payador ga*úcho missioneiro, Jayme Caetano Braun, refletem, com dura clareza, a situação de seca para a pecuária gaúcha:

Há muitos e muitos meses
Vem durando a seca braba
E nem ao menos, desaba
Um chuvisqueiro ou garoa
O calor desacorçoa
Até parece mandinga,
Cortou-se d'água a restinga,
Virou num lodo a lagoa
Até o açude da frente
Está de taipa rachada
E o resto de água embarrada
Que a boiada pisoteia
Parece sangueira feia
Que brotando de repente
Se esparramasse, inda quente,
Na cancha de uma peleia

Jayme Caetano Braun

Relação da ODP e precipitação pluvial

O fenômeno ENOS explica grande parte da variabilidade interanual da precipitação pluvial da América do Sul. Entretanto, alguns estudos têm fornecido evidências diagnósticas de modulação das teleconexões de ENOS por fenômenos climáticos de baixa frequência, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Kayano & Andreoli (2007) analisaram os padrões de anomalias da precipitação pluvial da América do Sul associa-

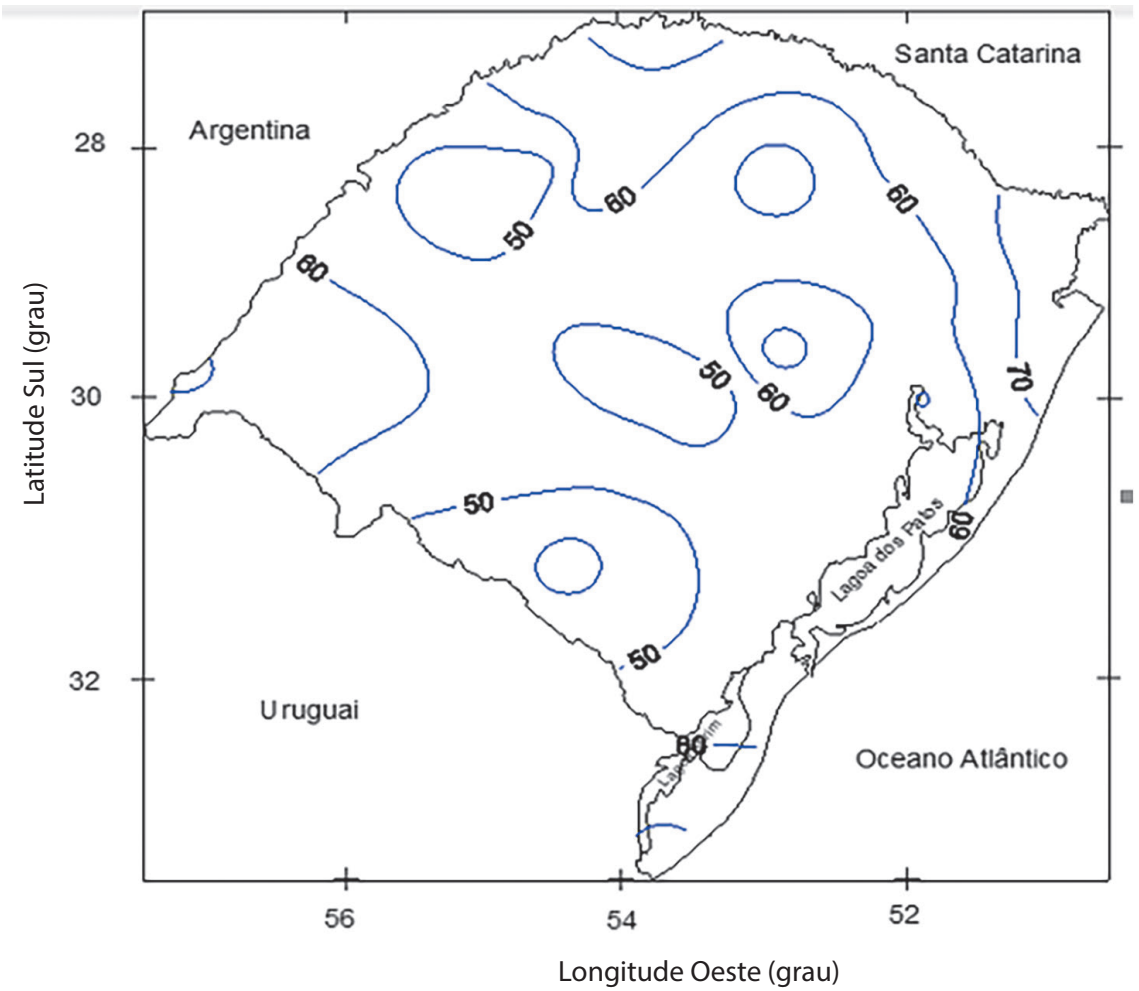


Figura 74. Percentagem (%) da precipitação pluvial ocorrida no ano de 1917 (La Niña), em relação à normal climatológica de 1961-1990, no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: INMET (*www.inmet.gov.br*).

dos ao ENOS, considerando as três fases da ODP: positiva, negativa e neutra. O resultado foi que esses padrões são consideravelmente mais intensos quando ENOS e ODP estão na mesma fase e mais fracos quando estão fora de fase. As autoras sugeriram que a ODP e o ENOS podem agir construtivamente (anomalias intensas e bem definidas) ou destrutivamente (anomalias fracas e ruidosas). Essas conclusões estão de acordo com o que disse McPhaden (2002), para o caso do El Niño: as fases quentes da ODP e o El Niño são aditivas e, nessas condições, as teleconexões atmosféricas podem ser amplificadas.

Como visto, a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) é uma oscilação que também ocorre no Oceano Pacífico, apresentando duas fases (quente e fria), semelhante ao ENOS, só que, entre outras diferenças, a ODP é uma oscilação de baixa frequência, com períodos que variam de 20 a 30 anos, enquanto no ENOS é uma oscilação de alta frequência, cujo período varia de 18 meses

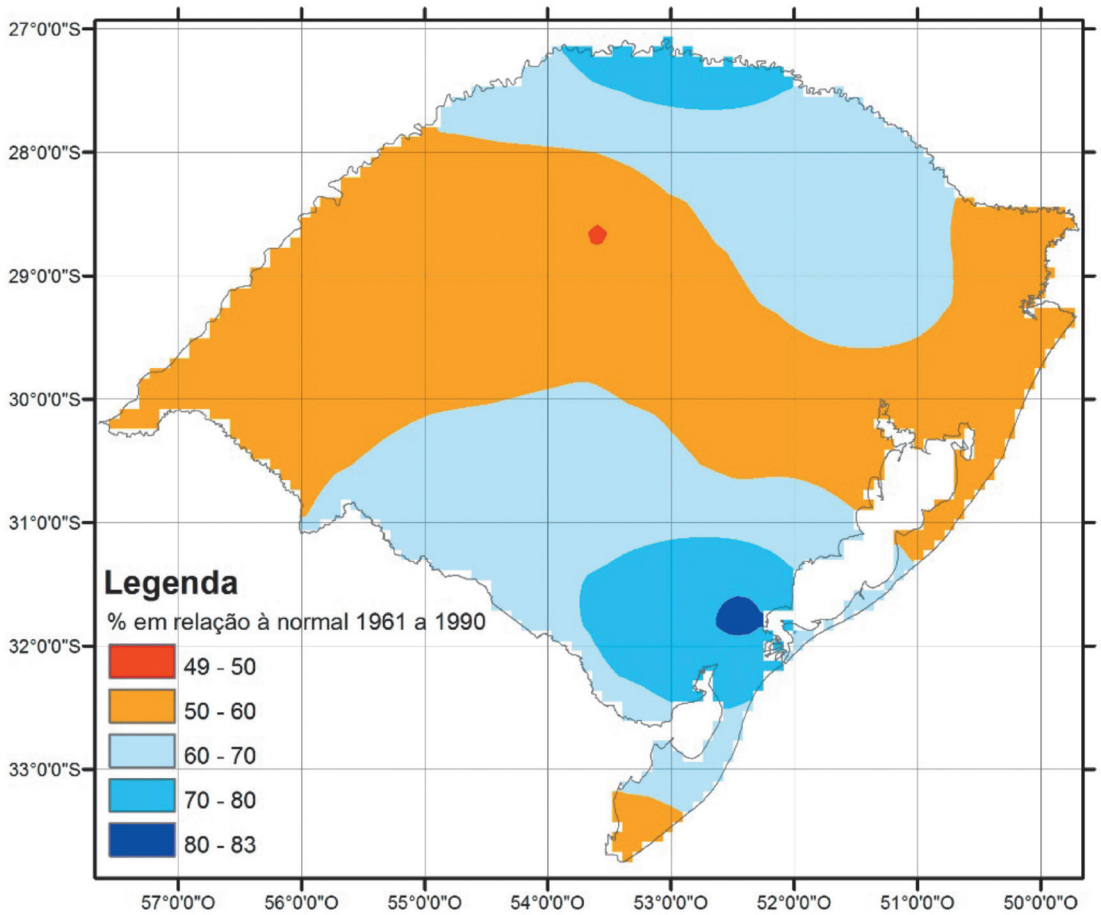


Figura 75. Percentagem (%) da precipitação pluvial ocorrida no ano de 1962 (ano neutro) em relação à normal climatológica de 1961-1990, no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: INMET (*www.inmet.gov.br*).

até 2 ou, raramente, 3 anos. Pelo menos nos períodos da ODP do século XX, o período da ODP negativa de 1947-1976, teve alta frequência de eventos frios de ENOS (La Niña), e que o período de ascensão da temperatura global média, de 1977-1999, teve vários eventos de El Niño, inclusive os dois mais fortes eventos da segunda metade do século XX. No Rio Grande do Sul, os eventos de La Niña ocasionam, normalmente, baixa precipitação pluvial. A Figura 76, da ODP mensal e precipitação pluvial mensal, média do Rio Grande do Sul, apesar de ser uma análise gráfica simples, faz sentido.

Especialmente, no período frio da ODP (anomalias negativas), dominado por eventos de La Niña, coincide bastante bem com um período que dominam as anomalias negativas de precipitação pluvial mensal (abaixo da média do Estado).

Barreto (2009), com dados de 1948-1999, que correspondem às duas fases da ODP (fria e quente), no verão austral, avaliou a variabilidade climática nas escalas decadal e interanual do Oceano Pacífico e sua interação com o Oceano Atlântico e América do

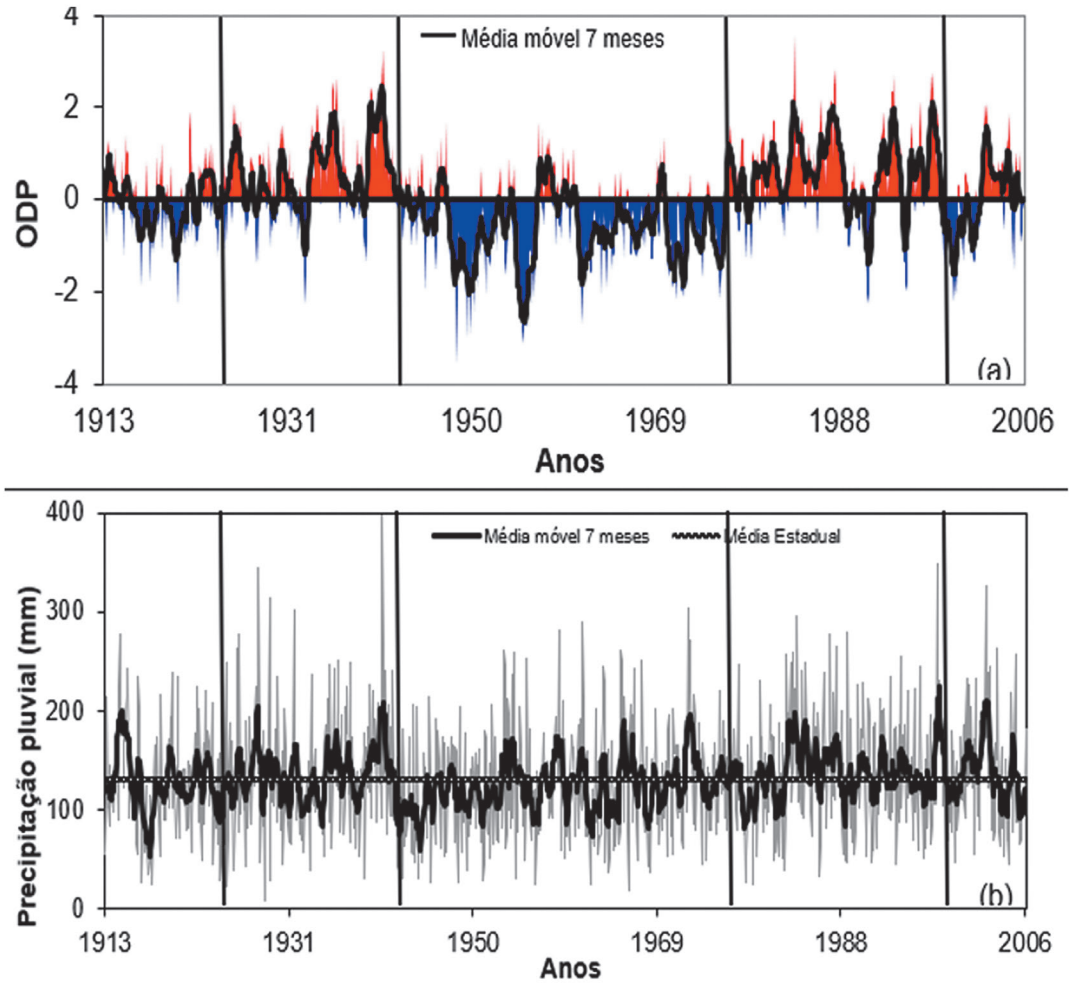


Figura 76. Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), dados mensais (a) e precipitação pluvial mensal média do Rio Grande do Sul (b), período de 1913 a 2006 (Berlato *et al*., 2007). A linha mais espessa representa a média móvel de 7 meses.

Sul. No período da ODP negativa, verificou, também, que dominaram os eventos, ou períodos, de La Niña, moderados ou fortes.

Molion (2008), usando dados observacionais e de reanálise (NCEP/NCAR), do período de 1948-2007, estudou a variabilidade climática do Brasil, relacionando com a ODP. Encontrou que totais pluviométricos de algumas regiões do País, entre elas o sul do Brasil, apresentaram correlações entre 0,5 e 0,8, com nível de significância de 99,5%. Mostrou que na fase fria da ODP os totais pluviométricos foram entre 10 e 30% inferiores ao da fase quente da ODP (1977-1998).

Streck *et al.* (2009), também encontraram associação entre precipitação pluvial e ODP, para a região central do Rio Grande do Sul (Santa Maria/RS), período 1912-2008, onde décadas com precipitação pluvial acima da normal climatológica correspondem à fase quente da ODP e décadas com precipitação pluvial abaixo da normal, estão associadas à fase fria da ODP.

Rebello (2006), encontrou relação entre

ODP e precipitação pluvial do Rio Grande do Sul, concluindo que ODP negativa corresponde à precipitação pluvial abaixo da média e ODP positiva (1977-1998), em geral, corresponde à anomalia positiva de precipitação pluvial, no Estado.

Também, Prestes *et al.* (2010) e Prestes (2011), para Porto Alegre/RS e Bagé/RS, respectivamente, verificaram que na fase fria da ODP (1947-1976) as precipitações pluviais anuais, em geral, são menores do que os valores normais.

Efeitos na temperatura do ar

A Figura 77, conforme Cordeiro & Berlato (2009), apresenta as frequências absolutas da temperatura mínima, no trimestre outubro-novembro-dezembro, nos eventos El Niño, La Niña e neutro, de 11 estações meteorológicas, representativas de todas

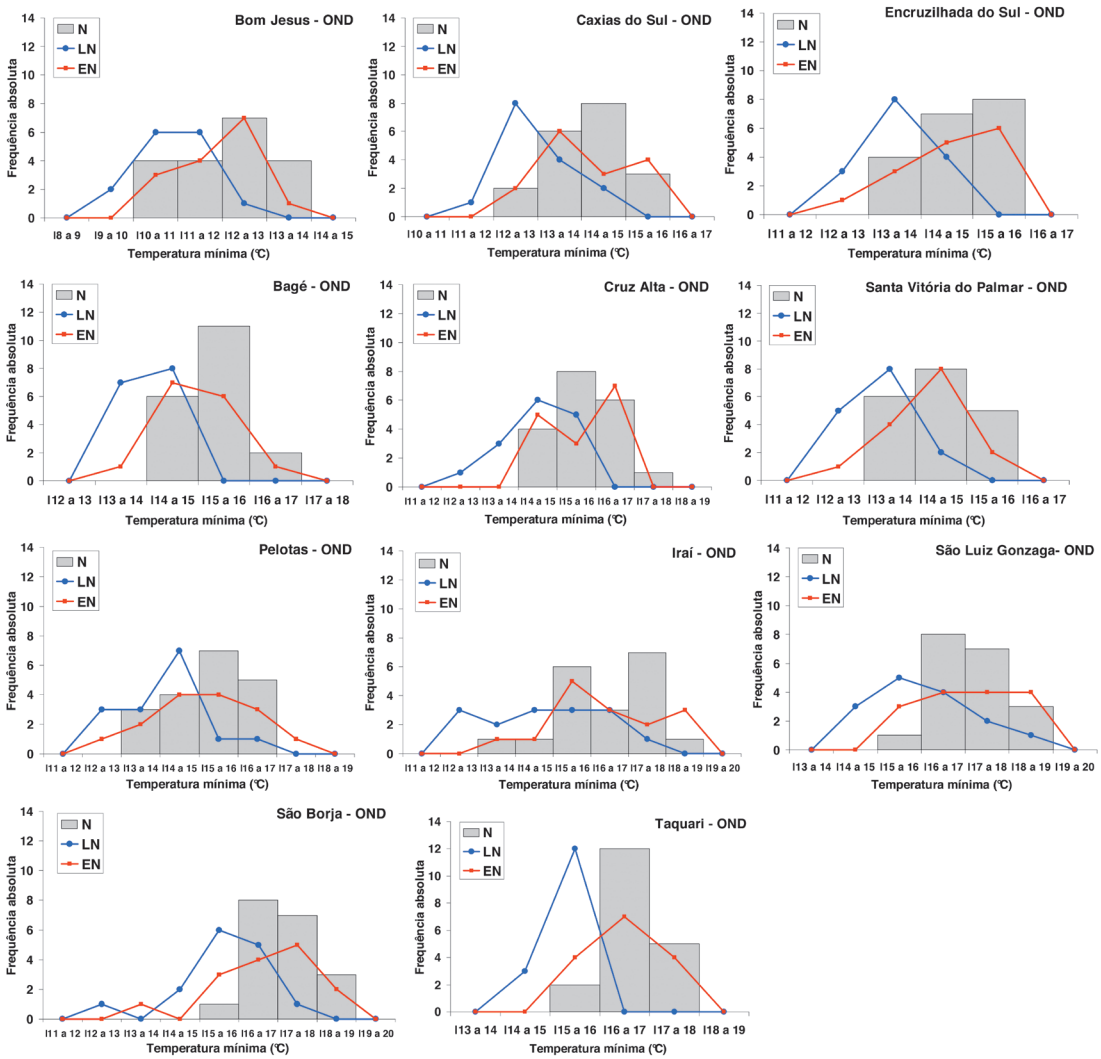


Figura 77. Distribuição da temperatura mínima do ar associada a eventos de El Niño, La Niña e Neutro, em 11 estações meteorológicas do Rio Grande do Sul, no trimestre outubro-novembro-dezembro, período de 1949-1998 (Cordeiro & Berlato, 2009).

as regiões climáticas do Rio Grande do Sul, período de 1949-1998. Como mostram as curvas de distribuição de frequência das temperaturas mínimas, eventos El Niño deslocam a curva para à direita, valores mais altos e eventos La Niña deslocam a curva para à esquerda, valores menores, ambas em relação à distribuição dos anos neutros (barras). Ou seja, mudam os extremos da distribuição.

Lopes & Berlato (2003), encontraram correlação positiva e significativa entre TSM da região do Niño 3.4 do Pacífico e temperatura mínima do Rio Grande do Sul. Na Figura 78, é mostrada a distribuição da temperatura média mínima em anos de La Niña e neutros, nos dois meses (outubro e novembro) de maior impacto de eventos frios de ENOS, no Rio Grande do Sul. Em outubro há uma probabilidade de mais de 80% das temperaturas médias mínimas ficarem abaixo da média dos anos neutros (linha pontilhada). Em novembro essa probabilidade é de, aproximadamente, 90%. Ou seja, final da primavera, na média do Estado, mais fria do que o normal.

Efeitos na nebulosidade diurna

A Figura 79 mostra os efeitos do El Niño e La Niña, em relação aos anos neutros, no índice de nebulosidade diurna, de 17 estações meteorológicas do Rio Grande do Sul, para o caso mensal e decendial. O índice de nebulosidade diurna foi calculado pela equação (IND = 1 - n/N), onde n é a insolação ocorrida e N a insolação máxima possível (comprimento astronômico do dia). Como se vê, na Figura 79a, em geral, o El Niño pro-

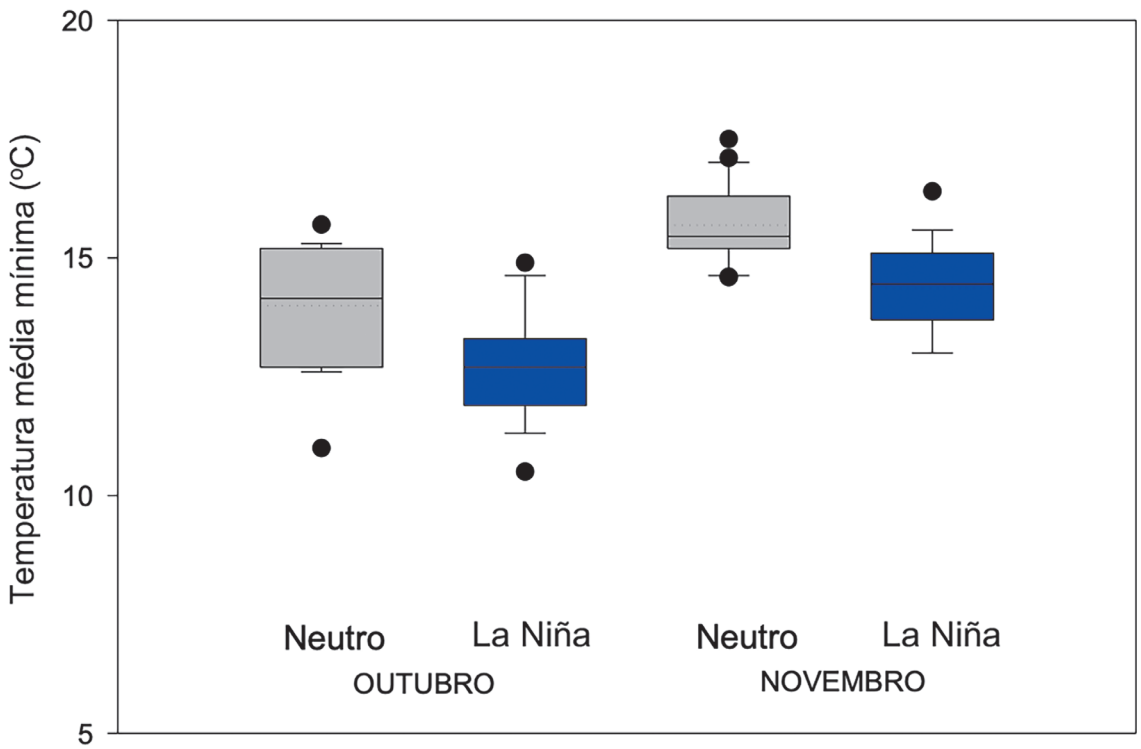


Figura 78. Distribuição (diagrama de caixa) da temperatura mínima do ar em eventos La Niña e Neutro em outubro e novembro, no Rio Grande do Sul, período de 1950-1998 (Lopes & Berlato, 2003).

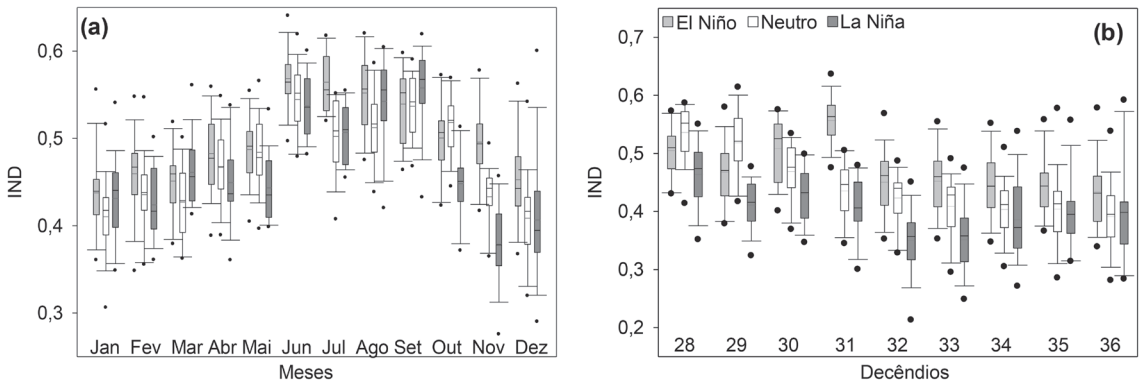


Figura 79. Distribuição dos impactos (diagrama de caixa) do El Niño e La Niña no índice de nebulosidade diurna, mensal (a) e decendial (b), no Rio Grande do Sul, período 1960-2005 (Custódio, 2016).

voca maior nebulosidade e La Niña menor nebulosidade, em relação aos anos neutros. Na Figura 79b, com dados decendiais, pode-se apreciar melhor o efeito do ENOS na nebulosidade diurna. A partir do decêndio 30 (3º decêndio de outubro), e nos decêndios de novembro e dezembro, o evento El Niño determina maior nebulosidade diurna e La Niña menor nebulosidade diurna, em relação aos eventos neutros.

Esses dados são coerentes com maior precipitação pluvial, maior número de dias de chuva, menor insolação, observados nesse período (Fontana & Berlato, 1997; Puchalski, 2000; Fontana & Almeida, 2002; Berlato & Fontana, 2003; Custódio, 2016).

A Figura 80 mostra exemplo do efeito de um muito forte El Niño (1997-1998), na nebulosidade diurna, para todo o Estado (a), para a metade norte (b) e para a metade sul (c). Nos três casos analisados, o El Niño 1997/98 apresentou índice de nebulosidade diurna superior ao do ano neutro na maioria dos decêndios. As maiores diferenças entre a nebulosidade diurna do El Niño de 1997-1998 em relação ao neutro, foram observadas a partir do decêndio 28 (1º decêndio de outubro (0)) até o decêndio 12 (3º decêndio de abril (+1)).

O padrão da nebulosidade, do El Niño 1997-1998, foi muito semelhante, em todo o Estado do Rio Grande do Sul.

As previsões operacionais do El Niño e La Niña

As previsões operacionais do El Niño e La Niña, são feitas por Institutos Internacionais e Nacionais de Meteorologia, através de Modelos Dinâmicos e Modelos Estatísticos. Os modelos dinâmicos são baseados nas equações físicas do sistema acoplado oceano-atmosfera. Os modelos estatísticos são desenvolvidos usando séries históricas de dados e analisadas por várias técnicas estatísticas. As condições de ENOS são representadas, em geral, pela anomalia da TSM da região do Niño 3.4, do Pacífico tropical. A qualidade das previsões é avaliada pelo "Skill" dos modelos (uma medida da habilidade/destreza dos modelos).

Os Modelos Acoplados oceano-atmosfera têm evoluído muito, desde a primeira previsão bem-sucedida do El Niño de 1986, feita por Cane *et al.* (1986). Segundo Barnston *et al.* (2012), isso foi devido à melhoria das observações e análises, à melhoria das

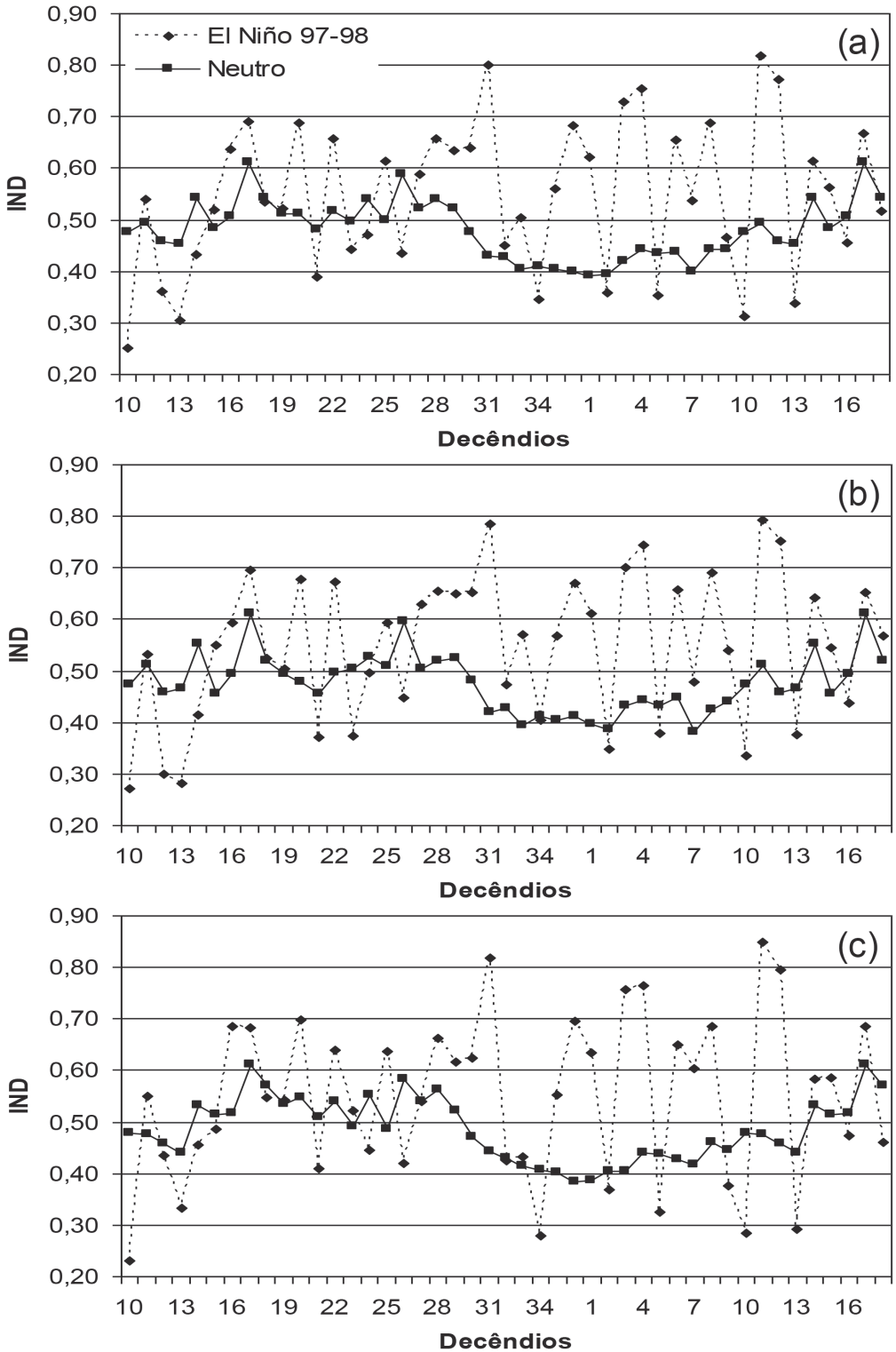


Figura 80. Distribuição decendial do índice de nebulosidade diurna (IND) durante o El Niño 1997-1998 e anos neutros no Rio Grande do Sul (a), metade norte (b) e metade sul (c) (Custódio, 2016).

parametrizações físicas, à melhoria da resolução espacial e ao melhor entendimento dos processos do oceano e da atmosfera que conduzem ao ENOS.

