El Niño – Southern Oscillation

Åke Johansson

FoUm, SMHI

28 februari 2016

1. Inledning

I atmosfären förekommer en stor mängd olika fenomen som var och en är associerade med vissa typiska karakteristiska egenskaper. En fundamental sådan egenskap är den skala – i tid och rum – som fenomenet vanligtvis har. Figur 1 visar att tids- och rums-skalorna inte är oberoende av varandra utan i stället påvisar ett starkt inbördes förhållande. För fenomen som i dagligt tal refereras till väder – i figuren benämnda såsom turbulens – fuktig konvektion – cykloner – planetära vågor – råder ett nära nog linjärt samband mellan rums- och tidsskalor. Fenomen som är småskaliga i rummet är alltså typiskt kortvariga i tiden medan å andra sidan storskaliga fenomen utmärks av lång varaktighet.

Den rumsliga skalan har dock ett maximum som aldrig kan överskridas – nämligen jordens storlek – medan någon sådan begränsning inte finns för tidsskalan. För tidsskalor längre än ungefär 1 månad är de dominerande fenomenen mycket storskaliga och i regel av samma storleksordning som jorden självt. Dessa s k lågfrekventa fenomen återfinns i figur 1 strax till vänster om den röda linjen, som betecknar jordens storlek, och högt upp, där de långa tidsskalorna återfinns.

Det kanske mest prominenta exemplet på ett lågfrekvent fenomen är de säsongsvariationer som är ett direkt resultat av den årliga cykeln i solens instrålning. Av atmosfärens totala variabilitet utgör dessa variationer den klart största delen. De längsta tidsskalorna som visas i figur 1 – decennier till århundranden – är associerade med olika former av klimatvariationer. Den globala uppvärmningstrenden, som är associerad med den av mänsklig aktivitet förorsakade förändringen i atmosfärens sammansättning, utgör här ett prominent inslag. Gemensamt för båda av dessa ovanstående viktiga lågfrekventa fenomenen är att de är direkt drivna av strålningseffekter som i stort sett är oberoende av atmosfärens interna variabilitet. Man brukar därför säga att de är externt drivna fenomen.

Det finns dock även lågfrekventa fenomen som i allt väsentligt är oberoende av externa faktorer och som i stället är internt genererade. En stor del av klimatvariationerna är t ex internt genererade. För de mer kortvariga klimatvariationerna – tidsskalor bortanför väder men kortare än några fåtal år - utgör Madden-Julian Oscillation – eller MJO efter initialerna på de två forskare som först beskrev fenomenet ett prominent exempel. Alternativa namn är ”30-60 day oscillation” eller ”tropical intraseasonal oscillation” vilket indikerar att MJO är ett fenomen med en tidsskala som är kortare än en säsong (30-90 dygn) och att den återfinns i den tropiska atmosfären, framförallt över de varmaste delarna av Indiska Oceanen och Stilla Havet. MJO uppstår genom en storskalig koppling mellan atmosfärisk cirkulation och djup konvektion och manifesterar sig i intermittent genererade östligt propagerande vågor längs ekvatorn. Det mest karakteristiska för MJO är de tydliga variationer i nederbörden som är avhängig av – och som följer med – de östligt propagerande vågorna.

När det gäller kortvariga klimatvariationer är dock El Niño - Southern Oscillation eller ENSO det klart största och viktigaste lågfrekventa fenomenet på jorden. Såsom framgår av figur 1 återfinns den bortanför den årliga cykeln med en ungefärlig tidsskala på 2-5 år. ENSO är en akronym för El Niño - Southern Oscillation och är alltså ett samlingsnamn för det kopplade atmosfärs-havs fenomen som ENSO utgör. Havsdelen utgörs av de avvikelser från normaltillståndet som karakteriserar en El Niño eller en La Niña, medan atmosfärsdelen utgörs av de avvikelser från normaltillståndet som är kopplade till svängningarna i Southern Oscillation. Det är därför naturligt och helt i sin ordning att ENSO, dvs El Niño – Southern Oscillation, fått sitt namn från både havs och atmosfärsdelen. Det fundamentala med ENSO är

att det är ett fenomen som karakteriseras av förändringar som är intimt koordinerade mellan hav och atmosfär. Detta är en direkt konsekvens av att samspelet mellan hav och atmosfär är ömsesidigt beroende av varandra. Anledningen till dess stora betydelse är dels att den tenderar att påverka atmosfärscirkulationen långt bortanför den tropiska delen av Stilla Havet genom så kallade ”teleconnections” och därmed i realiteten utgör, om än inte ett globalt fenomen, så i alla fall ett halvklots-stort fenomen. Dels har ENSO en för denna tidsskala ganska unik egenskap, nämligen att den är relativt förutsägbar med användbar prognoskvalité upp till ungefär 6 månader. Dessutom har ENSO en klart påvisbar påverkan på den globala medeltemperaturen, då en del av avvikelserna från den allmänt uppåtgående trenden i den globala medeltemperaturen kan hänföras till ENSO.

2. Observationer

Haven utbreder sig över mer än 2/3 av jordens totala yta, 70% mer exakt. Denna enorma areal har historiskt sett varit svår att observera, speciellt områden långt från tätbebyggda landområden och huvudsakliga sjöfartsleder. Stora delar av Stilla Havet inryms i denna kategori. I och med tillkomsten av satelliter har observationsmaterialet dock stadigt blivit allt bättre och satelliterna är numera en oumbärlig informationskälla för både atmosfärens och havsytans tillstånd. De observationer som finns – både konventionella och satellitdata – hänför sig dock framförallt till havsytan och de närmaste skikten ovan och under. Huvuddelen av havens volym har däremot varit mycket sparsamt observerade med undantag av specifika mätkampanjer.

Efter den mycket stora, så kallade super El Niño som inträffade 1982-1983 insåg man att det krävs betydligt fler och bättre observationer av framförallt den tropiska delen av Stilla Havet för att bättre kunna förstå och förhoppningsvis också förutsäga El Niño. Därför påbörjades år 1985 ett stort internationellt samarbete med syfte att utveckla ett system av förtöjda bojar, den så kallade ”TAO array”, där TAO står för ”Tropical Atmosphere Ocean”, för att mäta temperatur, vind och fuktighet i luften närmast havsytan samt temperatur i havet från ytan ned till ungefär 500 m djup på 10 olika djup inkluderande havsytan såsom framgår av figur 2. Systemet som blev komplett år 1994 har nu totalt 70 bojar jämnt fördelade över den tropiska delen av Stilla Havet såsom framgår av figur 3. År 2000 byttes namnet till TAO/TRITON för att synliggöra att en betydande del av systemet hänför sig till det japanska TRITON systemet. Data från bojarna skickas via satellit till en central som sammanställer och producerar dygnsmedelvärden som sedan görs tillgängliga i nära realtid.

Den dominerande observationskällan för att kartlägga havens tre-dimensionella tillstånd är dock i dagsläget observationssystemet ARGO. Det blev operationellt i början av 2000-talet och är ett system som i realtid observerar temperatur, salthalt och strömmar. ARGO består av ett stort antal, nästan 4000 stycken, flytande och drivande mätenheter som fungerar enligt skissen i figur 4. Mätenheten är normalt i sitt viloläge på ett så kallat parkeringsdjup på ungefär 1000 m djup. Var 10:de dag dyker den ner till ungefär 2000 m djup varefter den stiger upp till havsytan och då utför sina mätningar. Data skickas sedan via satellit till en central som sedan gör dem allmänt tillgängliga, utan restriktioner, i nära realtid. Omkring 90% av alla profileringar är allmänt tillgängliga inom 24 timmar. Fördelningen av de nästan 4000 stycken aktiva ARGO enheter som fanns i september 2015 framgår av figur 5 där färgerna indikerar vilket land som äger dem. Medelavståndet mellan dem är alltså av storleksordningen 300 km, något mindre på norra halvklotet och något större i södra hemisfären, framförallt i de sydligaste delarna. ARGO är alltså ett samarbetsprojekt mellan mer än 30 olika länder från alla kontinenter med syfte att tillhandahålla allmänt tillgängliga data för utforskningen av havet. Data från ARGO har snabbt blivit oumbärliga och används såväl för en rad olika operationella ändamål som inom oceanografisk och klimatologisk forskning. De spelade bland annat en mycket viktig roll i den senaste IPCC rapporten (2013) då man t ex för första gången direkt kunde beräkna havens totala värmeinnehåll.

Den viktigaste läxan man lärt sig från de senaste decenniernas ENSO observationer är den mycket stora variationsrikedom som ENSO uppvisat. I realtid har man kunnat bevittna en till synes aldrig sinande ström av överraskningar i hur ENSO manifesterar sig och utvecklas i tiden. Mångfalden är slående vilket gör att sannolikheten för än mer överraskningar i framtiden är hög.

3. Beskrivning av fenomenet ENSO

Normaltillståndet

ENSO är ett fenomen som utgör en avvikelse från normaltillståndet för både atmosfär och hav i och över den tropiska delen av Stilla Havet. För att förklara ENSO som fenomen är det därför nödvändigt att först klargöra hur det normala tillståndet i atmosfär och hav ser ut, och varför det ser ut som det gör.

När det gäller det normala förhållandet vid havsytan är ett av de mest framträdande inslagen den stora skillnaden i temperatur mellan öst och väst, vilket framgår av figur 6. I den västra delen av den tropiska delen av Stilla Havet – området kring, och strax öster om, Nya Guinea och Indonesien (ofta benämnt den maritima kontinenten) varierar inte havsytans temperatur (SST) särskilt mycket under året utan är stadigt mycket hög, omkring 30°C, året runt. Detta område är också det varmaste havsområdet på jorden, och benämns ofta som ”the warm pool”. Härifrån avtar sedan SST monotont mot öster och når ett minimum nära Sydamerikas kust där den som mest, under hösten, är omkring 10°C kallare än vid ”the warm pool”. Utseendet hos fördelningen av SST i den östra, kallare delen av den tropiska delen av Stilla Havet har gett upphov till beteckningen ”the cold tongue” eftersom den kan liknas vid en kall tunga som sträcker ut sig mot väster. Variabiliteten under året i den östliga delen är betydande, av storleksordningen 5°C, i skarp kontrast med de nästan konstanta förhållandena i området kring ”the warm pool”.

Den normala fördelningen av SST som beskrivits ovan är av fundamental betydelse för att förklara den längs ekvatorn i Stilla Havet observerade fördelningen av konvektiva åskmoln och den nederbörd som dessa genererar. Ju varmare underlaget är ju mer verkar det för att atmosfären blir vertikalt instabil och därmed att konvektiv molnbildning initieras. Tvärtom gäller att ju kallare underlaget är ju stabilare blir atmosfären vilket motverkar bildandet av konvektiva moln. Som framgår av figur 7 gör detta att fördelningen av konvektiva åskmoln och nederbörd är nära relaterade till fördelningen av SST. Den största konvektiva aktiviteten, och med den följande kraftigaste nederbörden, förekommer i området kring, och strax öster om, den maritima kontinenten, medan nästan ingen nederbörd alls faller över de östliga, relativt kallare, områdena nära Sydamerikas kust.

Fördelningen av SST och nederbörd är nära förbundna med vindfördelningen. På grund av den kraftiga konvektionen i området kring den maritima kontinenten får man här uppåtvindar samt lågt lufttryck vid havsytan. Det låga lufttrycket ger i sin tur upphov till att luften strömmar in mot detta område i låga skikt, vilket förklarar att det råder östliga vindar längs ekvatorn, dvs det blåser från Sydamerika in mot den maritima kontinenten. Av kontinuitetsskäl får man en returströmning i form av västliga vindar i den övre delen av troposfären, från den maritima kontinenten österut mot Sydamerika. För att sluta detta cirkulationshjul råder nedåtvindar i de östra delarna av Stilla Havet. Detta gigantiska cirkulationssystem i ekvatorialplanet i Stilla Havet går under namnet Walker Cirkulationen, vilken utgör en av de mer prominenta storskaliga cirkulationerna i jordens atmosfär. Den indikeras i figur 7 med svarta pilar. Notera att nedåtvindarna i de östra delarna av Stilla Havet kraftfullt motverkar molnbildning och därmed nederbördsutlösning. Detta är alltså en ytterligare förklaring – utöver den redan påtalade kalla havsytetemperaturen som där råder – till varför det är så ringa nederbörd över de östliga delarna av Stilla Havet längs ekvatorn.

Fundamentalt för förhållandena under havsytan är förekomsten av en termoklin, dvs en gränszon som skiljer det översta varma och relativt grunda ytskiktet – som normalt är 100-200 m djupt - från det betydligt kallare vattnet därunder. Som framgår av figur 7 lutar termoklinen markant från öst till väst. Det innebär att ytskiktet med varmt vatten är betydligt djupare i väster jämfört med vad det är i öster. Anledningen till denna lutning av termoklinen härrör sig från de östliga vindar som vid havsytan normalt blåser från Sydamerika till den maritima kontinenten.

Den ovan beskrivna fördelningen av SST och åskmoln med associerad nederbörd resulterar i att atmosfären erhåller ett stort värmetillskott i områden där SST är förhöjd och nederbörden riklig. De områden i atmosfären som har störst uppvärmning och därmed de varmaste temperaturerna överensstämmer normalt sett väldigt väl med områdena med varmaste SST och kraftigaste nederbörd. Atmosfären ovanför den maritima kontinenten och strax öster därom erhåller alltså i normalfallet ett mycket stort värmetillskott som i sin tur resulterar i att den nord-sydliga temperaturkontrasten mellan pol och ekvator på båda halvkloten accentueras i detta område. De starkaste vindarna på jordklotet, de båda subtropiska jetströmmarna, som får sin energi från den nord-sydliga temperaturgradienten, kommer därmed att påverkas och modifieras, både i styrka och läge. Denna påverkan är störst under respektive halvklots vintersäsong såsom illustreras i figur 8.

Avvikelser från normaltillståndet i havet - El Niño och La Niña

En El Niño, eller ett ”Pacific warm event”, karakteriseras av en period på 9-12 månader med ovanligt varmt ytvatten (SST), upp till 2-3°C varmare än normalt, i de östliga delarna av den tropiska delen av Stilla Havet såsom illustreras i den vänstra delen av figur 9. En La Niña, eller ett ”Pacific cold event”, å andra sidan karakteriseras av en period från 9-12 månader upp till flera år med ovanligt kallt ytvatten (SST), upp till 1-2°C kallare än normalt, i de centrala och östliga delarna av den tropiska delen av Stilla Havet såsom illustreras i den högra delen av figuren. De övre bilderna i figuren illustrerar också en asymmetri mellan El Niño och La Niña i den meningen att en El Niño är kvalitativt sett en större avvikelse från normaltillståndet jämfört med en La Niña, som i stället är mer av en accentuerad variant av normaltillståndet. De nedre bilderna i figuren, som visar anomalier av SST, illustrerar även den asymmetrin mellan El Niño och La Niña då SST-anomalierna inte är exakta spegelbilder av varandra. En alternativ bild av SST-anomalierna som råder under kulmen av en El Niño (övre bilden) respektive en La Niña (nedre bilden) visas i figur 10.

Såsom påpekats ovan tenderar temperaturavvikelserna från det normala att vara mindre under en La Niña jämfört med under en El Niño, men å andra sidan är varaktigheten hos en La Niña större än hos en El Niño. Dessa karakteristiska egenskaper framgår av figur 11 som visar tidsserien av ett ofta använt index för El Niño/La Niña – det så kallade Ocean Niño Index eller ONI. En El Niño anses inträffa då ONI överstiger värdet 0.5 under fem på varandra följande månader. På motsvarande sätt anses en La Niña inträffa då ONI understiger värdet -0.5 under fem på varandra följande månader. Man kan dessutom klassificera en El Niño/La Niña såsom varande svag, måttlig, stark eller mycket stark beroende på om den någon gång under sin livscykel överstiger värdet 0.5, 1.0 1.5 eller 2.0. Som synes har flera mycket starka El Niño, så kallade super El Niño, inträffat medan ingen så kraftig La Niña hittills har observerats. En El Niño är alltså mer spektakulär och dramatisk jämfört med en La Niña som är mer beskedlig och, som påpekats ovan, dessutom kan beskrivas som en accentuerad variant av normaltillståndet.

En viktig egenskap hos både El Niño och La Niña - som framgår av figur 12 - är att de tenderar att nå sin kulmen omkring juletid plus/minus någon månad, dvs i november-december-januari. De brukar därför sägas vara ”phase-locked to the annual cycle”. Eftersom den typiska varaktigheten på både El Niño och La Niña är ungefär ett år betyder det att det behövs två årtal för en korrekt kronologiskt benämning, t ex 1997-1998 El Niño och 1973-1974 La Niña.