Barnston *et al.* (2012), avaliaram o "Skill" de 20 modelos de previsão do ENOS (12 modelos dinâmicos e 8 modelos estatísticos), durante o período de 2002-2011. O desempenho dos modelos, entretanto, foi menor que os das décadas de 1980 e 1990, apesar de serem modelos mais sofisticados. Uma das explicações de Barnston *et al.* (2012), foi de que o período de estudo de 2002-2011, foi um período de maior desafio para as previsões do ENOS, pela menor variabilidade no oceano. E disseram também, que a "A variabilidade decadal da previsibilidade do ENOS pode ter dominado, fortemente, o gradual melhoramento do "Skill", relatado ao real avanço na ciência de previsão do ENOS e dos modelos". Esses autores, também, mostraram que os modelos dinâmicos apresentam ligeira vantagem em relação aos modelos estatísticos e que têm maior habilidade em "cruzar" a "barreira da primavera boreal", ou do outono austral (março a maio).

Cai *et al.* (2020), entretanto, dizem que desde o início do ano 2000, tem havido uma geral redução da previsibilidade do ENOS, o que pode estar associada com a maior presença de eventos ENOS CP.

Zhang *et al.* (2021), estudaram o "Skill" de previsão para diferentes períodos (1982-1999, 1984-1996, 2000-2018 e 2000-2014), com cinco modelos. A avaliação determinística mostrou que o "Skill" dos índices do Niño 3.4 e Niño 3, são muito menores que durante o período de 1982-1999. Indicaram que as previsões sofrem mais com o obstáculo da "barreira da primavera", após 2000. Disseram, ainda, que é um grande desafio a previsão do ENOS, usando a memória do oceano por si mesma, por causa do enfraquecimento da intensidade do WWV (Volume de Água Quente) e sua relação com o ENOS.

O enfraquecimento da habilidade do WWV, como precursor na previsão do Niño 3.4, já tinha sido relatado por outros autores (p.ex. McPhaden, 2012 e Clarke, 2014).

Barnston *et al.* (2012), confiam que a continuação de implementações de melhores esquemas para condições iniciais mais realísticas, maior detalhamento da física do fenômeno e alta resolução, provavelmente, haverá avanços adicionais do "Skill" dos modelos.

Atualmente, o IRI (*International Research Institute for Climate and Society*) e o CPC (*Climate Prediction Center*/NOAA), divulgam uma previsão conjunta do El Niño e La Niña, com base na anomalia da TSM da região do Niño 3.4, do Oceano Pacífico. Como os modelos apresentam resultados diferentes, especialmente à medida que o período de previsão vai se alongando, é usado um conjunto (*ensemble*, do inglês) de modelos. A Figura 81, apresenta, como exemplo, a previsão do muito forte El Niño de 2015-2016, em trimestres móveis, de modelos dinâmicos e modelos estatísticos. É feita a média dos modelos dinâmicos (linha grossa avermelhada) e a média dos modelos estatísticos (linha grossa verde). A Figura 81 é chamada de pluma (pena). A linha grossa azul representa o consolidado do CPC/NOAA.

Essa previsão também é divulgada num gráfico, em barras, com a probabilidade de El Niño, La Niña e neutro, que traz também a climatologia das fases do ENOS (Figura 82). Pode-se ver, também, nesse gráfico, que na climatologia (longo período) o El Niño e La Niña, são muito semelhantes (linhas vermelha e azul).

Tendo em vista que as anomalias de TSM do Pacífico, são tidas como as causas básicas das anomalias atmosféricas, em mui-

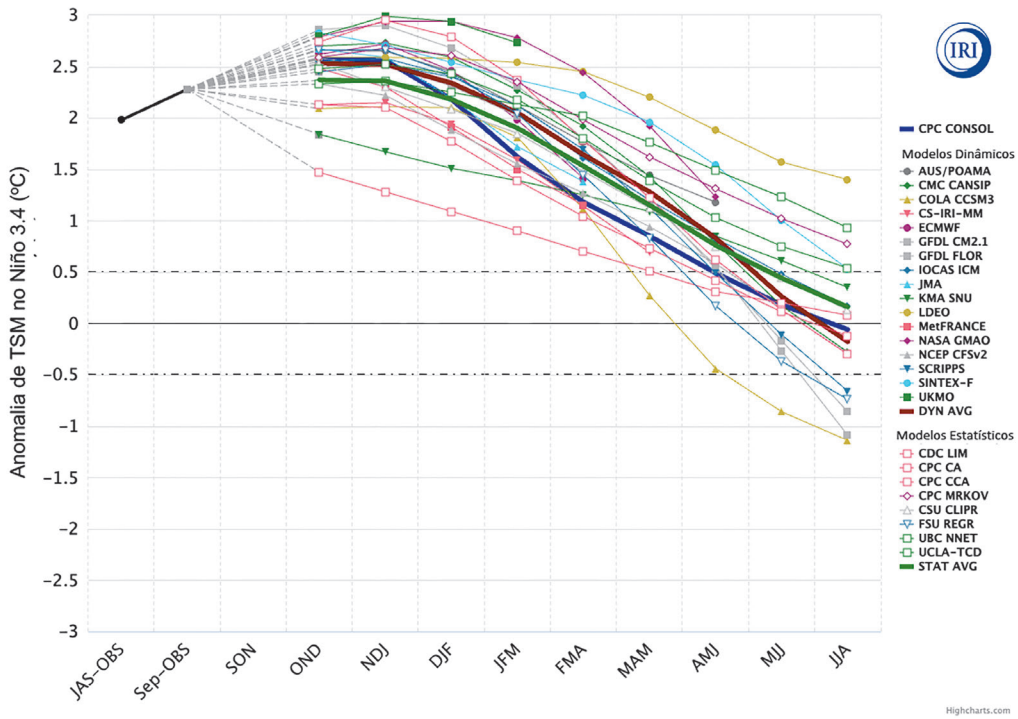


Figura 81. Previsão de modelos dinâmicos e estatísticos, para anomalias de TSM na região do Niño 3.4 (5ºN-5ºS;120ºW-170ºW), do Oceano Pacífico, do El Niño 2015-2016. Fonte: gráfico disponibilizado pelo *International Research Institute for Climate and Society*, *Columbia University Climate School (https://iri.columbia.edu/ENSO)*. Data de acesso: dezembro de 2020.

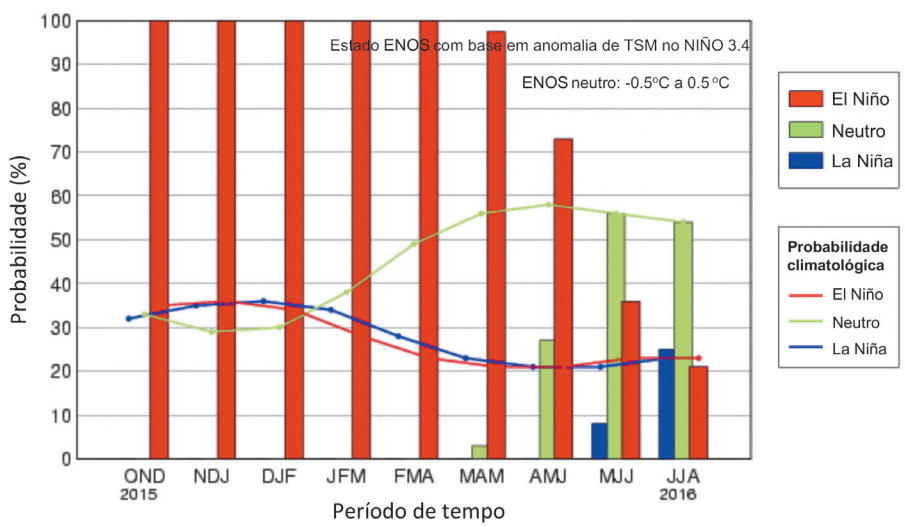


Figura 82. Previsão probabilística das fases do ENOS (CPC/IRI), em trimestres móveis, durante o El Niño 2015-2016. Fonte: gráfico disponibilizado pelo *International Research Institute for Climate and Society*, *Columbia University Climate School (https://iri.columbia.edu/ENSO).* Data de acesso: dezembro de 2020. As linhas são a climatologia das fases do ENOS.

tas regiões do mundo, um segundo passo das previsões sazonais do El Niño e La Niña é a utilização das anomalias de TSM, para previsões globais e regionais das duas variáveis meteorológicas mais importantes, precipitação pluvial e temperatura, feitas, em geral, por Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) e por Modelos Acoplados Oceano-Atmosfera , além de modelos regionais.

No Brasil, também é feita uma previsão de consenso (CPTEC/INPE, INMET e FUNCEME), com multi-modelo. Essa previsão é denominada de previsão objetiva, que além da análise da média dos modelos CPTEC/INMET/FUNCEME, incorpora informação da destreza retrospectiva (1981-2010) desse conjunto de modelos.

Para o caso da precipitação pluvial, o produto é apresentado como a probabilidade (%) da precipitação pluvial em três categorias (Categorias abaixo da faixa normal, dentro da faixa normal e acima da faixa normal). O mapa de previsão (Figura 83), para o trimestre outubro-novembro-dezembro de 2023 (El Niño 2023-2024), mostra o Dipolo que, normalmente, acontece para o caso de El Niño no Brasil (e, também, para La Niña, só que com o sinal invertido), ou seja, precipitações pluviais acima da média no sul e abaixo da média no norte-nordeste. Para a Região Sul do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná), a previsão foi de alta probabilidade de precipitação pluvial acima do normal (tercil superior).

Comparando com o ocorrido, segundo o monitoramento do INMET (Figura 84), verifica-se que isso realmente aconteceu, com precipitações pluviais muito acima do normal para, praticamente, toda a Região.

Entretanto, para o norte-nordeste, apesar de haver grande área relativamente seca, houve áreas isoladas com anomalias positivas de precipitação pluvial, inclusive no extremo norte da região do Semiárido (Figura 84). A área mais seca ocorreu no centro-oeste do País, mas, nessa região, não há sinal de influência forte de El Niño, na precipitação pluvial.

O CPTEC/INPE desenvolveu e executa uma previsão climática para a escala de tempo subsazonal (um mês à frente). Essa previsão é feita pelo Modelo "Brazilian Global Atmospheric Model (BAM-1.2)." O CPTEC/INPE é a única instituição da América do Sul e uma das poucas do mundo a fazer esse tipo de previsão. Veio preencher o vazio entre a previsão do tempo (sinótica), de 7 a 10 dias, e a previsão sazonal de três meses. Uma demanda que há tempo era reivindicada pelos usuários de previsões climáticas para a agricultura, além de outras áreas.

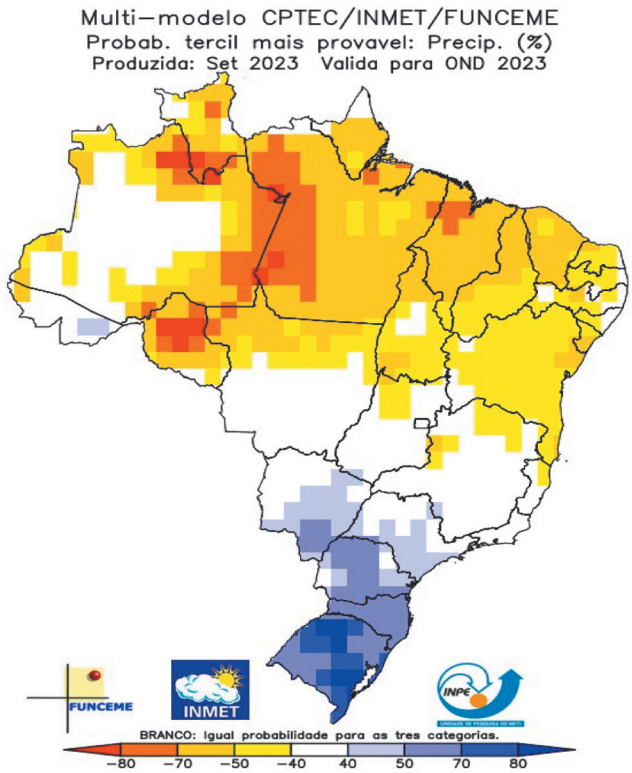


Figura 83. Previsão climática sazonal em tercil (categoria abaixo da faixa normal, dentro da faixa normal e acima da faixa normal), para o trimestre outubro-novembro-dezembro de 2023. Fonte: Boletim Nº 1 de 20 de setembro de 2023, do Painel El Niño 2023-2024 (INPE-INMET-ANA--CENAD). Data de acesso: dezembro de 2023. As áreas em branco, indicam igual probabilidade para as três categorias.

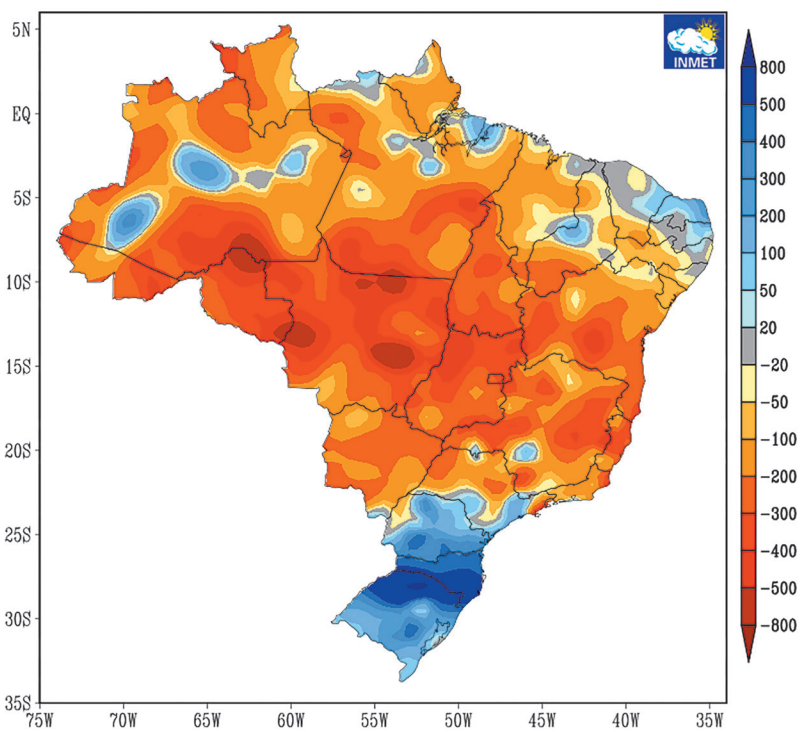


Figura 84. Anomalia da precipitação pluvial (mm), observada no trimestre outubro-novembro-dezembro de 2023 (El Niño 2023-2024). Fonte: INMET (www.inmet.gov.br). Data de acesso: Janeiro de 2024.

Referências

AB'SÁBER, A. N. Sertões e sertanejos: uma geografia humana sofrida. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 13, n. 36, p. 7-59, 1999. DOI: 10.1590/S0103-40141999000200002

ACEITUNO, P.; PRIETO, M. del R.; SOLARI, M. E.; MARTÍNEZ, A.; POVEDA, G.; FALVEY, M. The 1877–1878 El Niño episode: associated impacts in South America. **Climatic Change**, v. 92, p.389-416, 2009. DOI: 10.1007/s10584-008-9470-5

ACKERMAN, S. A.; KNOX, J. A. **Meteorology**: Understanding the Atmosphere. 2nd ed. Thomson Brooks/Cole, 2007. 467p.

AMBRIZZI, T.; MARQUES, R.; NASCIMENTO, E. Bloqueios Atmosféricos. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 18, p. 279-296.

ANDREOLI, R. V.; OLIVEIRA, S. S. de; KAYANO, M. T.; VIEGAS, J.; SOUZA, R. A. F. de; CANDIDO, L. A. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374-1390, 2017. DOI: 10.1002/joc.4783

ASHOK, K.; BEHERA, S. K.; RAO, S. A.; WENG, H.; YAMAGATA, T. El Niño Modoki and its possible teleconnection. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, C11007, p. 1-27, 2007. DOI: 10.1029/2006JC003798

BARBER, D.; CHAI, F.; CHAO, Y.; CHAVEZ, F.; GOES, J.; ALEXANDER, M. 2005. **Pacific climate variability and its impact on ecosystems and fisheries: a multi-scale modeling and data assimilation approach for nowcasting and forecasting**. In: NASA Biodiversity and Ecological Forecasting Team Meeting, Washington. Disponível em: <https://cce.nasa.gov/cce/mtg2005_bio_presentations/Barber_NASA%2008-09-05.ppt>. Acesso em: 10 abr. 2018.

BARNSTON, A. G.; CHELLIAH, M.; GOLDENBERG, S. B. Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial pacific. **Atmosphere-Ocean**, v. 35, n. 3, p. 367-383, 1997. DOI: 10.1080/07055900.1997.9649597

BARNSTON, A. G.; GLANTZ, M. H.; HE, Y. Predictive skills statistical and dynamical climate models in SST forecasts during the 1997-1998 El Niño episode and the 1998 La Niña onset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 2, p. 217-244, 1999a. DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2

BARNSTON, A. G.; LEETMAA, A.; KOUSKY, V. E.; LIVEZEY, R. E.; O'LENIC, E. A.; DOOL, H. van den; WAGNER, A. J.; UNGER, D. A. NCEP Forecasts of the El Niño of 1997–98 and its U.S. impacts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 9, p. 1829–1852, 1999b. DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<1829:NFOTEN>2.0.CO;2

BARNSTON, A. G.; TIPPETT, M. K.; L'HEUREUX, M. L.; LI, S.; DEWITT, D. G. Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 5, p. 631-651, 2012. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00111.1

BARREIRA, W. **Lampião & Maria Bonita**: uma história de amor e balas. São Paulo: Editora Planeta, 2018. 224 p.

BARRETO,M. J.C. **Relação entre Oscilação Decadal do Pacífico, El Niño-Oscilação Sul e a circulação atmosférica de verão na América do Sul**. 2009. 76p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

BARROS, V. R.; DOYLE, M. E.; CAMILLONI, I. A. Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n. 1, p. 19-33, 2008. DOI: 10.1007/s00704-007-0329-x

BARROS, V. R.; GRIMM, A. M.; DOYLE, M. E. Relationship between Temperature and Circulation in Southeastern South America and its Influence from El Niño and La Niña Events. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 80, n. 1, p. 21-32, 2002. DOI: 10.2151/jmsj.80.21

BARROS, V.; GONZALEZ, M.; LIEBMANN, B.; CAMILLONI, I. 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**, v. 67, n. 3, p. 123-133, 2000. DOI: 10.1007/s007040070002

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsão climática na agricultura. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003. 110p.

BERLATO, M. A.; MARTINS, E. J.; CORDEIRO, A. P. A.; ODERICH, E. H. Tendência observada da precipitação pluvial anual e estacional do estado do Rio Grande do Sul e relação com a temperatura da superfície do mar do Oceano Pacífico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., Aracaju, 2007. **Anais**. Aracaju: SBAgro, 2007. CD-ROM.

BJERKNES, J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. **Tellus**, v. 18, n. 4, p. 820-829, 1966.

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 97, n. 3, p. 163-172, 1969. DOI: 10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2

BJERKNES, J. Large-scale atmospheric response to the 1964-65 Pacific equatorial warming. **Journal of Physical Oceanography**, v. 2, n.3, p. 212-217, 1972. DOI: 10.1175/1520-0485(1972)002<0212:LSARTT>2.0.CO;2

BRITO, A. S. **El Niño and El Niño Modoki impacts on South American rainfall**. 2011. 163p. Dissertação (Mestrado) - The University of New South Wales, Sydney.

BROWN, J. R.; POWER, S. B.; DELAGE, F. P.; COLMAN, R. A.; MOISE, A. F.; MURPHY, B. F. Evaluation of the South Pacific Convergence Zone in IPCC AR4 Climate Model Simulations of the Twentieth Century. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1565-1582, 2011. DOI: 10.1175/2010JCLI3942.1

BUNGE, L; CLARKE, A. J. On the warm water volume and its changing relationship with ENSO. **Journal of Physical Oceanography**, v. 44, n. 5, p. 1372–1385, 2014. DOI: 10.1175/JPO-D-13-062.1

BURGERS, G.; JIN, F.-F.; OLDENBORGH, G. J. van. The simplest ENSO recharge oscillator. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 13, L13706, 2005. DOI: 10.1029/2005GL022951

BURITI, C., de O.; BARBOSA, H. A. **Um século de secas**: por que as políticas hídricas não transformaram o Semiárido brasileiro? Lisboa: Chiado Books, 2018. 434p.

CAI, W.; LENGAIGNE, M.; BORLACE, S.; COLLINS, M.; COWAN, T.; MCPHADEN, M. J.; TIMMERMANN, A.; POWER, S.; BROWN, J.; MENKES, C.; NGARI, A.; VINCENT, E. M.; WIDLANSKY, M. J. More extreme swings of the South Pacific convergence zone due to greenhouse warming. **Nature**, v. 488, n. 7411, p. 365-369, 2012. DOI: 10.1038/nature11358

CAI, W.; McPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y.- G.; SANTOSO, A.; NG, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H.- S.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; OSMAN, M.; LI, S.; WU, L.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K.; VERA, C. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020. DOI: 10.1038/s43017-020-0040-3

CAI, W.; SANTOSO, A.; WANG, G.; YEH, S.-W.; AN, S.-I.; COBB, K. M.; COLLINS, M.; GUILYARDI, E.; JIN, F.-F.; KUG, J.-S.; LENGAIGNE, M.; McPHADEN, M. J.; TAKAHASHI, K.; TIMMERMANN, A.; VECCHI, G.; WATANABE, M.; WU, L. ENSO and greenhouse warming. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 9, p. 849-859, 2015. DOI: 10.1038/nclimate2743

CAMILLONI, I.; BARROS, V. Extreme discharge events in the Parana River and their climate forcing. **Journal of Hydrology**, v. 278, n. 1, p. 94–106, 2003. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00133-1

CANE, M. A. El Niño. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 14, p. 43-70, 1986. DOI: 10.1146/annurev.ea.14.050186.000355

CANE, M. A.; ZEBIAK, S. E.; DOLAN, S. C. Experimental forecasts of El Niño. **Nature**, v.321, n. 6023, p. 827-832, 1986. DOI: 10.1038/3218227a0.

CANE, M. A.; MOLNAR, P. Closing of the Indonesian seaway as a precursor to east African aridification around 3-4 million years ago. **Nature**, v. 411, n. 6834, p. 157-162, 2001. DOI: 10.1038/35075500

CAPOTONDI, A.; WITTENBERG, A. T.; NEWMAN, M.; LORENZO di, E.; YU, J.-Y.; BRACONNOT, P.; COLE, J.; DEWITTE, B.; GIESE, B.; GUILYARDI, E.; JIN, F.-F; KARNAUSKAS, K.; KIRTMAN, B.; LEE, T.; SCHNEIDER, N.; XUE, Y.; YEH, S.-W. Understanding ENSO diversity. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 6; p. 921–938, 2015. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00117.1

CARRANZA, L. Contra-corriente marítima observada en Paita y Pacasmayo. **Boletín de La Sociedad Geografica de Lima**, v. 1, n. 9, p. 1-345, 1891.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 6, p. 95-109.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2

CAVALCANTI, I. F. A.; AMBRIZZI, T. Teleconexões e suas influências no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 20, p. 317-335.

CAVALCANTI, I.; SILVEIRA, V. P.; ALVES, L. M. 2013. Características atmosféricas e oceânicas em anos de seca. In: BORMA, S. L. D; NOBRE, C. A. (Ed.). **Secas na Amazônia**: Causas e Consequências. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, p. 54–77.

CAVIEDES, C. N. **El Niño in history: storming through the ages**. Gainesville: University Press of Florida, 2001. 279 p.

CAVIEDES, C. N. Secas and El Niño: two simultaneous climatical hazards in South America. **Proceedings of the Association of American Geographers**, v. 5., n. 1, p. 44-49, 1973.

CLARKE, A. J. El Niño Physics and El Niño Predictability. **Annual Review Marine Science**, v. 6, n. 1, p. 79–99, 2014. DOI: 10.1146/annurev-marine-010213-135026

CLARKE, A. J.; ZHANG, X. On the physics of the warm water volume and El Niño/La Niña predictability. **Journal of Physical Oceanography**, v. 49, n. 6, p. 1541-1559, 2019. DOI: 10.1175/JPO-D-18-0144.1

COBB, K. M.; CHARLES, C. D.; CHENG, H.; EDWARDS, R. L. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. **Nature**, v. 424, n. 6946, p. 271-276, 2003. DOI: 10.1038/nature01779

COLLINS, M.; AN, S.-I.; CAI, W.; GANACHAUD, A.; GUILYARDI, E.; JIN, F.-F.; JOCHUM, M.; LENGAIGNE, M.; POWER, S.; TIMMERMANN, A.; VECCHI, G.; WITTENBERG, A. The impact of global warming on the tropical Pacific ocean and El Niño. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 6, p. 391-397, 2010. DOI: 10.1038/ngeo868

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A. Frequência da temperatura mínima do ar associada a eventos El Niño, La Niña e neutros no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., Belo Horizonte, 2009. **Anais**. Belo Horizonte: SBAgro, 2009, 5p.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; ALVES, R. de C. M. Tendência do índice hídrico sazonal do Rio Grande do Sul e sua relação com El Niño e La Niña. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 3, p. 216-226, 2018. DOI: 10.11137/2018_3_216_226

CUSTÓDIO, M. de S. Índice de nebulosidade do estado do Rio Grande do Sul: climatologia e impactos do El Niño Oscilação Sul. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, p. 382-392, 2016. DOI: 10.5902/2179-460X18175

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251-271, 1998. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<0251:RBPAIU>2.0.CO;2

DONG, L.; McPHADEN, M. J. The role of external forcing and internal variability in regulating global mean surface temperatures on decadal timescales. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 3, 034011, 2017. DOI: 10.1088/1748-9326/aa5dd8

DUAN, W. S.; WEI, C. The 'spring predictability barrier' for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 5, p. 1280-1292, 2013. DOI: 10.1002/joc.3513

ESPINOZA, J. C.; MARENGO, J. A.; RONCHAIL, J.; CARPIO, J. M.; FLORES, L. N.; GUYOT, J. L. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, 124007 (9p.), 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/12/124007

FEDOROV, A. V; PHILANDER, S. G. Is El Nino Changing? **Science**, v. 288, n. 5473, p. 1997-2002, 2000. DOI: 10.1126/science.288.5473.1997

FERRAZ, J. de S. IMINENCIA DUMA "GRANDE" SECA NORDESTINA. **Revista Brasileira de Geografia**, Ano XII, n. 1, p. 3-15, 1950.

FOLEY, J. A.; BOTTA, A.; COE, M. T. El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, 1132, p. 79-1-79-17, 2002. DOI: 10.1029/2002GB001872

FONTANA, D. C.; ALMEIDA, T. S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 135-145, 2002.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.

FREUND, M. B.; HENLEY, B. J.; KAROLY, D. J.; McGREGOR, H. V.; ABRAM, N. J.; DOMMENGET, D. Higher frequency of Central Pacific El Niño events in recent decades relative to past centuries. **Nature Geoscience**, v. 12, n.6, p. 450-455, 2019. DOI: 10.1038/s41561-019-0353-3

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47-66, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0047:TSAMCA>2.0.CO;2

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface Cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991. DOI: 10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2

GAN, M. A.; RODRIGUES, L. R.; RAO, V. B. Monção na América do Sul. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap.19, p. 297-316.

GAN, M. A.; SANTOS, L. F. dos; LIMA, J. R. A.; AFONSO, J. M. de S.; SILVA, A. B. da. Monção da América do Sul. **Revista Climanálise**, v. 4., p. 1-6, 2016.

GANDU, A. W.; SILVA DIAS, P. L. Impact of tropical heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D6, p. 6001-6015, 1998. DOI: 10.1029/97JD03114

GERGIS, J. L.; FOWLER, A. M. A history of ENSO events since A.D. 1525: implications for future climate change. **Climatic Change**, v. 92, n. 3, p. 343-387, 2009. DOI: 10.1007/s10584-008-9476-z

GIRALT, S.; MORENO, A.; BAO, R.; SÁEZ, A.; VALERO; B. L.; PUEYO, J. J.; KLOSOWSKA, B. B.; HERNÁNDEZ, A.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; TABERNER, C. The history of El Niño – Southern Oscillation according to lacustrine and marine sediments. **Contributions to Science**, v. 3, n.3, p. 343-353, 2007. DOI: 10.2436/20.7010.01.12

GLYNN, P. W.; COLGAN, M. W. Sporadic disturbances in fluctuating coral reef environments: El Nino and coral reef development in the eastern Pacific. **American Zoologist**, v. 32, n. 6, p. 707-718, 1992. DOI: 10.1093/icb/32.6.707

GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? C**limate Dynamics**, v. 22, n. 2, p. 123-138, 2004. DOI: 10.1007/s00382-003-0368-7

GRIMM, A. M. Variabilidade interanual do clima do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 22, p. 353-374.

GRIMM, A. M.; BARROS, V.; DOYLE, M. E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T., GOMES, J. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863-2880, 1998. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2

GRIMM, A. M.; ZILLI, M. T. Interannual Variability and Seasonal Evolution of Summer Monsoon Rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257-2275, 2009. DOI: 10.1175/2008JCLI2345.1

GUAN, C.; McPHADEN, M. J. Ocean processes affecting the twenty-first century shift in ENSO SST variability. **Journal of Climate**, v. 29, n. 19, p. 6861–6879, 2016. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0870.1

GUAN, C.; McPHADEN, M. J.; WANG, F.; HU, S. Quantifying the role of oceanic feedbacks on ENSO asymmetry. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 4, p. 2140–2148, 2019. DOI: 10.1029/2018GL081332

GUILYARDI, E. 2015. **WCRP/CLIVAR efforts to understand El Niño in a changing climate**. Disponível em: <https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2015/11/Guilyardi-WCRP-CLIVAR-ENSO.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2019.

HALPERT, M. S.; ROPELEWSKI, C. F. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 5, n. 6, p. 577-593, 1992. DOI: 10.1175/1520-0442(1992)005<0577:STPAWT>2.0.CO;2

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p.77-92, 1977. DOI: 10.1002/qj.49710343505

HUANG, B.; L'HEUREUX, M.; HU, Z.-Z.; YIN, X.; ZHANG, H.-M. How significant was the 1877/78 El Niño? **Journal of Climate**, v. 33, n. 11, p. 4853-4869, 2020. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0650.1

HUANG, B.; L'HEUREUX, M.; HU, Z.-Z.; ZHANG, H.-M. Ranking the strongest ENSO events while incorporating SST uncertainty. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 17, p. 9165-9172, 2016. DOI: 10.1002/2016GL070888

INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE AND SOCIETY (IRI). 2001. **The Science and practice seasonal climate forecasting of IRI**. Disponível em: <http://iri.ldeo.columbia.edu/climate/tutorial 2/>. Acesso em: 15 jun. 2021.

IZUMO, T.; LENGAIGNE, M; VIALARD, J.; SURESH, I; PLANTON, Y. On the physical interpretation of the lead relation between Warm Water Volume and the El Niño Southern Oscillation. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 5, p. 2923-2942, 2018. DOI: 10.1007/s00382-018-4313-1

JIN, F.-F. An equatorial Ocean recharge paradigm for ENSO. Part I:Conceptual Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 54., n. 7, p. 811-829, 1997. DOI: 10.1175/1520-0469(1997)054<0811:AEORPF>2.0.CO;2

KANE, R. P. Limited effectiveness of El Niños in causing droughts in NE Brazil and the prominent role of Atlantic parameters. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 2, p. 231-236, 2001. DOI: 10.1590/S0102-261X2001000200010

KAO, H.-Y.; YU, J.-Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO. **Journal of Climate**, v. 22, n. 3, p. 615-632, 2009. DOI: 10.1175/2008JCLI2309.1

KAPLAN, A.; CANE, M. A.; KUSHNIR, Y.; CLEMENT, A. C.; BLUMENTHAL, M. B.; RAJAGOPALAN, B. Analyses of global sea surface temperature 1856-91. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C9, 18.567-18.589, 1998.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 4, p. 531-540, 2007. DOI: 10.1002/joc.1417

KAYANO, M. T.; MOURA, A. D. O El Nino de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 4, n. 2, p. 201-214, 1986. DOI: 10.22564/rbgf.v4i2.1055

KEEFER, D. K; MOSELEY, M. E.; deFRANCE S. D. A 38000-year record of floods and debris flows in the Ilo region of the Southern Peru and its relation to El Nino events and great earthquakes. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 194, n.1-3, p. 41-77, 2003. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00271-2

KESSLER, W. S. Is ENSO a cycle or a series of events? **Geophysical Research Letters**, v.29, n. 23, 2125, p. 1-4, 2002. DOI: 10.1029/2002GL015924

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n.9, p. 1140-1153, 1979. DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<1140:FIONB>2.0.CO;2

KOUSKY, V. E.; CHU, P. S. Fluctuations in Annual Rainfall for Northeast Brazil. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 56, n. 5, p. 457-465, 1978. DOI: 10.2151/jmsj1965.56.5_457

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 36, n. 5, p. 490-504, 1984. DOI: 10.3402/tellusa.v36i5.11649

KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. Extremes in the Southern Oscillation and their relationship to precipitation anomalies with emphasis on the South American Region. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 4, n. 2, p. 351-363, 1989.

KRIPALANI, R. H.; KULKARNI, A. Climatic impact of El Niño/La Niña on the Indian monsoon: A new perspective. **Weather**, v. 52, n. 2, p. 39-46, 1997. DOI: 10.1002/j.1477-8696.1997.tb06267.x

KUMAR, K. K.; RAJAGOPALAN, B.; HOERLING, M.; BATES, G.; CANE, M. Unraveling the mystery of Indian Monsoon failure during El Niño. **Science**, v. 314, n. 5796, p. 115-119, 2006. DOI: 10.1126/science.1131152

L'HEUREUX, M. L.; TAKAHASHI, K.; WATKINS, A. B.; BARNSTON, A. G.; BECKER, E. J.; DI LIBERTO, T. E.; GAMBLE, F.; GOTTSCHALCK, J.; HALPERT, M. S.; HUANG, B.; MOSQUERA-VÁSQUEZ, K.; WITTENBERG, A. T. OBSERVING AND PREDICTING THE 2015/16 EL NIÑO. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 7, p. 1363-1382, 2017. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0009.1

LANDSEA, C. W. 2000: **El Niño/Southern Oscillation and the seasonal predictability of tropical cyclones**. In: El Niño: Impacts of Multiscale Variability on Natural Ecosystems and Society. Disponível em: <https://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/el_nino/>. Acesso em: 18 nov. 2021.

LANDSEA, C. W.; KNAFF, J. A. How much skill was there in forecasting the very strong 1997-98 El Nino? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, n. 9, p. 2107-2119, 2000. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2107:HMSWTI>2.3.CO;2

LARKIN, N. K.; HARRISON, D. E. On the definition of El Niño and associated seasonal average U.S. weather anomalies. **Geophysical Research Letters**, v.32, n. 13, L13705, 2005. DOI: 10.1029/2005GL022738

LEE, T.; McPHADEN, M. J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 14, L14603, 2010. DOI: 10.1029/2010GL044007

LEIVAS, J. **Climatologia das condições hídricas e análise de risco de deficiência hídrica decendial na metade sul do estado do Rio Grande do Sul**. 2003. 225p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIEBMANN, B.; MECHOSO, C. R. The South American Monsoon System. In: CHANG, C.-P. et al. (Ed.). **The Global Monsoon System**: Research and Forecast. 2nd ed. New Jersey: World Scientific Publishing Co, 2011. p. 137-157. DOI: 10.1142/9789814343411_0009

LOPES, F.; BERLATO, M. A. Impactos do El Niño/La Niña nas temperaturas médias mínimas e médias máximas no Estado do Rio Grande do Sul. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., Porto Alegre, 2000. **Anais**. Porto Alegre: UFRGS, 2000, p. 142.

LOPES, F.; BERLATO, M. A. Relações entre a temperatura da superfície do mar da região do Nino 3.4 e a temperatura média mínima do estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., Santa Maria, 2003. **Anais.** Santa Maria: SBAgro, 2003, p. 961-962.

LU, Z.; LIU, Z.; ZHU, J. COBB, K. M. A Review of Paleo El Niño-Southern Oscillation. **Atmosphere**, v. 9, n. 4, 130, p. 1-27, 2018. DOI: 10.3390/atmos9040130

LÜBBECKE, J. F.; McPHADEN, M. J. Symmetry of the Atlantic Niño mode. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 2, p. 965-973, 2017. DOI: 10.1002/2016GL071829

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Description of global-scale circulation cells in the Tropics with a 40-50 day period. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 6, p. 1109-1123, 1972. DOI: 10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Detection of 40-50 day Oscillation in the Zonal Wind in the tropical Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 28, n. 5, p. 702-708, 1971. DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-1079, 1997. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2

MARENGO, J. A. Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. **Hydrological processes**, v.23, n. 22, p. 3236-3244, 2009. DOI: 10.1002/hyp.7396

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, 2 Suppl.1, p. 1973-1985, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201720170206

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00642.1

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; SOARES W. R. Jato de baixos níveis ao longo dos Andes. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 11, p.169-180.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanálise**, v. 4., p. 49-54, 2016.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Review extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016. DOI: 10.1002/joc.4420

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; DIAS, P. L. S.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1-21, 2012. DOI: 10.1002/joc.2254

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Região Amazônica. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 13, p. 197-212.

MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, G. S. de. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação de La Niña 1998/99. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., Brasília, 1998. **Anais.** Rio de Janeiro: SBMET, 1998. CD-ROM.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3, p. 1189-1200, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1840-8

MARQUES, J. R. Q. **Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul e sua relação com indicadores oceânicos**. 2005. 209f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARQUES, R. de F. C.; RAO, V. B. Bloqueio atmosférico no hemisfério sul, 1980-1993. **Revista Climanálise**, Ed. Especial, v. 9, p. 1078-1084, 1996.

MASON, S. J.; GODDARD, L. Probabilistic precipitation anomalies associated with ENSO. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 4, p. 619-638, 2001. DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<0619:PPAAWE>2.3.CO;2

MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; RADIN, B. **Regime de Chuvas e Produção de Grãos no Rio Grande do Sul:** impacto das estiagens e relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2021. 218 p.

McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship between drough frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., Anaheim, 1993. **Anais**. São José dos Campos: CPTEC/INPE, 1993. p. 1-6.

McPHADEN, M. J. A 21st century shift in the relationship between ENSO SST and warm water volume anomalies. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 9, L09706, p. 1-5, 2012. DOI: 10.1029/2012GL051826

McPHADEN, M. J. El Niño and La Niña: causes and global consequences. In: McCRACKEN, M. C.; PERRY, J. S. (Ed.). **Encyclopedia of Global Environmental Change**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2002. v. 1. p. 353–370.

McPHADEN, M. J. Genesis and Evolution of the 1997/98 El Niño. **Science**, v. 283, n. 5404, p.950-954, 1999. DOI: 10.1126/science.283.5404.950

McPHADEN, M. J. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 9, 1480, p.33.1-33.4, 2003. DOI: 10.1029/2003GL016872

McPHADEN, M. J.; BUSALACCHI, A. J.; ANDERSON, D. L. T. A TOGA retrospective. **Oceanography**, v. 23, n. 3, p. 86-103, 2010. DOI: 10.5670/oceanog.2010.26

McPHADEN, M. J.; BUSALACCHI, A. J.; CHENEY, R.; DONGUY, J.-R.; GAGE, K. S.; HALPERN, D.; JI, M.; JULIAN, P.; MEYERS, G.; MITCHUM; G. T.; NIILER, P. P.; PICAUT, J.; REYNOLDS, R. W.; SMITH, N.; TAKEUCHI, K. The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C7, p. 14169-14240, 1998. DOI: 10.1029/97JC02906

McPHADEN, M. J.; LEE, T.; McCLURG, D. El Niño and its relationship to changing background conditions in the tropical Pacific Ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 15, L15709, p. 1-4, 2011. DOI: 10.1029/2011GL048275

McPHADEN, M. J.; SANTOSO, A.; CAI, W. Understanding ENSO in a changing climate. **EOS**, v. 100, 2019. DOI: 10.1029/2019EO124159

McPHADEN, M. J.; YU, X. Equatorial waves and the 1997-98 El Niño. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 19, p. 2961-2964, 1999. DOI: 10.1029/1999GL004901

McPHADEN, M. J.; ZHANG, X. Asymmetry in zonal phase propagation of ENSO sea surface temperature anomalies. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 13, L13703, p. 1-6, 2009. DOI: 10.1029/2009GL038774

MEGGERS, B. J. Archeological evidence for the impact of mega-Niño events on Amazonia during the past two millennia. **Climatic Change**, v. 28, n. 4, p. 321-338, 1994. DOI: 10.1007/BF01104077

MEINEN, C. S.; McPHADEN, M. J. Observations of warm water volume changes in the equatorial Pacific and their relationship to El Niño and La Niña. **Journal of Climate**, v. 13, n. 20, p. 3551-3559, 2000. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<3551:OOWWVC>2.0.CO;2

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A., SOUZA, P. P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 25-41.

MENDES, M. C. D.; TRIGO, R. M.; CAVALCANTI, I. F. A.; DACAMARA, C. C. Bloqueios atmosféricos de 1960 a 2000 sobre o Oceano Pacífico sul: impactos climáticos e mecanismos físicos associados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 175-190, 2005.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global, El Niño, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 1-5, 2005.

MOLION, L. C. B. Perspectivas climáticas para os próximos 20 anos. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 3, p.117-128, 2008. DOI: 10.5380/abclima.v3i0.25438

MONTECINOS, A.; DIAZ, A.; ACEITUNO, P. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall subtropical South America based on tropical Pacific SST. **Journal of Climate**, v.13, n. 4, p.746-758, 2000. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<0746:SDAPOR>2.0.CO;2

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory and Numerical Experiments with a General Circulation Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981. DOI: 10.1175/1520-0469(1981)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2

NEELIN, J. D.; BATTISTI, D. S.; HIRST, A. C.; JIN, F.-F.; WAKATA, Y.; YAMAGATA, T.; ZEBIAK, S. E. ENSO Theory. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C7, p. 14261-14290, 1998. DOI: 10.1029/97JC03424

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during Summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2

OKUMURA, Y. M.; DESER, C. Asymmetry in the duration of El Niño and La Niña. **Journal of Climate**, v. 23, n. 21, p. 5826–5843, 2010. DOI: 10.1175/2010JCLI3592.1

OLIVEIRA, G. S. de; SATYAMURTY, P. O El Niño de 1997/98: evolução e impactos no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., Brasília, 1998. **Anais.** Rio de Janeiro: SBMET, 1998. CD-ROM.

PAEGLE, J. N.; MO, K. C. Linkages between summer rainfall variability over South America and sea surface temperature anomalies. **Journal of Climate**, v. 15, n.12, p. 1389–1407, 2002. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<1389:LBSRVO>2.0.CO;2

PEREIRA, H. R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da Atmosfera na Primavera Austral Durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 293-310, 2017. DOI: 10.1590/0102-77863220011

PHILANDER, S. G. H. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. Califórnia: Academic Press, 1990. 289p.

PLANTON, Y.; VIALARD, J.; GUILYARDI, E.; LENGAIGNE, M.; IZUMO, T. Western Pacific Ocean heat content: a better predictor of La Niña than of El Niño. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 18, p. 9824-9833, 2018. DOI: 10.1029/2018GL079341

PRESTES, S. D. Relações entre a Oscilação Decadal do Pacífico e a variabilidade da precipitação e Bagé – RS. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 5., João Pessoa, 2011. **Anais**. Rio de Janeiro: SBMET, 2011. CD-ROM.

PRESTES, S. D.; SOUSA, A. J. S.; ROLIM, P. A. M.; SANTO, A. R. S. E.; SOUSA, J. R. A. Relações entre a Oscilação Decadal do Pacífico e a Variabilidade da precipitação em Porto Alegre/RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., Belém, 2010. **Anais**. Rio de Janeiro: SBMET, 2010. CD-ROM.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

PUCHALSKI, L. A. **Efeitos associados ao El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e o déficit hídrico no estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 83p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PUY, M.; VIALARD, J.; LENGAIGNE, M.; GUILYARDI, E.; DiNEZIO, P. N.; VOLDOIRE, A.; BALMASEDA, M.; MADEC, G.; MENKES, C.; McPHADEN, M. J. Influence of Westerly Wind Events stochasticity on El Niño amplitude: the case of 2014 vs. 2015. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 12, p. 7435–7454, 2019. DOI: 10.1007/s00382-017-3938-9

QUINN, W. H.; NEAL, V. T.; MAYOLO, S. E. A. de. El Niño Occurrences Over the Past Four and a Half Centuries. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. C13, p. 14449-14461, 1987. DOI: 10.1029/JC092iC13p14449

RASMUSSON, E. M.; CARPENTER, T. H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 5, p. 354-384, 1982. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2

REBELLO, E. R. G. A Oscilação Decadal do Pacífico e suas possíveis influências no estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., Florianópolis, 2006. **Anais**. Rio de Janeiro: SBMET, 2006. CD-ROM.

REN, H. L.; JIN, F.-F. Recharge oscillator mechanisms in two types of ENSO. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6506-6523, 2013. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00601.1

REN, H. L.; JIN, F.-F.; TIAN, B.; SCAIFE, A. A. Distinct persistence barriers in two types of ENSO. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 20, p. 10,973–10,979, 2016. DOI: 10.1002/2016GL071015

RODRIGUES, H. P. **Zona de convergência do Atlântico Sul: um estudo observacional e numérico**. 2012. 67p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

RODRIGUES, R. R.; McPHADEN, M. J. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast?. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 3, p. 1012–1018, 2014. DOI: 10.1002/2013GL058703

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1606-1626, 1987. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, n. 3, p. 268-284, 1989. DOI: 10.1175/1520-0442(1989)002<0268:PPAWTH>2.0.CO;2

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships. **Journal of Climate**, v. 9, n. 5, p. 1043-1059, 1996. DOI: 10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2

SALVA, A.; GUEVARA. El Índice Chicama como indicador de desastres, en la costa norte del Peru. In: CONGRESSO NACIONAL DE CIENCIAS DEL MAR, 6., Peru, 2018. **Anais**. Peru: CONCIMAR, 2018.

SANSIGOLO, C. A. Probabilistic rainfall anomalies in Southern Brazil associated with ENSO. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8., Foz do Iguaçu, 2006. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2006. p. 1359-1364.

SCHOPF, P. S.; SUAREZ, M. J. Vacillations in a Coupled Ocean–Atmosphere Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45, n.3, p. 549–566, 1988. DOI: 10.1175/1520-0469(1988)045<0549:VIACOM>2.0.CO;2

SERRA, A. METEOROLOGIA DO NORDESTE BRASILEIRO. **Revista Brasileira de Geografia**, Ano VII, n. 3, 1945.

SHEINBAUM, J. Current theories on El Niño-Southern Oscillation: A review. **Geofísica Internacional**, v. 42, n. 3, p. 291-305, 2003.

SINGH, D.; SEAGER, R.; COOK, B. I.; CANE, M.; TING, M.; COOK, E.; DAVIS, M. Climate and the Global Famine of 1876–78. **Journal of Climate**, v. 31, n. 23, p. 9445-9467, 2018. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0159.1

STRECK, N. A.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; GABRIEL, L. F.; PAULA, G. M. de. Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1553-1561, 2009.

STUDZINSKI, C. D. S. **Um estudo da precipitaçâo na região sul do Brasil e sua relacão com os oceanos Pacífico e Atlântico tropical e sul.** 1995. 99p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SUAREZ, M. J.; SCHOPF, P. S. A delayed action oscillator for ENSO. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45., n. 21, p. 3283-3287, 1988. DOI: 10.1175/1520-0469(1988)045<3283:ADAOFE>2.0.CO;2

TAKAHASHI, K.; MARTÍNEZ, A. G. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 12, p. 7389–7415, 2019. DOI: 10.1007/s00382-017-3702-1

TIMMERMANN, A.; AN, S.-I.; KUG, J.-S.; JIN, F.-F.; CAI, W.; CAPOTONDI, A.; COBB, K. M.; LENGAIGNE, M.; MCPHADEN, M. J.; STUECKER, M. F.; STEIN, K.; WITTENBERG, A. T.; YUN, K.-S.; BAYR, T.; CHEN, H.-C.; CHIKAMOTO, Y.; DEWITTE, B.; DOMMENGET, D.; GROTHE, P.; GUILYARDI, E.; HAM, Y.-G.; HAYASHI, M.; INESON, S.; KANG, D.; KIM, S.; KIM, W. M.; LEE, J.-Y.; LI, T.; LUO, J.-J.; McGREGOR, S.; PLANTON, Y.; POWER, S.; RASHID, H.; REN, H.-L.; SANTOSO, A.; TAKAHASHI, K.; TODD, A.; WANG, G.; WANG, G.; XIE, R.; YANG, W.-H.; YEH, S.-W.; YOON, J.; ZELLER, E.; ZHANG, X. El Niño–Southern Oscillation complexity. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 535-545, 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0252-6

TIMMERMANN, A.; OBERHUBER, J.; BACHER, A.; ESCH, M.; LATIF, M.; ROECKNER, E. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. **Nature**, v. 398, n. 6729, p.694-697, 1999. DOI: 10.1038/19505

TRENBERTH, K. E. El Niño Southern Oscillation (ENSO). In: COCHRAN, J. K.; BOKUNIEWICZ, H.; YAGER, P. (Ed.). **Encyclopedia of Ocean Sciences**, 3rd ed, Atlanta: Elsevier, 2019. v. 6, n. 3, p. 420-432. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.04082-3

TRENBERTH, K. E. Has there been a hiatus? **Science**, v. 349, n. 6249, p. 691-692, 2015. DOI: 10.1126/science.aac9225

TRENBERTH, K. E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 102, n. 433, p. 639-653, 1976.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T. An apparent hiatus in global warming? **Earth's Future**, v. 1, n. 1, p. 19–32, 2013. DOI: 10.1002/2013EF000165

TRENBERTH, K. E.; HOAR, T. J. The 1990-1995 El Niño Southern Oscillation Event: Longest on record. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 1, p. 57-60, 1996. DOI: 10.1029/95GL03602

TRENBERTH, K. E.; STEPANIAK, D. P. Indices of El Niño Evolution. **Journal of Climate**, v. 14, n. 8, p. 1697-1701, 2001. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2

TRENBERTH, K. E; CARON, J. M.; STEPANIAK, D. P; WORLEY, S. Evolution of El Niño–Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D8, p. AAC5-1 - AAC5-17, 2002. DOI: 10.1029/2000JD000298

TUCHTENHAGEN, P. N; RICKES, C. P.; GONÇALVES, F. A. V.; FREITAS, G. J. N. DE; RADIN, B. Influência de eventos El Niño e La Niña sobre a ocorrência de eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., Lavras, 2015. **Anais**. Lavras: SBAgro, 2015, p. 1503-1508.

TZIPERMAN, E. 2001. **Lecture 2: ENSO toy models. Woods Hole Oceanographic Institution. Geophysical Fluid Dynamics. Proceedings Volume 2001**. Disponível em: <https://gfd.whoi.edu/gfd-publications/gfd-proceedings-volumes/2001-2/>. Acesso em: jun. 2018.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1998. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<0551:TRBTPA>2.0.CO;2

UVO, C.B. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da região norte do nordeste brasileiro**. 1989. 99p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

VALLÈS-CASANOVA, I.; LEE, S. K.; FOLTZ, G. R.; PELEGRÍ, J. L. On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 8, p. 1-10, 2020. DOI: 10.1029/2020GL087108

VIEGAS, J.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; CANDIDO, L. A.; SOUZA, R. A. F. de; HALL, D. H.; SOUZA, A. C. de; GARCIA, S. R.; TEMOTEO, G. G.; VALENTIN, W. I. D. Caracterização dos diferentes tipos de El Niño e seus impactos na América do Sul a partir de dados observados e modelados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n.1, p. 43-67, 2019. DOI: 10.1590/0102-7786334015

VINCENT, E. M.; LENGAIGNE, M.; MENKES, C. E.; JOURDAIN, N. C.; MARCHESIELLO, P.; MADEC, G. Interannual variability of the South Pacific Convergence Zone and implications for tropical cyclone genesis. **Climate Dynamics**, v. 36, p. 1881-1896, 2011. DOI: 10.1007/s00382-009-0716-3

VOITURIEZ, B.; JACQUES, G. **El Niño**: realidad y ficción. Paris: Unesco, 2000. 142 p.

WALKER, G. T. Correlation in seasonal variations of weather, VIII: A preliminary study of world weather. **Memoirs of the India Meteorological Department**, v. 24, n. 4, p. 75-131, 1923.

WANG, C.; DESER, C.; YU, J.-Y.; DINEZIO, P.; CLEMENT, A. El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A review. In: GLYMN, P.; MANZELLO, D.; ENOCHS, I. (Ed.). **Coral Reefs of the Eastern Pacific**. Dordrecht: Springer Science Publisher, 2016. p. 85-106. DOI: 10.1007/978-94-017-7499-4_4

WANG, G.; CAI, W.; GAN, B.; WU, L.; SANTOSO, A.; LIN, X.; CHEN, Z.; MCPHADEN, M. J. Continued increase of extreme El Niño frequency long after 1.5°C warming stabilization. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 8, p. 568-573, 2017. DOI: 10.1038/NCLIMATE3351

WILLIAMS, E.; ANTONIA, A. dall'; ANTONIA, V. dall'; ALMEIDA, J. M. de; SUAREZ, F.; LIEBMANN, B.; MALHADO, A. C. M. The drought of the century in the Amazon basin: an analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 231–238, 2005. DOI: 10.1590/S0044-59672005000200013

WU, R.; KIRTMAN, B. P.; DOOL, H. V. An analysis of ENSO skill in the CFS retrospective forecasts. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1801-1818, 2009. DOI: 10.1175/2008JCLI2565.1

WYRTKI, K. El Niño-The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. **Journal of Physical Oceanography**, v.5, n. 4, p.572-584, 1975. DOI: 10.1175/1520-0485(1975)005<0572:ENTDRO>2.0.CO;2

WYRTKI, K. The slope of sea level along the equator during the 1982/1983 El Niño. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. C6, p. 10419-10424, 1984. DOI: 10.1029/JC089iC06p10419

WYRTKI, K. Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C4, p. 7129-7132, 1985. DOI: 10.1029/JC090iC04p07129

YEH, S.-W.; CAI, W.; MIN, S.-K.; McPHADEN, M. J.; DOMMENGET, D.; DEWITTE, B.; COLLINS, M.; ASHOK, K.; AN, S.-I.; YIM, B.-Y.; KUG, J.-S. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. **Reviews of Geophysics,** v. 56, n. 1, p. 185-206, 2018. DOI: 10.1002/2017RG000568

YEH, S.-W.; KUG, J.-S.; DEWITTE, B.; KWON, M.-H.; KIRTMAN, B. P.; JIN, F.-F. El Niño in a changing climate. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 511-514, 2009. DOI: 10.1038/nature08316

ZEBIAK, S. E. Oceanic heat content variability and El Niño cycle. **Journal of Physical Oceanography**, v. 19, n. 4, p. 475-486, 1989. DOI: 10.1175/1520-0485(1989)019<0475:OHCVAE>2.0.CO;2

ZEBIAK, S. E.; CANE, M. A. A Model El Nino-Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 10, p. 2262-2278, 1987. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<2262:AMENO>2.0.CO;2

ZENG, N.; YOON, J.-H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, 014002, 2008. DOI: 10.1088/1748-9326/3/1/014002

ZHANG, S.; WANG, H.; JIANG, H.; MA, W. Evaluation of ENSO prediction skill changes since 2000 based on multimodel hindcasts. **Atmosphere**, v. 12, n. 3, p. 365-380, 2021. DOI: 10.3390/atmos12030365

ZHOU, J.; LAU, K.-M. Does a monsoon climate exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020–1040, 1998. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2



CAPÍTULO 2

Detecção de alterações na vegetação associadas ao fenômeno ENOS, usando imagens orbitais

Denise Cybis Fontana

2 Detecção de alterações na vegetação associadas ao fenômeno ENOS, usando imagens orbitais

Denise Cybis Fontana

Neste capítulo, assumiu-se a premissa de que as condições hídricas e térmicas em diversas regiões do Globo são alteradas em anos com a presença do fenômeno ENOS e, em decorrência desta, ocorrem modificações no estado da cobertura vegetal da superfície da Terra. Se esta premissa é verdadeira, o monitoramento e o detalhamento da abrangência espacial e temporal do fenômeno podem ser feitos através do uso de técnicas de sensoriamento remoto. Séries temporais de imagens de satélite permitem estabelecer padrões e perceber mudanças no padrão normal de crescimento e desenvolvimento da vegetação em períodos longos de tempo e em grandes áreas. Isto porque alguns sensores a bordo de satélites atualmente disponíveis possuem resolução espacial e temporal compatíveis com a área de abrangência de fenômenos de grande escala, como o ENOS. Tais informações contribuem de forma original e complementar às análises realizadas sobre as alterações associadas a esse fenômeno no clima de diferentes regiões.

Busca-se, nesse capítulo, apresentar breve revisão sobre contribuições do uso de sensores remotos na análise da dinâmica da cobertura vegetal associada ao fenômeno ENOS. Os estudos apresentados, por óbvio, não representam a totalidade do que tem sido estudado neste tema, mas foram escolhidos de forma a representar diferentes possibilidades de contribuição ao entendimento das alterações que ocorrem na superfície associada a esse fenômeno. Assume-se, portanto, que o monitoramento da quantidade e do estado da biomassa na superfície pode ser útil na definição da abrangência espacial do ENOS, além de gerar subsídios para a tomada de decisões frente às previsões climáticas. Especial ênfase dá-se à vegetação de interesse agropecuário e, principalmente, àquela predominante nas regiões brasileiras em que o clima é mais suscetível a alterações em presença do fenômeno, como o estado do Rio Grande do Sul.

Monitoramento da vegetação por sensores remotos

Existem muitos estudos relacionados ao uso de informações obtidas a partir de sensores remotos para fins de monitoramento da superfície da Terra. Nesses, tem sido confirmada a tese de que os sensores remotos se constituem em consistentes indicadores da resposta da vegetação aos efeitos climáticos e/ou antrópicos, decorrentes de conversões de uso e cobertura do solo (Casa *et al*., 2021)

e podem, em consequência, ser utilizados em análises de variabilidade e tendências de mudanças globais (Zhao *et al*., 2018) regionais ou locais. Os produtos oriundos de técnicas de sensoriamento remoto que detectam tais respostas podem ser considerados relativamente recentes, mas a ideia de usar a vegetação como agente integrador de condições ambientais é razoavelmente antiga, similar ao utilizado por Köppen no seu sistema de classificação climática, o qual tem sido intensamente utilizado (Alvares *et al*., 2013). Antes de abordar o tema de fundo, é importante que duas perguntas sejam respondidas. São elas:

Quais indicadores remotos têm sido mais utilizados para caracterizar o tipo e o estado da vegetação?

Os denominados "Índices de Vegetação" são os indicadores oriundos de sensores remotos que mais intensamente têm sido utilizados para fins de monitoramento da vegetação com grande abrangência espacial, dado que podem ser interpretados como estimadores da quantidade e do estado da cobertura vegetal. Entre as dezenas ou mesmo centenas de índices existentes na literatura, destaca-se o NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) como aquele mais amplamente utilizado.

Com o índice NDVI, proposto por Rousse *et al*. (1973), é possível caracterizar a presença e o estado da vegetação para as mais diversas aplicações, desde estudos localizados (Monteiro *et al*., 2012; Pinto *et al*., 2017; Almeida *et al*., 2018) até análises globais (Huete *et al*, 2002; Zhao *et al*., 2018) em diferentes áreas do conhecimento, mas com uso destacado nas ciências agrárias. O NDVI permite o monitoramento da biomassa verde (ou "verdor") das regiões de produção, ao utilizar na sua equação (Eq.1) a relação antagônica da reflectância (ρ) nas bandas do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP) frente ao acúmulo de biomassa (Jensen, 2009). À medida em que ocorrem incrementos de biomassa, observa-se uma diminuição na reflectância no V, em função do aumento na absorção pelos pigmentos presentes na folha, e aumentos na reflectância no IVP, pelas múltiplas reflexões que ocorrem no dossel mais estruturado.

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{V})}{(\rho_{IVP} + \rho_{V})} \qquad \text{Eq.1}$$

A reflectância, grandeza usada neste e em outros índices de vegetação, apresenta alta correlação com a absortância (Almeida *et al*., 2018), que é a grandeza utilizada pelas plantas para seu crescimento e desenvolvimento, o que explica a alta associação da reflectância com a produção de biomassa verde.

Entre as aplicações mais frequentes, estão as inferências sobre parâmetros biofísicos (Monteiro *et al*., 2012; Fontana *et al*., 2018), o monitoramento e a modelagem do rendimento de grãos (Melo *et al*., 2008; Junges & Fontana, 2011; Figueiredo *et al*., 2016; Gusso *et al*., 2017) ou mesmo a indicação da sanidade das plantas, como deficiências nutricionais e doenças (Junges *et al*., 2020).

Outro aspecto importante é que o NDVI tende a minimizar os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, fatores que influenciam nos valores de refletância da vegetação (Ponsoni & Shimabukuro, 2017), permitindo estudos comparativos entre diferentes locais ou épocas do ano. Nesses estudos, frequentemente são utilizados os denominados per-

fis temporais de NDVI, que nada mais são do que a representação da evolução no tempo do NDVI e, portanto, registram o histórico de crescimento e desenvolvimento da vegetação. Os perfis aplicados a culturas anuais são extremamente úteis para fins de monitoramento ou mesmo como dado de entrada para alimentar modelos de estimativa do rendimento de grãos. O NDVI de culturas anuais mostra um padrão bastante característico de incrementos desde a implantação da lavoura até um valor máximo, que estabiliza durante todo o período reprodutivo. Ao final do ciclo, o NDVI reduz novamente quando da translocação de nutrientes para o enchimento de grãos e o consequente amarelecimento e queda natural das folhas (Klering *et al*., 2012; Mengue & Fontana, 2015).

Também um segundo índice de vegetação se destaca, o EVI (*Enhance Vegetation Index*, proposto por Huete *et al*., 1997), o qual tem sido bastante utilizado em estudos que avaliam as variações na cobertura vegetal ao longo do tempo. Esse índice é resultante da combinação dos índices SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index,* proposto por Huete *et al*., 2011) e ARVI (*Atmosphere Resistant Vegetation Index*, proposto por Kaufman & Tanré, 1992), e é obtido pela Eq. 2:

$$EVI = G \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + C_1\rho_V + C_2\rho_A + L)} \qquad \text{Eq 2.}$$

em que G = fator de ganho; ρ_A, ρ_{IVP} e ρ_V são, respectivamente, reflectância nas bandas do azul, infravermelho próximo e vermelho; C_1 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos, para a banda do vermelho (C_1 = 6); C_2 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul (C_2 = 7,5); e L é fator de correção para a interferência do solo (L = 1). Os coeficientes C_1 e C_2 podem ser alterados de acordo com condições regionais, sendo os valores indicados entre parênteses aqueles adotados nos produtos disponibilizados pelo EOS (*Earth Observing System*) do programa Earth Science Enterprise lançado pela NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Quais são os sensores mais apropriados para o monitoramento contínuo de grandes áreas?

Muito seguidamente tem sido feito o uso combinado de sensores de alta e de moderada resolução espacial para fins de monitoramento contínuo da superfície, e a consequente obtenção de informações da dinâmica temporal dos alvos da superfície. Os sensores com alta resolução espacial (a bordo das plataformas Landsat, Aster, CBERS, Sentinel, entre outras) contribuem ao permitir o maior detalhamento dos alvos na superfície, o que é essencial para caracterização e distinção de tipos vegetais. Por sua vez, sensores de moderada resolução espacial (a bordo das plataformas Terra, NOAA, SPOTVeg, principalmente) podem contribuir para a generalização das informações em caráter regional, fornecendo maior frequência de obtenção de informações sobre as variações ocorridas na superfície, ao longo do tempo.