Avvikelser från normaltillståndet i atmosfären - Southern Oscillation

De förändringar i havsytans temperatur som karakteriserar El Niño och La Niña är intimt kopplade till förändringar i den storskaliga fördelningen av lufttrycket vid havsytan. Denna fluktuation går under namnet ”The Southern Oscillation”, förkortat SO, och illustreras i figur 13. Den negativa fasen av SO sammanfaller med El Niño och kännetecknas av onormalt högt lufttryck över den maritima kontinenten samtidigt som det är onormalt lågt lufttryck över den östra delen av den tropiska delen av Stilla Havet. Den motsatta fasen av SO inträffar under La Niña med onormalt lågt lufttryck över den maritima kontinenten samtidigt som det är onormalt högt lufttryck över den östra delen av den tropiska delen av Stilla Havet. Southern Oscillation är alltså en gigantisk omförflyttning av massa i atmosfären mellan de östra och västra delarna av de tropiska delarna av Stilla Havet. Den beskrivna samvariationen mellan El Niño/La Niña och Southern Oscillation framgår tydligt av figur 14 som visar dels en tidsserie under en 30-årsperiod för ONI-indexet för El Niño/La Niña (övre bilden) dels en motsvarande tidsserie för SOI-indexet för Southern Oscillation (nedre bilden).

Den kopplade havs-atmosfärs-avvikelsen från normaltillståndet – ENSO

Som påpekats är ENSO samlingsnamnet på det kopplade atmosfärs-havs fenomenet där havsdelen utgörs av de avvikelser från normaltillståndet som karakteriserar en El Niño eller en La Niña, medan atmosfärsdelen utgörs av de avvikelser från normaltillståndet som är kopplade till svängningarna i Southern Oscillation. Det är därför naturligt och helt i sin ordning att ENSO, dvs El Niño – Southern Oscillation, fått sitt namn från både havs och atmosfärsdelen. Det fundamentala med ENSO är att det är ett fenomen som karakteriseras av förändringar som är intimt koordinerade mellan hav och atmosfär och där samspelet mellan hav och atmosfär är ömsesidigt beroende av varandra.

För att beteckna det tillstånd ENSO vid en given tidpunkt befinner sig i borde man logiskt sett använda ordet ENSO tillsammans med ett lämpligt adjektiv. För normaltillståndet är så också fallet, då man hänför det till ett ENSO-neutralt tillstånd. Språkbruket för de båda ytterlighets-tillstånden av ENSO är dock vanligtvis El Niño och La Niña, vilket inte är helt lyckat. Svängningarna i ENSO karakteriseras av stor oregelbundenhet. En El Niño kan lika väl följas av en La Niña som ENSO-neutral eller en annan El Niño, som framgår av tidsserierna i figur 11 och 14.

Beskrivning av ENSO under en El Niño

Figur 15 beskriver den typiska situationen under El Niño fasen av ENSO. Eftersom ENSO är ett kopplat fenomen kan man börja beskrivningen från många olika infallsvinklar, där alla är lika goda startpunkter. Om man börjar med vindförhållandena framgår av figuren att den storskaliga Walker cirkulationen är betydligt försvagad under en El Niño, både vid havsnivån och i den övre troposfären. Under en kraftig El Niño kan den till och med försvinna helt och hållet. Försvagningen, eller den totala avsaknaden, av den östliga passadvinden vid havsytan är intimt förknippad med förändringarna under havsytan. Under normala förhållanden anhopas

det varma vattnet vid den maritima kontinenten på grund av de persistenta östliga vindarna. Vid en El Niño försvagas dock dessa östliga vindar, eller upphör helt, vilket gör det möjligt för det varma vattnet, både vid havsytan och ned genom hela ytskiktet, att utbreda sig österut. Processen då hela det varma ytskiktet börjar utbreda sig österut, och i och med det pressar ner termoklinen, anses vara en manifestation av en vågrörelse, en så kallad Kelvin våg, som utbreder sig från den maritima kontinenten till Sydamerikas kust. Ett exempel på detta visas i figur 16 där det också framgår att det tar flera månader för Kelvinvågen att röra sig från den maritima kontinenten till Sydamerikas kust. Lutningen hos termoklinen blir alltså under en El Niño betydligt mindre, och under en kraftig El Niño kan termoklinen till och med bli helt horisontell. Detta innebär att skiktet med varmt vatten i öster blir betydligt djupare än normalt. Det varma vattnet, som i normaltillståndet finns i området kring och strax öster om den maritima kontinenten, breder sig under en El Niño ut över den centrala, och stora delar av den östra, delen av ekvatoriella Stilla havet. Därmed kommer också de stora åskmolnen med tillhörande nederbörd att likaledes röra sig österut. Under en El Niño minskar därför nederbörden över den västra delen av tropiska Stilla Havet, inkluderande den maritima kontinenten och Australien, medan den ökar i framförallt den centrala, men också i den östra, delen av tropiska Stilla Havet. Det är framförallt havsområden med ytvattentemperaturer som överstiger 28°C som får den största ökningen av nederbörd. En illustration av hur avvikelserna i nederbörd under en El Niño jämfört med normaltillståndet brukar se ut visas i figur 17. Den totala areal som berörs av denna El Niño relaterade avvikelsen från den normala nederbördsfördelningen sträcker sig över nästan halva jordens ekvatorialområde, och har därmed potential att påverka väderförhållandena över stora delar av jorden.

Beskrivning av ENSO under en La Niña

Figur 18 beskriver den typiska situationen under La Niña fasen av ENSO. Om man också här börjar med vindförhållandena framgår av figuren att den storskaliga Walker cirkulationen förstärks under en La Niña, både vid havsnivån och i den övre troposfären. Denna förstärkning av Walker cirkulationen är framförallt uttalad i den östra delen av Stilla Havet. Från en kvalitativ synvinkel är dock skillnaden mot normaltillståndet, figur 7, inte särskilt stor, vilket är konsistent med karakteriseringen att en La Niña kan ses som en accentuerad variant av normaltillståndet. Förstärkningen av den östliga passadvinden vid havsytan är intimt förknippad med förändringarna under havsytan. Under normala förhållanden anhopas det varma vattnet vid den maritima kontinenten på grund av de persistenta östliga vindarna. Vid en La Niña då dessa östliga vindar förstärks kommer det varma vattnet att röra sig än mer västerut och koncentrera sig på ett allt mindre område. Den förstärkta östliga vinden gör också att termoklinen blir allt brantare och i de östliga delarna är den belägen mycket nära havsytan, vilket totalt sett innebär en markant minskning av volymen med varmt vatten under havsytan i de östra delarna av Stilla Havet. Denna avkylning är gynnsam för det marinbiologiska livet, inte minst för fiskbeståndet, då det kallare vattnet är betydligt mer näringsrikt. I och med att det varma ytvattnet under en La Niña krymper ihop och drar sig allt längre västerut kommer de stora åskmolnen med tillhörande nederbörd att också dra sig allt längre västerut och begränsar sig till området runt Indonesien och den allra västligaste delen av Stilla Havet. Stora delar av centrala och östra Stilla Havet får markant mindre nederbörd, vilket överensstämmer med att de karakteriseras av onormalt kalla ytvattentemperaturer. En illustration av hur avvikelserna i nederbörd under en La Niña jämfört med normaltillståndet brukar se ut visas i figur 19. Den totala areal som berörs av denna La Niña relaterade avvikelsen från den normala nederbördsfördelningen sträcker sig över nästan halva jordens ekvatorialområde, och har därmed potential att påverka väderförhållandena över stora delar av jorden.

4. Hur långt sträcker sig ENSOs inflytande

En stor anledning till att ENSO fått en så stor uppmärksamhet är att den tenderar att påverka atmosfärscirkulationen långt bortanför den tropiska delen av Stilla Havet genom så kallade ”teleconnections”. Som framgår av figurerna 20 och 21 sträcker sig dock dess inflytande inte riktigt över hela jordklotet. Det är framförallt Stilla Havet och omkringliggande landområden som är direkt påverkade av ENSO. De mest robusta sambanden återfinns helt naturligt i ENSOs primära kärnområde i tropiska Stilla Havet. Rör man sig successivt bort från kärnområdet blir sambanden dock allt mer diffusa på grund av den relativt sett allt större inverkan som all annan variabilitet har. Det som visas i figurerna är förväntade medelförhållanden under en El Niño respektive en La Niña. För en specifik El Niño eller La Niña kan emellertid avsevärda avvikelser förekomma på grund av att summan av all annan, ej ENSO-relaterad, variabilitet är relativt sett så pass stor. Speciellt noterbart är att vad gäller Europa, inkluderande Skandinavien och Sverige, så har enligt figurerna inte ENSO något inflytande.

ENSOs betydelse för Nordamerika, och då speciellt USA, är kanske av speciell betydelse för att förklara den stora uppmärksamheten som ENSO fått. Den ”teleconnection” som traditionellt har åberopats för att förklara ENSOs inflytande på USA är den så kallade PNA, vilket står för Pacific-North American teleconnection pattern och visas i figur 22. PNA består av ett vågtåg som utgår från ENSOs - ur energisynvinkel - kärnområde, dvs området vid ekvatorn med intensiv konvektiv aktivitet över havsområdet med den varmaste ytvattentemperaturen. Vågtåget utbreder sig härifrån längs en storcirkel norrut upp mot Alaska, viker sedan av söderut över västra Kanada och vidare ned mot Florida och Karibien. En mer detaljerad beskrivning av de meteorologiska konsekvenserna för Nordamerika av en El Niño respektive en La Niña visas i figur 23. Denna figur är resultatet av dels empiriskt funna samband men också av hur dessa samband passar in i teorin för hur teleconnections - såsom PNA - påverkar atmosfärsdynamiken. Det som visas i figuren är förväntade medelförhållanden under en El Niño respektive en La Niña. För en specifik El Niño eller La Niña kan emellertid avsevärda avvikelser förekomma.

5. Modellering och prognoser av ENSO

För att kunna göra en prognos för hur ENSO kommer att utveckla sig med tiden behöver man ha tillgång till en matematisk modell som fysikaliskt beskriver hela det kopplade atmosfärs-havs fenomen som ENSO utgör. Under årens lopp har det utvecklats många sådana modeller. De två huvudsakliga typerna av modeller är empiriska och dynamiska modeller. De empiriska modellerna bygger på någon typ av statistisk modell för hur ENSO brukar fungera, och är beroende av ett stort datamaterial för att försöka etablera robusta samband. De dynamiska modellerna är i stället baserade på en detaljerad matematisk beskrivning av alla de fysikaliska processer som ingår i det kopplade atmosfärs-havs fenomen som ENSO utgör. Komplexitetsgraden varierar dock avsevärt mellan olika typer av modeller varför man brukar säga att det finns en hel hierarki av modeller. De mest avancerade dynamiska modellerna för att beskriva och förutsäga ENSO liknar, och bygger på, de modeller som används för att producera operationella numeriska väderprognoser. En sådan modell är den som används operationellt för att göra ENSO prognoser vid ECMWF. Den 6-månadersprognos som utfärdades i början av juni 2015 av denna modell visas i figur 24. De röda kurvorna visar hur havsytetemperaturen i centrala tropiska Stilla Havet utvecklar sig. För att uppskatta osäkerheten i prognosen gör man många så kallade ensembleprognoser, där de olika ensemblemedlemmarna startar från något olika starttillstånd. Spridningen av alla dessa ensembleprognoser blir då ett mått på osäkerheten i prognosen. Den streckade svarta kurvan visar det verkliga utfallet. En bra modell skall vara sådan att det verkliga utfallet återfinns någonstans i, eller omkring, klustret av alla ensemblemedlemmar, vilket det synes göra i detta fall. Spridningen är dock betydande och de flesta medlemmarna indikerar en svagare El Niño än vad som i verkligheten blev fallet. Man har gjort många sådana prognoser på det historiska data-material som finns tillgängligt, vilket normalt är från ungefär 1979 till nutid. Baserat på utfallet av dessa retroaktiva prognoser, så kallade ”hindcasts”, kan man få en uppskattning på tillförlitligheten hos prognoserna. Resultatet av sådana hindcasts från många olika modeller från olika institut jorden runt indikerar användbara prognoser upp till ungefär 6 månader. Den statistiskt sett bästa prognosen från ett ensembleprognos-system - som den från ECMWF - är att beräkna medelvärdet av alla prognoser, den så kallade ensemble-medelvärdes-prognosen. Denna prognos ligger alltså i mitten av klustret av alla prognoser från de individuella ensemblemedlemmarna.

Som påpekats ovan är spridningen mellan individuella prognoser hos en given modell ett mått på prognosens tillförlitlighet. En vidareutveckling av denna idé är att studera spridningen hos ensemble-medelvärdes-prognoser från olika modeller, så kallade multi-modell-ensembler. Ett exempel på sådana prognoser som utfärdades i mitten av maj 2015 av 25 olika modeller, både statistiska och dynamiska modeller, från jordens alla hörn visas i figur 25. Som synes är spridningen betydande, vilket indikerar stor osäkerhet. Det verkliga utfallet är i utkanten av klustret – den är nära den modell som prognoserade den största El Niño’n – vilket är konsistent med osäkerhetsbedömningen.

Som påpekats tidigare har ENSO den ganska unika egenskapen för att vara ett fenomen med en så pass lång tidsskala, nämligen att den är relativt förutsägbar med användbar prognoskvalité upp till ungefär 6 månader, vilket framgår av figur 26. Figuren visar också att empiriska och dynamiska modeller har ungefär samma kvalitet. Detta kan förefalla förvånande då de mycket komplexa dynamiska kopplade atmosfärs-havs modellerna kräver många-många storleksordningar mer datorkapacitet jämfört med de empiriskt-statistiska modellerna. Förklaringen till denna paradox är att antalet frihetsgrader som går att prognosticera på denna tidsskala i allt väsentligt är 1, nämligen ENSO. Den grundläggande fördelen som de dynamiska modellerna har över de empiriska modellerna är att de är icke-linjära emedan de empiriska i allt

väsentligt är linjära. Det krävs emellertid minst tre frihetsgrader med prognostiskt innehåll för att en icke-linjär modell skall kunna utnyttja sin fördel. En komplex dynamisk kopplad atmosfärs-havs modell med nominellt miljontals frihetsgrader som endast har prognostiskt innehåll i ≤ 3 frihetsgrader är i praktiken linjär. De icke-linjära termerna producerar därmed i realiteten endast slumptal vilka adderas till tidsderivatan hos den enda prediktabla frihetsgraden med prognostiskt innehåll, dvs ENSO. Det är därför det är nödvändigt med ett stort ensemble för att filtrera bort det brus som slumptalen ger upphov till.