É importante ressaltar que tradicionalmente o emprego dos sistemas de alta resolução espacial apresenta limitação relacionada à frequência de revisita (16 dias para os sistemas Landsat e 26 dias para SPOT e CBERS, por exemplo). Esta, aliada à cobertura de nuvens, seguidamente resulta em insuficiente número de imagens disponíveis para que as mudanças da vegetação, ao longo do tempo, sejam observadas de forma contínua. Devido ao volume excessivo de dados, estudos com

esses satélites são majoritariamente restritos a análises locais, abrangendo áreas relativamente pequenas e não contemplando o desafio de estudos com abrangência de um Estado ou de um País inteiro, especialmente quando se refere ao Brasil. Essa situação está progressivamente sendo alterada pela disponibilização de sensores mais adequados à realidade agrícola, assim como pelo uso combinado de diferentes sensores orbitais. Exemplo importante de uso do sensor Landsat para avaliações sobre a alteração da cobertura vegetal em diversos biomas brasileiros e com abrangência nacional é o MapBiomas (Souza *et al*., 2020), que gera produtos de alterações anuais para o Brasil. Mas para fins de monitoramento ao longo de uma safra, um limitador é, entretanto, a carência de séries históricas de imagens que permitam a definição de padrões regionais e de análises de variabilidade no tipo e estado da vegetação na superfície. Também importante salientar a recente introdução do processamento em nuvem de grandes volumes de dados, como o caso da plataforma *Google Earth Engine*, que é uma plataforma de acesso de dados aberta e com a possibilidade de intenso compartilhamento de códigos de processamento (https://developers.google.com/earth-engine/help_dataset_description), o que tem ampliado sobremaneira a possibilidade de abranger áreas maiores com sensores de alta resolução espacial.

Em termos de sensores de moderada resolução espacial, mas com alta resolução temporal, salientam-se AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo do satélite NOAA (*National Ocenanic and Atmosferic Administration*) e o sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*). a bordo do satélite TERRA, os quais são considerados, na literatura internacional, como os mais consistentes para a geração de produtos capazes de atender às necessidades do monitoramento da dinâmica de grandes áreas (Justice *et al*., 1991; Maselli *et al*., 1992; Huete *et al*., 2002; Manjunath *et al*., 2002, Gurgel & Ferreira, 2003; Cordeiro *et al*., 2021). Essa peculiaridade é consequência de características como cobertura global diária da Terra, larga faixa de imageamento, disponibilidade de bandas espectrais próprias ao monitoramento da vegetação e, também, de uma série contínua de imagens a partir de 1981, no caso do AVHRR/NOAA (Kidwell, 1990), e a partir de 1999, no caso do MODIS/TERRA (Huete *et al*., 2011).

Com dados adquiridos numa faixa de imageamento de 2.800 km de largura e em 5 bandas espectrais, que vão do vermelho ao infravermelho termal, as imagens derivadas do sensor AVHRR, na forma de produtos de combinação de máximo valor, têm sido extensamente utilizadas. Nessas combinações, cada pixel, geograficamente registrado, corresponde ao maior índice de vegetação NDVI ao longo de um determinado período de tempo (quinzenal ou mensal). O processo de composição temporal tem como objetivo minimizar a interferência da atmosfera no valor do pixel, diminuindo a contaminação por nuvens e o efeito das diferentes condições atmosféricas associadas aos diferentes ângulos de obtenção das imagens (Tucker *et al*., 2011). Embora existam muitos outros sensores de resolução espacial mais refinada, as imagens do sensor AVHRR ainda são muito utilizadas em estudos de áreas extensas, como as de biomas e regiões agrícolas, devido à disponibilidade da mais longa série temporal, com dados contínuos, cobertura global e frequência diária (Huete *et al*., 2011). Exemplo é a série GIMMS (*Global Inventory Modeling and Mapping Studies*), disponibilizada por um grupo de estudo formado por pesquisadores da NASA e da Universidade

de Maryland (EUA), que tem como objetivo principal detectar mudanças em grandes extensões territoriais na vegetação do globo terrestre (Tucker *et al*., 2011).

Também as imagens do sensor MODIS/TERRA, na forma de índices de vegetação, têm sido muito utilizadas para o monitoramento da evolução da vegetação natural e agrícola de diversas regiões do globo (Rizzi *et al*., 2001, Huete *et al.* 2002; Risso *et al*., 2009, Junges *et al*., 2016; Fontana *et al*., 2018; Moreira *et al*., 2019b, Cordeiro *et al*., 2021). Com esse sensor, que opera com 36 bandas espectrais, é possível o recobrimento global e contínuo diário ou a cada dois dias (dependendo da latitude), com resoluções espaciais variando de 250 a 1.000 m. Uma característica importante em relação ao MODIS é de que os dados, já corrigidos para efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, etc.) e georeferenciados, são distribuídos gratuitamente na forma de diferentes produtos, entre os quais se destacam os índices de vegetação NDVI e EVI, produzidos a cada 16 dias (produto MOD13), com resoluções de 250 m (produto MOD13Q1), 500 m (produto MOD13A1) e 1.000 m (produto MOD13 A2) (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod13.php). Esses produtos, tanto para o NDVI como para o EVI, estão também disponibilizados na plataforma *Google Earth Engine*, o que facilita sobremaneira o processamento das imagens e a obtenção de informações derivadas desses índices.

As imagens NDVI/MODIS/TERRA representam uma possibilidade de estender a série histórica de imagens NDVI/AVHRR/NOAA, ampliando a disponibilidade de dados para estudos de monitoramento ao longo do tempo. Já nas imagens EVI/MODIS/TERRA foram introduzidas melhorias na qualidade da informação espectral (Huete *et al*., 2011), através do aumento na sensibilidade em condições de alta biomassa e de correções para a redução da influência atmosférica e do fundo (solo, palha, água, etc.). As imagens MODIS têm sido utilizadas também para o monitoramento das mudanças sazonais e da fenologia da vegetação (Mengue & Fontana, 2015; Nhongo *et al*., 2017; Moreira *et al*., 2019a), o que é essencial para definir o tipo de uso da terra e acompanhar seu desenvolvimento no tempo. Recentemente, o EOS (*Earth Observing System Data Gateway*) da NASA iniciou a disponibilização da coleção 6 de imagens NDVI e EVI/MODIS, na qual as imagens de toda a série histórica disponível foram reprocessadas, tornando-as ainda mais confiáveis. Esta é uma característica interessante deste programa e que se repete em intervalos de tempo, permitindo a cada avanço tecnológico, com o reprocessamento de toda a série histórica, a manutenção do aspecto de comparação temporal na série.

Assim, respondidas as duas questões iniciais, quais indicadores e quais sensores podem ser usados em análises do fenômeno ENOS, seguem alguns exemplos conduzidos nos territórios brasileiro e gaúcho que envolveram aplicações de sensores remotos na caracterização da abrangência dos efeitos associados ao fenômeno ENOS.

NDVI e ENOS no Brasil

São apresentados neste item quatro estudos de casos relatando pesquisas que analisaram a associação entre o NDVI, obtido de imagens orbitais, e os eventos ENOS no território brasileiro. A abrangência espacial foi todo o território brasileiro, ou parte dele. Em termos de análises, algumas abordaram o conceito de imagem diferença e outras aplicaram estatísticas mais robustas, revelando mais detalhes da associação NDVI e ENOS.

O primeiro estudo de caso selecionado

foi conduzido por Batista *et al*. (1997), o qual pode ser considerado como pioneiro pela abrangência de todo o Brasil e pelo número de anos utilizados. O estudo teve como base imagens da série GIMMS, com resolução espacial de 7,6 km na forma de composições mensais do máximo NDVI/AVHRR/NOAA. O período estudado foi extenso, tendo sido utilizadas imagens de 1981 a 1991. Exatamente por ser um dos estudos pioneiros com a série GIMMS aplicada em todo o território brasileiro, os autores enfatizaram que, apesar das prováveis contaminações por nuvens, fumaça de queimadas sazonais e/ou o efeito de aerossóis de erupções vulcânicas que podem ter ocorrido durante o período, as comparações e relações feitas mostraram coerência com o esperado para as mesmas.

Entre os diversos dados analisados, foi apresentada a imagem diferença entre os valores médios anuais de NDVI do ano de 1983, ano muito seco no norte do Brasil devido ao forte evento El Niño, e um ano com precipitação pluvial próxima à normal climatológica (1990). Os autores constataram que, em 1983, houve diferenças na fenologia da vegetação da Amazônia (cerrado, caatinga e floresta de transição), com significativa redução no NDVI em relação a 1990 para todos os tipos de vegetação. A Figura 1 delimitou as áreas de influência desse evento através do uso da imagem diferença, o que representa a contribuição mais evidente do uso das imagens de satélite. Os efeitos associados ao ENOS foram importantes na Bacia Amazônica, refletidos nas reduções de NDVI, a redução da descarga do rio Amazonas e do total de precipitação pluvial anual.

O foco do estudo foi a região Amazônica, mas percebe-se que a redução no NDVI ocorreu em praticamente todo território brasileiro, especialmente na Região Nordeste. Houve coerência com o que já se conhece do ENOS, visto que, em anos de El Niño, é esperada precipitação pluvial abaixo do normal no Nordeste brasileiro, o que explica as reduções no NDVI. Para o Sul do Brasil, observou-se nesse estudo redução no NDVI em 1983 em relação ao ano neutro, o que parece incoerente. Mas, como a análise é apenas de um evento El Niño e um evento Neutro, pode ocorrer certa variabilidade na resposta em relação a uma "climatologia" dos eventos ENOS, conforme salientado pelos autores (Batista *et al*., 1997).

Imagens NDVI/AVHRR/NOAA também foram usadas nesse segundo estudo de caso, por Kogan (2000), para avaliar a relação com dados de SST (*Sea Surface Temperature*, ou TST - temperatura da superfície do mar), considerando uma série histórica um pouco mais longa, de 15 anos, e para várias regiões do globo. O estudo possibilitou avaliar as respostas associadas ao fenômeno ENOS diferenciadas conforme a região do planeta, assim como as diferenças entre eventos de diferentes intensidades de anomalias na SST no Oceano Pacífico Equatorial. Os resultados encontrados para o sul da América do Sul (Figura 2) apontaram para o sentido esperado da relação NDVI-SST (Berlato & Fontana, 2003). Em eventos La Niña, em consequência das menores precipitações pluviais, predominaram, em grande parte da região avaliada, valores menores de NDVI (Figura 2A), quando comparados aos eventos El Niño (Figura 2B) e especialmente ao evento Muito Forte de 1997/1998 (Figura 2C), com maior precipitação.

No próximo estudo de caso, Gurgel & Ferreira (2003), também usando a série GIMMS (1982 a 1993), aprofundaram o estudo das conexões entre a variabilidade da cobertura vegetal e a variabilidade climática anual e interanual, a partir da incorporação da análise por Componentes Principais

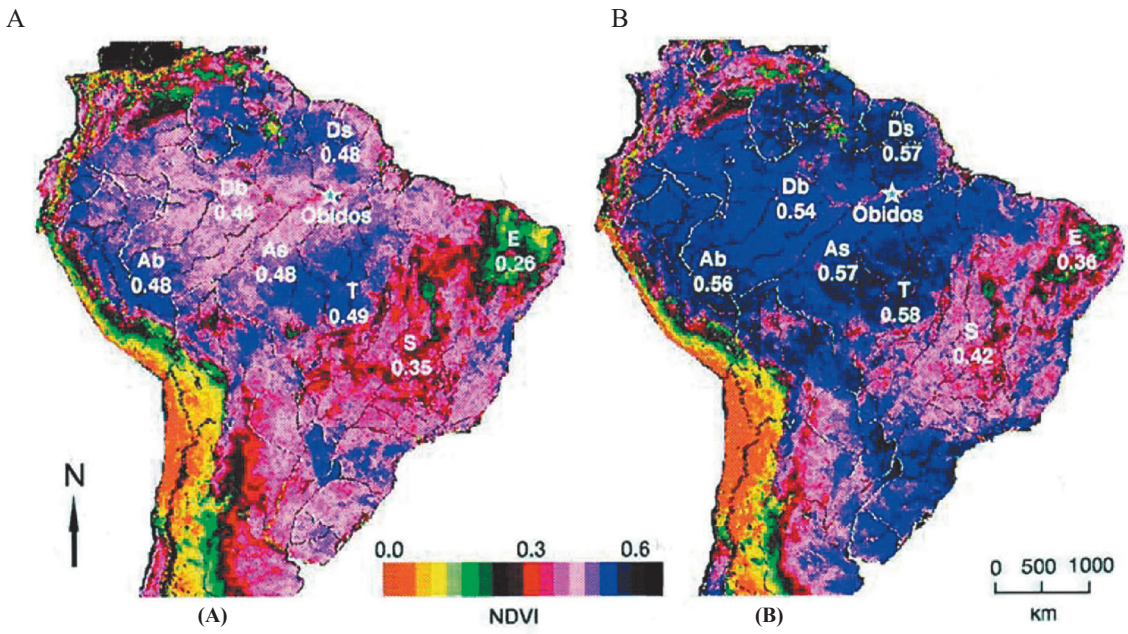


Figura 1. Imagens NDVI do Brasil para (A: 1983 - ano El Niño) e (B: 1990 - ano Neutro). As imagens são a média das composições de NDVI da série GIMMS para o ano (Fonte: Batista *et al*.,1997).

(PCA) relacionando os dados de NDVI e dois indicadores do ENOS: SST (*Sea Surface Temperatura*) e SOI (*Southern Oscillation Index*). A Figura 3 resume os principais resultados obtidos.

O primeiro componente, o qual explicou 99,49% da variância total, mostrou que os dados do NDVI médio do período caracterizaram e diferenciaram os diversos tipos de vegetação no Brasil. Os mais altos valores de NDVI estão na Floresta Amazônica, Mata Atlântica e Florestas de Araucária. Os mais baixos valores são observados na Caatinga, e valores intermediários estão nas demais regiões. O mapa do primeiro componente confirma, portanto, que o NDVI é de fato um estimador acurado da quantidade e do estado da vegetação, conforme salientado por diversos autores (Jensen, 2009; Huete *et al*., 2002; Ponsoni & Shimabukuro, 2017).

O segundo e terceiro componentes principais expressaram as variações verão/inverno e primavera/outono dos modos anuais e interanuais. Ambos componentes experimentaram mudanças moduladas pelos eventos ENOS. O coeficiente de correlação entre NDVI e SST foi de -0,79 e significativo (p< 0,75). Os autores afirmaram que a vegetação respondeu a oscilações interanuais e, em alguns casos, foram observadas mudanças abruptas durante eventos ENOS, em que o impacto sobre a vegetação foi bastante intenso.

O quarto componente mostrou que fatores "não-climáticos", como outros eventos antrópicos, em especial os eventos de queimadas, afetam os valores de NDVI principalmente no Brasil Central.

O último estudo de caso, bastante interessante, foi feito por Erasmi *et al.* (2014). Nesse, a abrangência espacial foi menor, restringindo-se à Região Nordeste, a qual sabidamente apresenta importantes teleconexões com o fenômeno ENOS. Foi utilizada

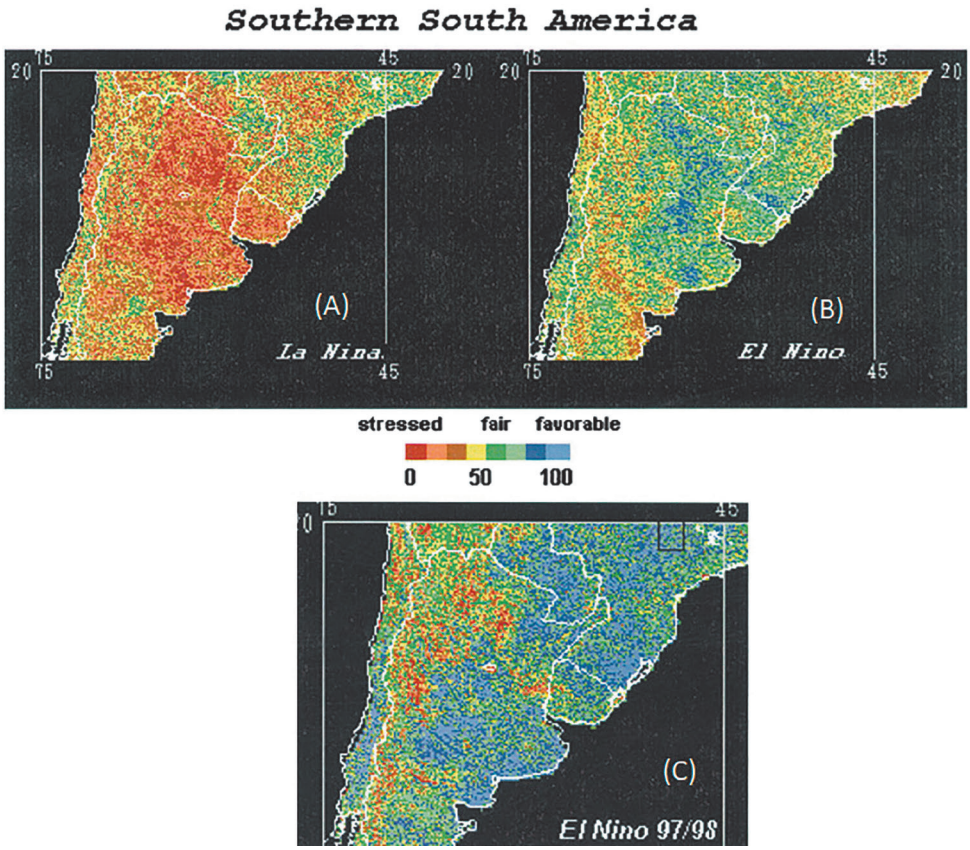


Figura 2. Imagens coloridas para (A) NDVI médio para dois eventos La Niña (1988/1989 e 1995/1996), (B) em dois eventos El Niño (1987/1988 e 1991/1992) e (C) para evento El Niño (1997/1998) no Sul da América do Sul (Fonte: adaptado de Kogan, (2000).

a SST Niño 3.4 para correlacionar com as fases do ENOS, analisando uma série de 1982 a 2010, também GIMMS.

Os autores verificaram que existe uma associação linear em que, considerando todo o período, as anomalias negativas no NDVI em geral são percebidas após ocorrerem anomalias positivas na SST em meses anteriores. Nesse estudo de caso, foi incorporado às análises o conceito de defasagem de tempo entre o evento e seus efeitos associados sobre a vegetação. A máxima área afetada foi observada com 9 meses de defasagem. Observa-se que existe na região um gradiente: no norte e nordeste da área em estudo a correlação negativa é maior, e no sul as correlações são fracas e não significativas (Figura 4). Os autores salientaram ainda que a vegetação de Caatinga foi mais fortemente afetada do que as áreas com mais umidade da Mata Atlântica.

Ainda do trabalho da Erasmi *et al.* (2014), é apresentada a Figura 5, cuja interpretação visual indica claramente o impacto negativo das anomalias positivas da SST quando se considera uma defasagem temporal. A relação entre NDVI e SST foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$), com um coeficiente de correlação de -0,43.

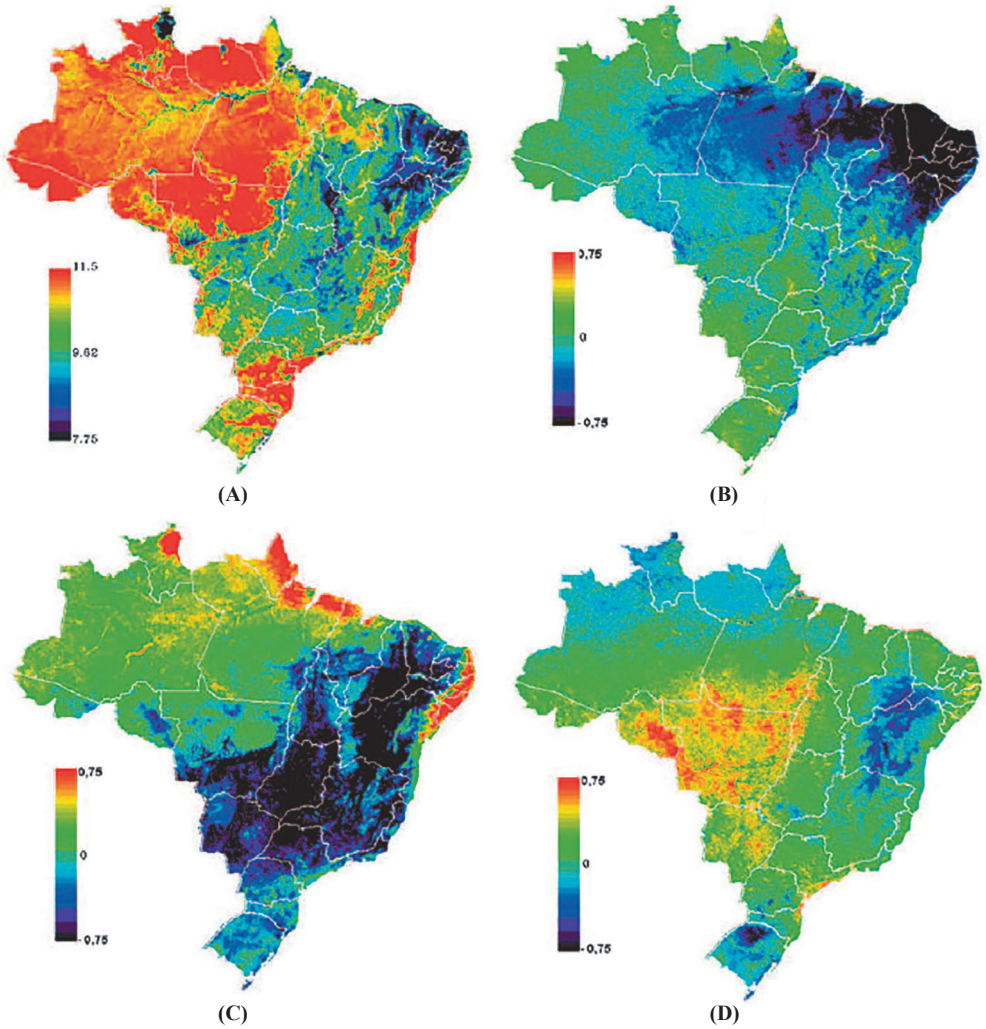


Figura 3. Imagens dos Componentes Principais derivados dos dados mensais de NDVI do período de janeiro de 1982 a dezembro de 1993. A escala de cores varia do vermelho ao preto. O vermelho representa as regiões com os maiores valores de NDVI e correspondem às localidades com o tipo de vegetação mais densa e verde ao longo do ano. O preto representa regiões onde a vegetação permanece verde somente por poucos meses do ano, regiões com pouca ou nenhuma vegetação, regiões com vegetação natural degradada por causas antrópicas ou regiões com muita água, (A) imagem da primeira componente, (B) imagem da segunda componente, (C) imagem da terceira componente, (D) imagem da quarta componente (Fonte: Gurgel & Ferreira, 1997).

NDVI e ENOS no Rio Grande do Sul

Neste item estão descritos alguns "Estudos de Casos" desenvolvidos pelo grupo de Agrometeorologia da UFRGS em estudos do fenômeno ENOS usando ferramentas de sensoriamento remoto, cujas análises ficaram restritas majoritariamente ao estado do Rio Grande do Sul. Os estudos estão organizados em três itens. O primeiro refere-se àqueles que não diferenciaram os tipos de uso e cobertura da terra, seguido dos estudos que tiveram foco em coberturas de campos naturais e, por último, são apresentados os

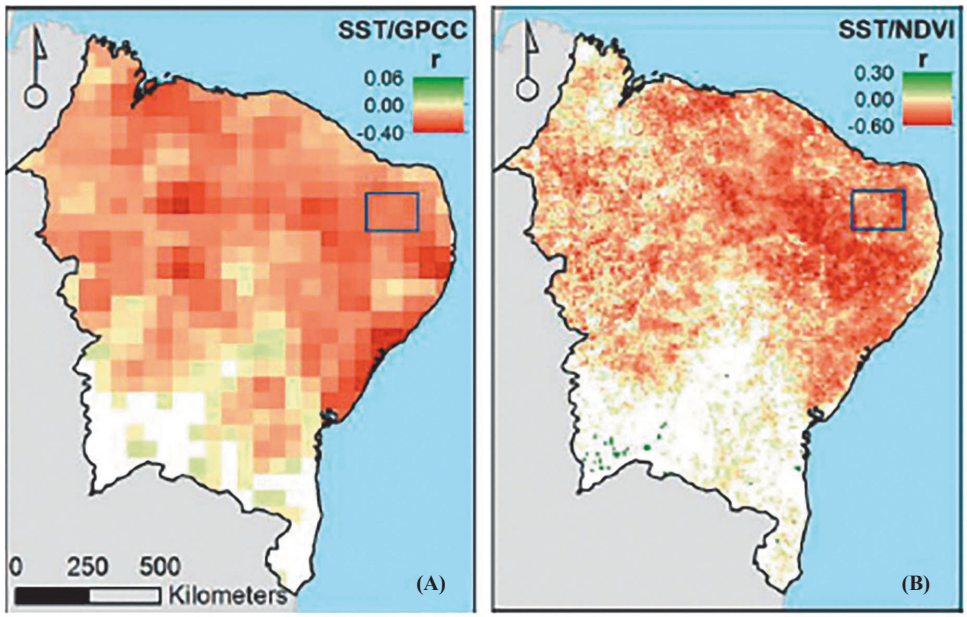


Figura 4. Coeficiente de correlação (r) para a regressão linear do período de 1982 a 2010 entre as anomalias mensais de temperatura da superfície do mar (SST do Niño 3.4) e: A) Precipitação pluvial do GPCC (dados com defasagem de 9 meses) e B) NDVI (defasagem = 12 meses); (branco são áreas não significativas, $p < 0,01$). (Fonte: Erasmi *et al*. 2014).

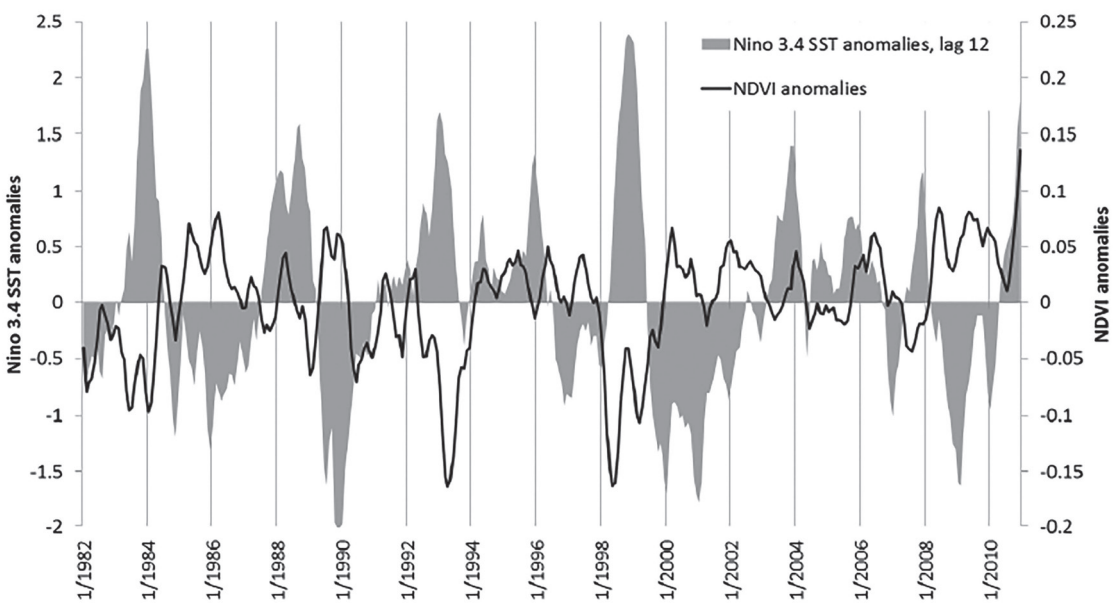


Figura 5. Perfil temporal mensal das anomalias de NDVI para a região de estudo do Seridó (assinalada com o retângulo azul na Figura 4), comparada às anomalias de SST Niño 4 com uma defasagem temporal de +12 meses. (Fonte: Erasmi *et al*. 2014).

estudos que abrangeram algumas das principais culturas anuais do Rio Grande do Sul: trigo, arroz e soja. Salienta-se que os resultados apresentados neste capítulo corroboram interessantes trabalhos realizados cuja abrangência envolveu o Sudeste da América do Sul (Zhao *et al.*, 2018; Lara *et al.*, 2018; Casa *et al.*, 2021, entre outros), região na qual o sinal associado ao ENOS é similar ao encontrado no Rio Grande do Sul.

Tipos de uso e cobertura diversos

Os primeiros estudos realizados foram feitos usando imagens do sensor NDVI/AVHRR/NOAA, que, conforme mencionado anteriormente, é bastante útil em estudo de escala regional ou global. O enfoque utilizado inicialmente não individualizava tipos de uso e cobertura da terra; as alterações nas condições da vegetação eram analisadas de forma indiscriminada em todo o Estado. Tal proposta tem suporte no fato de que a escala espacial e temporal dos dados de NDVI/AVHRR/NOAA (1 km; mensal) é compatível com a escala espacial e temporal dos efeitos associados ao fenômeno de grande escala.

Para avaliar os efeitos associados ao ENOS sobre o desenvolvimento da cobertura vegetal no estado do Rio Grande do Sul, Jacóbsen *et al.* (2004) propuseram o uso de mapas de precipitação pluvial, obtidos a partir de dados de estações meteorológicas, e de imagens de NDVI/AVHRR/NOAA do período 1981 a 2000. Os autores verificaram que, em anos de El Niño, no Rio Grande do Sul, há o predomínio de anomalias positivas de precipitação pluvial em praticamente todos os meses do ano, com exceção de setembro, fevereiro (metade Sul), maio e junho (Figura 6). Esse resultado é coerente, pois é sabido que, associado ao El Niño, ocorrem anomalias positivas de precipitação pluvial ao longo de todo o ano, especialmente de outubro a janeiro, com maior intensidade nos meses de outubro e novembro e, especialmente, na região Noroeste do Rio Grande do Sul (Fontana & Berlato, 1997; Fontana *et al.*, 2004; e Puchalski, 2000; Matzenauer *et al.*, 2017). Observa-se na Figura 6 que o excedente de precipitação pluvial ocorrido nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro acarreta a predominância de anomalias positivas de NDVI no Estado nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, o que é esperado e característico de um necessário tempo de resposta da vegetação às condições meteorológicas persistentes, favoráveis ou desfavoráveis.

Já nos anos de La Niña (Figura 7), de forma oposta ao observado para El Niño, Jacóbsen *et al.* (2004) verificaram que as anomalias negativas de precipitação pluvial predominam na maior parte do Estado ao longo de todo o ano, mas principalmente nos meses de novembro, dezembro, maio e junho. A principal diferença em relação ao El Niño é que, em condições de La Niña, as anomalias negativas de precipitação pluvial resultam em predomínio de anomalias negativas no NDVI nos meses de outubro a janeiro. Ao longo do ano, fevereiro é o único mês em que, em condições de La Niña, predominam anomalias positivas de NDVI em todo o Estado, o que possivelmente seja consequência das anomalias positivas de precipitação pluvial verificadas no mês anterior (janeiro).