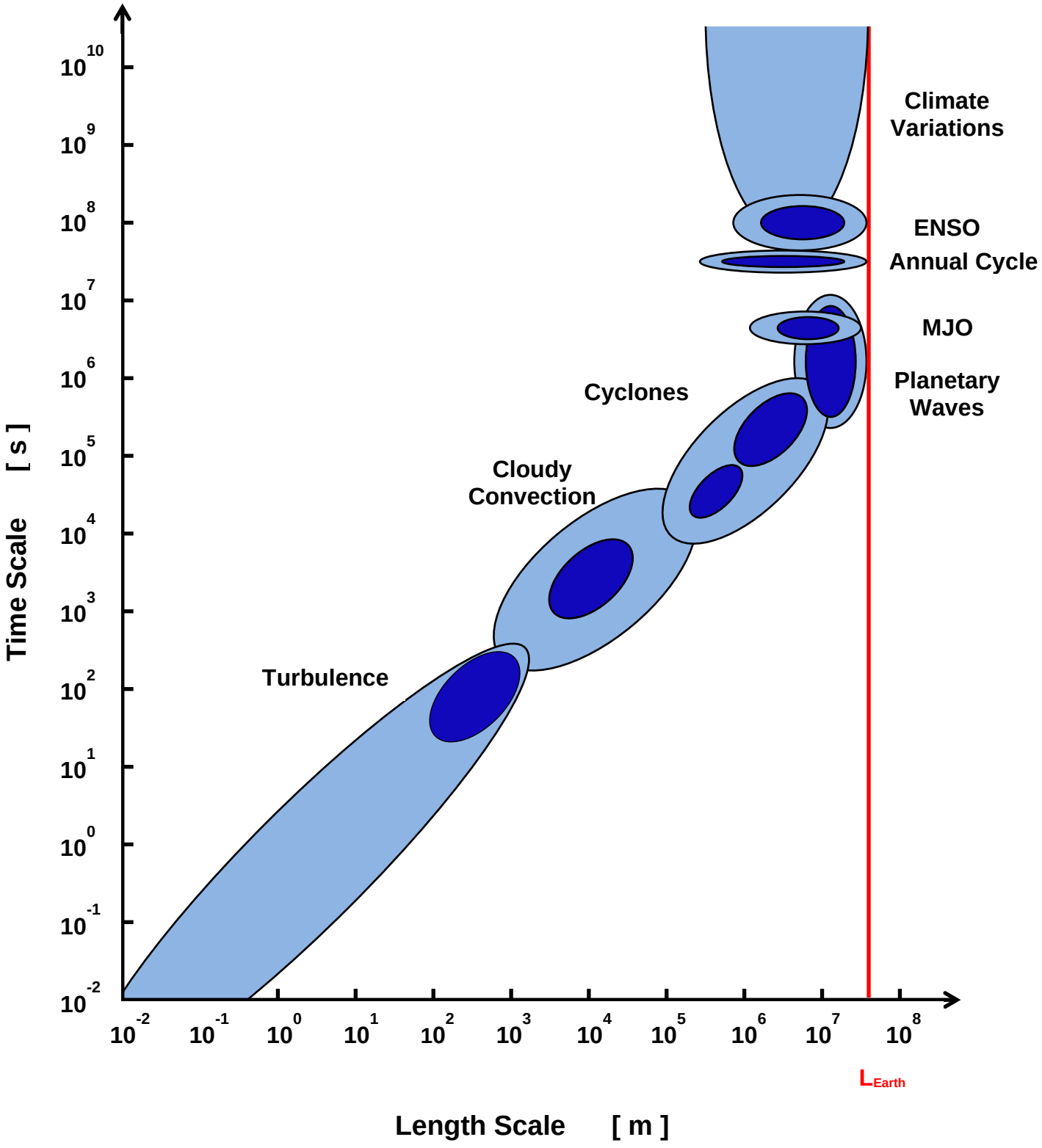
Konsistent med den ovanstående beskrivningen är det faktum att prognoskvaliteten hos ENSO prognoser inte förbättrats nämnvärt under de senaste decennierna. Under det första decenniet på 2000-talet noterades faktiskt lägre prognoskvalitet än vad som uppnåddes under de föregående decennierna. Detta kan mycket väl ha att göra med att ENSO har en så stor variationsrikedom med betydande variationer i ENSO karakteristik på dekad och längre tidsskalor. Som en följd av detta har det under senare tid blivit mycket populärt att prata om ”ENSO diversity”.

6. ENSO och den globala uppvärmningen

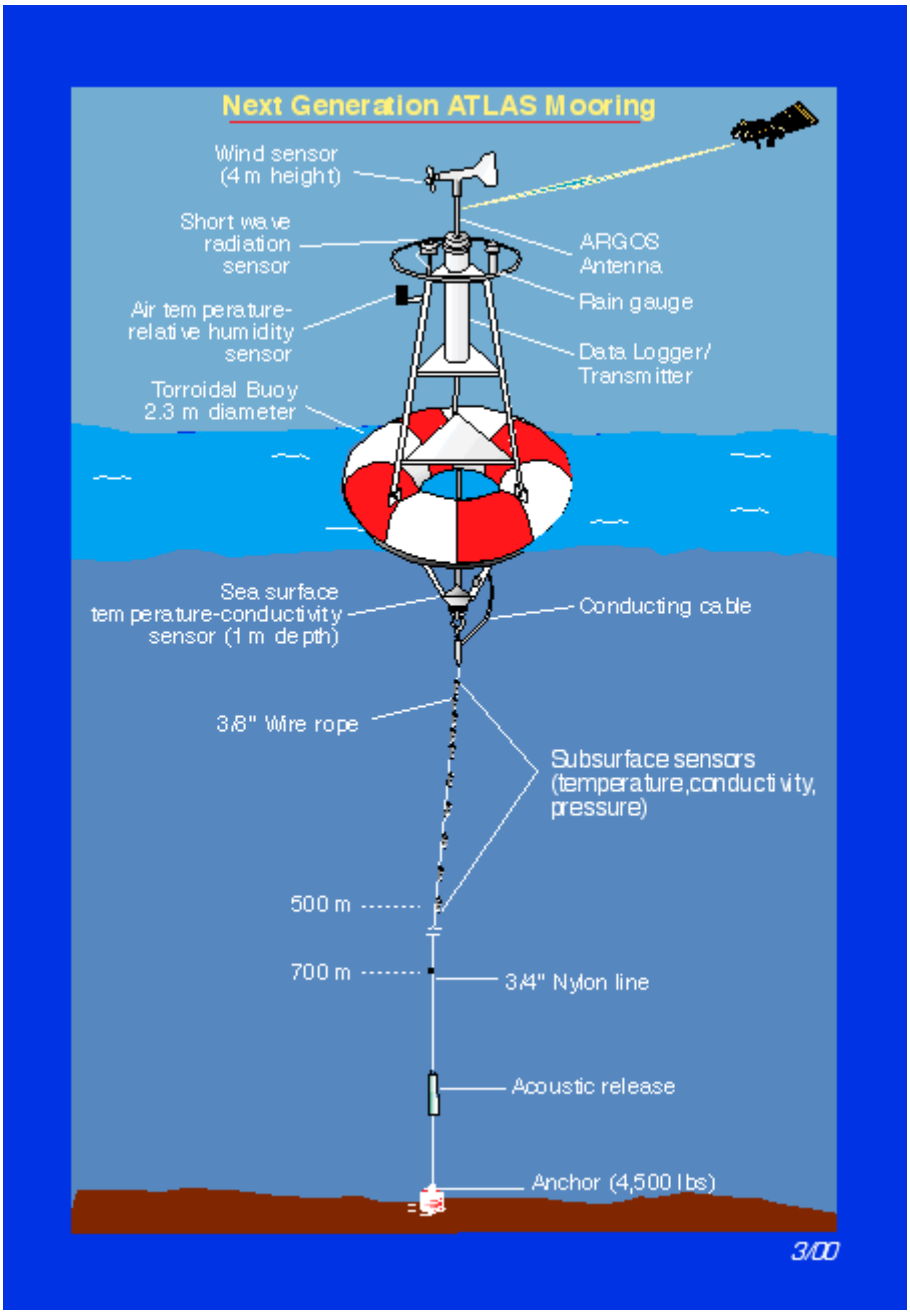
Den globala medeltemperaturen reagerar på ett robust sätt på förekomsten av en El Niño eller en La Niña. Under en El Niño utbreder sig hela det varma ytskiktet österut. Ett exempel på hur denna förändring av värmeinnehållet i havets översta delar (0-300 m) vilket alltså inkluderar havsytan kan se ut visas i figur 16. Denna uppvärmning av havet leder i sin tur till att atmosfären ovanför så småningom också värms upp. Värmeöverföringen till atmosfären är dels i form av sensibelt värmeutbyte men också i form av latent värmeutbyte i samband med konvektiv molnbildning och nederbördsutlösning ovanför det uppvärmda havet. Med en eftersläpning på ungefär 3 månader förhöjs den globala medeltemperaturen nära markytan med ungefär 0.1°C jämfört med det normala, såsom illustreras i figur 27. Vid en mycket kraftig El Niño – såsom de super El Niño som förekom 1982-1983 och 1997-1998 – blir uppvärmningen på grund av El Niño ändå något högre, över 0.15°C. Eftersom El Niño/La Niña tenderar att ha sitt maximum omkring november-december-januari såsom illustreras i figur 12 (den sägs vara ”phase-locked to the annual cycle”), betyder det att den globala medeltemperaturen når sitt maximum följande vår. Då man refererar till ett El Niño år eller ett La Niña år i samband med hur ENSO påverkar den globala medeltemperaturen för ett visst kalenderår brukar man därför ange det senare av de båda åren som normalt används för att beteckna en El Niño, t ex 1993 för 1982-1983 El Niño och 1998 för 1997-1998 El Niño. Förutom skikten närmast markytan så värms dessutom hela troposfären upp efter en El Niño.

Om man beräknar storleken på den effekt som ENSO har på den globala medeltemperaturen finner man dock att den är relativt liten i jämförelse med den långsiktiga trenden mot allt högre temperaturer som är associerade med den av människan förorsakade förändringen i atmosfärens sammansättning. Detta kvantifieras i figur 28 där man kan se att ENSO endast kan ”förklara” ungefär 8% av den totala variansen av den globala medeltemperaturen, medan den långsiktiga trenden ”förklarar” ungefär 46% eller 6 gånger mer än ENSO. En avgörande skillnad är att medan den långsiktiga trenden förändrar jordens medeltemperatur mer permanent så innebär svängningarna mellan El Niño och La Niña ingen långsiktigt kvardröjande effekt på jordens medeltemperatur. Notera att ungefär 46% av förklarad varians återstår vilken hänför sig till all annan naturlig variabilitet – förutom ENSO – som förekommer i klimatsystemet. Denna är alltså lika stor som trenden och innebär att man mycket väl kan ha perioder på storleksordningen decennier då ingen märkbar temperaturökning föreligger. Den mycket omtalade perioden från 1998 till dagsläget – den förmenta avstanningen av jordens uppvärmning – är ett exempel på detta.

Hur förändras då ENSO av den globala uppvärmingen? Trots att denna fråga har studerats intensivt under senare år finns ännu ingen konsensus. Det finns två huvudanledningar till detta. För det första är de observationer som finns tillgängliga – speciellt av haven under havsytan – mycket begränsade och täcker egentligen bara de senaste decennierna. Baserat på de data som ändå finns tillgängliga kan man konstatera att ENSO uppvisar en mycket stor naturlig variationsrikedom över långa tidsperioder. Det är därför mycket vanskligt att urskilja en signal som entydigt skulle kunna kopplas till den globala uppvärmingen. För det andra är de modeller som används för att utröna frågan långt ifrån perfekta. Vår förmåga att modellera alla de relevanta havs och atmosfärsprocesser som är involverade i ENSO är begränsade. De relativt stora systematiska fel, eller bias, som i princip alla modeller har är kanske det mest synbara resultatet av det.

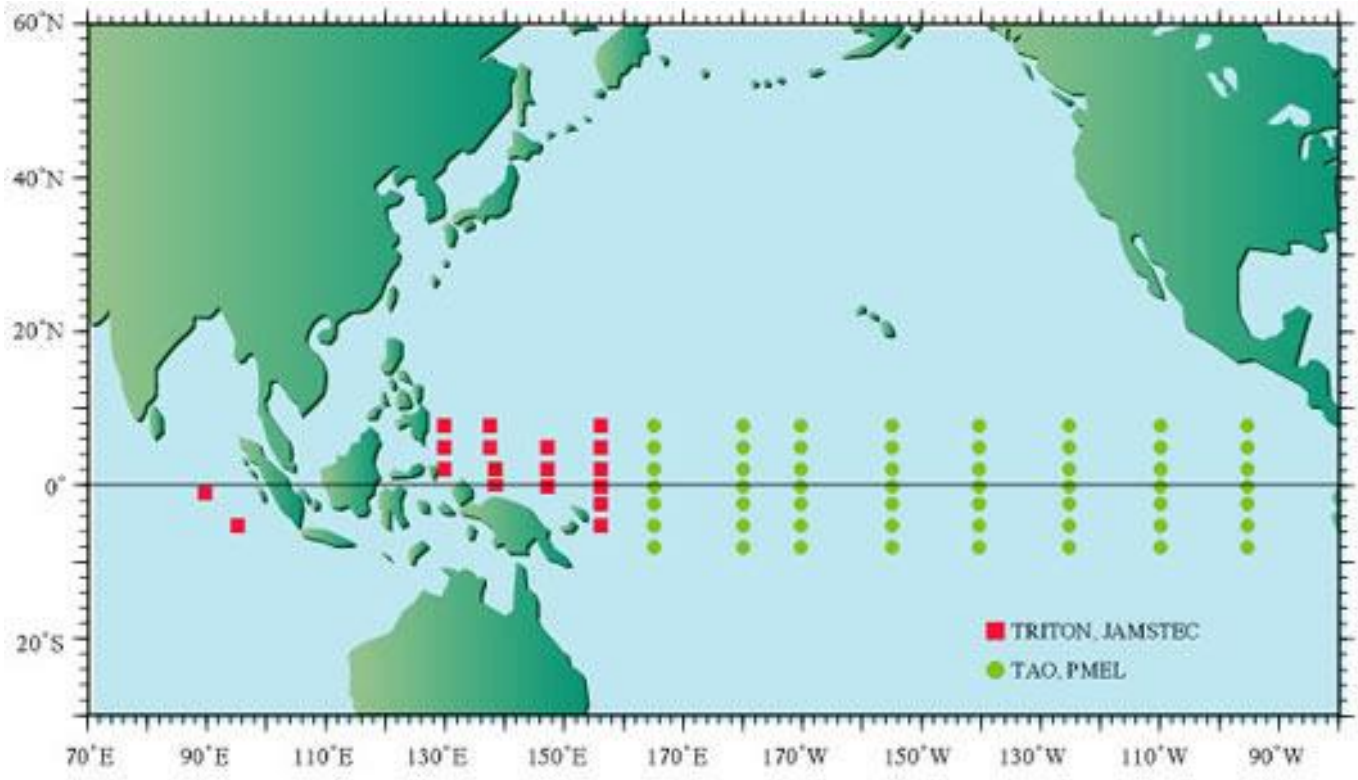


Figur 1. Typiska längd- och tidsskalor hos de mest fundamentala fenomenen i atmosfären. De blå skuggningarna indikerar de skalor där huvuddelen av respektive fenomens energi vanligtvis förekommer.



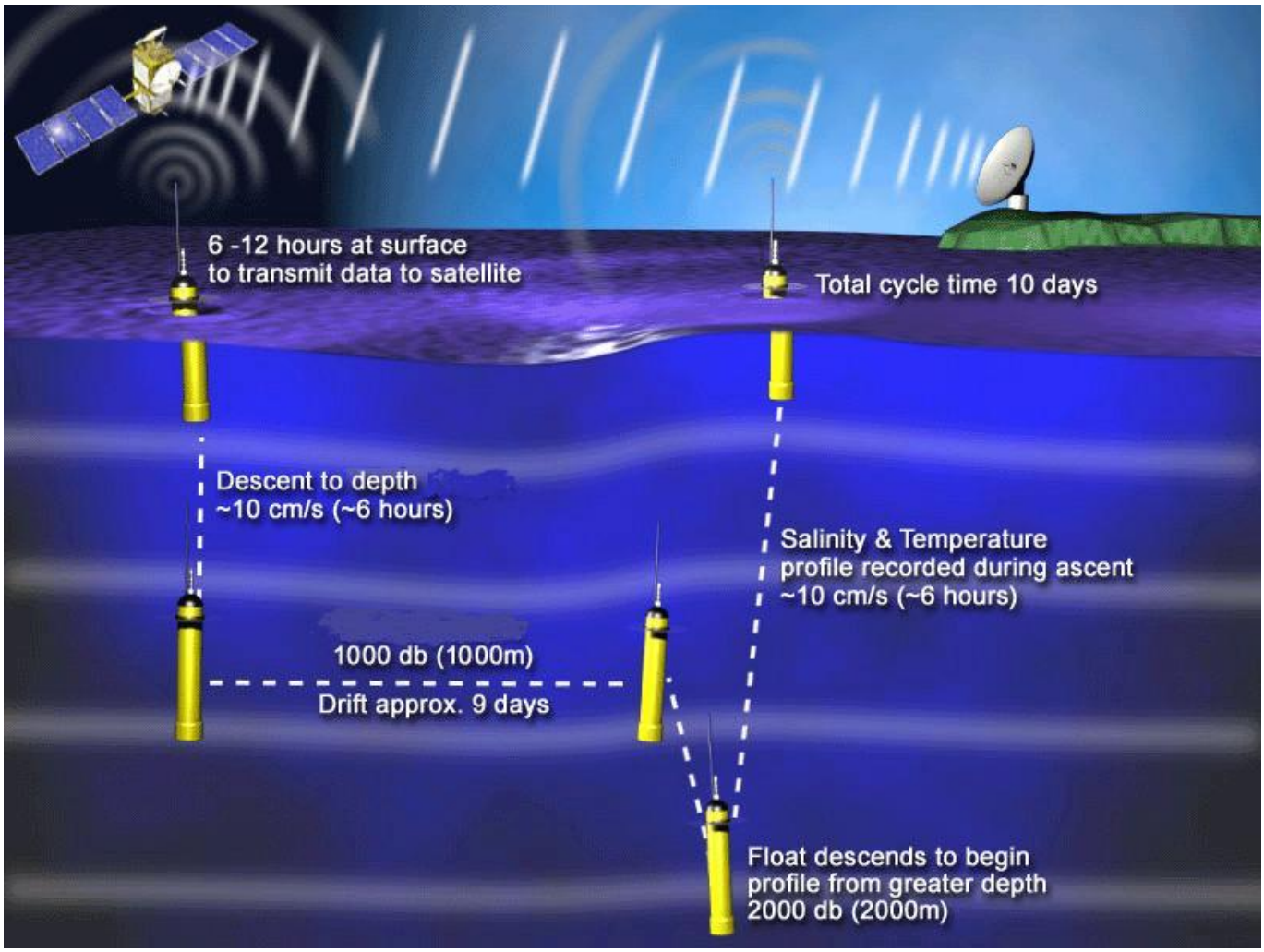
Figur 2. Principskiss av hur TAO arrayens ATLAS bojar är designade.
ATLAS = Autonomous Temperature Line Acquisition System.