Ainda com o sensor NDVI/AVHRR/NOAA, mas com uma série mais longa (GIMMS - *Global Inventory Modeling and Mapping Studies* - de 1982 a 2008), Cordeiro (2014) confirmou e ampliou os estudos de Jacóbsen *et al.* (2004). Nesse caso, a autora usou os perfis temporais de NDVI para monitorar as variações fenológicas da vegetação de todo o Rio Grande do Sul em decorrência da va-

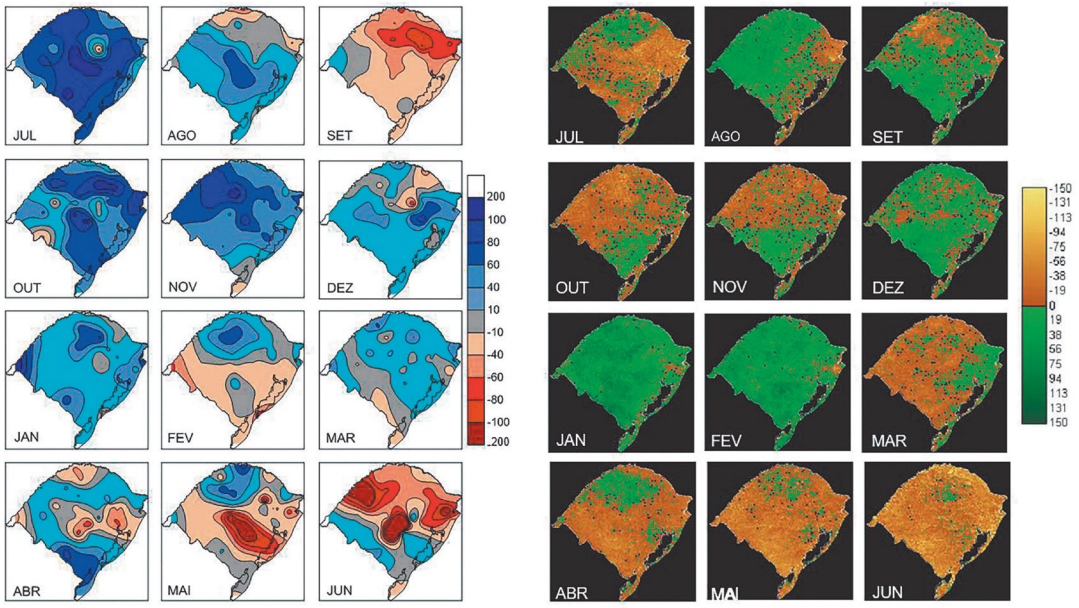


Figura 6. Anomalias de precipitação pluvial (mm) e de NDVI médios dos anos de El Niño no estado do Rio Grande do Sul. As anomalias são relativas aos anos neutros no período de 1981 a 2000. Fonte: Jacóbsen *et al*., (2004).

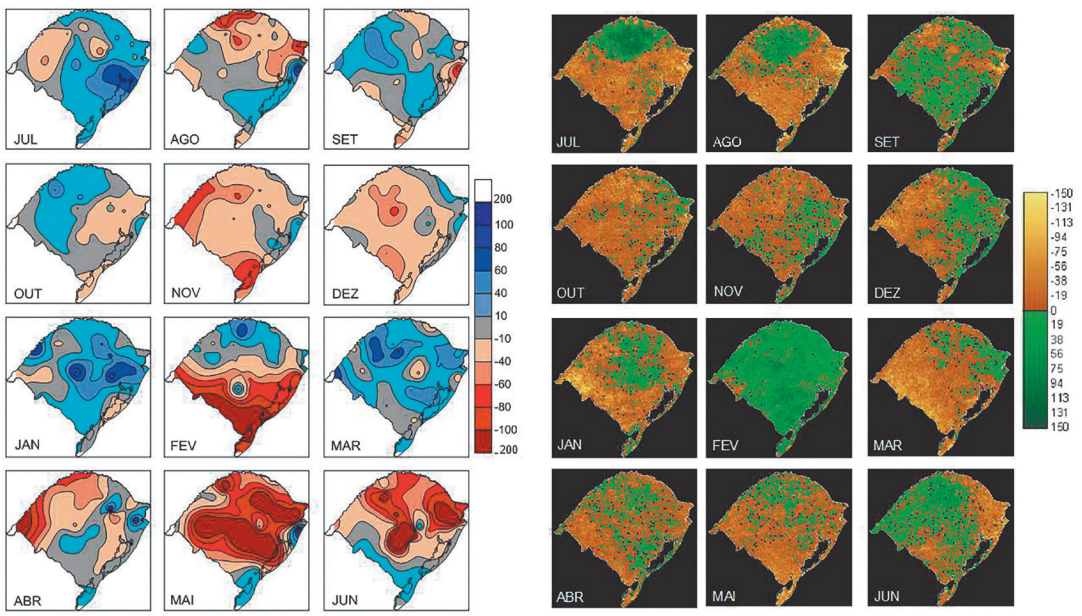


Figura 7. Anomalias de precipitação pluvial (mm) e de NDVI médios dos anos de La Niña no estado do Rio Grande do Sul. As anomalias são relativas aos anos neutros no período de 1981 a 2000. Fonte: Jacóbsen *et al*., (2004).

riabilidade das condições meteorológicas associadas ao fenômeno ENOS. Ao analisar esta relação, foi demostrado que a variável meteorológica limitante ao crescimento depende da estação do ano, e que, no período de primavera-verão, é a precipitação pluvial o elemento que mais seguidamente causa limitações de crescimento. Através de análises espaço-temporais e também de anomalias no padrão normal da vegetação, Cordeiro (2014) observou que os maiores valores de NDVI estão associados, em geral e de forma coerente com a maior precipitação pluvial, a eventos El Niño, enquanto que os menores valores se associam a La Niña (Figura 8). A autora propôs análises realizadas em períodos trimestrais, de forma a compatibilizar com uma abordagem mais empregada do fenômeno. Este estudo evidenciou, também, certa defasagem no tempo de resposta das plantas às condições meteorológicas. Embora o trimestre de maior impacto do ENOS na precipitação pluvial ocorra em outubro, novembro e dezembro (OND), o trimestre de maior impacto do El Niño sobre o NDVI ocorre em janeiro, fevereiro e março (JFM). Já para a La Niña, o maior impacto ocorreu em novembro, dezembro e janeiro (NDJ). Por fim, foi verificado que grande parte do território do Estado é impactado com anomalias positivas (associadas ao El Niño) e negativas (associadas a La Niña) nos trimestres de maior impacto (Figura 9).

Nesses estudos iniciais ficaram evidentes as potencialidades de uso de imagens de satélite para fins de identificação das áreas no Rio Grande do Sul nas quais a vegetação sofre algum tipo de alteração no seu vigor em resposta às alterações das condições meteorológicas associadas ao ENOS.

Campos Naturais

Wagner *et al.* (2013), por meio de séries temporais de NDVI/MODIS, produto MOD13Q1, também analisaram e caracterizaram a dinâmica temporal da cobertura vegetal, mas ao contrário dos estudos anteriores, tiveram como foco as áreas campestres do Bioma Pampa do Rio Grande do Sul e do Uruguai. Esta área de estudo foi definida em função dos campos naturais deste bioma es-

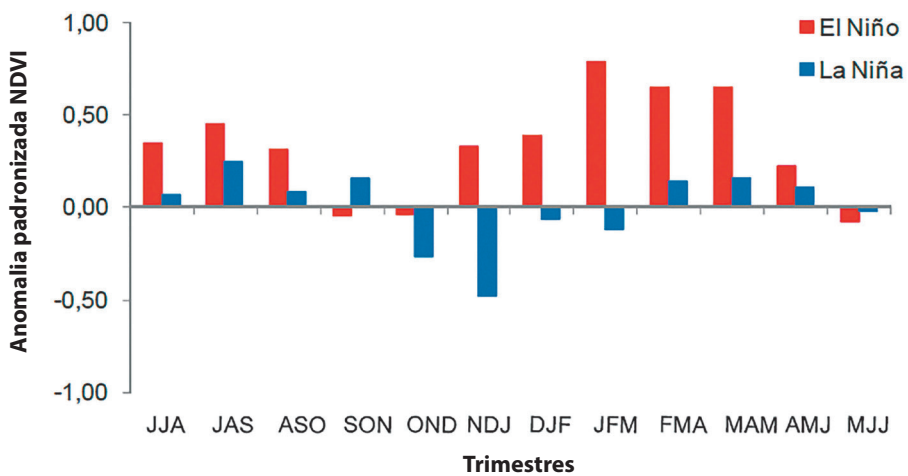


Figura 8. Anomalias trimestrais padronizadas de NDVI no Rio Grande do Sul, em eventos El Niño e La Niña. Período de 1982 a 2008. Fonte: Cordeiro (2014).

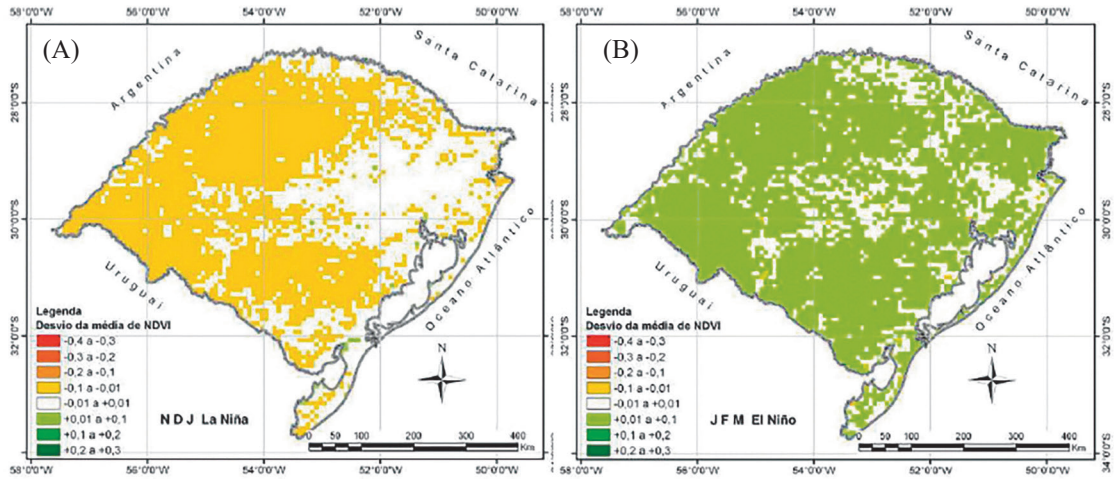


Figura 9. Desvios da média de NDVI no Rio Grande do Sul, (A) no trimestre de La Niña (novembro, dezembro e janeiro – NDJ) e (B) de El Niño (janeiro, fevereiro e março – DJF). Período de 1982 a 2008. Fonte: Cordeiro (2014).

tarem entre os maiores e mais ricos do mundo, com uma enorme diversidade de espécies e uma singular coexistência de plantas C3 e C4 no mesmo tempo e espaço. O estudo teve como foco as 13 regiões ecológicas deste bioma no Brasil (estado do Rio Grande do Sul) e no Uruguai. A variabilidade temporal e espacial do vigor da vegetação foi avaliada utilizando os índices NDVI e EVI para o período de 2000 a 2011. Inicialmente, os autores mostraram um resultado preocupante: em regiões com predomínio de campos, há uma declividade negativa na tendência linear da média dos índices de vegetação ao longo do tempo (Wagner *et al.*, 2013). A tendência negativa, relacionada à combinação da ocorrência de déficit hídrico em solos rasos e com sobrepastoreio, indica alterações no padrão de cobertura vegetal do Pampa, com redução do vigor vegetativo. Esse enfoque proposto de análises de tendência temporais do NDVI pode ter grande contribuição nas análises de tendências climáticas regionais e globais.

Mais além das análises de tendência linear, em seu estudo, Wagner (2013) também analisou os efeitos do fenômeno ENOS sobre o "verdor" dos campos desse bioma (Figura 10). As análises confirmaram trabalhos anteriores e mostraram que a variabilidade interanual das condições meteorológicas no Estado é alta, a qual, em parte, está associada ao fenômeno ENOS. No período do verão é quando o fenômeno mostra as maiores alterações no padrão climático da região, com aumento na precipitação pluvial e na amplitude térmica durante o El Niño. O oposto é verificado na fase La Niña. Na análise pixel a pixel foi observada alta correlação entre NDVI e EVI e o índice MEI (*Multivariate ENSO Index*) sobre as áreas de campos. A correlação foi alta e positiva durante o verão, especialmente em dezembro e janeiro (Figura 10).

Ainda na Figura 10, no caso dos mapas de desvio nas fases ENOS, observa-se que a vegetação decresceu durante a La Niña e o padrão oposto ocorreu durante a fase El Niño, corroborando os padrões e tendências observadas em outros tipos de uso e cobertura do solo. Os efeitos associados ao fenô-

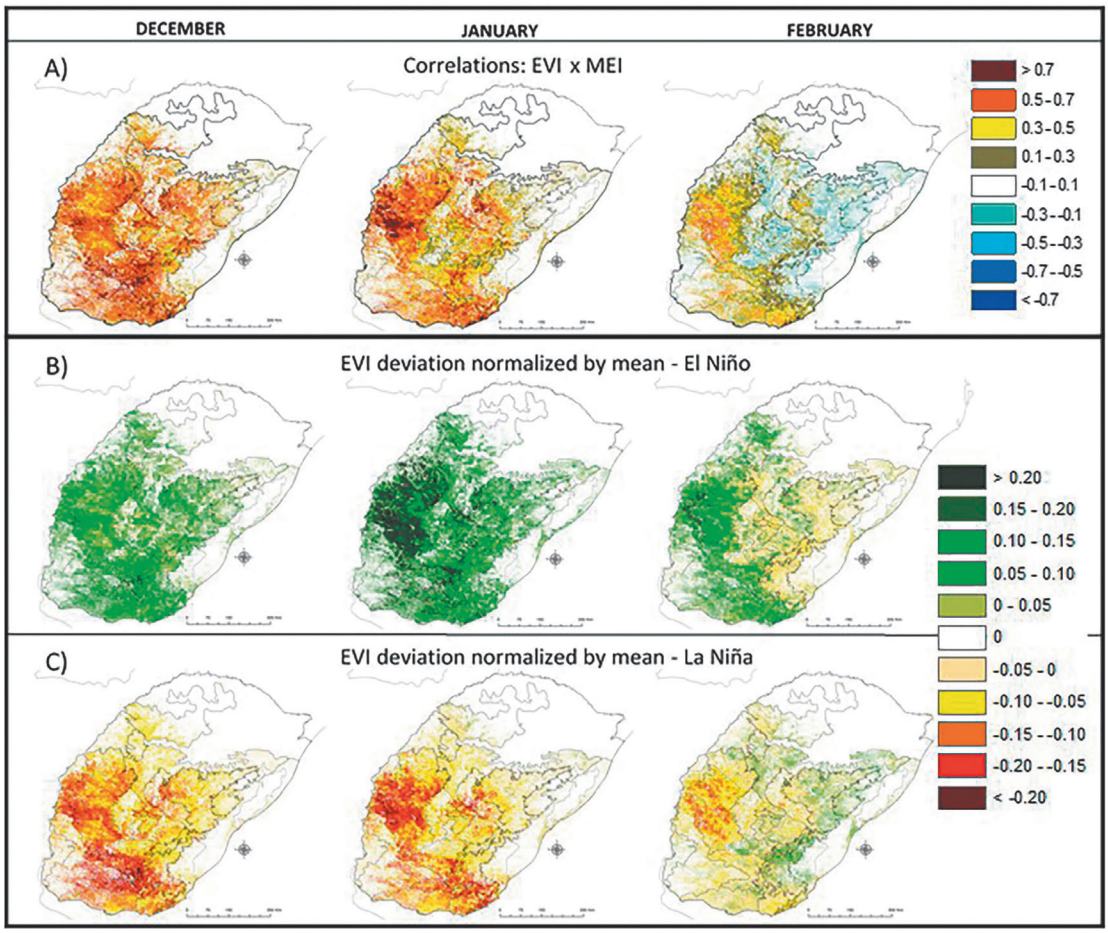


Figura 10. (A) Correlação entre NDVI e MEI (p<0,05, sem defasagem), desvio normalizado do NDVI pela média dos El Niños. (B) e La Niñas (C), em dezembro, janeiro e fevereiro. Análises no Bioma Pampa no período de fevereiro de 2000 até agosto de 2011. Fonte: Wagner *et al*. (2013a).

meno, entretanto, não são iguais em toda a região. Existe um gradiente em que as correlações crescem de nordeste para o sudeste, o qual os autores justificam em função da interação entre a precipitação pluvial e a capacidade de armazenamento de água nos diferentes tipos de solos na região.

Também analisando os campos do Bioma Pampa, porém em um estudo de caráter local, Fontana *et al.* (2018) analisaram dados de uma área de 64 ha de pastagem natural na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). No experimento, conduzido desde 1986 (longa duração), diferentes níveis de oferta de forragem são disponibilizados a bovinos ao longo do ano, o que determina que as parcelas experimentais apresentem diferenças em sua composição florística e no crescimento e desenvolvimento da vegetação ao longo do ano e entre distintos anos. Entre os dados analisados constavam a taxa de acúmulo de forragem, dados de NDVI, também oriundos do sensor MODIS, e dados meteorológicos de superfície.

Conforme esperado, foi verificado que a variabilidade dos elementos meteorológicos associados ao ENOS afeta o crescimen-

to da vegetação, o que foi avaliado pelo uso do NDVI. No evento El Niño de 2009/2010, o déficit hídrico acumulado no verão foi de 133 mm, enquanto que, no evento La Niña, ocorrido no ano seguinte (2011/2012), o déficit foi consideravelmente maior (247 mm). Como consequência das condições hídricas favoráveis, os valores de NDVI foram maiores durante o evento El Niño em quase todos os meses do ano (Figura 11). No caso do evento La Niña, o déficit hídrico determinou menor disponibilidade de forragem e, consequentemente, os menores valores de NDVI. Para a Taxa de Acúmulo de Forragem (FAR), apesar da menor disponibilidade de dados quando comparado aos dados NDVI no período considerado, a média do evento El Niño (294 kgDM/ha/16 dias) foi mais que o dobro da média durante o evento La Niña (121 kgDM/ha/16 dias). A menor quantidade de dados FAR foi devido a problemas na coleta de dados experimentais naquele ano, o que ajuda a enfatizar a importância e a conveniência do uso de modelos obtidos a partir de dados remotos ampliando a representatividade, tanto no tempo como no espaço, de informações sobre a superfície.

A partir de imagens MODIS desta mesma área experimental, e corroborando a robustez do uso do NDVI como indicador das condições da vegetação, Junges *et al.* (2016) e Ogliari *et al.* (2020) demonstraram que é

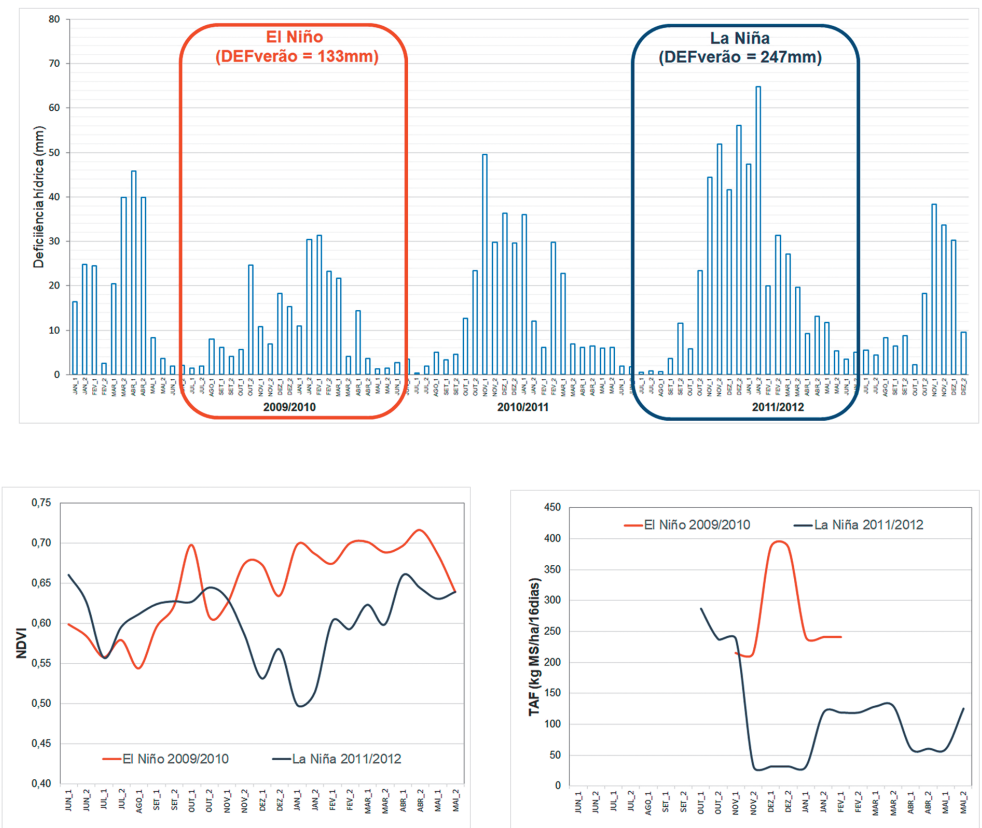


Figura 11. Valores de DEF (déficit hídrico), NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e FAR (Taxa de Acúmulo de Forragem) observados durante os eventos ENOS de 2009/2010 e 2011/2012, em Eldorado do Sul, RS. Fonte: Fontana *et al*. (2018).

possível diferenciar níveis de oferta de forragem aos animais. Esse é um indicador importante no contexto da sustentabilidade das pastagens naturais do Bioma Pampa.

Por fim, apresenta-se o estudo conduzido por Moreira *et al.* (2019b), que utilizou imagens do sensor EVI/MODIS em estudo dos efeitos associados ao fenômeno ENOS nos campos do Rio Grande do Sul (Figura 12), incluindo além do Bioma Pampa, também os campos do Bioma Mata Atlântica, situados no Nordeste do Estado. Neste estudo foram utilizadas as imagens EVI/MODIS/Terra e aplicada a análise de ondeletas, considerando separadamente as 13 tipologias campestres do Estado. Na Figura XX é apresentado o resultado somente para duas das tipologias, Campos Arbustivos e Campos Mistos do Cristalino Oriental, como forma de exemplificar o tipo de informação gerada, visto que a maior parte das tipologias estudadas apresentaram um padrão similar

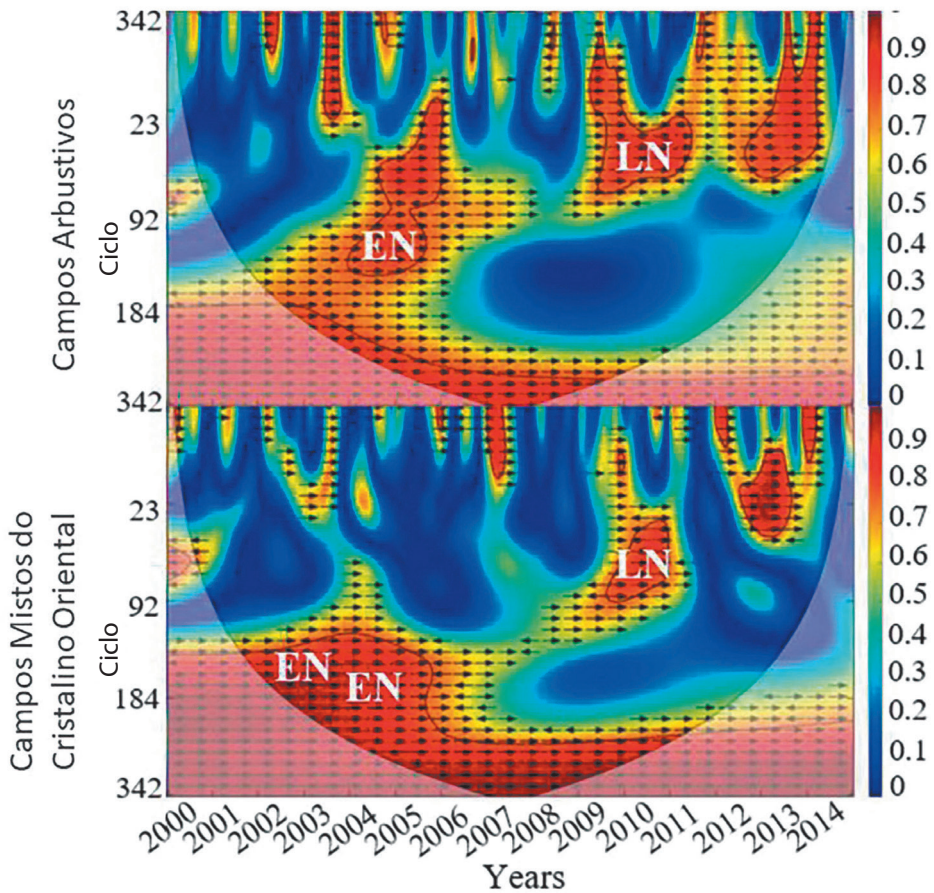


Figura 12. Espectro de potência para o EVI/MODIS/Terra de duas tipologias de campos (Campos Arbustivos e Campos Mistos do Cristalino Oriental) do Rio Grande do Sul para o período de 2000 a 2014 (tons em vermelho indicam a intensidade de ocorrência dos eventos – azul: baixa intensidade e vermelho: alta intensidade. As setas indicam o sinal de fase: setas para direita (→) indicam que as séries estão completamente em fase e as setas para a esquerda (←) indicam que as séries estão em fase completamente oposta. Os códigos EN e LN referem-se aos eventos El Niño e La Niña (CPC / NOAA, 2016). Fonte: Moreira *et al. (*2019b).

a essas. A análise por ondeleta foi escolhida pois permite identificar onde e quando ocorreram alterações no padrão fenológico das séries temporais analisadas, apontando a intensidade (correlação) entre o EVI/MODIS e a variabilidade da precipitação pluvial. Os resultados obtidos por Moreira *et al.* (2019b) confirmaram a grande variabilidade das condições de precitação pluvial na área de estudo, tanto nos ciclos anual como no ciclo interanual. Para o ciclo anual, as estiagens podem ser a principal causa de interferência e enfraquecimento do ciclo. Para o ciclo interanual, os autores relacionaram com os eventos ENOS, dada a conhecida relação entre o fenômeno e as condições de precipitação pluvial no Estado (Berlato & Fontana, 2003). Muitos eventos de El Niño ou La Niña, embora não regulares, fortalecem o ciclo sazonal (ver meses 92–184).

A partir dos exemplos elencados, fica evidenciado que o uso de índices de vegetação (NDVI e EVI) em estudos dos campos naturais do Rio Grande do Sul está consolidado. Mesmo sendo um ecossistema extremamente complexo quanto à definição do acúmulo de biomassa, à suscetibilidade às condições meterológicas, também àquelas associadas ao ENOS, que ocorrem ao longo das estações do ano, é evidente e quantificável através do uso de imagens de satélite.

Culturas Anuais

No Rio Grande do Sul, segundo dados médios de 5 anos (2017 a 2021) (IBGE, 2022), as culturas produtoras de grãos de maior expressão são a soja, que apresenta a maior área de plantio (área de 5,83 milhões de ha e produção de 7,30 milhões de ton), o arroz irrigado (área de 1,01 milhão de ha e produção de 8,07 milhões de toneladas), o milho (área de 0,77 milhão de ha e produção de 4,99 milhões de toneladas) e o trigo (área de 0,87 milhão de ha e produção de 2,18 milhões toneladas). Apesar do crescimento médio anual da produção de grãos observado nas séries das estatísticas oficiais do Estado, observa-se que existe alta variabilidade interanual dos rendimentos, o que é determinada principalmente pelos dois principais fatores de risco à atividade agrícola não controlável pelo produtor: mercado e adversidades climáticas.

As adversidades climáticas assumem importante fator que limita a obtenção de rendimentos mais elevados quando comparadas a outras regiões produtoras, o que tem sido denominado como "lacunas de produtividade". No Sul do Brasil, Sentelhas *et al.* (2015) demonstraram que as maiores lacunas estão associadas aos déficits hídricos, o que vem a corroborar diversos trabalhos (Berlato & Fontana, 1999; Cunha *et al.*, 1999; Berlato & Fontana, 2003) que mostraram que parte importante da variabilidade interanual dos rendimentos de grãos de culturas no RS está relacionada à condição hídrica, condicionada pelo fenômeno ENOS e seus efeitos em alguns elementos meteorológicos. Neste item, serão apresentados alguns resultados obtidos de trabalhos que analisaram a relação ENOS e o rendimento de grãos, tendo sido escolhidas uma cultura de inverno (trigo) e duas culturas de verão, uma irrigada (arroz) e outra não irrigada (soja), visando a caracterizar de forma mais ampla as possibilidades e tipos de interações que possam existir. Os trabalhos apresentados têm caráter local, mas corroboram resultados obtidos com enfoque semelhante em diversas regiões do mundo (Li *et al.*, 2020, na China, Casa *et al.*, 2021, na Argentina, Lara *et al.*, 2018, na região Patagônica e Saleem *et al.*, 2021 na, Austrália)

Trigo

Para a cultura do trigo, Junges *et al.* (2015) analisaram dados de 2000 a 2012, sendo que, nessa série, foram selecionados quatro anos (30,7%) identificados como La Niña (2000, 2007, 2010 e 2011), mesmo número de anos de El Niño (2002, 2004, 2006 e 2009) e cinco anos (38,6%) neutros (2001, 2003, 2005, 2008 e 2012). Inicialmente, os autores mostraram que, independente do evento ENOS, os perfis temporais médios de NDVI extraídos das áreas cultivadas com trigo, obtidos de imagens MODIS, foram condizentes com a evolução temporal do índice de vegetação esperada de áreas agrícolas destinadas à produção de grãos. Mas houve diferenças entre os perfis das distintas regionais analisadas, as quais refletiram as diferenças nos ciclos de desenvolvimento dos cereais de estação fria, como consequência das distintas épocas recomendadas para a semeadura nessas regiões.

Também, ficou evidenciado que os perfis temporais médios de NDVI/MODIS das lavouras de trigo apresentaram diferenças quanto a sua evolução temporal conforme o evento La Niña, El Niño e neutro considerado (Figura 13). O perfil temporal médio de La Niña indicou atraso temporal no incremento inicial dos valores de NDVI, comparativamente aos demais, o que pode ser associado às anomalias negativas de temperatura do ar para a maioria dos meses do ano em eventos La Niña. As diferenças entre os valores de NDVI/MODIS de perfis médios ocorreram especialmente entre El Niño e La Niña nas quinzenas referentes ao desenvolvimento vegetativo dos cereais de estação fria nas regionais, da EMATER-RS, avaliadas: junho e julho (Santa Rosa), julho e agosto (Passo Fundo) e agosto e setembro (Caxias do Sul). Nesses meses, os valores de NDVI/MODIS no perfil médio referente a La Niña foram inferiores aos observados nos perfis médios de El Niño e neutro.

Menores temperaturas do ar em anos de ocorrência do fenômeno La Niña tendem a acarretar menor acúmulo de biomassa verde e, consequentemente, perfis temporais com menores valores de NDVI/MODIS no período de crescimento vegetativo das plantas. Mas o efeito de baixas temperaturas do ar nas plantas de trigo produz resultados diferenciados, dependendo do estádio de desenvolvimento em que ocorrem. Baixas temperaturas do ar no período vegetativo são favoráveis, pois prolongam o ciclo e induzem à formação de maior número de afilhos. Para a cultura do trigo e demais cereais de estação fria, os menores valores de NDVI no início do ciclo não implicaram em redução no rendimento de grãos, como pode ser verificado nos perfis temporais contrastantes dos anos 2004 (El Niño) e 2011 (La Niña), na Figura 13B. Os rendimentos foram maiores em 2011 nas regionais analisadas, confirmando que anos de La Niña são favoráveis aos cereais de estação fria (Cunha *et al.,* 1999). Este mesmo tipo de associação em que os anos de maiores rendimentos de grãos de trigo são aqueles em que os perfis mostram altos valores de NDVI mantidos por um período maior de tempo (maior área sob a curva) também foi demonstrado por Junges & Fontana (2011) e Klering *et al.,* (2016).

Neste estudo de caso buscou-se evidenciar que os eventos ENOS, ao estarem associados com as variações interanuais da temperatura do ar no Rio Grande do Sul, determinam alterações no padrão de crescimento e desenvolvimento das plantas e, em consequência, no rendimento de grãos da principal cultura de outono/inverno do Estado. E isso pode ser identificado por sensores remotos através da observação dos perfis temporais de NDVI.