Källa: TAO Project Office, Pacific Marine Environmental Laboratory, NOAA



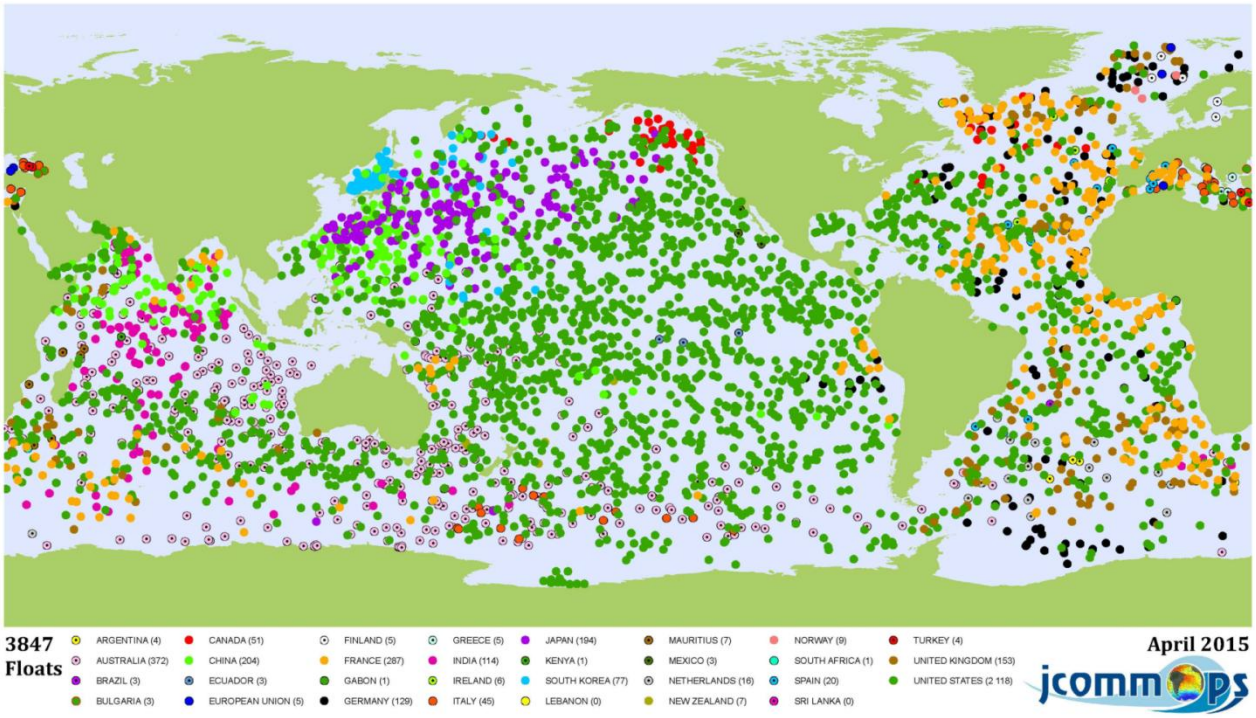
Figur 3. Geografisk fördelning av bojarna i TAO och TRITON arrayerna. Systemet som blev komplett år 1994 har ungefär 70 bojar jämnt fördelade över den tropiska delen av Stilla Havet.

Källa: JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)



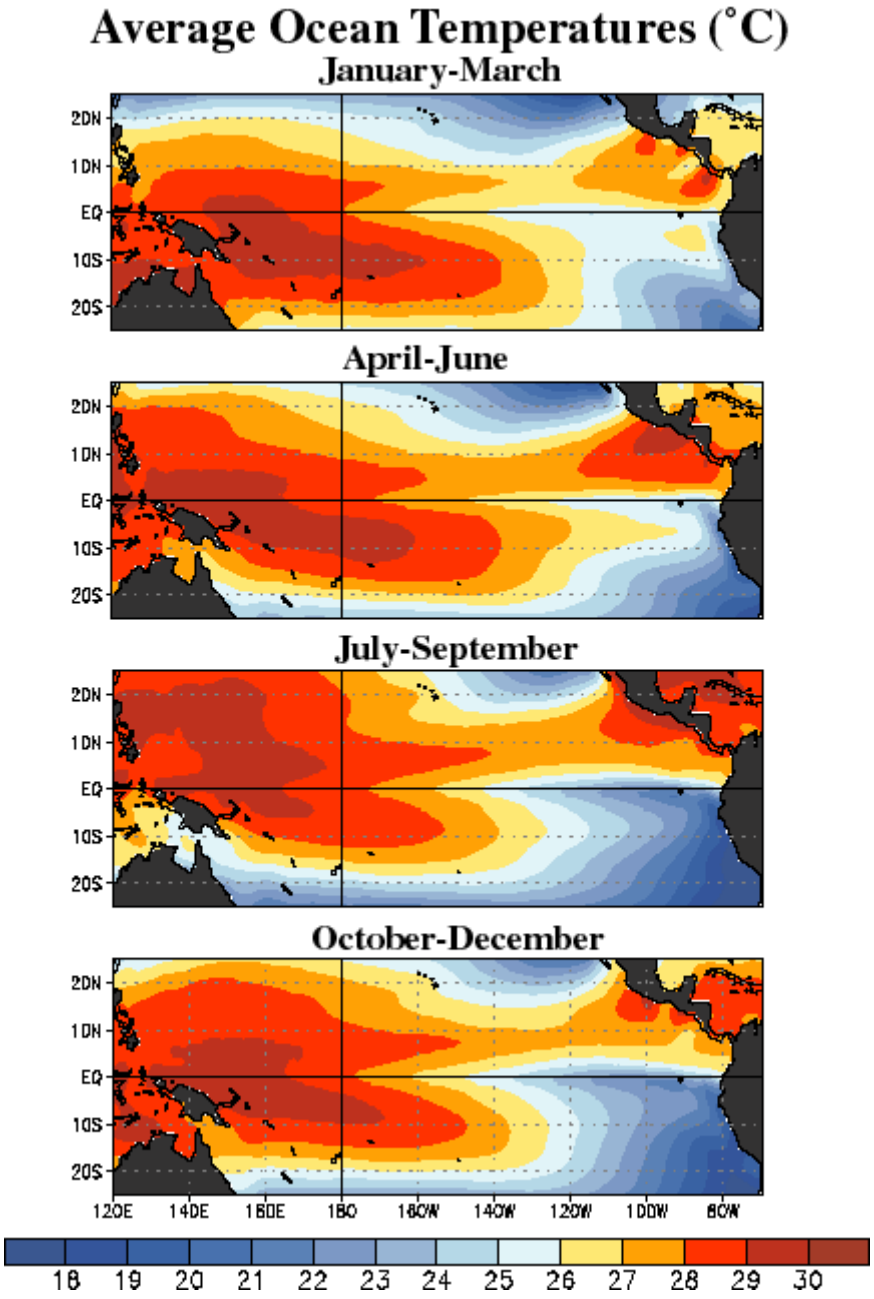
Figur 4. Principskiss av hur ARGO fungerar. Mätenheten är mesta delen av tiden i sitt parkeringsläge på 1000 m djup. Var 10:e dag dyker den ner till 2000 m djup, varefter den börjar mäta temperatur och salthalt under sin uppstigning till havsytan. De erhållna data överförs sedan till satelliter.

Källa: Argo Project Office



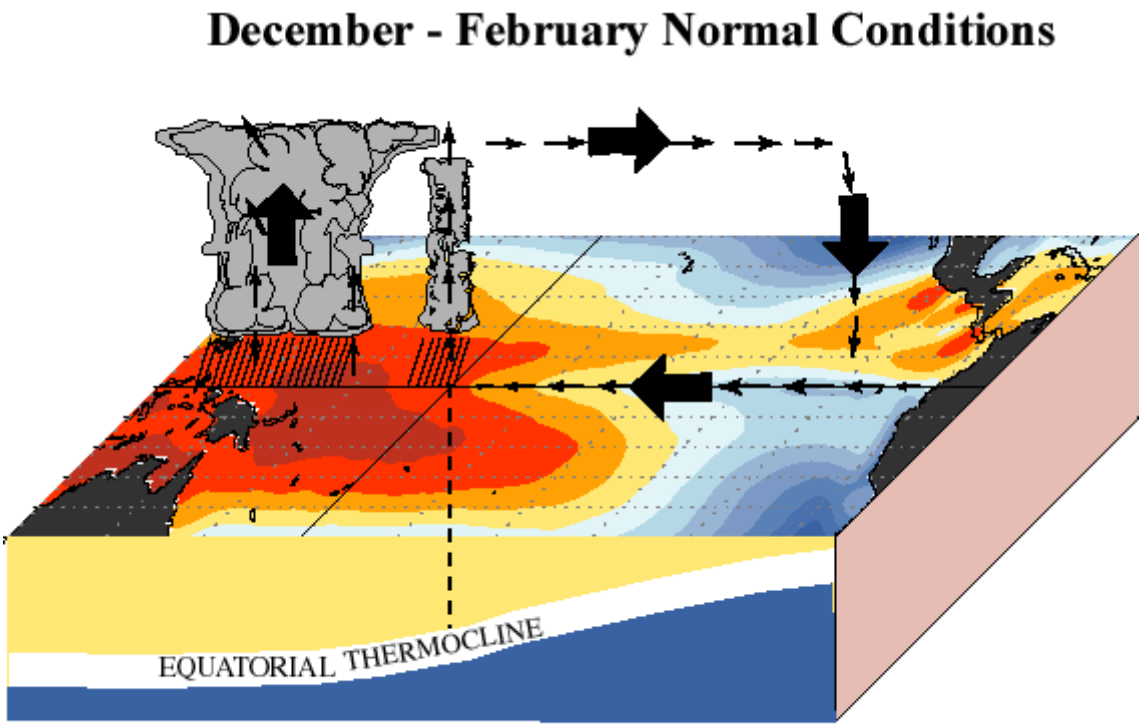
Figur 5. Geografisk fördelning av aktiva ARGO enheter i april 2015. Det totala antalet var då 3847 och på kartan är de färgkodade efter ägarland.

Källa: JCOMMOPS, WMO-IOC



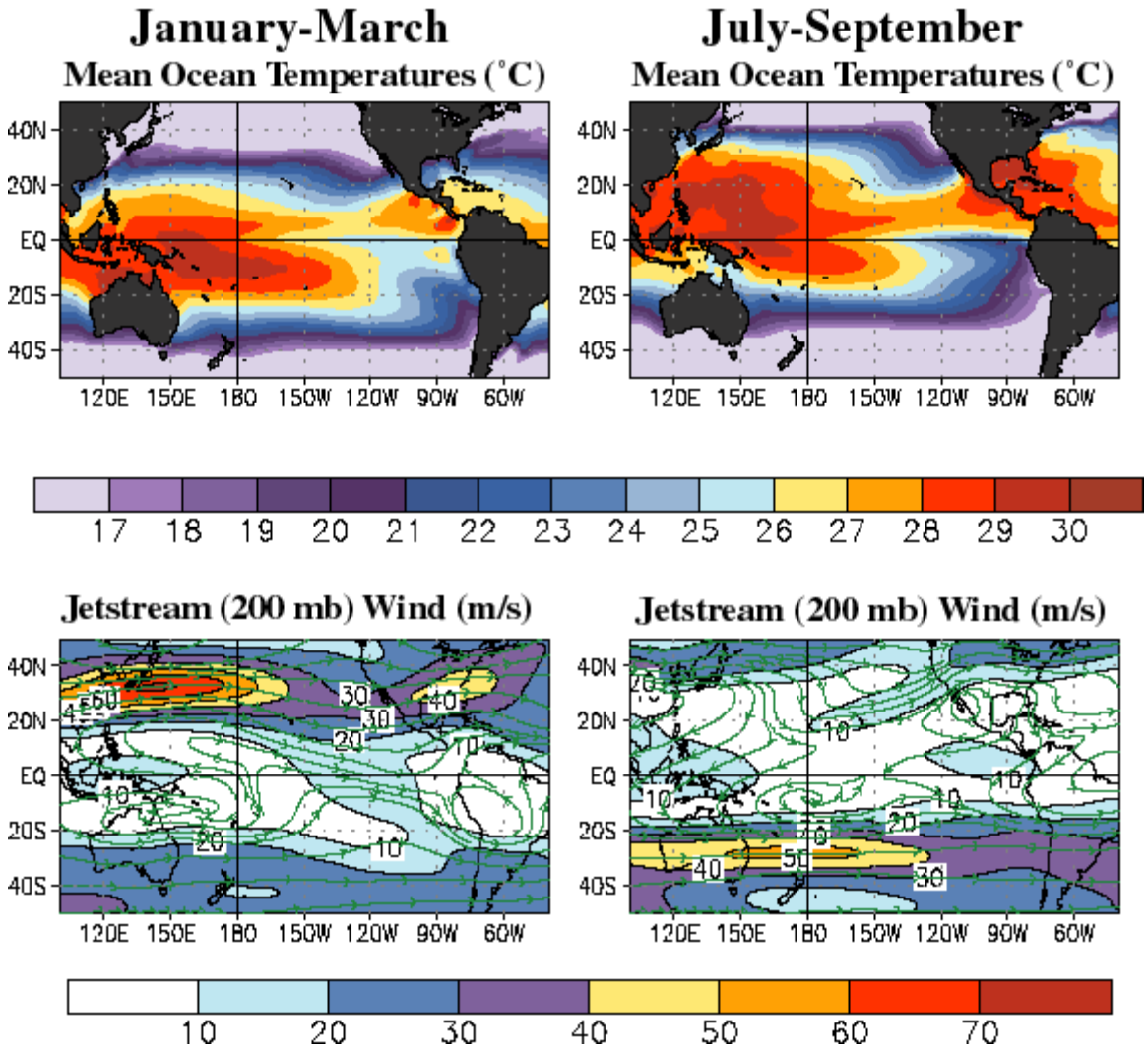
Figur 6. Den årliga cykeln i de klimatologiska medelförhållandena hos havsytans temperatur (SST) i den tropiska delen av Stilla Havet.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



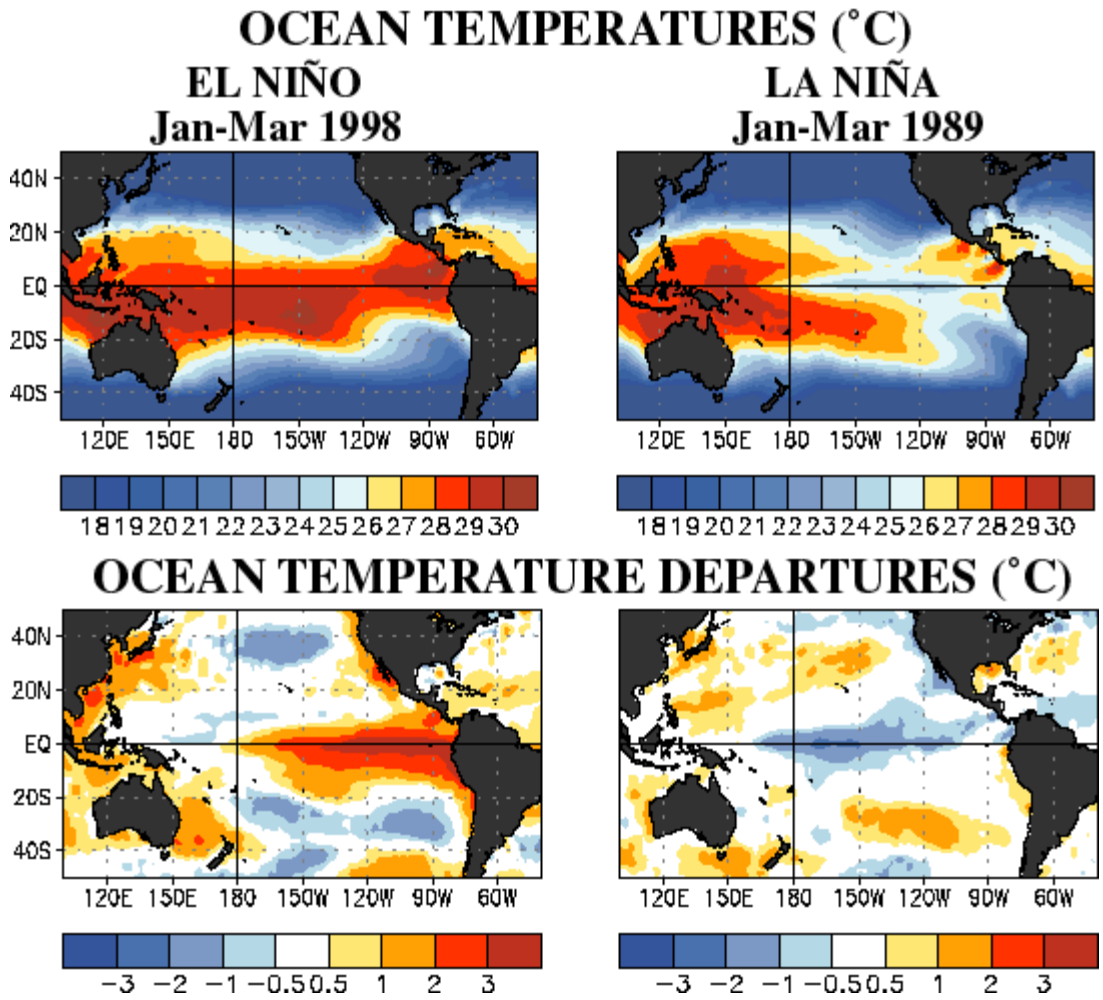
Figur 7. Principskiss av normalförhållandena i tropiska Stilla Havet och i atmosfären ovanför under norra halvklotets vinter.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



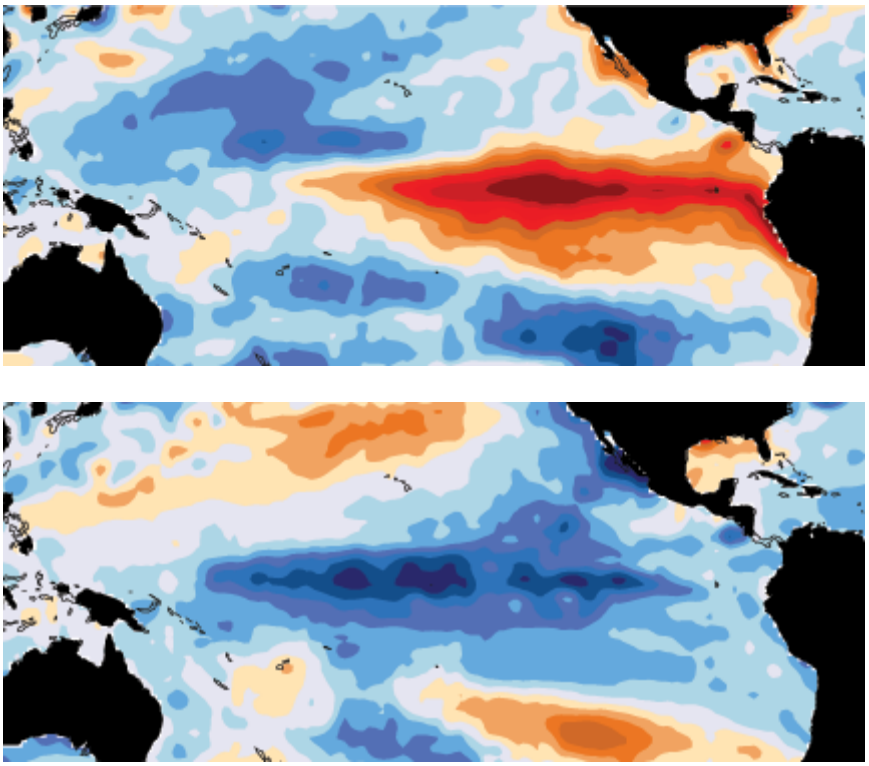
Figur 8. Illustration av hur position och styrka hos den subtropiska jetstömmen under vintersäsongen på båda halvkloten beror av diabatisk uppvärmning av atmosfären som i sin tur är intimt förknippad med fördelningen av SST.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



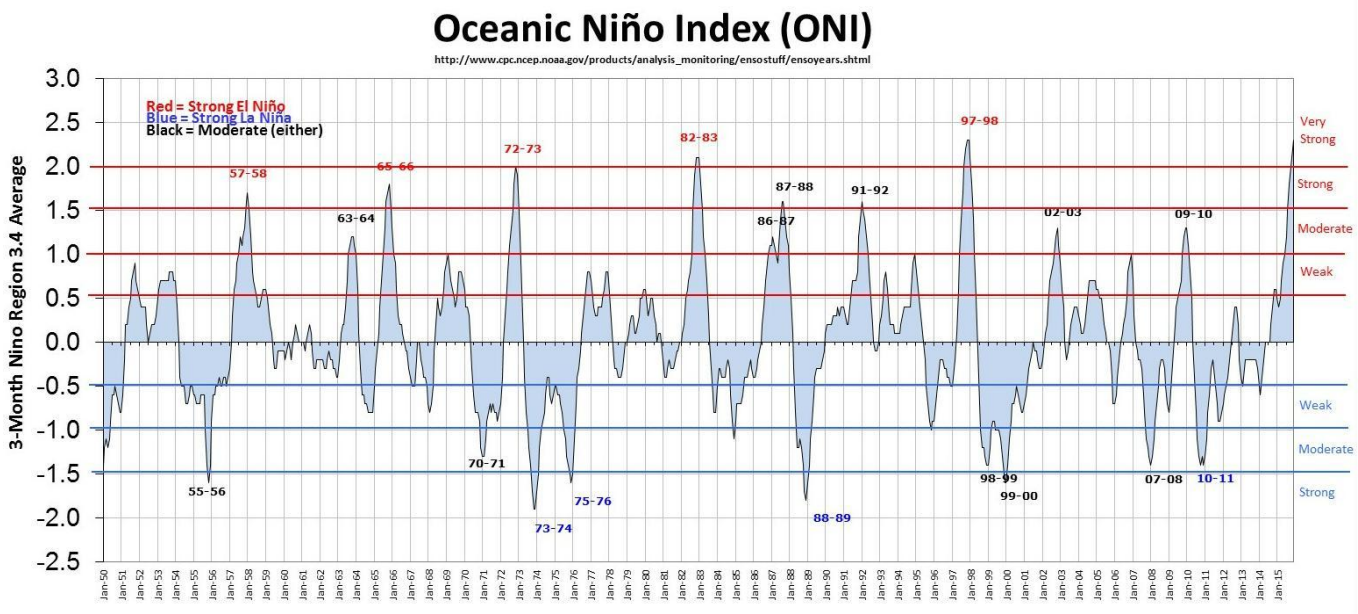
Figur 9. Illustration av de typiska ytvattentemperaturförhållanden som råder under kulmen av en El Niño (vänstra bilderna) respektive en La Niña (högra bilderna). Övre bilderna visar ytvattentemperaturen medan de nedre bilderna visar ytvattentemperaturernas avvikelse från det normala (anomalier).

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



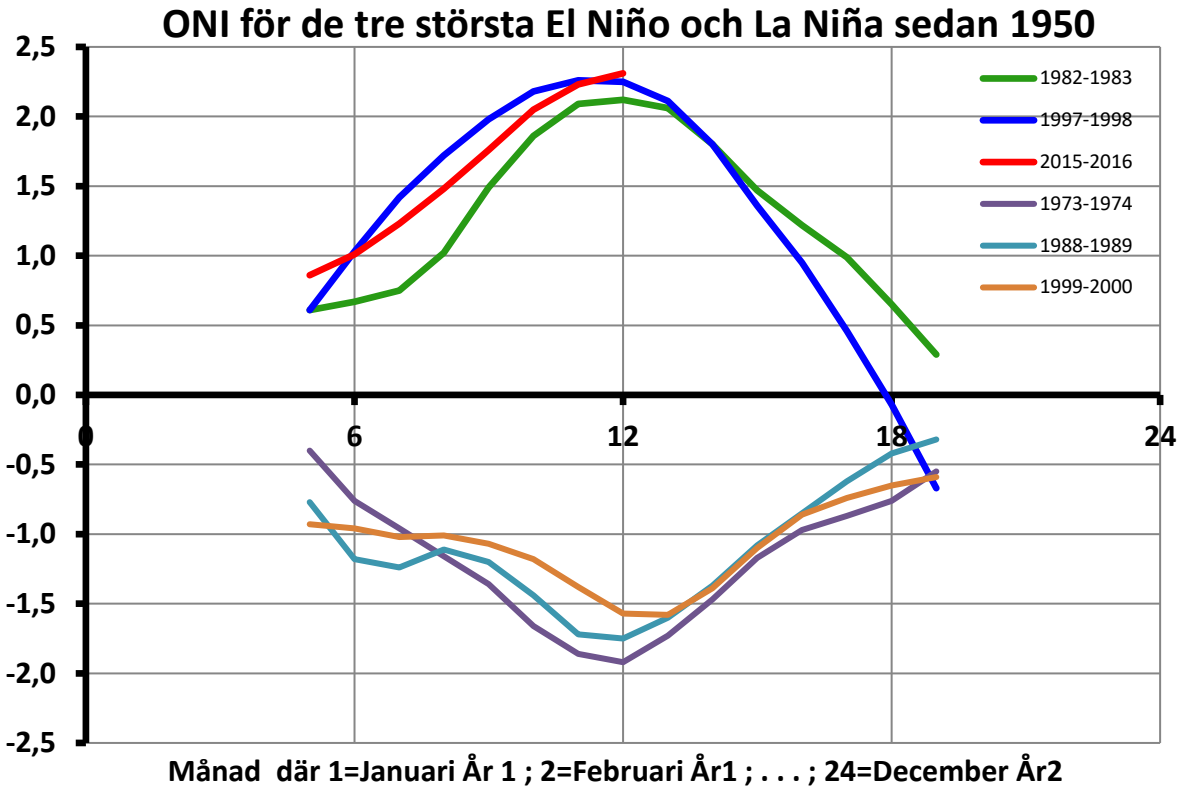
Figur 10. Illustration av de typiska ytvattentemperaturförhållanden som råder under kulmen av en El Niño (övre bilden) respektive en La Niña (nedre bilden). Bilderna visar ytvattentemperaturernas avvikelse från det normala (anomalier).

Källa: Earth System Research Laboratory (ESRL), NOAA

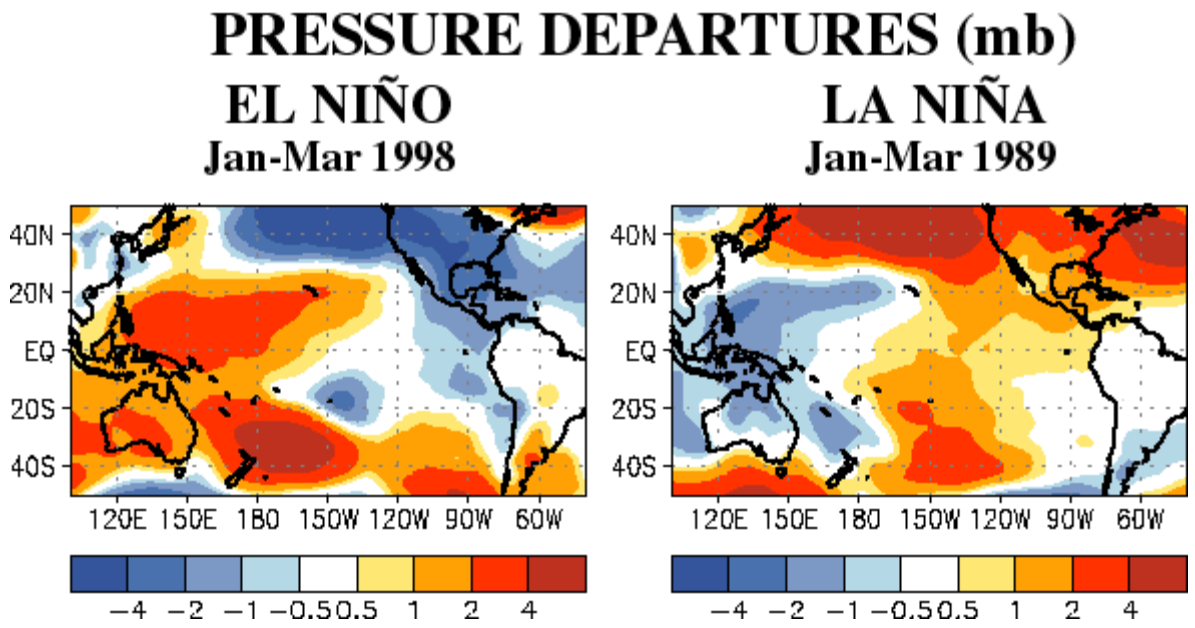


Figur 11. Tidsserie av ett ofta använt index för El Niño/La Niña – det så kallade Ocean Niño Index eller ONI. En El Niño anses inträffa då ONI överstiger värdet 0.5 under fem på varandra följande månader. På motsvarande sätt anses en La Niña inträffa då ONI understiger värdet -0.5 under fem på varandra följande månader. Man kan dessutom klassificera en El Niño/La Niña såsom varande svag, måttlig, stark eller mycket stark beroende på om den någon gång under sin livscykel överstiger värdet 0.5, 1.0 1.5 eller 2.0.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.

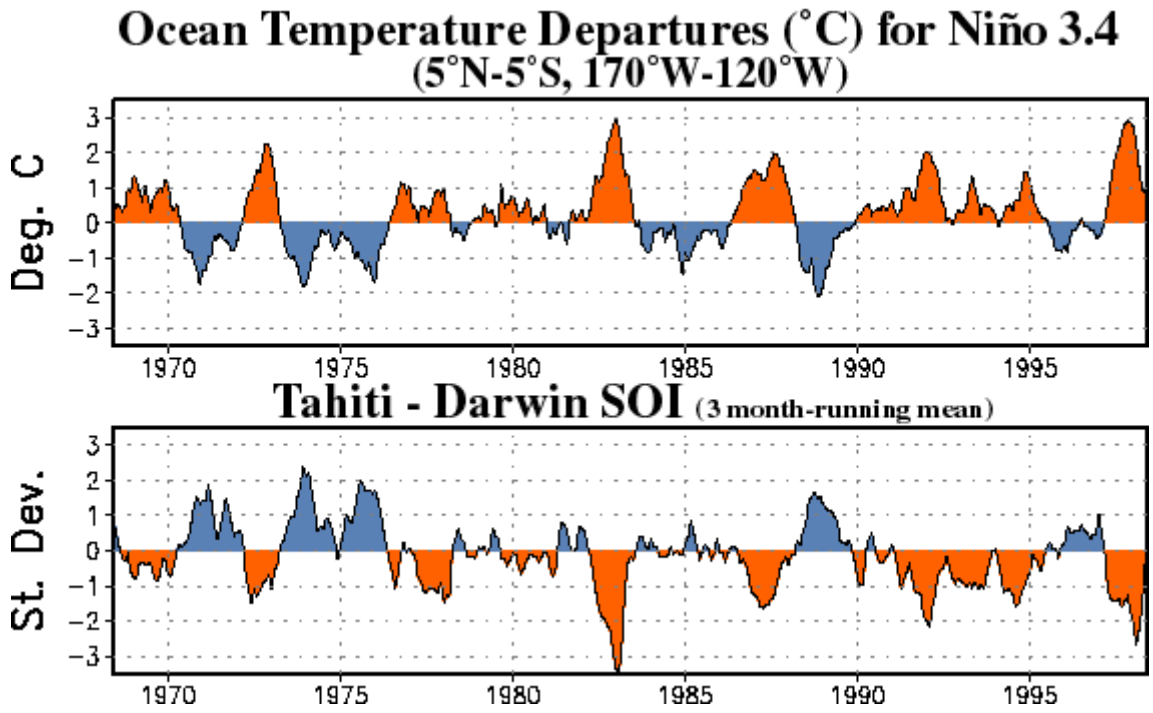


Figur 12. Tidsförloppet hos Ocean Niño Index – ONI - för de tre största El Niño och La Niña som förekommit sedan 1950. Notera att kulmen inträffar omkring juletid plus/minus någon månad, dvs i november-december-januari. De brukar därför sägas vara ”phase-locked to the annual cycle”. Eftersom den typiska varaktigheten på både El Niño och La Niña är ungefär ett år betyder det att det behövs två årtal för en korrekt kronologiskt benämning, t ex 1997-1998 El Niño och 1973-1974 La Niña.