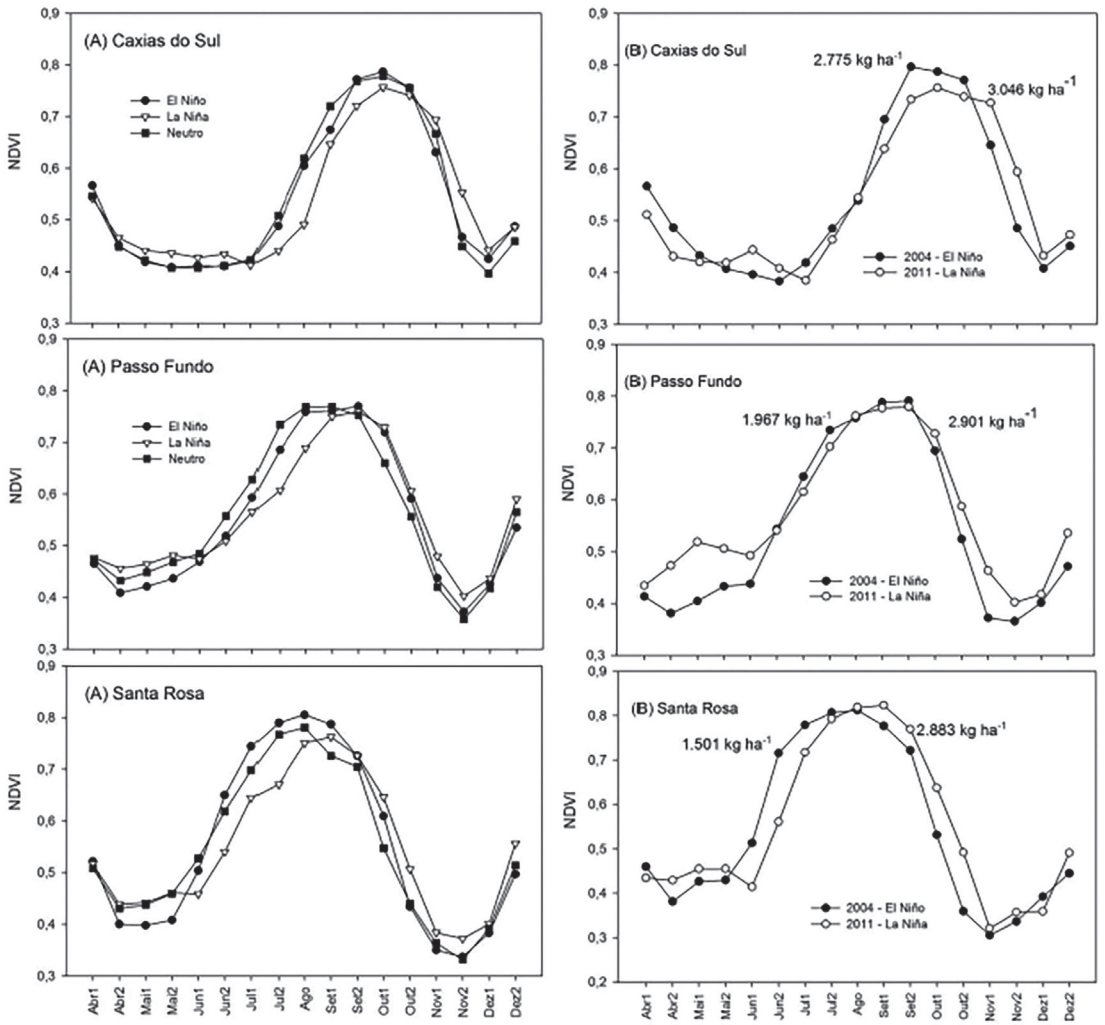


Figura 13. Perfis temporais NDVI/MODIS de áreas agrícolas cultivadas com cereais de estação fria na média de anos El Niño, La Niña e neutro (A) e perfis temporais de NDVI/MODIS e rendimento de grãos de trigo em 2004 (El Niño) e 2011 (La Niña) (B) nas regionais Emater Caxias do Sul, Passo Fundo e Santa Rosa, no Rio Grande do Sul. Série 2000 a 2012. Fonte: Junges *et al.* (2015).

Arroz irrigado

Klering *et al.* (2012) analisaram dados referentes à cultura do arroz no Rio Grande do Sul, a qual é cultivada no período de primavera-verão e conduzida quase que na totalidade da área com irrigação por inundação. Este aspecto é importante, pois a presença da água influencia tanto na relação clima–planta, determinando a importância relativa das variáveis meteorológicas na definição do rendimento de grãos, como na resposta espectral das lavouras obtida pelo sensor remoto.

A área de estudo cobriu as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, situadas na metade sul do Estado. Nessas regiões foram extraídos os perfis temporais médios de NDVI/MODIS utilizando somente as áreas cultivadas com arroz irrigado, considerando as safras de ocorrência de ENOS (Figura 14). Foram utilizadas duas safras de La Niña (2000/2001 e 2007/2008) e quatro safras de

El Niño (2002/2003, 2004/2005, 2006/2007 e 2009/2010).

Os autores observaram que, para as safras de La Niña, o NDVI médio apresentou os valores mínimos com defasagem de uma ou duas quinzenas em relação aos mínimos NDVI das safras de El Niño em todas as regiões. Segundo eles, explicar o porquê dessas diferenças é complexo, mas parte deste entendimento baseia-se no fato de que na primavera do ano de início da fase fria do ENOS (La Niña), em consequência da menor nebulosidade associada à diminuição de precipitação pluvial, tem-se um maior resfriamento do solo em função da maior perda de radiação de onda longa durante a noite.

Assim, em safras de ocorrência de La Niña na metade sul do Rio Grande do Sul, o preparo do solo para a semeadura normalmente é concluído antes do período recomendado como preferencial em virtude do maior número de dias sem precipitação pluvial (Carmona & Berlato, 2002). No entanto, a semeadura pode vir a ser retardada em função da temperatura do solo não ter atingido o mínimo recomendado, pois temperaturas menores do que 20 °C podem provocar crescimento do dossel desuniforme, consequentemente, baixo rendimento de grãos (Steinmetz *et al.*, 2009).

Os perfis temporais das safras de El Niño e La Niña apresentaram NDVI máximos em quinzenas coincidentes apenas nas regiões Fronteira Oeste e Campanha. Nas

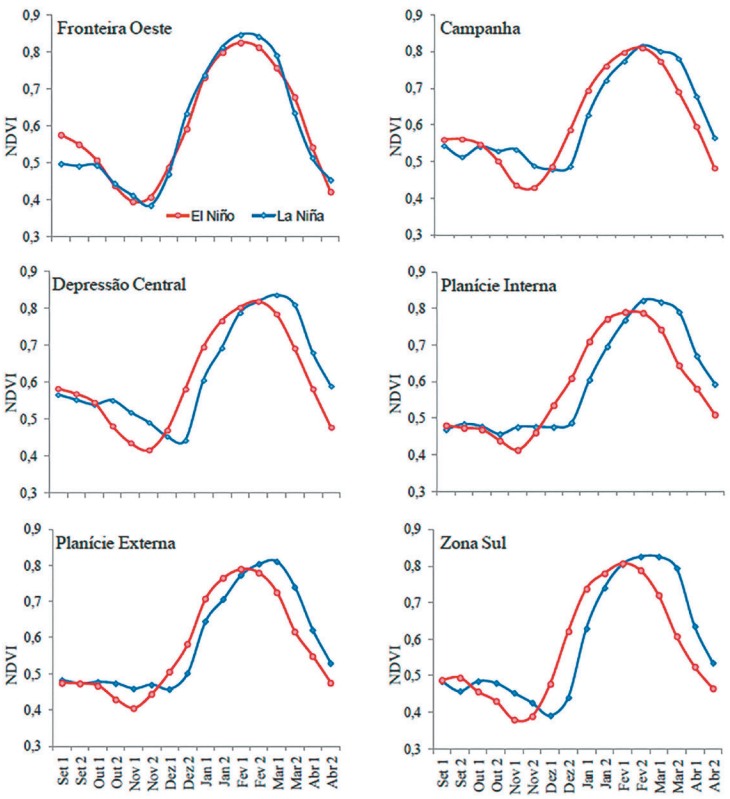


Figura 14. Perfis temporais NDVI/MODIS de áreas agrícolas cultivadas com arroz irrigado, das safras de ocorrência de La Niña e El Niño nas regiões da Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Interna à Lagoa dos Patos, Planície Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul. Fonte: Klering *et al.* (2012).

demais regiões, os valores de NDVI nas safras de La Niña ocorreram conforme o esperado, ou seja, também com defasagem de uma a duas quinzenas. É importante destacar que os máximos valores de NDVI foram observados nos perfis referentes às safras de La Niña, associados a maiores acúmulos de biomassa verde e, consequentemente, maiores rendimentos de grãos. Embora as condições meteorológicas não tenham sido usadas diretamente na associação apresentada neste trabalho, é importante ressaltar que as condições distintas ocorridas em anos de ENOS têm uma importante relação com o rendimento final de grãos de arroz irrigado.

Novamente, os perfis temporais de NDVI foram utilizados nesse estudo de caso para retratar as condições de crescimento e desenvolvimento das lavouras. No caso da cultura do arroz irrigado, a influência do ENOS pode ser observada como consequência dos efeitos associados alterando o padrão normal dos elementos meteorológicos. Para o arroz irrigado, a nebulosidade parece ser a variável mais determinante, pois afeta tanto no período noturno (emissão noturna de ondas longas determinando a temperatura do ar e do solo e o seu reflexo nos processos biológicos) como no período diurno (aporte de radiação solar e o reflexo no processo fotossintético).

Soja

A soja foi selecionada de forma a retratar a possibilidade de monitoramento dos efeitos associados ao ENOS na cultura que ocupa a maior área de cultivo no Estado. A cultura, à semelhança do arroz, é cultivada no período de primavera-verão, mas, ao contrário dessa cultura, a maior parte das lavouras é conduzida sem irrigação. Portanto, para as lavouras de soja o suprimento de água depende quase que unicamente da precipitação pluvial, a qual, no Estado, é caracterizada por alta variabilidade interanual. Assim, a condição hídrica é altamente determinante do sucesso ou insucesso da produção de grãos dessa cultura.

Na literatura, encontram-se alguns trabalhos utilizando imagens de índices de vegetação para a avaliação dos efeitos associados ao ENOS no cultivo da soja no Rio Grande do Sul. Os primeiros usavam imagens NDVI/AVHRR/NOAA e não discriminavam as áreas de cultivo com soja ou outros cultivos. Partiam do pressuposto que, como as extensões das lavouras de soja eram bastante grandes e como a cultura era suprida de água majoritariamente pela precipitação pluvial, sempre que o suprimento hídrico era adequado, tanto a cultura como os campos circundantes às lavouras tinham um adequado crescimento, resultando em elevados índices de vegetação. Assim, a resposta do conjuto (lavoura + campos) foi utilizada para representar o estado da cultura da soja, podendo ser utilizada para fins de monitoramento do ciclo (Jacóbsen *et al*., 2003; Fontana *et al*., 2004) ou mesmo para fins de previsão de safras através do uso de modelos agrometeorológicos-espectrais (Melo *et al.*, 2008).

Em estudos subsequentes, apareceram análises com maior detalhamento espacial e utilizando a resposta do NDVI ou EVI/MODIS proveniente somente das lavouras de soja. Um desses trabalhos foi desenvolvido por Rodigheri *et al.* (2019), cuja análise focou na influência do evento La Niña, em que as condições hídricas em geral são limitantes à obtenção de altos rendimentos de soja no Rio Grande do Sul. A área de estudo foi restrita à microrregião de Passo Fundo, a qual, em média, apresenta cerca de 70% do seu território ocupado com o cultivo da soja (IBGE, 2022), tendo sido comparado um ano

neutro a um ano de La Niña, usando imagens MODIS produto MOD13Q1.

Os autores observaram que houve significativa diferença nos valores do NDVI entre as duas safras analisadas (Figura 15). Em 2013/2014 (ano neutro), as áreas de soja apresentavam valores de NDVI maiores, associados ao maior vigor das plantas, quando comparada à safra 2011/20212 de La Niña. Isso foi evidenciado pelo cálculo da imagem diferença do NDVI entre as duas safras. Pode-se observar que existem regiões em que a diferença, ou seja, a mudança no NDVI de um ano para o outro foi total (representada pelas áreas em vermelho-escuro). A maior parte dos casos que apresentaram coloração verde estão em áreas com rotação de cultivo, o que torna a comparação entre anos limitada. Mas em grande parte da região observa-se que predomina a diminuição do verdor da vegetação, indicado pelo menor NDVI na safra de 2011/2012, ano de La Niña (áreas em vermelho-claro e amarelo). Também, são salientadas as áreas que se mantiveram similares em ambas as safras, ou seja, áreas que tiveram mudanças extremamente baixas ou, então, não tiveram mudança no NDVI (áreas em verde). Importante salientar que o uso

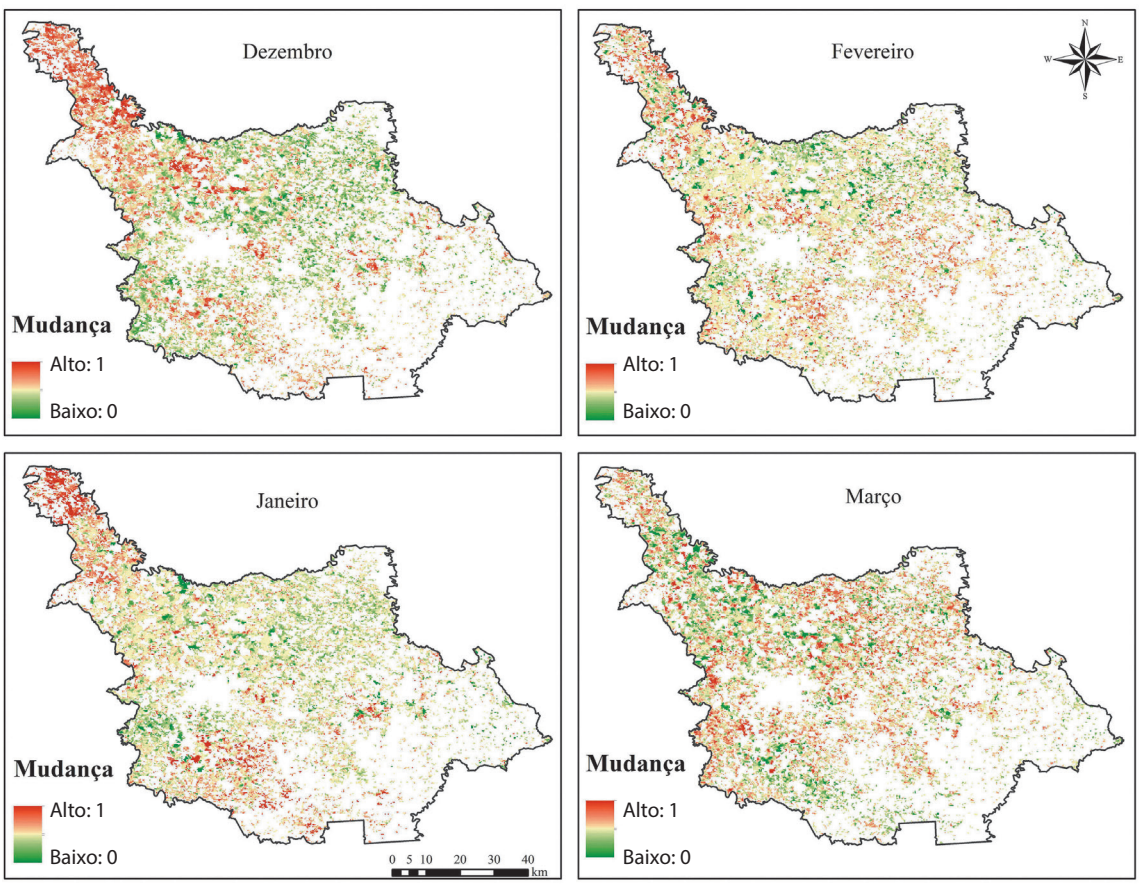


Figura 15. Imagem de diferença de NDVI entre o ano neutro e o ano de La Niña nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março nas áreas cultivadas com soja na microrregião de Passo Fundo. Fonte: Rodigheri *et al*. (2019).

da imagem diferença entre as duas safras é uma forma muito interessante para avaliar a abrangência espacial dos efeitos associados ao fenômeno ENOS na produção de soja, detectando áreas nas quais as plantas mostram os estresses ocorridos no período de análise. No caso desse evento, as principais alterações ocorreram mais no noroeste da micorregião.

Rodigheri *et al.* (2019) utilizaram os dados medidos na estação meteorológica de Passo Fundo para fazer o cálculo do balanço hídrico da cultura (metodologia de Thornthwaite & Matter, 1955) de forma a representar a condição hídrica de toda a microrregião. Ao relacionar a condição hídrica (balanço hídrico) e a condição das plantas (NDVI), verificaram que o ano neutro (Figura 16B) apresentou crescimento rápido e exponencial e estabilizou no início de janeiro, indicando o início do período do Índice de Área Foliar (IAF) ótimo, o qual se estendeu até final de fevereiro e início de março. A duração por mais tempo de um IAF ótimo está associada, em geral, com altos rendimentos de grãos. Nesta safra foram observados períodos de chuvas bem distribuídos ao longo do ciclo da cultura e grandes períodos de excesso hídrico, favorecendo o crescimento (novembro a dezembro) e o desenvolvimento da cultura (janeiro e fevereiro).

Já para o ano de La Niña (Figura 16A), o perfil de NDVI apresentou crescimento mais lento, alcançando seu máximo valor entre o período de final de janeiro e início de fevereiro. Percebe-se que o IAF ótimo se manteve por um período de duração mais curto nessa safra, indicando o prejuízo no desenvolvimento da planta. Isso, provavelmente, esteve associado ao fato de que, nessa safra, ocorreu déficit hídrico em dois períodos. O primeiro ocorreu durante a emergência das plantas (novembro), que pode ter ocasionado o atraso da emergência e/ou desuniformidade na população das plantas. O segundo período de déficit hídrico coincidiu com o período de desenvolvimento da cultura e enchimento de grãos (janeiro), o que pode ter determinado menor acúmulo de biomassa verde e menor número e/ou peso de grãos, sendo possivelmente determinante da obtenção dos menores rendimentos de grãos nesta safra.

Os rendimentos estimados pelo IBGE para estas microrregiões nas safras 2011/2012 e 2013/2014 foram, respectivamente, 1.445 e 2.617 kg/ha, confirmando a hipótese de que os perfis temporais de NDVI contam a história do desenvolvimento das lavouras e podem ser usados como um indicador espectral para fins de estimativas de rendimento a partir da incorporação deste histórico em modelos agrometeorológicos-espectrais (Melo *et al.,* 2008, Gusso *et al.,* 2017).

Também abrangendo o período de cultivo de soja no Rio Grande do Sul (novembro a março), foram analisados eventos com diferentes intensidade para El Niño (Fraco: 2019/2020, Moderado: 2002/2003, Forte: 2009/2010 e Muito Forte: 2015/2016) e para La Niña (Fraca: 2017/2018), Moderada: 2020/2021 e Forte: 2010/11), buscando relacionar anomalias de TSM com as anomalias de NDVI no Rio Grande do Sul (Figura 17). Os dados de TSM (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) abrangeram as médias móveis de três meses da região Niño 3.4. Os dados de NDVI, do produto MOD13Q1, foram processados na plataforma *Google Earth Engine*, obtendo-se as médias e as anomalias de NDVI para todo o Estado observadas nos eventos selecionados.

O transcurso das anomalias de TSM (Figuras 17A e B) evidenciam o que já foi bas-

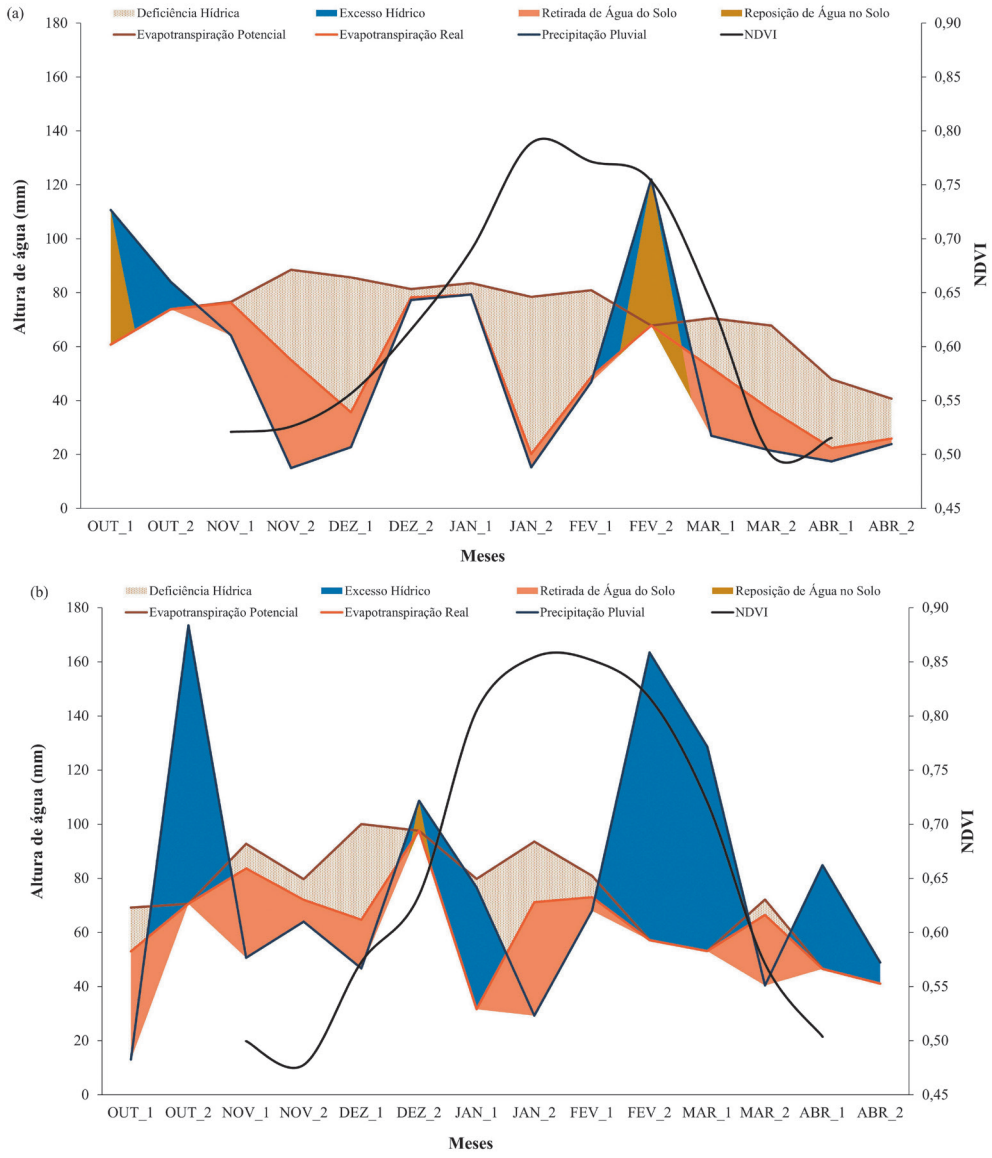


Figura 16. Perfil de NDVI e balanço hídrico para o ciclo da soja do ano (A) La Niña (2011 - 2012) e (B) ano neutro (2013 - 2014). Fonte: Rodigheri *et al*. (2019).

tante discutido nos capítulos anteriores, relativo às variações de temperatura do Oceano Pacífico características de cada fase do ENOS, bem como à variabilidade intrínseca aos eventos ENOS. Observa-se que as curvas de TSM apresentaram um padrão suave de variação no tempo, o que decorre da inércia deste sistema. A variabilidade observada na TSM mostrou associação com a variabilidade das anomalias de NDVI no período coincidente com o ciclo da cultura da soja (Figuras 17C e D). Em presença de El Niño, a maior parte das anomalias observadas no NDVI de novembro a março foram positivas, enquanto que, para La Niña, ocorreram tanto anomalias negativas como positivas. Também importante é observar que as variações no tempo dos valores de NDVI foram mais



Figura 17. Transcurso temporal das anomalias de TSM e de NDVI em eventos ENOS de diferentes intensidades (o retângulo verde indica o período do ciclo da soja no Rio Grande do Sul).

abruptas, o que, conforme já caracterizado, estão associadas à resposta da vegetação e sua adequação às condições meteorológicas, especialmente hídricas (Jacóbsen *et al.,* 2003; Wagner *et al.*, 2018; Rodigheri *et al.*, 2019).

Ao analisar o conjunto dos dados, através do diagrama de caixas, observa-se completa separação na distribuição dos dados de anomalias de TST (Figura 18A), o que não se verifica nos dados de anomalias de NDVI (Figura 18B). As anomalias de TSM nos eventos El Niño foram todas positivas e, no caso da La Niña, todas foram negativas. Já no caso das anomalias de NDVI, houve sobreposição nas caixas para grande parte dos dados. Apesar disso, os resultados corroboram a tendência citada em trabalhos anteriores (Jacóbsen *et al.,* 2004; Rodigheri *et al.,* 2019), de que os menores valores de NDVI ocorrem em anos La Niña, e maiores, em eventos El Niño.

Ao relacionar esses dois índices, TSM e NDVI, observa-se que as anomalias positivas de TSM de outubro-novembro-dezembro em eventos El Niño coincidem com as maiores anomalias positivas de NDVI no ciclo da soja, estando situadas no quadrante 2 do gráfico de dispersão. Já nos eventos La Niña, a coincidência das anomalias negativas de TSM deu-se no quadrante 3 com as menores anomalias negativas em NDVI (Figura 19). Nos dois extremos desta figura encontram-se os eventos mais extremos, o evento Forte de La Niña de 2010/2011 e o evento Muito Forte de El Niño de 2015/2016.

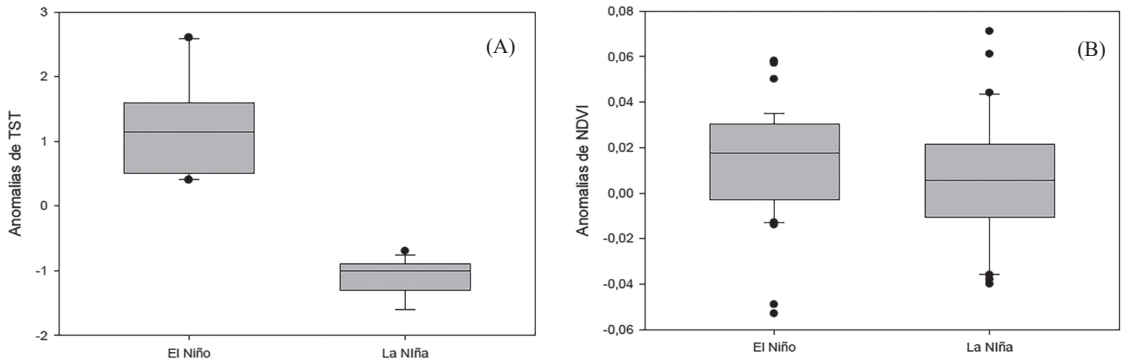


Figura 18. Diagrama de caixas das anomalias de TSM da região Niño 3.4 para o trimestre outubro, novembro e dezembro (A) e as anomalias de NDVI do período de novembro a março (ciclo da soja) (B) em eventos ENOS de diferentes intensidades. A linha horizontal no interior das caixas representa o percentil 50 (mediana), o final das caixas, os percentis 25 e 75, as barras, os percentis 10 e 90 e os círculos cheios, os valores extremos.

Balanço de Energia e o ENOS

O balanço de energia (BE) descreve como se dá a partição da energia disponível na superfície na forma de saldo de radiação (Rn) entre os três principais componentes: calor latente de evapotranspiração (LE), calor sensível para aquecimento do ar (H) e calor sensível para aquecimento do solo (G). Apesar da grande importância do conhecimento desta partição e de sua implicação na definição das condições meteorológicas, do tipo e da condição da cobertura vegetal e da produção agropecuária das diferentes regiões do globo, são poucos os trabalhos que analisaram os efeitos associados do fenômeno ENOS na partição de Rn. Esta afirmação é especialmente válida no que tange ao uso de sensores remotos nestas análises.

Para obtenção dos componentes do BE a partir de sensores remotos, pode-se utilizar distintos modelos, os quais em geral estão separados em dois grupos: i) duas camadas, como por exemplo o TSTIM (*Two-Source Time Integrated Model*), e ii) camada única, como o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) e o METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*) (Tang *et al.,* 2013). Em todos os modelos são utilizados dados que representam o estado da superfície, tanto oriundos de plataformas orbitais como de estações meteorológicas (medidos ou gerados por reanálises). Schirmbeck (2017), a partir do teste de diferentes modelos, verificou a adequação do modelo de camada única, METRIC, para as condições de clima subtropical úmido do RS, com chuvas distribuídas ao longo de todo o ano. Foram, então, utilizados produtos MODIS/Terra (NDVI, albedo e temperatura e emissividade da superfície), aliados a dados meteorológicos de reanálise da série ERA-Interim (radiação solar e temperatura do ar), para construir uma série temporal dos componentes do BE com abrangência de todo o Rio Grande do Sul no período de 2002 e 2019 (Crespo, 2022). Essa série permite estudos inéditos sobre o padrão normal e a variabilidade em torno desse padrão, inclusive a variabilidade associada ao fenômeno ENOS. Uma das análises feitas é apresentada neste último estudo de caso.

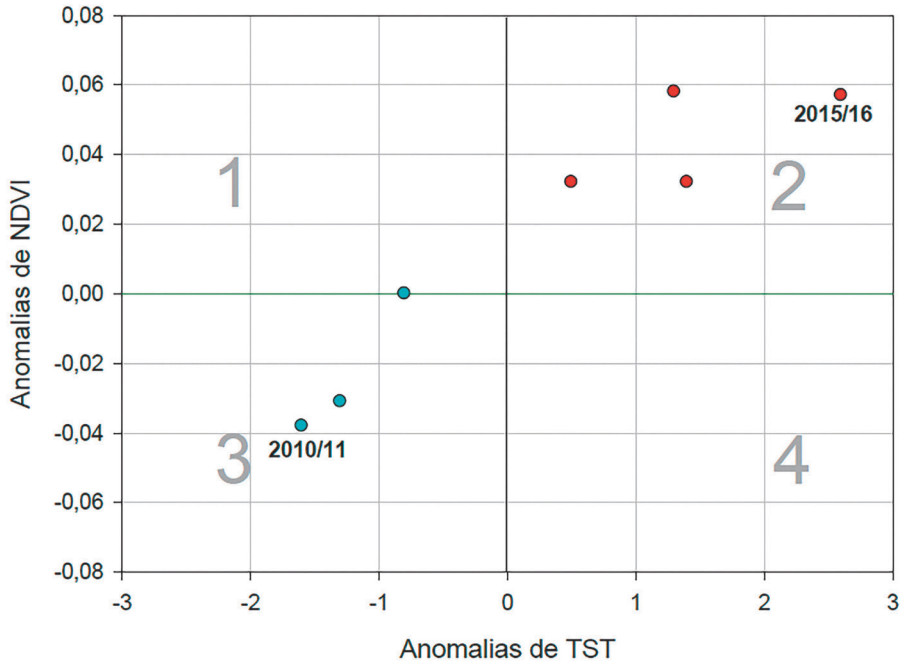


Figura 19. Anomalias de TSM do trimestre outubro-novembro-dezembro e anomalias de NDVI (maior anomalia no ciclo da soja para El Niño, em vermelho, e menor anomalia no ciclo da soja para La Niña, em azul) em eventos ENOS de diferentes intensidades.

Foram comparadas as estimativas de LE para os eventos fortes de El Niño: 2002/2003, 2009/2010 e 2015/2016 (anos com anomalias ONI>1,0^{o}C) e de La Niña: 2007/2008, 2010/2011 e 2011/2012 (anos com anoaliadas ONI<-1,0 ^{o}C). ONI significa *Oceanic Niño Index*. Nesses seis eventos selecionados para análise, houve alteração dos totais mensais de precipitação pluvial no RS trimestre Out-Nov-Dez no sentido esperado, com anomalias positivas associadas aos eventos El Niño e anomalias negativas nas La Niñas, especialmente no mês de novembro (Figura 20).