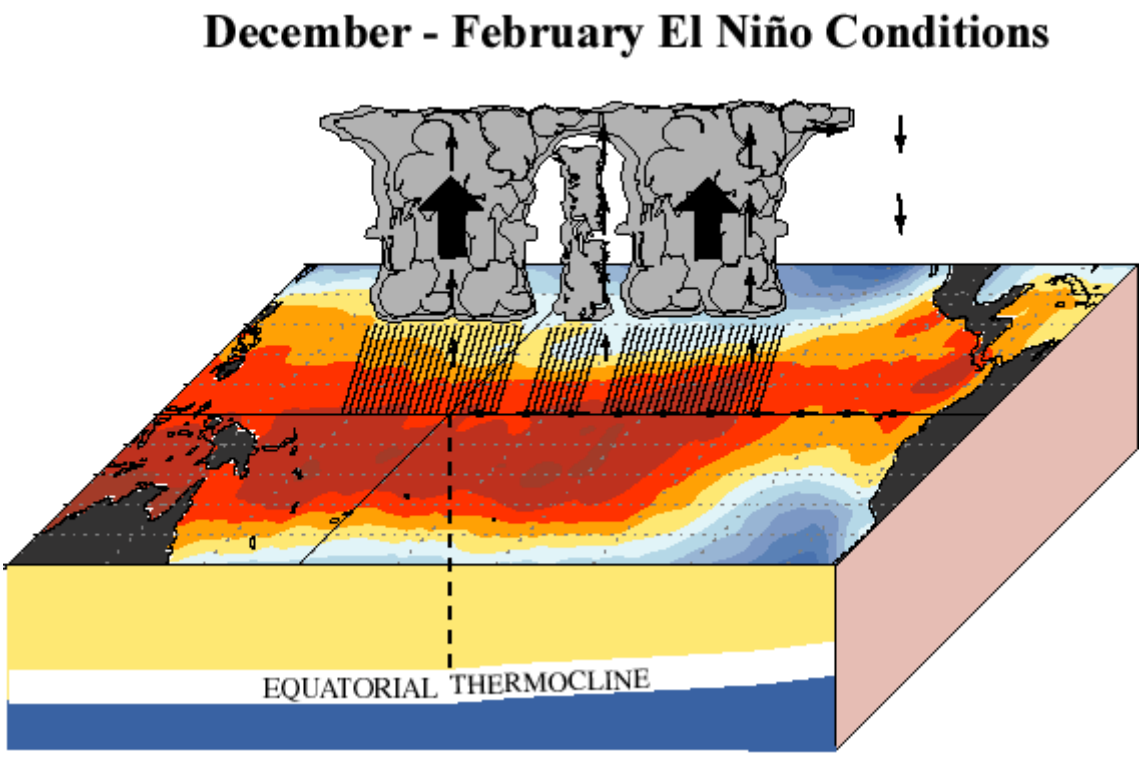
Figur 13. De båda motsatta faserna hos Southern Oscillation (SO). Den vänstra bilden visar en typisk lufttrycksfördelning under den negativa fasen av SO. Den sammanfaller med El Niño och kännetecknas av onormalt högt lufttryck över den maritima kontinenten samtidigt som det är onormalt lågt lufttryck över den östra delen av den tropiska delen av Stilla Havet. Den motsatta fasen av SO visas i den högra bilden. Den inträffar under La Niña med onormalt lågt lufttryck över den maritima kontinenten samtidigt som det är onormalt högt lufttryck över den östra delen av den tropiska delen av Stilla Havet. Southern Oscillation är alltså en gigantisk omförflyttning av massa i atmosfären mellan de östra och västra delarna av de tropiska delarna av Stilla Havet.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



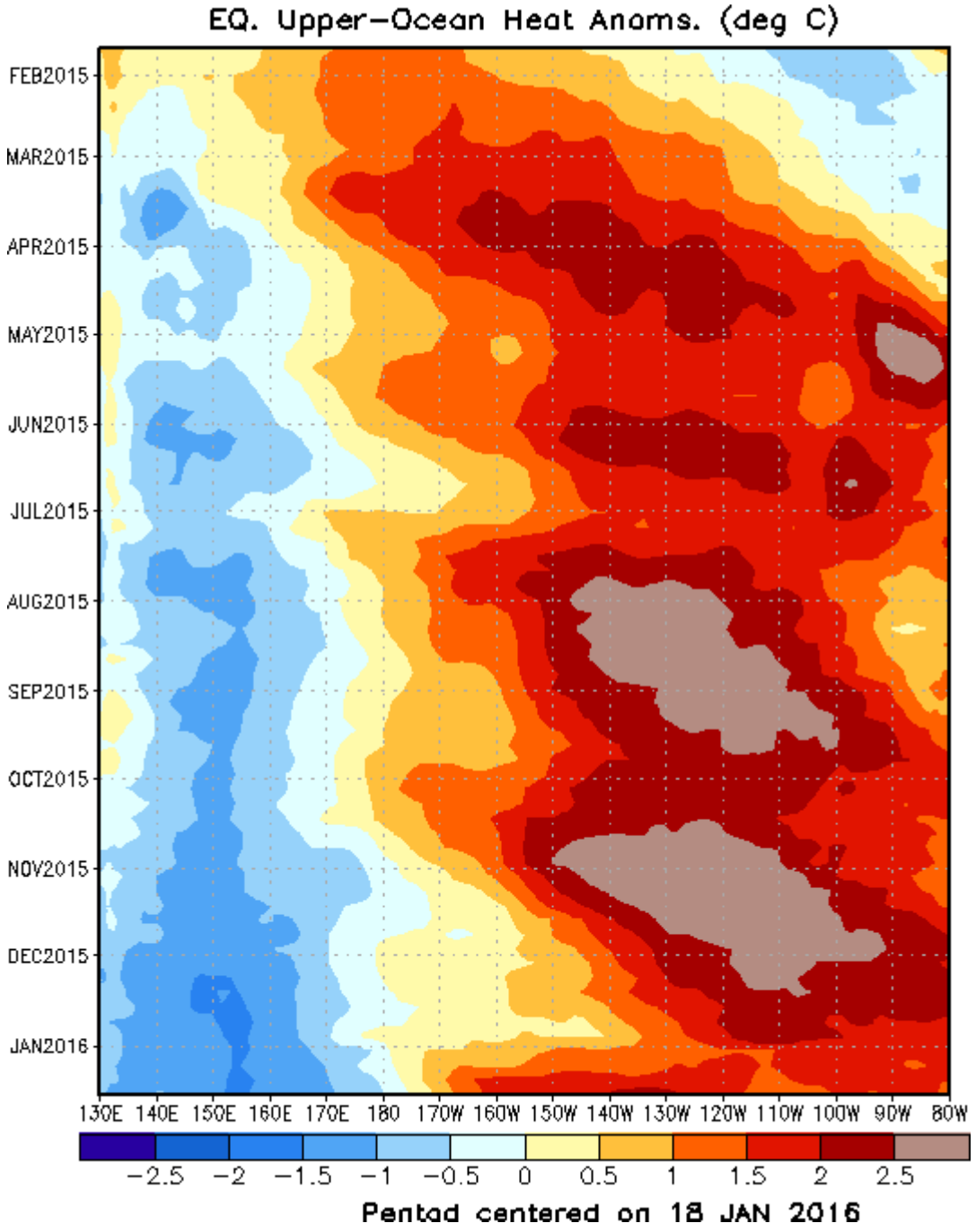
Figur 14. Tidsserie av Ocean Niño Index – ONI - för El Niño/La Niña (övre bilden) samt Southern Oscillation Index – SOI - för Southern Oscillation (nedre bilden).

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



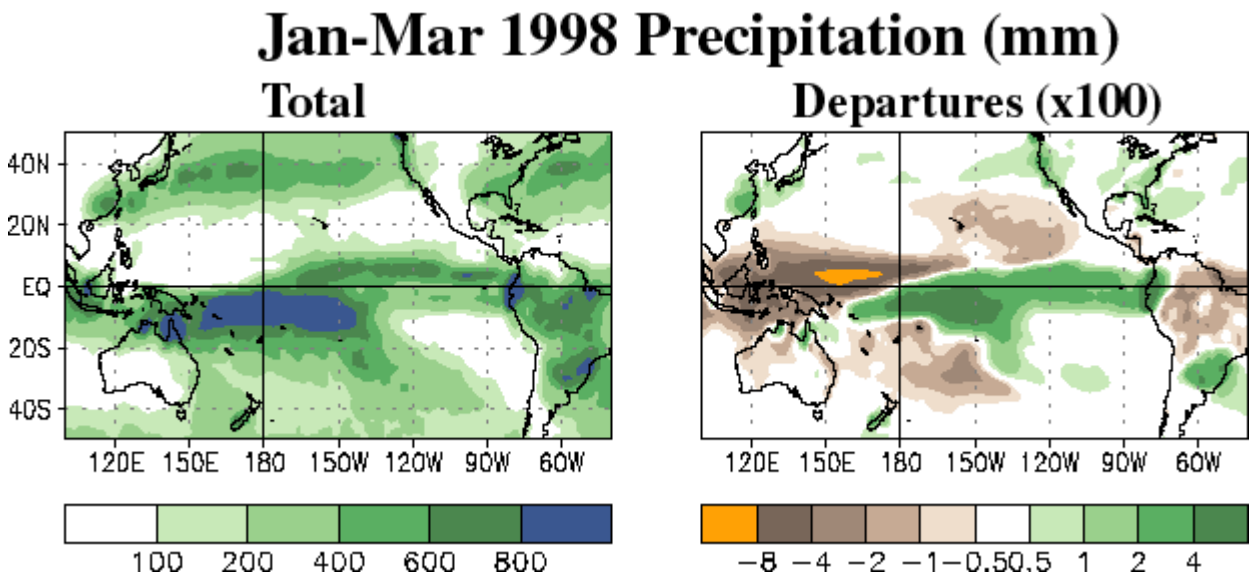
Figur 15. Principskiss av förhållandena i tropiska Stilla Havet och i atmosfären ovanför vid kulmen av en El Niño.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



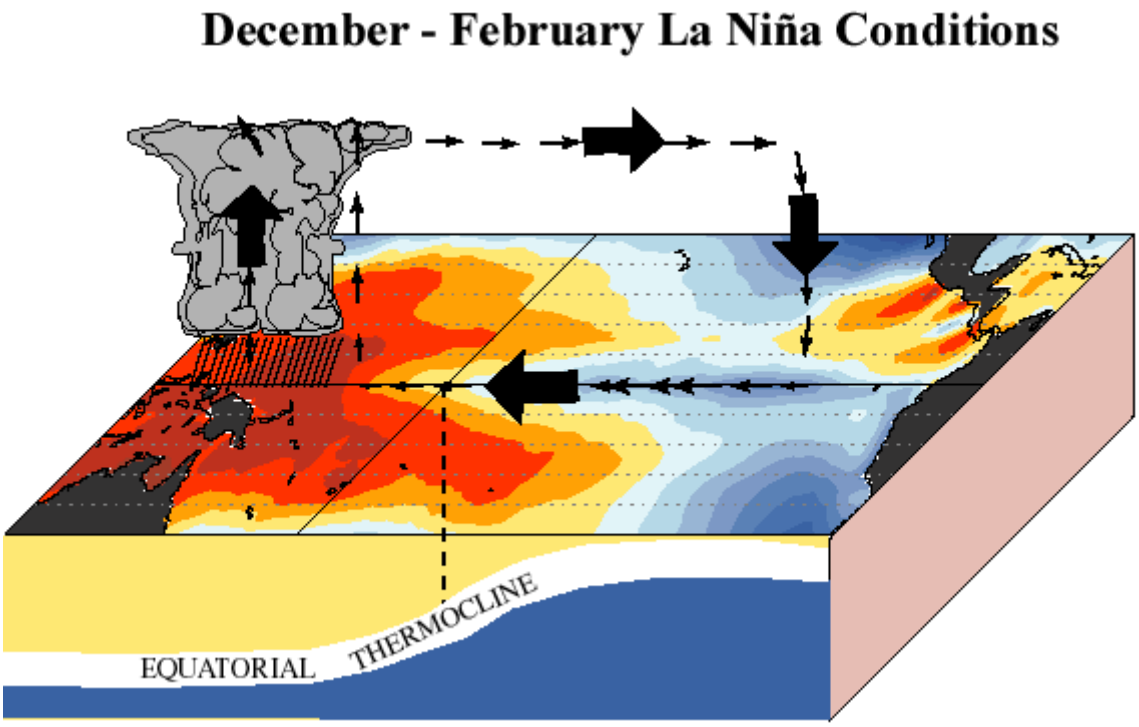
Figur 16. Ett så kallat Hovmöller diagram – tid på y-axeln och longitud på x-axeln – visandes hur värmeinnehållet i havets översta skikt vid ekvatorn utvecklar sig med tiden. Under andra halvåret av 2015 - då en super El Niño utvecklade sig i Stilla Havet - kan man se hur flera stora Kelvin vågor utbreder sig från väster mot öster.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



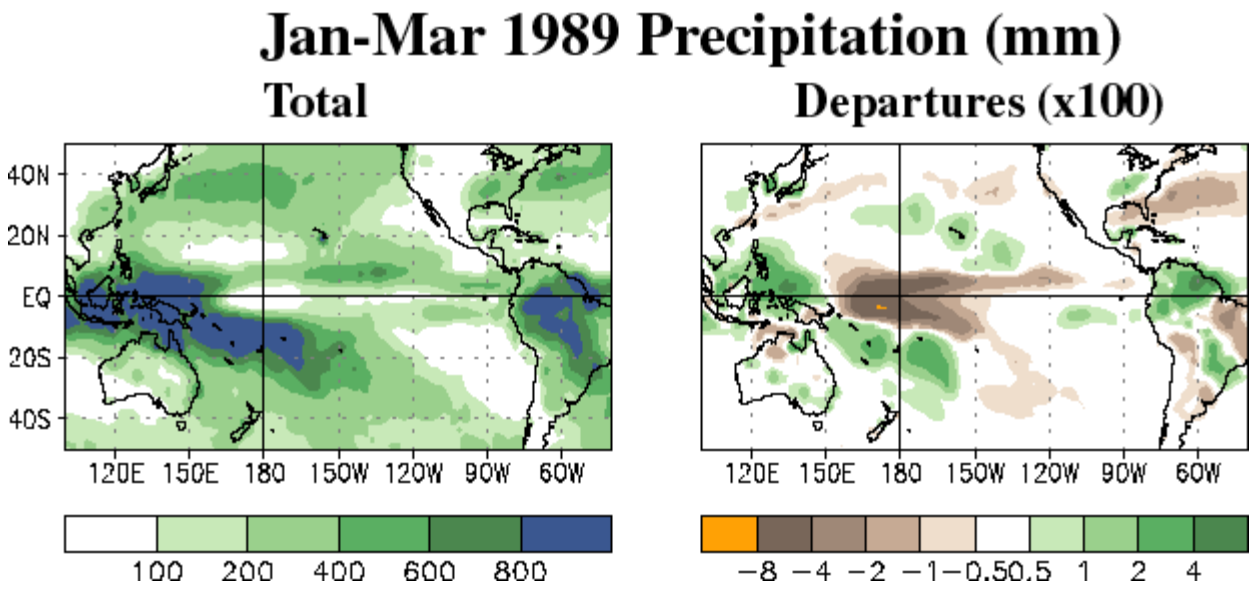
Figur 17. Exempel på nederbördsfördelningen under kulmen av en El Niño (vänstra bilden), samt hur avvikelserna i nederbörd under en El Niño jämfört med normaltillståndet brukar se ut (högra bilden).

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



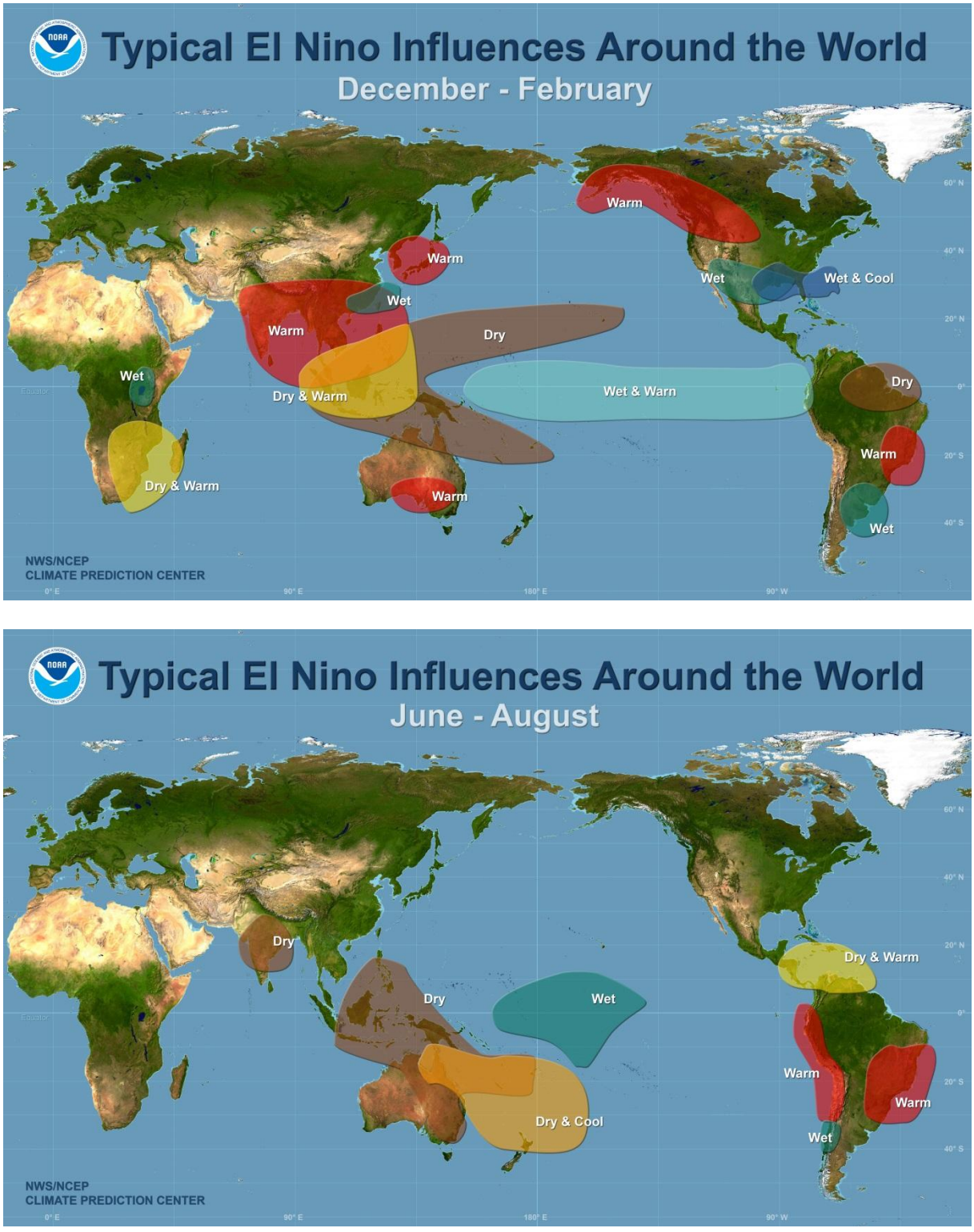
Figur 18. Principskiss av förhållandena i tropiska Stilla Havet och i atmosfären ovanför vid kulmen av en La Niña.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



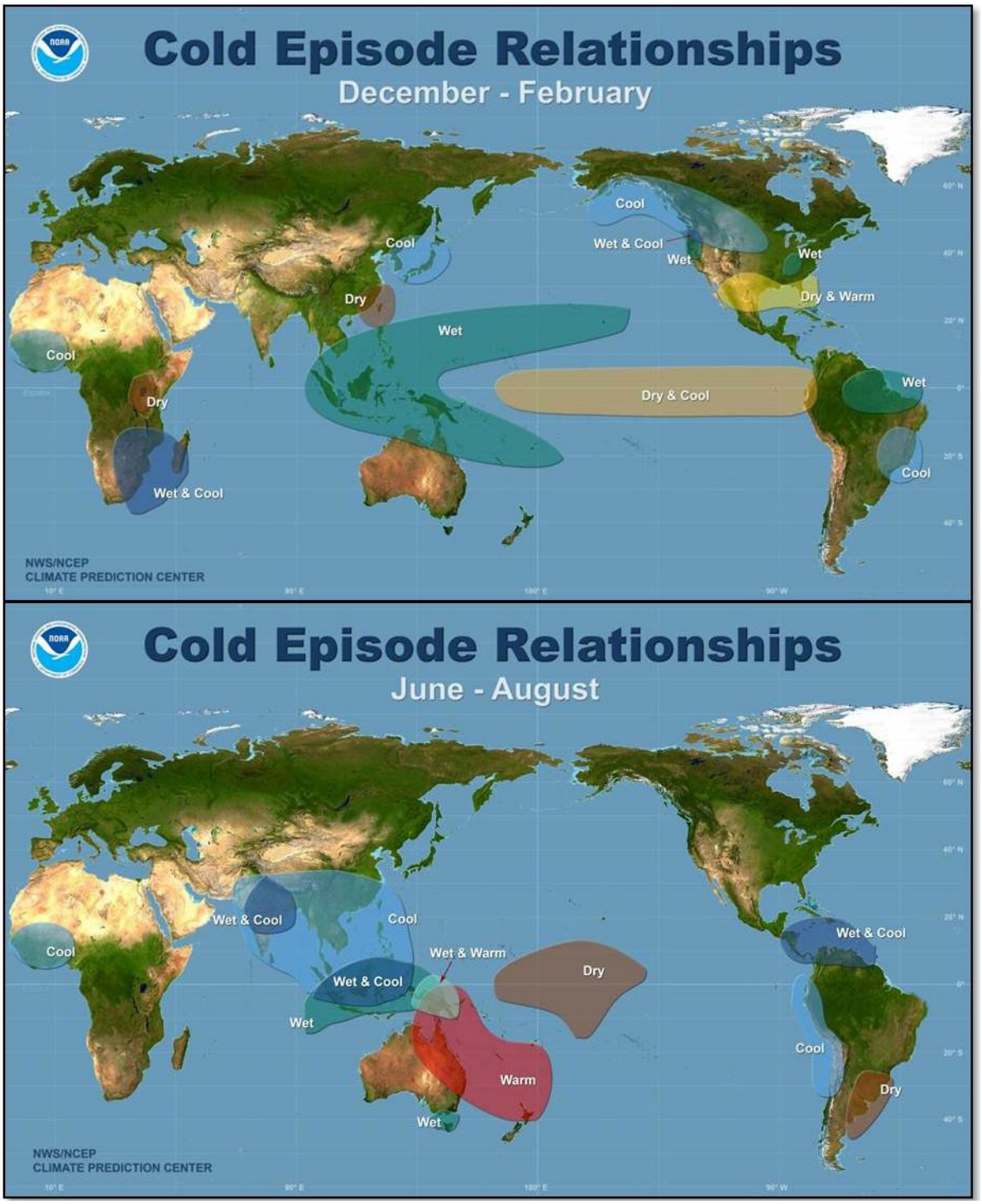
Figur 19. Exempel på nederbördsfördelningen under kulmen av en La Niña (vänstra bilden), samt hur avvikelserna i nederbörd under en La Niña jämfört med normaltillståndet brukar se ut (högra bilden).

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



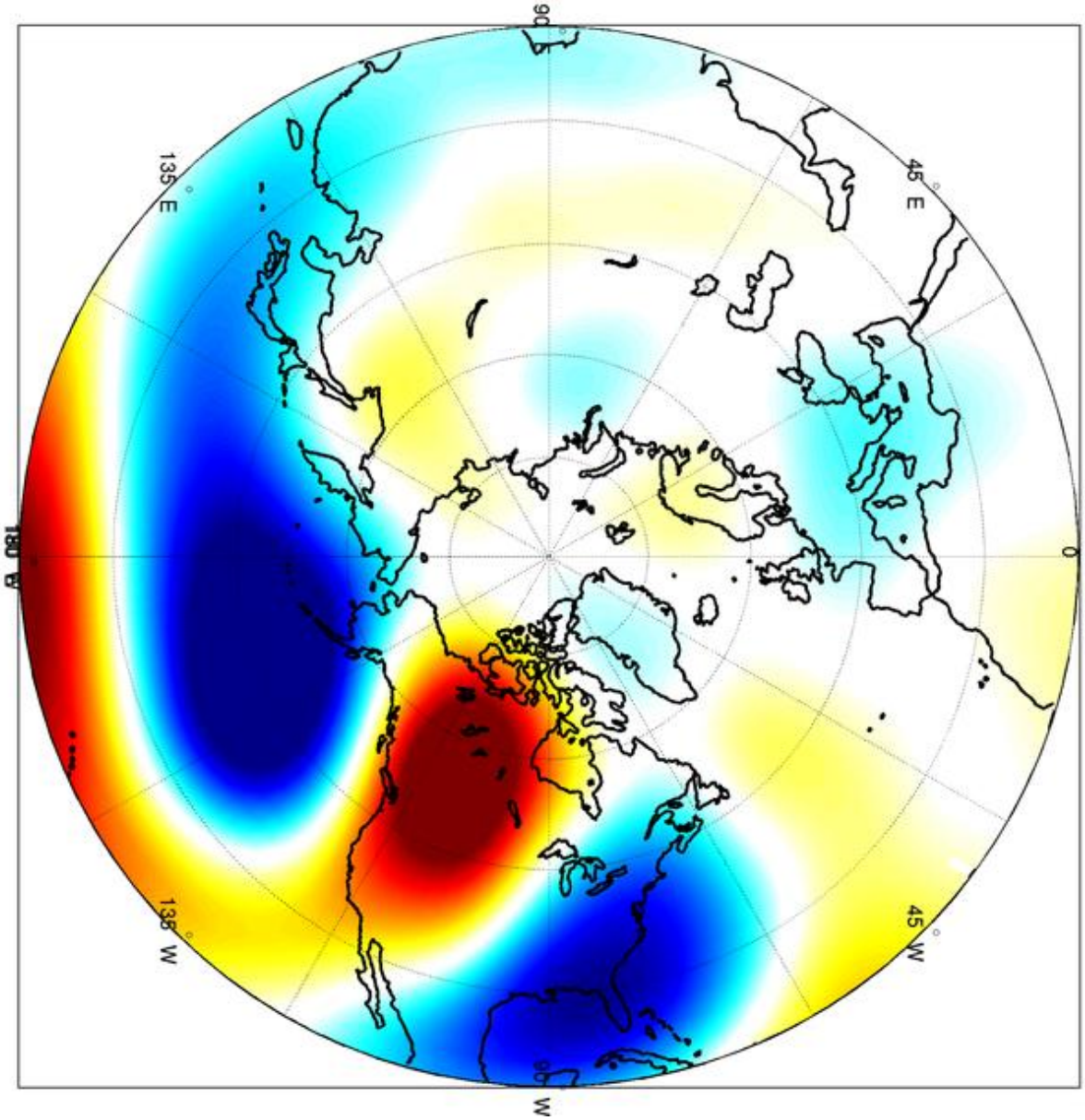
Figur 20. Typiska avvikelser från det normala klimatet runt om i världen under en El Niño. Övre bilden avser förhållandena då El Niño har sin kulmen – dvs vintern – medan den nedre bilden avser förhållandena då El Niño är i sin uppbyggnadsfas – dvs sommaren.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



Figur 21. Som i figur 20 men för La Niña.

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA



Figur 22. Principskiss av PNA - Pacific-North American teleconnection pattern. Det vågtåg som PNA utgör är en av de största och viktigaste manifestationerna av hur atmosfärens lågfrekventa variabilitet är organiserad.

Källa: Department of Atmospheric and Environmental Sciences. University at Albany, State University of New York.

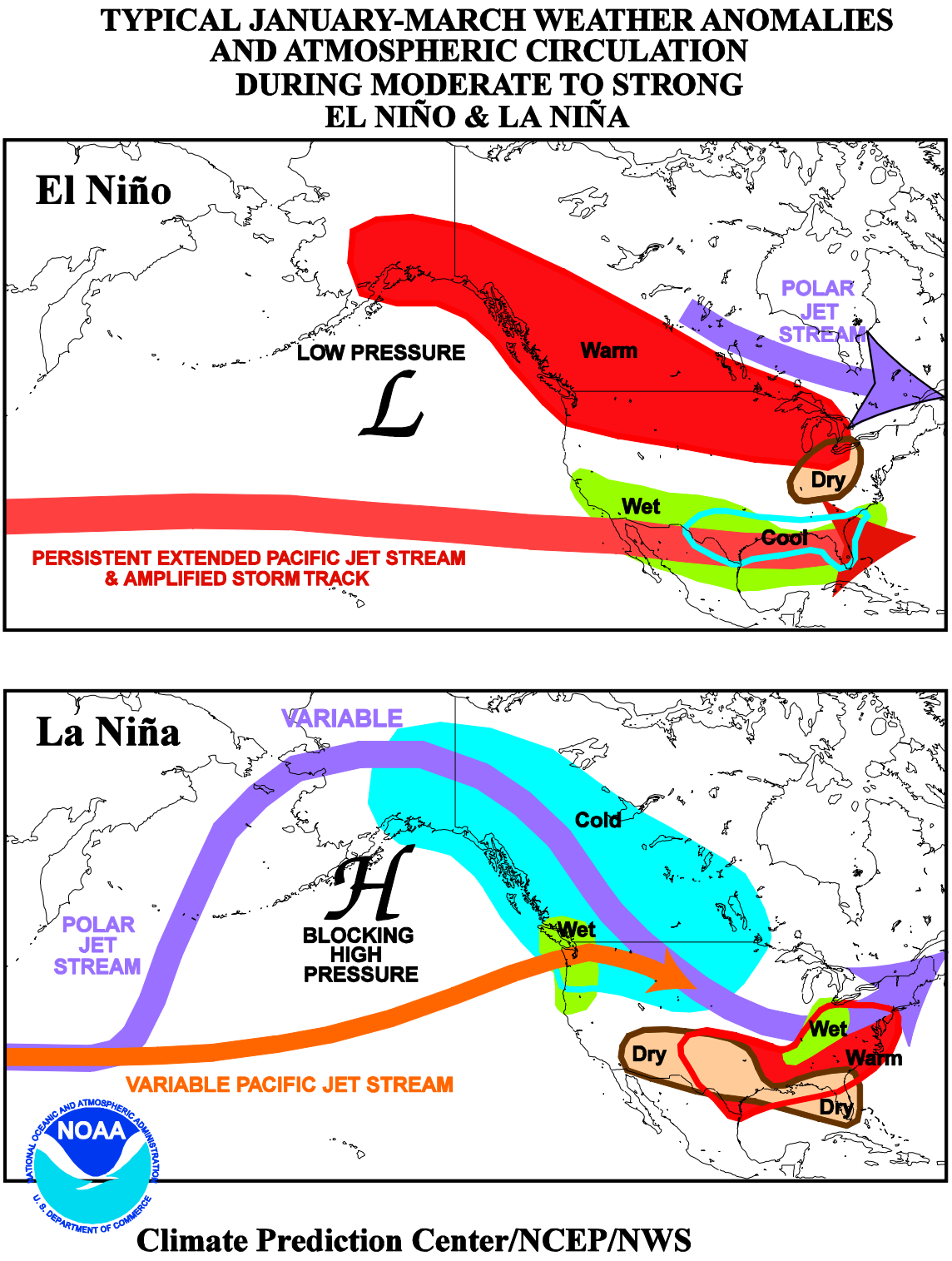
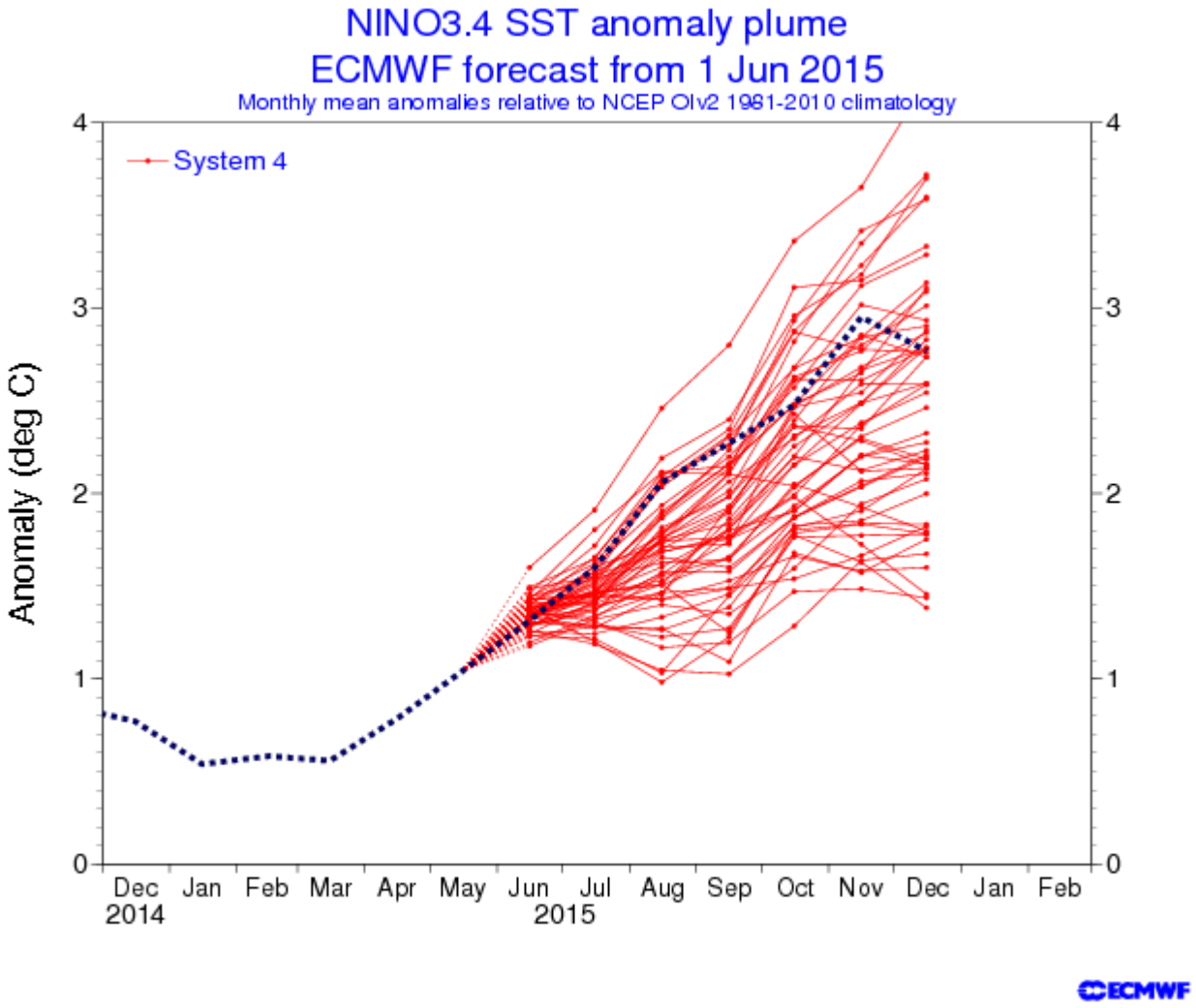


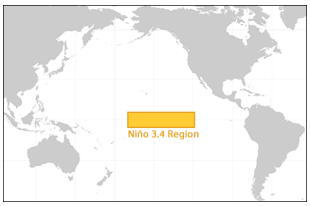
Fig. 23. Förväntade meteorologiska konsekvenser över Nordamerika vid kulmen av en El Niño (övre bilden) respektive en La Niña (nedre bilden).