Ao analisar LE para os meses de outubro, novembro e dezembro, verificou-se que, em presença de eventos El Niño (Figura 21), houve tendência de ocorrerem menores valores em comparação com LE em eventos La Niña. Mesmo havendo maior precipitação pluvial nos eventos El Niño, isso não implicou maior LE, como poderia-se pensar. Sabe-se que a evapotranspiração é um processo extremamente complexo, definido pela resultante das condições que ocorrem num contínuo solo-planta-atmosfera. Dado que em anos de El Niño ocorre maior precipitação pluvial e maior nebulosidade, como consequência tem-se menor incidência de radiação solar global, e também, menor Rn. Nessas condições, a menor demanda evaporativada atmosfera (ETo) implica menor LE, mesmo havendo maior conteúdo de umidade na superfície. Já nos eventos de La Niña ocorre o oposto. Associado à menor precipitação pluvial, tem-se menor nebulosidade, maior radiação solar global e maior saldo de radiação, resultando em maior LE. Isso é parcialmente explicado pelas condições de clima subtropical úmido que predominam no RS, capaz de fornecer água para o proces-

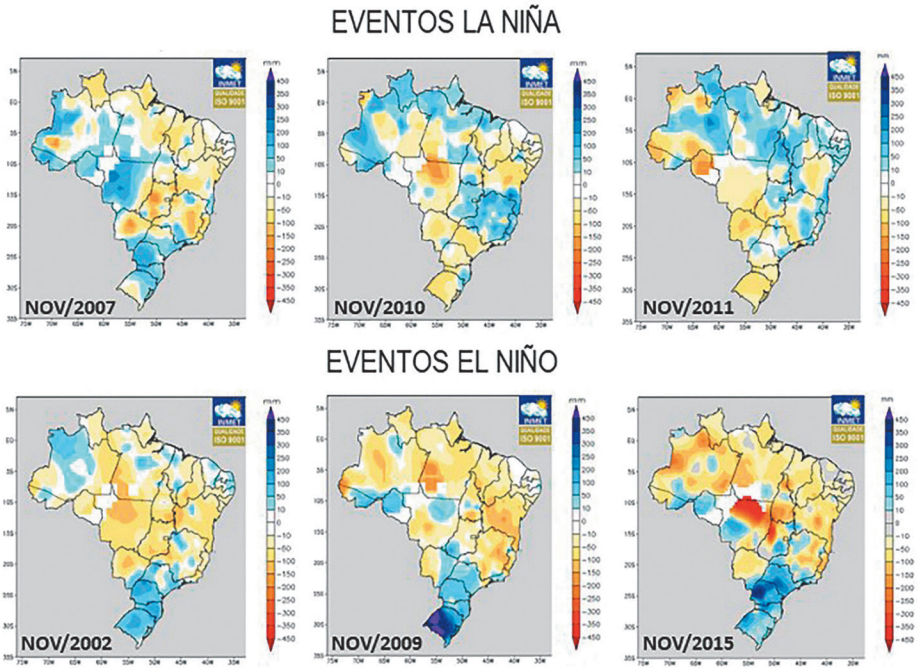


Figura 20. Mapas com a distribuição do desvio em relação à Normal Climatológica (1961/1990) da precipitação pluvial ocorrida no Brasil no mês de novembro em três eventos fortes de El Niño (2002/2003, 2009/2010 e 2015/2016) e de La Niña (2007/2008, 2010/2011 e 2011/2012). Fonte: INMET (2022).

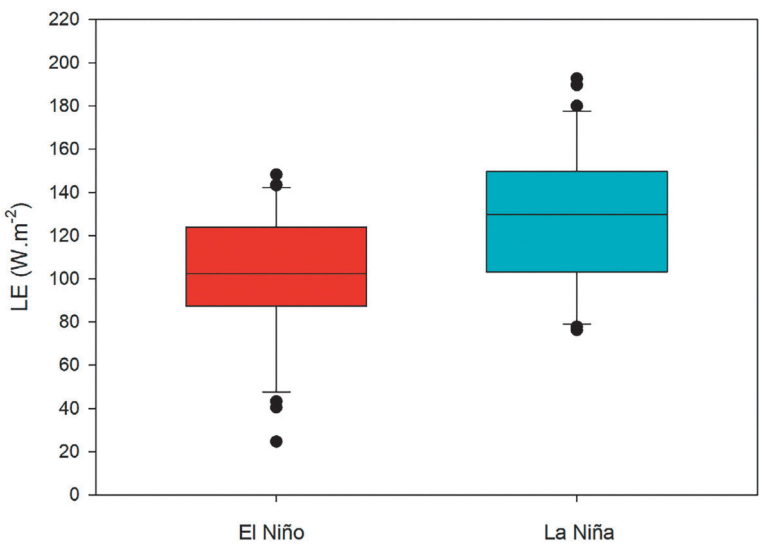


Figura 21. Box plots do fluxo de calor latente de evapotranspiração (LE) de outubro, novembro e dezembro em três eventos fortes de El Niño (2002/2003, 2009/2010 e 2015/2016) e de La Niña (2007/2008, 2010/2011 e 2011/2012) no Rio Grande do Sul. A linha horizontal no interior das caixas representa o percentil 50 (mediana), o final das caixas, os percentis 25 e 75, as barras os percentis 10 e 90 e os círculos cheios, os valores extremos.

so de evapotranspiração mesmo em período com menores ofertas de chuva.

Ao analisar os seis eventos ENOS, mas considerando separadamente cada um dos três meses de maior influência do ENOS no RS (Figura 22), é possível observar que existe diferença entre os eventos também na componente LE. Para a maioria dos meses, houve confirmação da tendência esperada, de menor LE nos eventos El Niño.

A partir das imagens de LE para os mais fortes eventos ENOS avaliados (Figura 23), foi possível fazer a análise da sua distribuição espacial. Na média dos meses de outubro, novembro e dezembro do El Niño de 2015/2016, as regiões que apresentaram os menores valores em LE foram as áreas agrícolas, especialmente no norte do Estado, Depressão Central e no sul próximo à Lagoa Mirim; todas são áreas com intensa atividade agrícola e que, à época, se encontravam na etapa de introdução das lavouras de verão. Já os valores mais altos de LE, associados a La Niña 2010/2011, ocorreram especialmente nas regiões cuja vegetação são matas naturais ou plantadas no Estado. Nesse evento houve baixos valores em LE na Campanha, onde predominam solos rasos.

Importante salientar, mais uma vez, que as análises espaciais oriundas do uso de imagens de satélite, ao permitirem delimitar áreas em que os efeitos associados ao ENOS se tornam relevantes, geram contribuição importante e original ao entendimento do fenômeno.

Considerações finais

Nesse capítulo, através da apresentação de alguns estudos de casos utilizando sensores remotos (SR), buscou-se contribuir para o entendimento dos efeitos associados ao fenômeno ENOS. Ficou evidenciado que a principal e original contribuição do SR se refere ao detalhamento espacial, delimitando áreas em que os padrões normais e

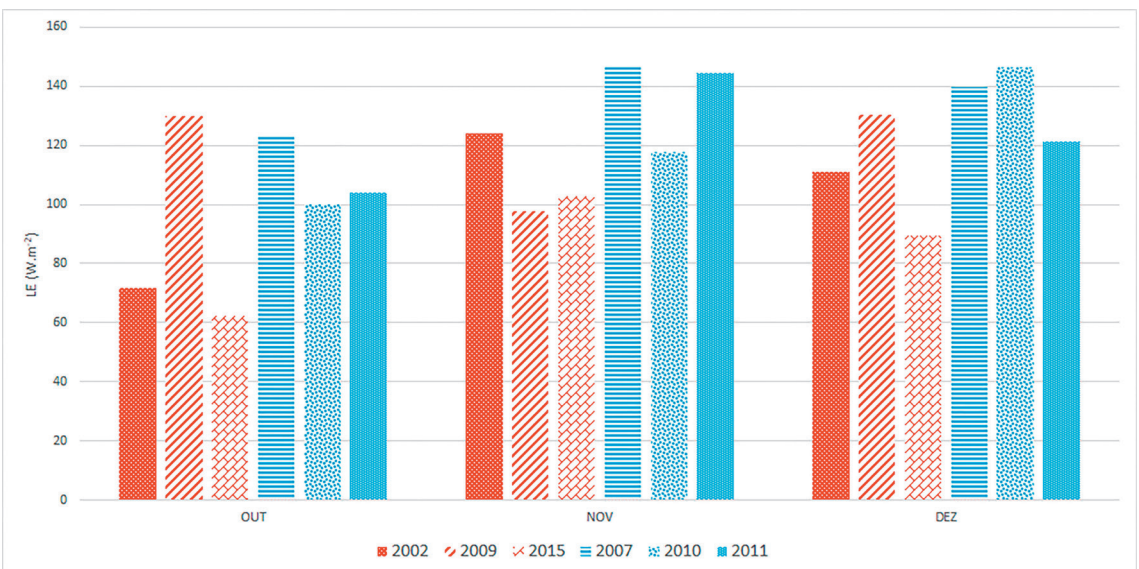


Figura 22. Fluxo de calor latente de evapotranspiração (LE) para os meses de outubro, novembro e dezembro em três eventos fortes de El Niño (2002/2003, 2009/2010 e 2015/2016) e de La Niña (2007/2008, 2010/2011 e 2011/2012).

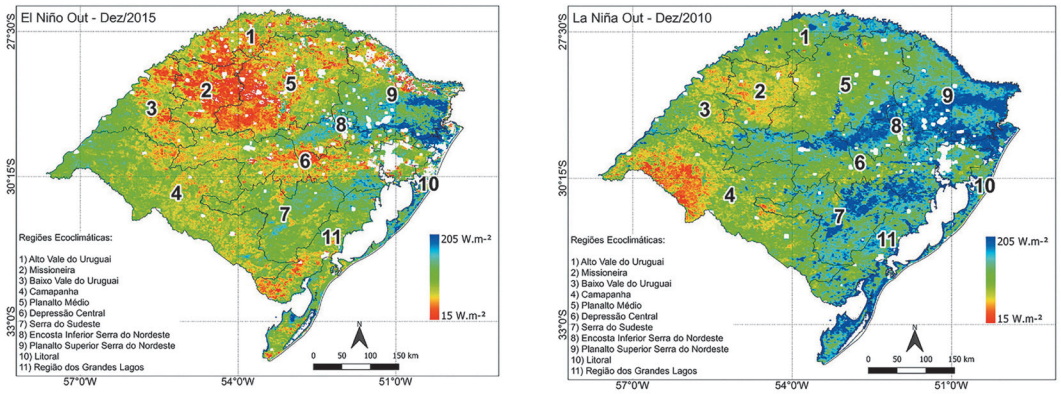


Figura 23. Mapas de fluxo de calor latente de evapotranspiração (LE) para os meses de outubro, novembro e dezembro de eventos fortes de El Niño (2015/2016) e de La Niña (2010). Fonte: Crespo (2022).

característicos da vegetação são alterados durante manifestação do fenômeno. As áreas cobertas pelas imagens podem ser muito amplas, como Continentes, Países e Estados, ou mesmo mais restritas a algum município ou região de interesse, dependendo do objetivo da análise e do tipo de sensor selecionado. Qualquer que seja a abrangência espacial, é fundamental que o sensor escolhido apresente tempo de revista compatível com as mudanças temporais que ocorrem na vegetação de interesse. Os índices de vegetação, especialmente o NDVI, têm sido os mais utilizados, dado suas associações com a condição biomassa verde. Das áreas afetadas, é possível obter valores médios e/ou anomalias e acompanhar as variações da vegetação ocorridas ao longo do tempo, de forma a "contar a história" do que ocorreu na área no período em análise. A informação gerada mostra, portanto, a localização, no tempo e no espaço, de áreas anômalas, o que decorre de alterações na quantidade de biomassa verde ou mesmo alterações fenológicas da vegetação em resposta a uma situação meteorológica também anômala. Os usos possíveis das informações sobre os efeitos na vegetação, associados ao fenômeno ENOS, geradas a partir dos sensores remotos orbitais, são diversos, tanto para diagnóstico como para monitoramento. Mas se destaca o uso de séries temporais de imagens para geração da climatologia das respostas da vegetação às fases do fenômeno, o que é de grande relevância nas análises de risco.

Agradecimentos

A autora agradece aos estudantes de pós-graduação e de iniciação científica vinculados ao Grupo de Pesquisa em Agrometeorologia/UFRGS pela continuada dedicação para gerar informações e conhecimento sobre o fenômeno ENOS.

Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALMEIDA, T.S.; FONTANA, D.C.; BERGAMASCHI, H. Spectral responses of soybean leaflets crops to differet water conditions and tillage systems. **Agrometeoros,** v.26, n.1, p.181-189, 2018.

BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; LAWRENCE, W.T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.15, p.3195-3210, 1997.

BERLATO, M. A.; FONTANA D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre : Ed. Universidade / UFRGS, 2003. 110p.

BERLATO, M.A; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometerologia**, Santa Maria, v.7, v.1, p.119-125, 1999.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A. El Niño e La Niña e o rendimento de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.147-152. 2002.

CASA, A., OVANDO, G.; DÍAZ, G. Linking data of ENSO, NDVI-MODIS and crops yield as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina**. Remote Sensing Applications**: Society and Environment v. 22 (2021) 100480. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100480

CORDEIRO. A.P.L.V. **Padrões do índice de vegetação associados à variabilidade cimática do estado do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 154f. 2014.

CORDEIRO, A.P.A; ALVES, R.C.M.; ANA PAULA L.W. STEFFLER, A.P.L.W.; MENGUE, W.P.; FONTANA, D.C.; ROGLIO, V.S.; GUASSELLI, L.A. Classification of homogeneous regions of vegetation cover in the State of Rio Grande do Sul, Brazil and its temporal dynamics, using AVHRR GIMMS and MODIS data sets. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** (2021) 93(3): e20201278 DOI: 10.1590/0001-3765202120201278

CRESPO, F.C. **Distribuição espaço-temporal do fluxo evapotranspirativo no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 154f. 2022.

CUNHA, G. R., DALMAGO, G.A., ESTEFANEL, V. Enso influences on wheat crop in Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.127-138, 1999.

ERASMI, S.; SCHUCKENECHT, A.; BARBOSA, M.; MATSCHULLAT, J. Vegetation greenness in Northeastern Brazil and its relation to ENSO warm events. **Remote Sensing**, v.6, p. 3041-3058, 2014.

FIGUEIREDO, G.K.D.A.; BRUNSELL, N.A.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C.; PICOLI, M.C.A. Using temporal stability to estimate soya bean yield: a case study in Paraná state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 37:5, 1223-1242, 2016.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.127-132. 1997.

FONTANA, D. C.; CORDEIRO, A. P. A; MELO, R. W. Dinâmicas temporais de NDVI e de ETr/ETo na região maior produtora de soja do Rio Grande do Sul. **In**: X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología, 10., 2004, Mar del Plata, **Anais**…. Mar del Plata: 2004.

FONTANA, D.C.; JUNGES, A.H.; BREMM, C.; SCHAPARINI, L.P.; MENGUE, V.P.; WAGNER, A.P.L.; CARVALHO, P. NDVI and meteorological data as indicators of the Pampa biome natural grasslands growth. **Bragantia**, v. 77, p. 404-414, 2018.

GURGEL, H.C.; FERREIRA, N.J. Annual and interanual variability of NDVI in Brazil and its connections. **International Journal of Remote Sensing**, v.24:18, p. 3595- 3609, 2003.

GUSSO, A.; ARVOR, D. ; DUCATI, J.R. Model for soybean production forecast based on prevailing physical conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Online), v. 52, p. 95-103, 2017.

HUETE, A; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEWEEN, W. A. Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440–451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; LEEUWEN, W. VAN; MIURA, T.; GLENN, E. MODIS Vegetation Indices. In: Ramachandran, B. *et al*. (Eds.) **Land Remote Sensing and Global Environmental Change**. Remote Sensing and Digital Image Processing. 2011, v. 11, Cap. 26, p. 579-602.

HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T. *et al*. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index**. Remote Sensing of Environment**, v.83, p.195-213, 2002.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. SIDRA Sistema IBGE de Recuperação Automática**. 2022. Disponível em: < https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>. Acesso em: julho de 2022.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. CLIMA: **Monitoramento da precipitação. 2022**. Disponível em: https://clima.inmet.gov.br/prec. Acesso em: julho de 2022.

JACÓBSEN, L. O. ; FONTANA, D. C. ; SHIMABUKURO, Y. E. . Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associadas a eventos El Niño e La Nña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n.2, p. 361-374, 2003.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 19, n.2, p. 129-140, 2004.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma prespectiva em recursos terrestres**. Tradução Epiphanio, J.C.N. Parênteses, São José dos Campos. 2009.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Modelo agrometeorologico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. **Revista Ceres**, 58:9-16. 2011.

JUNGES, A.H.; FONTANA, D.C. Perfis temporais de NDVI/MODIS de áreas agrícolas cultivadas com cereais de estação fria em anos de El Niño e La Niña no Rio Grande do Sul, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 23. João Pessoa, 2015,. **Anais**... INPE, 2015.

JUNGES, A.H.; BREMM, C.; FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, C.A.O.; SCHAPARINI, L.P.; CARVALHO, P.C.F. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 332-337, 2016.

JUNGES, A.H.; ALMANÇA, M.A.K.; FAJARDO, T.V.M.; DUCATI, J.R. Leaf hyperspectral reflectance as a potential tool to detect diseases associated with vineyard decline. **Tropical Plant Pathology,** v. 45, p.522–533, 2020.

JUSTICE, C.O.; TOWNSHELD, J.R.G.; KALB, V.L. Representation of vegetation by continental data sets derived from NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v.12, p.999-1021, 1991.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Symposium**. Proceedings… v. 30, p. 261-270, 1992.

KIDWELLI, K.B.C. **Global vegetation index: user guide**. Washington, US Department of Commerce. 40p. 1990.

KLERING, E.V.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; ALVES, R.M. Perfis temporais NDVI/MODIS de áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul em safras de ocorrência ENOS. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XVII Gramado 2012. **Anais** SBMet, 2012.

KLERING, E.V.; FONTANA, D.C.; ROGLIO, V.S.; ALVES, R.C.M.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Bragantia** (São Paulo, SP. Eletrônico), v. 75, p. 247-256, 2016.

KOGAN N.F. Satellite-Observed Sensitivity of World Land Ecosystems to El Niño/La Niña. **Remote Sensing of Environment,** v.74, p.445–462, 2000.

LI, Y.; STRAPASSON, A.; ROJAS, O. Assessment of El Niño and La Niña impacts on China: Enhancing the Early Warning System on Food and Agriculture. **Weather and Climate Extremes** 27 (2020) 100208.

LARA, C.; SALDÍAS, G.S.; PAREDES, A.L.; CAZELLES, B.; BROITMAN, B.R. Temporal variability of MODIS phenological indices in the temperate rainforest of Northern Patagonia. **Remote Sensing**. 2018, 10, 956. DOI:10.3390/rs10060956

MANJUNATH, K.R., POTDAR, M.B., PUROHIT, N.L. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data. **International Journal of Remote Sensing,** v.23, p.3023-3038, 2002.

MASSELI, F.; CONESE, C.; PETKOV, L.; GILABERT, M.A. Use of NOAA-AVHRR NDVI data for environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel. Preliminary results. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v.13, p.2743-49, 1992.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 25, p. 323-331, 2017.

MELO, R.W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; DUCATI, J.R. An agrometeorological–spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.14, p.4013–4028, 2008.

MENGUE, V.P. ; FONTANA, D.C. Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul. **Bragantia** (São Paulo, SP. Eletrônico), v. 74, p. 000-000, 2015.

MONTEIRO, P. F. C.; ANGULO FILHO, R.; XAVIER, A.C.; MONTEIRO, R.O.C.. Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperspectral measurements. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 69, n. 2, p. 87-94, 2012.

MOREIRA, A. ; BREMM, C. ; FONTANA, D.C. ; KUPLICH, T.M. Seasonal dynamics of vegetation indices as a criterion for grouping grassland typologies. **Scientia Agricola**, v. 76, p. 24-32, 2019a.

MOREIRA, A.; FONTANA, D.C.; KUPLICH, T.M. Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 147, p. 335-344, 2019b.

NHONGO, E. J. S.; FONTANA, D.C. ; GUASSELLI, L. A.; DALLA MORA, J.C . Caracterização fenológica da cobertura vegetal com base em série temporal NDVI/MODIS na reserva do Niassa - Moçambique. **Revista Brasileira de Cartografia** (online), v. 69, p. 1175-1187, 2017.

OGLIARI, D.G.P.; FONTANA, D.C.; BREMM, C. Variação temporal de índices de vegetação em pastagem natural, submetida a diferentes ofertas de forragem. **Agrometeoros**. v.28, e02678, 2020. DOI: 10.31062/agrom.v28.e026778

PINTO, D.G, FONTANA, D.C.; DALMAGO G.A; FOCHESATTO, E.; VICARI, M.B.; BREMM, C.; CUNHA, G.R.; GOUVÊA, J.A; SANTI, A. Correlations between spectral and biophysical data obtained in canola canopy cultivated in the subtropical region of Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.52, n.10, p.825-832, 2017.

PONSONI, F.J.; SHIMABUKUTO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no estudo da Vegetação**. Editora Parêntese, São José dos Campos, 127p., 2017.

PUCHALSKI, L. A. **Efeitos Associados ao El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e no déficit hídrico no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. 83 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia, Área de concentração em Agrometeorologia) Curso de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2000.

RISSO, J.; RIZZI, R.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y.; FERNANDES, S. L. Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. **Anais**... INPE, 2009. p. 379–386.

RIZZI, R.; FONSECA E. L. da. Análise da variação espacial e temporal do NDVI no Estado do Rio Grande do Sul através de imagens AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu, **Anais**... São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1735-1737.

RODIGHERI, G.; FONTANA, D.C.; SCHAPARINI, L.P., A.P.S.F.M.; DALMAGO, G.A.. Análise espectro-temporal de NDVI e área da soja cultivada frente ao La Niña de 2012. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 21. 2019, Catalão, **Anais**... Catalão: SBAgro, 2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: 3rd ERTS SYMPOSIUM, NASA SP-351 I, p. 309–317. 1973.

SALEEM,A.; AWANGE, J.L.; KUHN, M.; JOHN, B.; HU, K. Impacts of extreme climate on Australia's green cover (2003–2018): A MODIS and mascon probe. **Science of the Total Environment,** 766 (2021), 142567.

SCHIRMBECK. J. **Padrão espaço temporal dos componentes do balanço de energia em clima subtropical úmido**. 2017. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 156f.

SENTELHAS, P. C., BATTISTI, R., CÂMARA, G. M. S., FARIAS, J. R. B., HAMPF, A. C., NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science,** 153: 1-18, 2015.

SOUZA Jr., C.M.; SHIMBO, J.Z.; ROSA, M.R. et. al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine - **Remote Sensing**, v. 12, Issue 17, 2020. 10.3390/rs12172735.

STEINMETZ, S.; MATZENAUER, R.; MALUF, J.R.T.; FERREIRA, J.S.A. Temperatura do solo favorável para o início da semeadura do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.15, n.2, p.99-104, 2009.

TANG, R., LI, Z., JIA, Y., LI, C., CHEN, K., SUN, X., LOU, J. Evaluating one-and two-source energy balance models in estimating surface evapotranspiration from Landsat-derived surface temperature and field measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 9-10, p. 3299-3313, 2013.

TUCKER, C. J.; PINZON, J. E.; BROWN, M. E. GIMMS - **Global Inventory Modeling and Mapping Studies Documentation. GLCF - Global Land Cover Facility Data Distribuition.** University of Maryland**.** Disponível em: <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/>. Acesso em: novembro de 2011.

WAGNER, A.P.L. ; WALLAU, M. ; FONTANA, D. C.; Carvalho, P.C.F ; Fraise, C. Vegetation indices variability in the Pampa grasslands in Brazil and Uruguay. **Agrometeoros**, v. 26, p. 83-92, 2018.

WAGNER, A.P.L. **Dinâmica temporal de índices de vegetação no Pampa do Rio Grande do Sul e Uruguai e suas relações com os elementos meteorológicos regionais**. Tese (PPG Sensoriamento Remoto/UFRGS).160p. 2013.

WAGNER, A.P.L.; FONTANA, D. C.; Fraise, C.; WEBER, E.; HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Online), 48:1192-1200. 2013.

ZHAO, L.; DAI, A.; DONG, B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982–2013 **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 198-209. 2018. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.11.013



CAPÍTULO 3

Previsões ENOS e suas aplicações na agricultura brasileira

Gilberto Rocca da Cunha

3 Previsões ENOS e suas aplicações na agricultura brasileira

Gilberto Rocca da Cunha

Sobre o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) e suas previsões, sobressaem-se algumas certezas e muitas incertezas. Não obstante, pelo que se conhece, a inação não se justifica, seja em agricultura, defesa civil ou nas mais diversas atividades econômicas influenciadas pelo clima, mesmo sob a proteção do manto do desconhecimento dos impactos.

Depois de passadas quatro décadas de convivência consciente (desde o El Niño de 1982/1983, pelo menos), com a variabilidade climática associada às fases extremas (El Niño e La Niña) do fenômeno ENOS no território brasileiro, não nos cabe mais alegar surpresas (ainda que essas não possam ser ignoradas) do que podemos esperar, em termos de variabilidade climática extrema nas diferentes regiões do País, em anos de La Niña e em anos de El Niño, e, em tese, seus potenciais impactos na atividade agropecuária.

Indiscutível, como bem documentaram Berlato (2024) e Fontana (2024), nos capítulos 1 e 2 deste livro, respectivamente, nos anos de La Niña pode chover menos nas regiões Sul e Sudeste (em parte dela, pelo menos) e chover mais em algumas áreas das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil (os anos 2021 e 2022 exemplificam bem esta afirmação). O inverso costuma ocorrer nos anos de El Niño, quando, normalmente, chove mais nas regiões Sul e Sudeste (em parte dela, reitera-se), com destaque na primavera (embora as outras estações do ano não estejam isentas desses mesmos impactos), e chover menos e com maior irregularidade em algumas áreas das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil (os anos 1982, 1997, 2015 e 2023 corroboram bem esta assertiva), especialmente, nas regiões Norte e Nordeste, quando há sincronia de fases com o Dipolo do Atlântico.

O fenômeno ENOS é caracterizado pela recorrência (aperiódica, alternando fases quente/El Niño e fria/La Niña, em ciclos que podem variar de 2 a 7 anos) e pelo nível elevado de incerteza dos impactos potencialmente causados. Mesmo assim, a partir dos eventos passados, podem ser extraídas lições que nos permitem lidar melhor com a variabilidade climática das suas fases extremas na agricultura brasileira. Sabemos mais sobre o fenômeno ENOS, tanto em capacidade preditiva quanto sobre impactos na agricultura, do que sabíamos nos anos 1980, quando boa parte do mundo, tomada de surpresa, ouviu falar pela primeira vez em El Niño, diante da repercussão midiática que alcançou o evento ENOS de 1982/1983 (o El Niño do século,

cuja denominação, pela magnitude dos impactos globais, também seria dada ao El Niño de 1997/1998).

Há padrões de variabilidade climática extrema no território brasileiro que, apesar da variação em magnitude, se reproduzem a cada El Niño e a cada La Niña. Entenda-se que saber lidar com as fases extremas do fenômeno ENOS, no caso da agricultura, envolve tanto estar preparado para a mitigação de efeitos adversos causados pelo clima, quanto saber aproveitar as condições ambientais favoráveis para os cultivos. As lições deixadas pelos eventos ENOS passados, nesse caso, não podem ser ignoradas, devendo, especialmente, no que diz respeito a lidar com adversidades, ser usadas para manter estado de atenção e vigilância sobre obstáculos que, porventura, venham a surgir durante a estação de crescimento dos cultivos. Não podemos mais aceitar, passivamente, a inabilidade para tratar com impactos adversos ou a incapacidade para capitalizar benefícios potenciais, quando uma condição ambiente favorável se avizinha.

Não obstante as dúvidas que são postas em destaque, precisamos estar preparados, nos moldes preconizados por Glantz et al. (2018) e Glantz & Ramirez (2020), para esperar o ENOS. O que isso significa, no caso da agricultura brasileira? Significa, pelo menos, saber lidar, proativamente, no plano estratégico e, reativamente, no tático, quando anomalias climáticas regionais extremas são, em tese, esperáveis, na presença de El Niño ou de La Niña, conforme inúmeros exemplos de aplicação encontráveis em Cunha et al. (2001b). Usar o que sabemos e, acima de tudo, o que sabemos que NÃO sabemos, eis a receita. Mas esse "estar prontos para esperar El Niño ou La Niña", no caso da agricultura, ainda é um conceito difuso, marcado por níveis de maturidade (prontidão) diferentes entre os usuários, que fazem com que, muitas vezes, o pior não seja evitado, nem o melhor, o lado positivo desses eventos, seja bem explorado.

Esse capítulo, focado em integração de previsões climáticas com gestão de riscos na agricultura brasileira, especialmente aplicáveis nos sistemas de produção de grãos, destaca como, a partir dos impactos conhecidos, as previsões ENOS podem ser usadas nos processos de tomada de decisão nas mais variadas escalas, abrangendo desde produtores rurais, assistentes técnicos e executivos de corporações empresariais que atuam no setor agrícola, até gestores públicos.

Impactos do fenômeno ENOS na agricultura brasileira

A safra brasileira de grãos, segundo levantamentos da Companhia Nacional e Abastecimento, nos últimos 5 anos (2018/2019 a 2022/2023), tem variado entre 246,8 e 319,8 milhões de toneladas, e a área ocupada com as chamadas lavouras temporárias, que se estendem desde o extremo sul até o norte do País, envolvendo cultivos de verão (sobressaindo-se soja e milho) e de inverno (com destaque para trigo), tem oscilado entre 63,2 e 78,5 milhões de hectares (Conab, 2024). No grupo de 18 espécies produtoras de grãos economicamente exploradas no Brasil, como cultivos de verão e de inverno, nos sistemas em sequeiro e irrigado, em primeira, segunda e até terceira safras, além de especificidade de cores do produto (caso do feijão), há predomínio do sistema de cultivo em sequeiro, razão pela qual a variabilidade climática regional, associada com as fases extremas do fenômeno ENOS (El Niño ou La Niña) e seus impactos no regime hídrico, reveste-se de capital importância.

Os impactos diretos do fenômeno ENOS na agricultura brasileira dão-se, acima de tu-

do, por intermédio da variabilidade climática que, normalmente, ainda que não só com elas, está associada com as suas fases. Estudos que têm sido levados a cabo por diversos grupos de pesquisa em Agrometeorologia no Brasil, envolvendo cultivos de grãos, apesar de alguns resultados divergentes, podem, em termo de impactos mais prováveis, ser sintetizados, regionalmente, de forma qualitativa (positivos ou negativos), conforme apresentados na Tabela 1.

A soja, indubitavelmente, seja pela área de cultivo que ocupa ou pela magnitude da movimentação na economia nacional, é a cultura produtora de grãos mais importante no Brasil. Ainda que alguns resultados, como os de Matzenauer et al. (2018), para o Rio Grande do Sul, não tenham encontrado diferenças significativas no rendimento de grãos dessa oleaginosa, comparando anos de El Niño, La Niña e Neutro, e os de Heinemann et al. (2020), focados no centro e norte do País, relatando atraso e redução do período de semeadura da soja em anos de La Niña naquela parte do País, majoritariamente, as evidências apontam para o inverso das con-

Tabela 1. Impactos mais prováveis do fenômeno ENOS nos principais cultivos agrícolas produtores de grãos no Brasil.

Cultura	Região	Safra	Impacto		Fonte
			El Niño	La Niña	
Trigo	Sul	inverno	negativo	positivo	Cunha et al., 1999
Cevada	Sul	inverno	negativo	positivo	Cunha et al., 2001a
Canola	Sul	inverno	negativo	positivo	Dalmago et al., 2018
Soja	Sul	verão	positivo	negativo	Berlato & Fontana, 1999
Arroz	Sul	verão	negativo	positivo	Carmona & Berlato, 2002
Milho	Sul	verão	positivo	negativo	Berlato et al., 2005
Trigo	Sul	inverno	negativo	positivo	Alberto et al., 2006
Milho	Sul	verão	positivo	negativo	Alberto et al., 2006
Soja	Sul	verão	positivo	negativo	Alberto et al., 2006
Soja	Sul	verão	positivo	negativo	Pilau et al., 2022
Soja	Sul	verão	positivo	negativo	Arsego et al., 2018
Soja	Sul	verão	positivo	negativo	Caron & Minuzzi, 2019
Feijão	Sul	verão	positivo	negativo	Caron & Minuzzi, 2019
Milho	Sul	verão	positivo	negativo	Caron & Minuzzi, 2019
Arroz irrigado	Sul	verão	negativo	positivo	Carmona & Berlato, 2002
Soja	Norte	verão	negativo	positivo	Nóia Jr. & Sentelhas, 2019
Milho	Norte	verão (2ª safra)	negativo	positivo	Nóia Jr. & Sentelhas, 2019
Soja	Sul	verão	positivo	negativo	Nóia Jr. & Sentelhas, 2019
Milho	Sul	verão (2ª safra)	positivo	negativo	Nóia Jr. & Sentelhas, 2019
Soja	Centro-Sul	verão	positivo	negativo	Nóia Jr. & Sentelhas, 2019
Milho	Centro-Sul	verão (2ª safra)	positivo	negativo	Nóia Jr. & Sentelhas, 2019

clusões tiradas por esses autores. A Figura 1 mostra que, quando se compara o desempenho produtivo da soja no Brasil entre a safra 2015/2016, marcada por El Niño, e a safra 2021/2022, caracterizada por La Niña, o desempenho produtivo da soja, regionalmente, corrobora as indicações qualitativas resumidas na Tabela 1.

A questão crucial, a partir do que se conhece sobre o ENOS e seus potenciais impactos na agricultura brasileira, é: qual o uso que pode ser feito com essa informação? Especialmente, como é o caso atual, quando é sabido que as previsões ENOS indicam (sempre em termos probabilísticos e não absolutos) quais condições climáticas regionais serão mais prováveis, ao longo da estação de crescimento dos cultivos. Que fazer com isso?

Nesse ponto é que merece ser destacado o enfoque de gestão integrada de riscos na agricultura, seja, especialmente, com o intuito de mitigar adversidades climáticas esperáveis ou, mirando o inverso, como melhor explorar as potencialidades do ambiente, quando as condições que estão sendo previstas são favoráveis.

Estratégias de manejo de cultivos com bases em previsões do fenômeno ENOS

Quando um evento El Niño ou La Niña é divulgado nos diversos segmentos de mídia (jornal, rádio, televisão e Internet, por exemplo), as pessoas reagem de formas diferentes. Algumas reações, seguramente, podem ser consideradas adequadas, e outras, não. Vejamos, reproduzindo as informações que foram sintetizadas por Cunha & Pires (2023), qual seria a forma mais adequada de comportamento humano frente a uma previsão de El Niño ou La Niña, principalmente no que diz respeito à agricultura brasileira. Destacando-se, mais uma vez, que toda decisão deve ser tomada com a consciência de que se está lidando com informação probabilística e não absoluta.

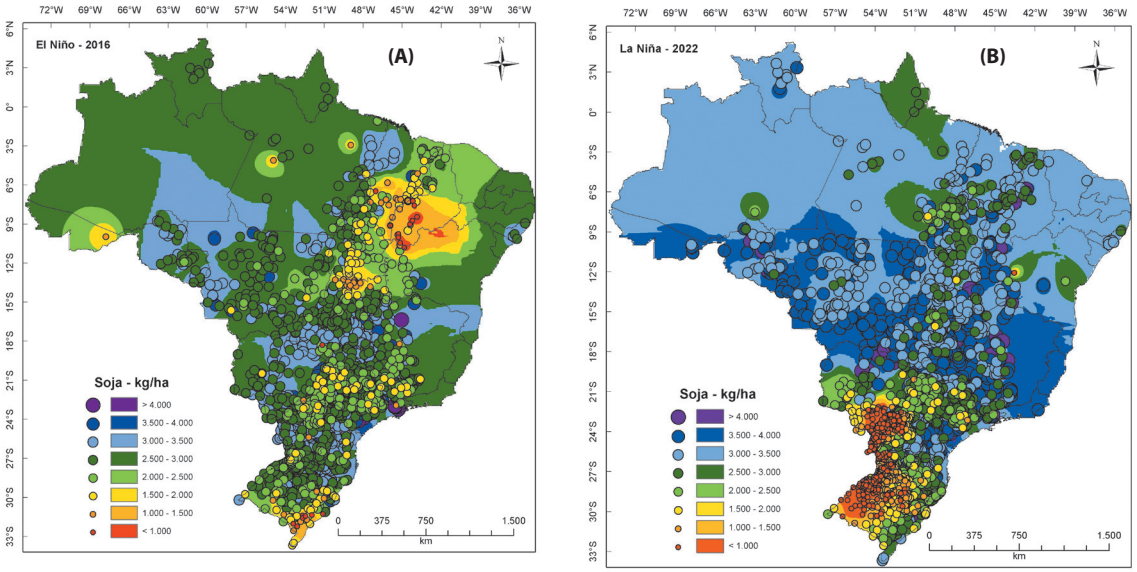


Figura 1. Rendimento de grãos de soja (kg/ha) no Brasil nas safras 2015/2016 (A), com predomínio de El Niño, e, 2021/2022 (B), com predomínio de La Niña. Fonte: IBGE (2024).

Comportamento adequado

■ buscar informações sobre o fenômeno ENOS em fontes de reconhecida confiabilidade;
■ saber quando El Niño/La Niña ocorreu nos últimos anos;
■ ter claros os tipos de condição climática e eventos meteorológicos extremos ocorridos na sua região durante os eventos El Niño/La Niña anteriores;
■ saber como foi afetado pelos últimos El Niño/La Niña e o que fez ou deixou de fazer, porém deveria ter feito, na ocasião;
■ identificar quais os possíveis impactos climáticos do El Niño/La Niña nas diferentes estações (épocas) do ano;
■ dominar alternativas de resposta para os possíveis impactos climáticos causados por El Niño/La Niña na sua região;
■ ter claras quais as alternativas de reação que pode fazer sozinho e com meios próprios;
■ listar as alternativas de reação para as quais depende de auxílio de terceiros (privado ou governamental); e
■ esperar, sempre, por atualizações futuras (algumas semanas) do avanço do El Niño/La Niña, buscando informações do serviço meteorológico oficial, sejam nacionais ou internacionais. No caso do Brasil, ficar atento aos boletins do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), por exemplo.

Comportamento inadequado

■ ignorar as previsões ENOS;
■ entrar em pânico e multiplicar visões catastróficas;
■ abandonar a atividade rural e procurar desfazer-se de bens na região;
■ acompanhar o monitoramento de El Niño/La Niña, de forma quase obsessiva, todos os dias, dando asas a imaginações apocalípticas;
■ acreditar em tudo que ouve falar sobre El Niño/La Niña, atribuindo a esses eventos todos os males do mundo;
■ assumir que a variabilidade climática regional pode ser explicada totalmente (100%) pelos fenômenos El Niño e La Niña; e
■ assumir que a variabilidade climática é a única responsável por toda a flutuação de rendimento dos cultivos, de uma safra para outra, ignorando o papel da tecnologia de produção e das intervenções humanas via o manejo dos cultivos.

Orientações regionais

Chuva acima do normal

Quando a expectativa é de chuva acima dos padrões normais do clima, que pode implicar, além da maior quantidade de água, também em maior número de dias com chuva, destacam-se como orientações de ordem geral:
■ começar a semeadura no início do período recomendado pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), particularmente no caso do cultivo de grandes áreas;
■ preparar antecipadamente a estrutura para a semeadura, realizando limpeza, regulagem e reparos em máquinas e deixando os insumos disponíveis para, quando o tempo permitir, desencadear a operação;
■ não semear com o solo exageradamente úmido, evitando o risco de compactação e degradação da estrutura do solo. Apesar de chuvas abundantes, em geral, há períodos suficientes de sol para a semeadura, nos limites de calendário preconizados pelo ZARC;
■ priorizar esquemas de rotação de culturas, pois, em ano de alta umidade, o ambiente costuma favorecer o desenvolvimento de doenças;

■ escolher cultivares resistentes às principais doenças que ocorrem na região;
■ dar atenção especial à sanidade e ao tratamento de sementes;
■ eleger cultivares não suscetíveis ao acamamento;
■ cuidar a adubação nitrogenada em cobertura. Em anos de muita chuva, a lixiviação de nitrogênio (N) pode ser grande e os sintomas de deficiência de N ficarão evidenciados;
■ evitar o uso de áreas sujeitas a inundações prolongadas;
■ realizar a colheita tão logo os grãos tenham umidade adequada para a operação, evitando a ocorrência, devido às chuvas frequentes, de perdas quantitativas e qualitativas em pré-colheita; e
■ adotar o Sistema Plantio Direto, em função da conservação do solo e da praticidade para realizar a semeadura.

Chuva abaixo do normal

Quando a expectativa é de chuva abaixo dos padrões normais do clima, destacam-se, como orientações para minimizar impactos de estiagens na agricultura (ajustadas conforme a especificidade de cada cultura e a realidade do produtor rural), as seguintes medidas:
■ manter o solo descompactado ou evitar o adensamento excessivo;
■ mobilizar o solo o mínimo possível, por ocasião das operações de manejo;
■ dar preferência ao Sistema Plantio Direto;
■ observar o ZARC (começar a semeadura no início do período indicado, escalonar épocas de semeadura e priorizar o uso de cultivares de ciclos diferentes);
■ não utilizar população de plantas superior à indicada para a cultura;
■ implantar as culturas sob condições adequadas de umidade e de temperatura de solo;
■ regular a profundidade de semeadura um pouco maior do que a usual, e utilizar sulcadores para auxiliar as culturas a aprofundarem o sistema radicular e, consequentemente, favorecer a exploração de maior volume de solo, visando a ter a sua disposição maior quantidade de água armazenada no solo. Essa tática pode ser importante quando o intuito é superar períodos curtos de estiagem;
■ evitar o esvaziamento de barragens/açudes;
■ racionalizar o uso da água e irrigar quando necessário, dando preferência, em casos extremos, para os períodos críticos de cada cultura;
■ utilizar cultivares que possuam maior capacidade de aprofundar o sistema radicular, característica relacionada com a tolerância à presença de alumínio no solo.

Cabe ressaltar que o foco deste capítulo são os sistemas de produção de grãos no Brasil, razão pela qual não são tratados impactos e nem orientações de manejo de cultivos envolvendo fruteiras, florestais, olerícolas ou ornamentais, além de apicultura ou outras explorações agropecuárias sensíveis ao clima. Todavia, pela inserção e relação quase umbilical com sistemas de produção de grãos em muitas propriedades rurais, não se poderia deixar de mencionar algumas orientações envolvendo espécies forrageiras, quando a perspectiva é de redução regional de chuvas:
■ aumentar o estoque de forragens na propriedade, seja no campo, através do ajuste de carga animal (aliviar a carga) e do diferimento de potreiros, seja via forragens conservadas (feno e silagem);
■ antecipar ao máximo o plantio/semeadura das forrageiras cultivadas de verão e utilizar mudas/sementes de alto vigor; e
■ procurar manter uma boa cobertura do

solo, preservando os resíduos (resteva) no campo, via boas práticas de manejo de plantas forrageiras e de pastoreio.

O caso do trigo no sul do Brasil

Orientações para enfrentar o El Niño 2023

A perspectiva de volta do fenômeno El Niño em 2023, que começou a ser aventada no começo desse ano e, a partir do outono, foi confirmada, suscitou o debate se, no caso da produção de trigo no sul do Brasil, estaríamos preparados para enfrentá-lo. Neste caso, as boas práticas de manejo de cultivo poderiam fazer a diferença no desempenho produtivo do trigo no sul do País em anos de El Niño?

Sabe-se que, em termos de condições climáticas durante a estação de crescimento do trigo, no sul do Brasil, os anos de La Niña são mais favoráveis do que os de El Niño (o desempenho produtivo desse cereal, nas safras 2021 e 2022, anos de La Niña, corrobora esta afirmação), embora não haja garantia absoluta de que os resultados sempre se repetirão. Os diagramas de caixa da Figura 2 mostram, pelas medianas (segundo quartil) e pelas posições do primeiro e do terceiro quartis, de forma inequívoca, que, em termos de rendimento de grãos (kg/ha) e, possivelmente, em qualidade tecnológica do produto colhido, as melhores condições ambientais, na maioria das vezes, ocorrem em anos de La Niña para os três Estados da Região Sul e para a região no todo, ainda que não possam ser ignoradas as variabilidades intrarregional e interanual (entre eventos de mesma fase). Todavia, os anos de El Niño, embora denotem serem os piores para o desempenho produtivo do trigo, também têm a sua variabilidade inerente, pela qual muitos dos resultados, que se sobrepõem nos digramas de caixas, não permitem diferenciar dos anos neutros e dos anos La Niña.

Outra particularidade que não deve ser ignorada é que, nos últimos anos, houve evolução da tecnologia de produção utilizada em trigo, seja para a mitigação das condições adversas, mais comuns em anos de El Niño, ou para potencializar a exploração das condições favoráveis, que são mais frequentes nos anos de La Niña. A comparação dos mapas de rendimento médio de grãos de trigo na Região Sul, em base municipal do IBGE, para os eventos canônicos de El Niño em 1982/1983, 1997/1998 e 2015/2016, e os de La Niña em 1988/1989, 1999/2000 e 2021/2023, dispostos na Figura 3, dá sustentação ao que foi previamente discutido: os rendimentos de grãos são mais elevados em anos de La Niña, e possivelmente a qualidade tecnológica dos grãos colhidos é melhor. Não obstante, a comparação entre décadas (1980 x 1990 x 2000) deixa explicitada que, à medida que se avança em direção aos tempos atuais, os impactos negativos verificados nos anos de El Niño são menores, e os impactos positivos, nos anos de La Niña, são maiores. Esse desempenho da triticultura sul-brasileira pode ser creditado à evolução em genética de cultivares e em tecnologia de manejo do cultivo nos campos.

Há práticas de manejo específicas que podem (e devem) ser adotadas pelos triticultores, apesar da incerteza sobre a magnitude dos impactos esperados nos anos de El Niño, conforme preconizaram Cunha et al. (2023) e Cunha & Pires (2023), sem deixar de destacar a importância de os triticultores do sul do Brasil praticarem uma gestão integrada de riscos, diante da perspectiva da volta de El Niño na safra 2023 e da possibilidade de um ambiente de produção mais úmido, unindo boas práticas de manejo de cultivos e adesão aos instrumentos de securidade rural:

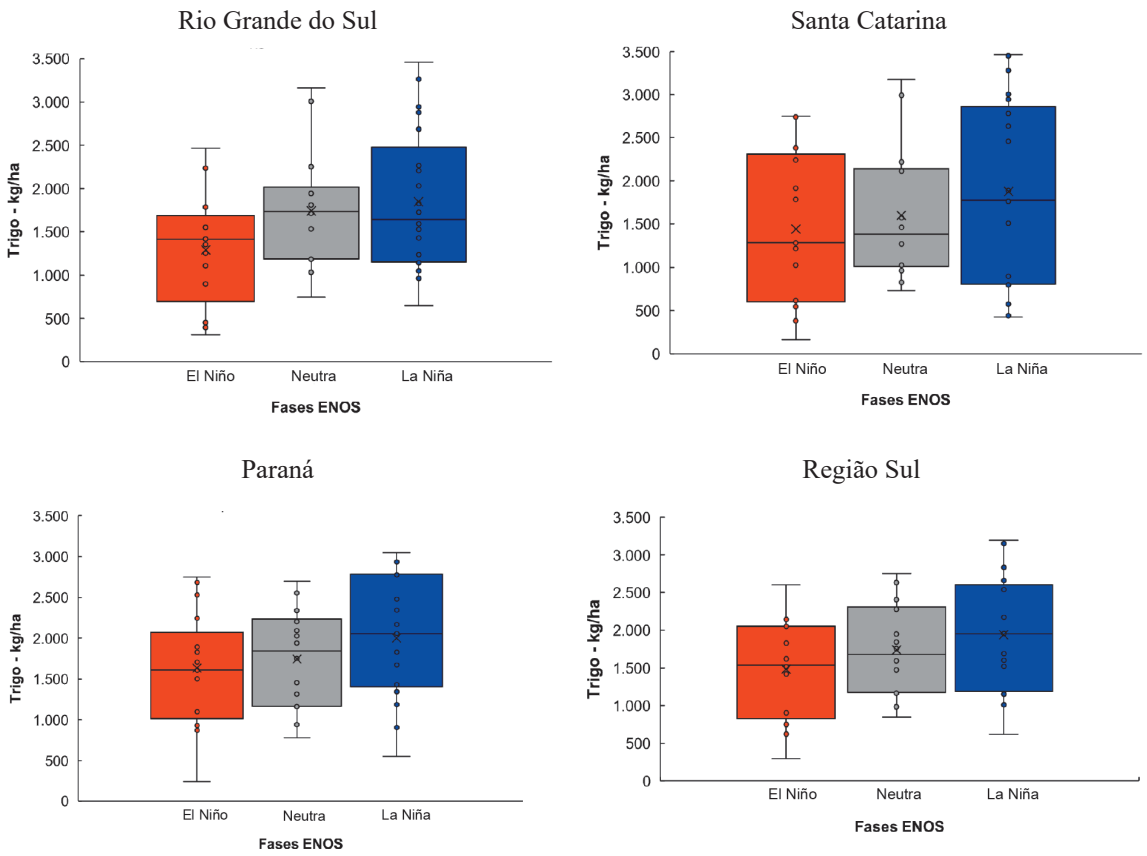


Figura 2. Impactos das fases ENOS (El Niño, neutra e La Niña) no rendimento de grãos do trigo (kg/ha) no sul do Brasil, no período de 1971 a 2022. Fonte: IBGE (2024).

■ semear trigo em sistema de **rotação de culturas**, ou seja, dar preferência a áreas que tenham utilizado espécies não hospedeiras de doenças do trigo no inverno anterior (ex.: aveia-preta, canola e nabo-forrageiro);

■ **intensificar o uso do inverno**, com planejamento das áreas que permita cobertura do solo o ano todo, por meio do uso de culturas, como o nabo-forrageiro, entre o cultivo de verão e o trigo, permitindo ciclagem de nutrientes, redução da erosão e maximização do rendimento de grãos e rentabilidade do cereal de inverno;

■ respeitar os períodos de semeadura, em cada região, conforme definidos pelo **ZARC**, que podem ser consultados, em escala municipal, nas portarias do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) ou pelo aplicativo ZARC Plantio Certo;

■ utilizar **cultivares de ciclos diferentes** semeadas em uma mesma época (dentro do calendário ZARC) para evitar que os estádios críticos da cultura ocorram no mesmo momento em todos os talhões/lavouras;

■ no caso do uso de somente uma cultivar (ou cultivares com mesmo ciclo), fazer o **escalonamento de épocas de semeadura** para evitar que os estádios críticos ocorram no mesmo momento em todos os talhões/lavouras;

■ evitar fazer a semeadura em solo exces-

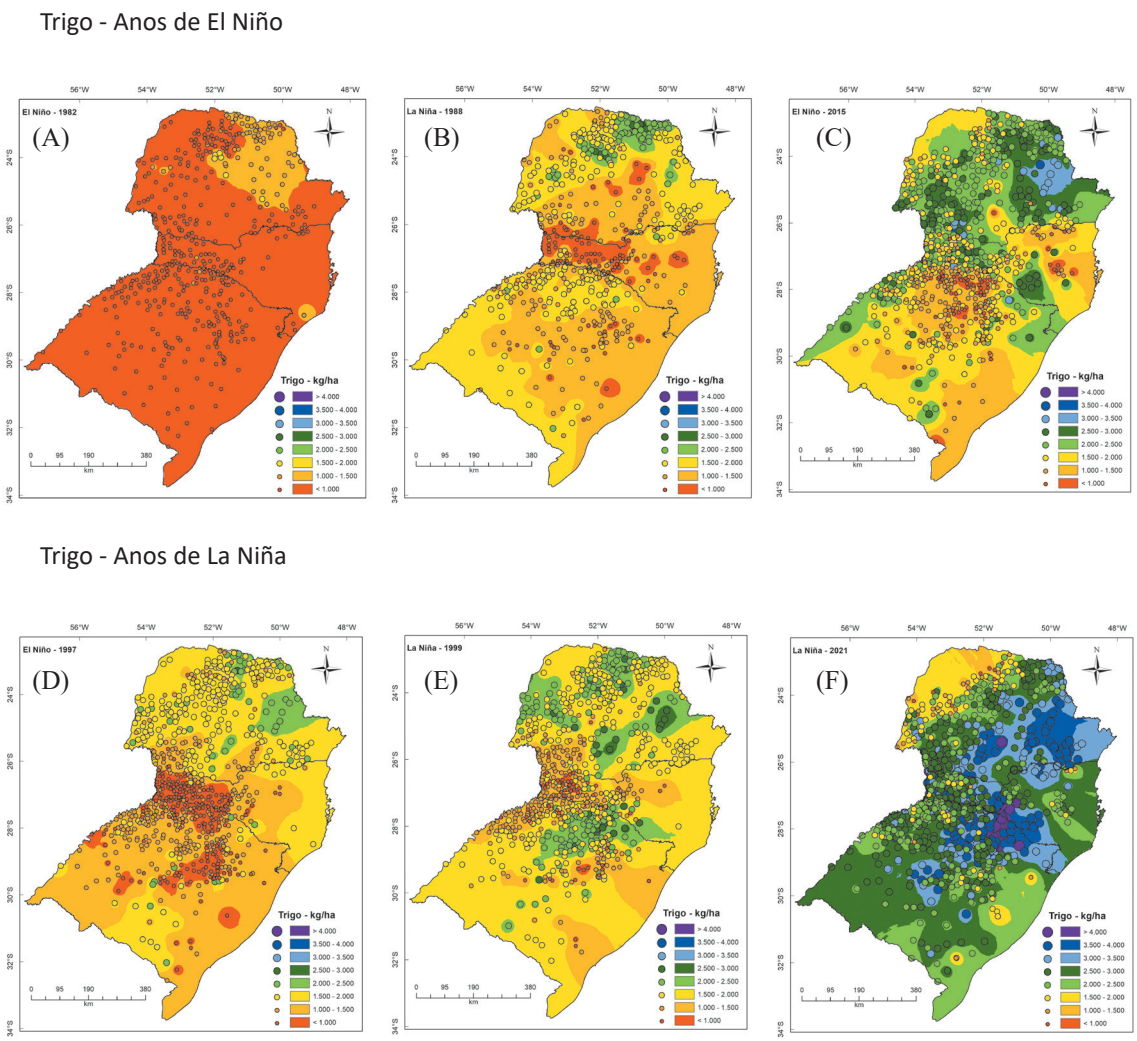


Figura 3. Rendimento de grãos de trigo (kg/ha) em anos de El Niño (em 1982 (A), 1997 (B) e 2015 (C)) e La Niña (em 1988 (D), 1999 (E) e 2021 (F)) na Região Sul do Brasil. Fonte: IBGE (2024).

sivamente úmido, para **reduzir o risco de ocorrência do mosaico-comum do trigo,** dando preferência a cultivares com maior nível de resistência a essa virose e a áreas sem histórico da doença;

■ escolher cultivares com boa **resistência geral a doenças e à germinação dos grãos em pré-colheita**;

■ fazer o acompanhamento das **previsões meteorológicas de curto prazo** (que possuem maior nível de acerto) para tomada de decisões de manejo, como semeadura, aplicação de insumos e protetores de plantas nos momentos mais adequados;

■ fazer a **divisão da dose de nitrogênio** em cobertura para maximizar o aproveitamento desse nutriente e reduzir perdas por lixiviação e/ou escorrimento superficial;

■ realizar o **monitoramento de doenças**, com atenção especial para giberela, fazendo o acompanhamento da fenologia e das condições ambientais, e realizar a aplicação de fungicidas para proteção da espiga quando necessário (usando produtos e tecnologia de

aplicação apropriados);
■ fazer a **colheita tão logo possível**, evitando a perda de qualidade tecnológica em função de chuvas possivelmente mais frequentes na primavera; e
■ contratar **seguro agrícola**.

Considerações finais

O uso das previsões ENOS, quando se leva em consideração o impacto potencial da variabilidade climática na agricultura brasileira, para ter efetividade, precisa ser capaz de modificar decisões. Este fator tem relação com as mais diversas escalas nas quais as partes interessadas (*stakeholders*) interagem. No universo da assistência técnica (sobre quem recai a atribuição de configurar tecnologias de produção resilientes, que possam suportar adversidades do clima ou, dependendo da previsão, aquelas que melhor explorem as condições favoráveis). No que diz respeito aos produtores rurais, estes devem ter capacidade de adotar alternativas de manejo dos cultivos. Para os executivos das corporações que lidam com insumos de produção e com a comercialização de produtos agrícolas, a antecipação das possíveis ofertas regionais de *commodities* agrícolas, inferior ou superior ao esperado, e seus impactos no mercado global constituem-se em informação estratégica de valor imensurável. E, para os gestores públicos, significa a possibilidade de antecipar medidas necessárias tanto para abastecimento (alimentos e água) da população, quanto para a proteção das economias regionais potencialmente impactáveis.

Um entendimento que se faz necessário é que as previsões ENOS indicam, probabilisticamente e não de forma absoluta, os impactos mais prováveis do clima e, por consequência, na agricultura brasileira. Isso não pode ser ignorado, pois se está lidando com chances, maiores ou menores, além da interferência em sistemas de produção, que por natureza são complexos, e cujas consequências podem escapar do controle e se configurarem como inesperadas. Não se deve confundir impactos com aplicações. Impactos são indicadores de efeitos e, no caso do uso de previsões ENOS na agricultura brasileira, aplicações envolvem decisões de manejo/gestão que busquem, acima de tudo, mudar impactos/respostas, sejam para mitigar efeitos ou potencializar o desempenho produtivo dos cultivos. De qualquer forma, é indiscutível o valor da integração de previsões climáticas na gestão de riscos na agricultura brasileira. Bons exemplos não faltam!

Referências

ALBERTO, C.M.; STRECK, N.A.; HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; MEDEIROS, S.L.P. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.7, p.1067-1075, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006000700001

ARSEGO, D.A.; FERRAZ, S.E.T.; STRECK, N.A.; CARDOSO, A.O.; ZANON, A.J. Estudo do impacto de diferentes índices associados ao El Niño Oscilação Sul na produtividade de soja no Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, v.40 (Especial), p.82-87, 2018. DOI: 10.5902/2179460X30684

BERLATO, M. A. El Niño Oscilação Sul. In.: BERLATO, M. A.; CUNHA, G. R.; FONTANA, D. C. **El Niño Oscilação Sul**: clima, vegetação e agricultura. Passo Fundo: edição dos autores. 2024, p.17-159.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.423-432, 2005.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento de soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A. El Niño e La Niña e o rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 147-152, 2002.

CARON, M. L.; MINUZZI, R. B. ENOS canônico nas secas e produtividades de culturas de grãos em Chapecó e Urussanga, SC. **Agrometeoros**, v.27, n.1, p.53-61, 2019. DOI:10.31062/agrom.v27i1.26570

CONAB. **Boletim da Safra de Grãos**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Acesso em: 13 mar. 2024.

CUNHA, G. R.; DALMAGO, G. A.; ESTEFANEL, V. Enso influences on wheat crop in Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.127-138, 1999.

CUNHA, G. R.; DALMAGO, G. A.; ESTEFANEL, V.; PASINATO, A.; MOREIRA, M. B. El Niño – oscilação do Sul e seus impactos sobre a cultura de cevada no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p.137-145, 2001a.

CUNHA, G. R.; HAAS, J. C.; BERLATO, M. A. (Eds.) **Applications of climate forecasting for better decision-making processes in agriculture**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001b. 328p.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F. Trigo safra 2023: desafios e oportunidades no sul do Brasil. **AGROEXTENSÃO – Boletim Agronômico**, v.1, n.4, p.2-7, 2023.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; PASINATO, A. Trigo. Estamos preparados para o El Niño? **Cultivar Grandes Culturas**, v. 23, n. 279, p. 30-32, 2023.

DALMAGO, G. A.; GOUVÊA, J. A.; CUNHA, G. R.; BIANCHI, C. A. M.; SANTI, A. **El Niño e La Niña influenciam o rendimento de grãos de canola no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2018. 22 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento online; 92).

FONTANA, D. C. Detecção de alterações na vegetação associadas ao fenômeno ENOS, usando imagens orbitais. In.: BERLATO, M. A.; CUNHA, G. R.; FONTANA, D. C. **El Niño Oscilação Sul**: clima, vegetação e agricultura. Passo Fundo: edição dos autores. 2024, p.163-197.

GLANTZ, M. H.; NARANJO, L.; BAUDOIN, M. A.; J. RAMÍREZ, I. J. What does it mean to be El Niño ready? **Atmosphere**, v.9, n.3; p.1-13, 2018. DOI: 10.3390/atmos9030094

GLANTZ, M. H., RAMIREZ, I. J. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to enhance societal readiness for El Niño's impacts. **Int. J. Disaster Risk Sci.,** v.11, p.394–403, 2020. DOI:10.1007/s13753-020-00275-w

HEINEMANN, A. B.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; STONE, L. F.; SILVA, A. P. G. A.; MATTA, D. H.; DIAZ, M. E. P. The impact of El Niño Southern Oscillation on cropping season rainfall variability across Central Brazil. **Int. J. Climatol.**, 2020; 1-22. DOI: 10.1002/joc.6684

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612. Acesso em: 13 mar. 2024.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; CARGNELUTTI FILHO, A. Rendimento de grãos de soja e de milho, no Rio Grande do Sul, não difere entre eventos El Niño Oscilação Sul. **Agrometeoros**, v.26, n.1, p.123-129, 2018. DOI: 10.31062/agrom.v26i1.26376

NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. **Agricultural Systems**, v.173, p.254-267, 2019. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.03.012

PILAU, F. G.; MARIN, F. R.; GRUBERTO, D. A. V.; DALMAGO, G. A.; ROMANELLI, T. L. Impact of ENSO-related rainfall variability on soybean yield in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Agrometeoros**, v.30, e027115, 2022. DOI: 10.31062/agrom.v30.e027115

1ª Edição [2024]
Esta obra foi composta em Gentium para os autores
Moacir Antonio Berlato, Gilberto Rocca da Cunha e Denise Cybis Fontana.

Passo Fundo, RS, abril de 2024.



Os autores desse livro vivenciaram intensivamente a história da inclusão do El Niño Oscilação Sul (ENOS), via o acoplamento dinâmico oceano-atmosfera, como base das previsões climáticas, para as regiões do mundo influenciadas por esse fenômeno, que se deu após o evento El Niño de 1982/1983. Muitas vezes estivemos presentes, juntos, em eventos seminais desse processo, tanto no Brasil quanto no exterior.

Todos possuem mais de quatro décadas dedicadas ao estudo do ENOS, seus impactos climáticos e aplicações no Brasil. Especificamente, destaco que conheci o autor principal e mentor desse livro, Professor Moacir Antonio Berlato, no início dos anos 1980, no INPE, quando ele cumpria o seu programa de doutoramento em Meteorologia, em São José dos Campos. Berlato sempre foi um profissional de destaque, nível técnico elevado, responsável, agregador na formação de equipes e que daria prova cabal disso, ao retornar para o Rio Grande do Sul, onde, tanto junto ao antigo Instituto de Pesquisas Agronômicas (IPAGRO) quanto no Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), desencadearia uma produção acadêmica relevante sobre o ENOS, formando inúmeros mestres e doutores nesse tema. Além de Moacir Berlato, também conheço os outros dois autores, Gilberto Cunha e Denise Fontana. Ambos oriundos do grupo da UFRGS, formados sobre a tutoria dos professores Moacir Berlato e Homero Bergasmaschi, com carreiras de reconhecida competência na agrometeorologia brasileira.

Assim, pelo conteúdo e pelas credenciais dos autores, eu não hesito em recomendar fortemente essa obra. Você, certamente, ao lê-la, vai auferir muitos benefícios!

São José dos Campos, 19 de abril de 2024

ANTONIO DIVINO MOURA

Engenharia Elétrica UFMG, 1969, PhD MIT, 1975, pós-doutorado NASA/GISS, 1980, ex-pesquisador e ex-professor do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do INPE, ex-diretor do IRI, foi vice-presidente da OMM e ex-diretor do INMET

ISBN: 978-65-01-02988-7
CBL
9 786501 029887
GR Editor