Källa: Climate Prediction Center (CPC), NCEP/NWS/NOAA.



Figur 24. Realtidsprognos av ENSO utfärdad av ECMWF i början av juni 2015. Prognosen avser avvikelsen från den klimatologiskt normala havsytetemperaturen (SST) i ett område – Nino 3.4 – i centrala ekvatoriella Stilla Havet.

Källa: ECMWF.



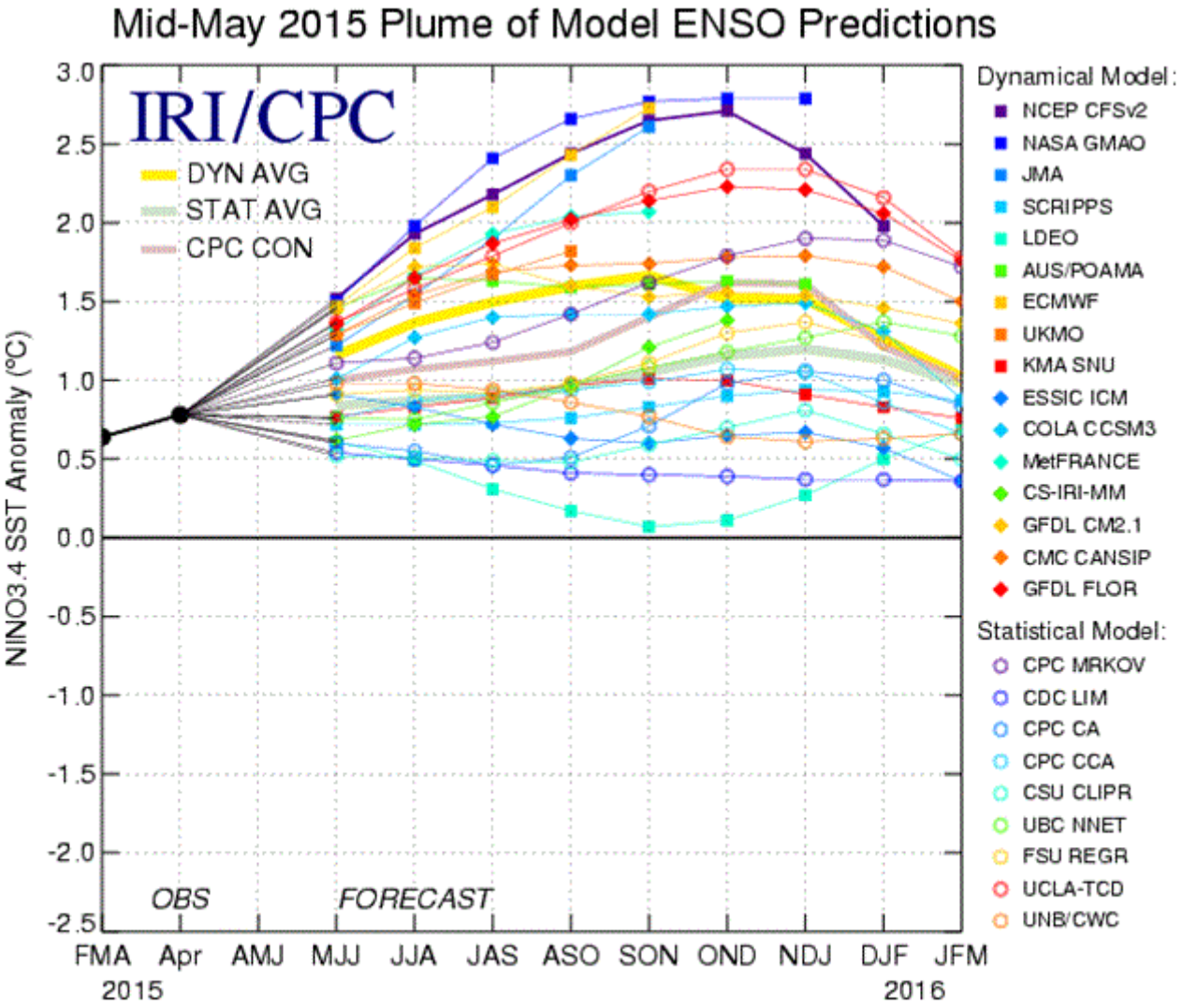
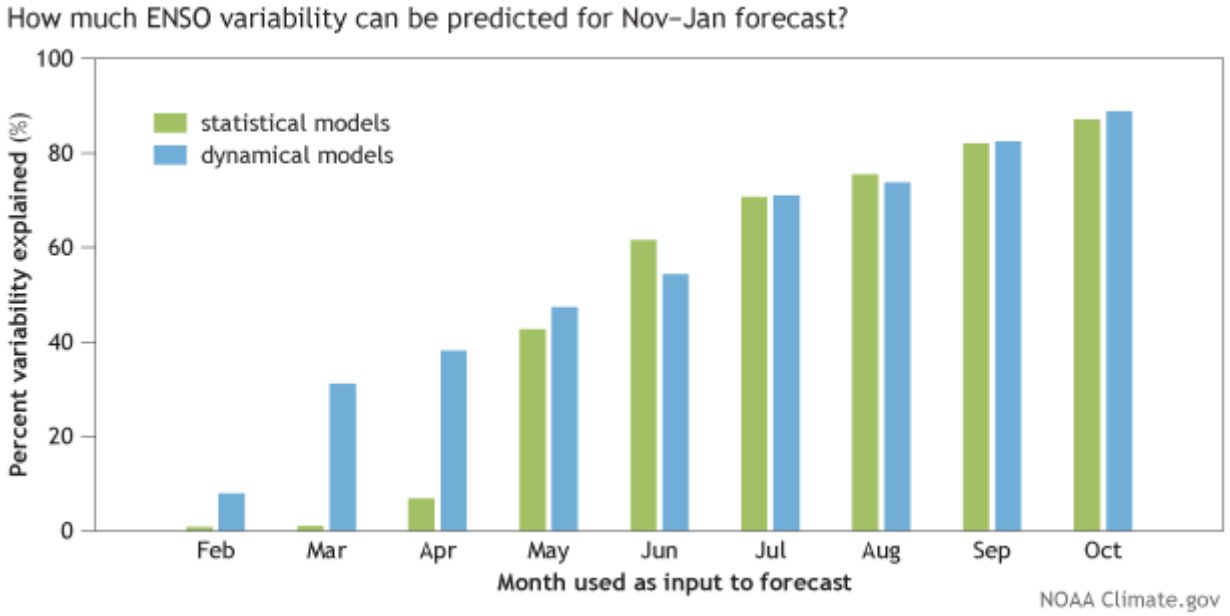


Figure 6. Forecasts of sea surface temperature (SST) anomalies for the Niño 3.4 region (5°N-5°S, 120°W-170°W). Figure updated 19 May 2015.

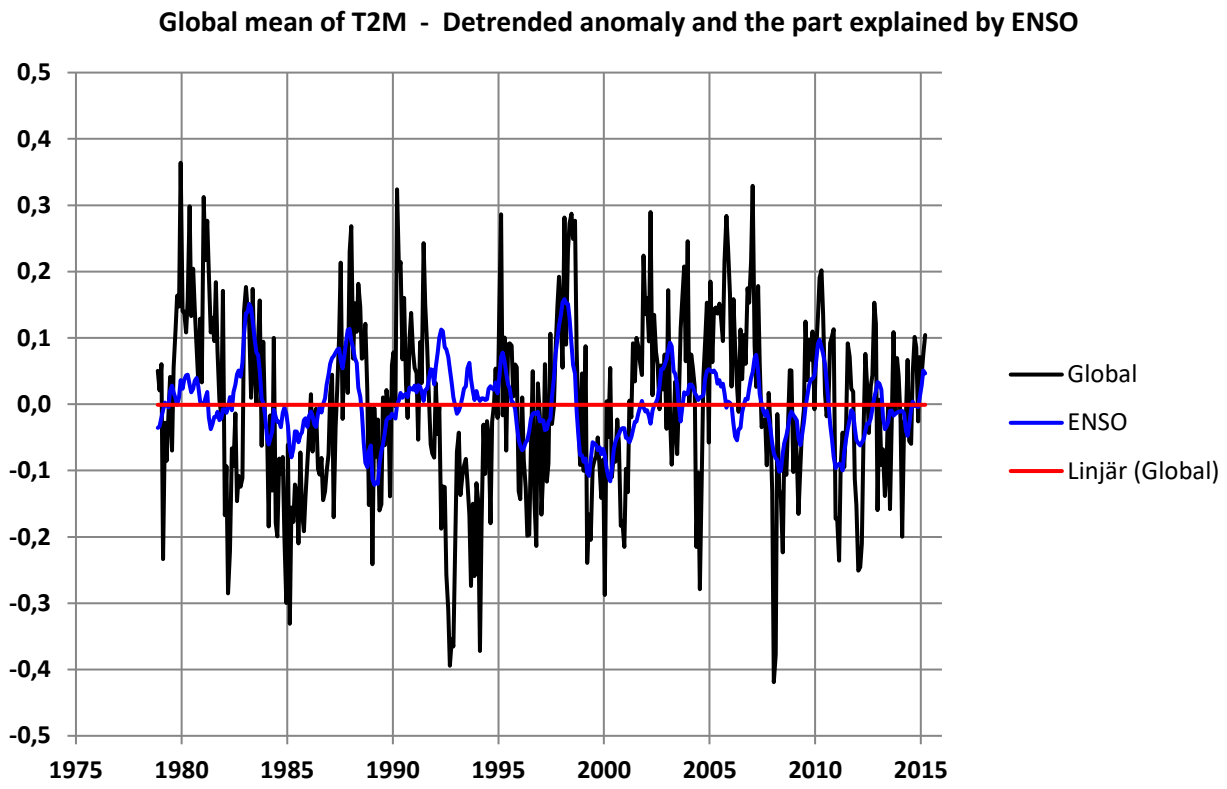
Figur 25. Realtidsprognoser av ENSO framställda av 25 olika statistiska och dynamiska modeller utfärdade i mitten av maj 2015. Prognoserna avser avvikelsen från den klimatologiskt normala havsytetemperaturen (SST) i ett område – Nino 3.4 – i centrala ekvatoriella Stilla Havet.

Källa: International Research Institute for Climate and Society (IRI), Columbia University, USA.

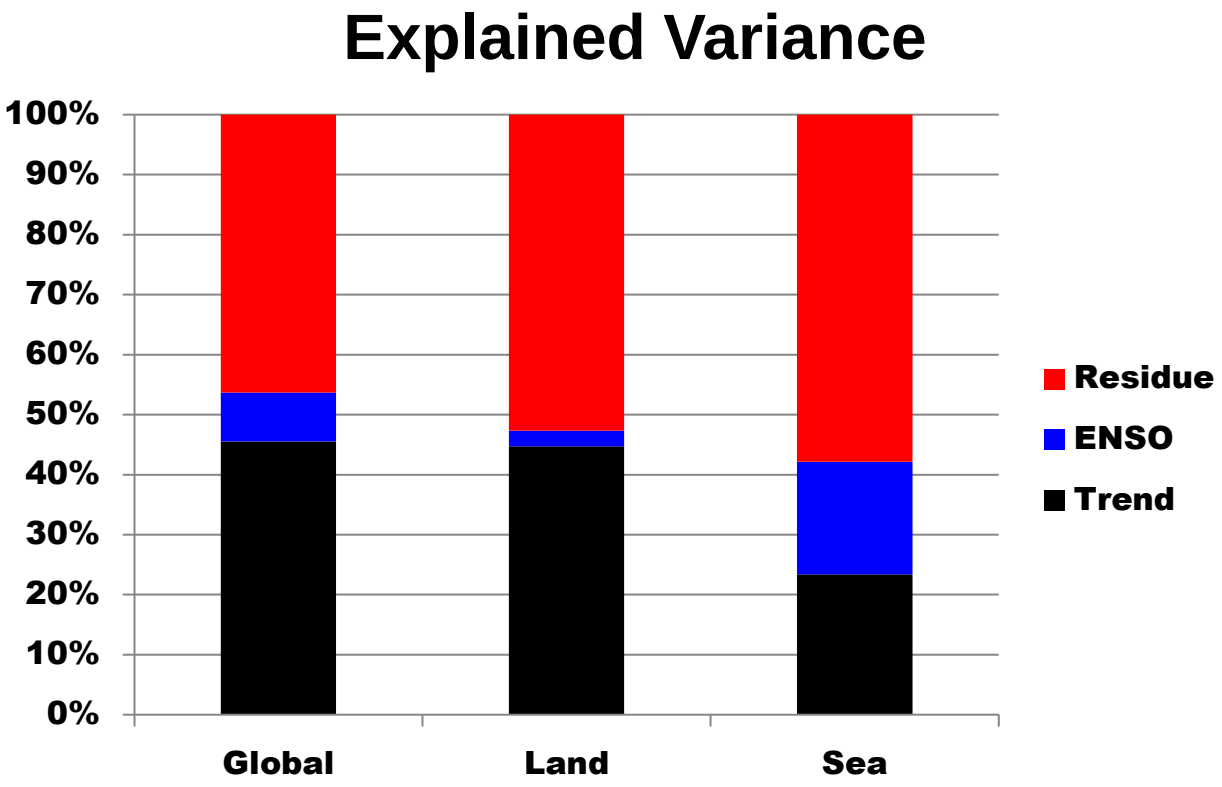


Figur 26. Jämförelse av kvaliteten hos ENSO prognoser mellan prognoser gjorda med hjälp av statistiska modeller (gröna staplar) och med hjälp av dynamiska modeller (blåa staplar). Prognoserna avser avvikelsen från den klimatologiskt normala havsytetemperaturen (SST) i ett område – Nino 3.4 – i centrala ekvatoriella Stilla Havet för perioden november-januari

Källa: Barnston et al. 2012 och NOAA.



Figur 27. Tidsserie av den globala medeltemperaturen vid markytan efter det att den långsiktiga trenden mot allt högre temperaturer som är associerade med den av människan förorsakade förändringen i atmosfärens sammansättning har subtraherats (svart kurva). Den del av ovanstående som kan ”förklaras” av ENSO representeras av den blå kurvan.



Figur 28. Kvantifiering av hur stor del av den totala variansen hos den globala medeltemperaturen vid markytan som kan ”förklaras” av (i) den långsiktiga trenden mot allt högre temperaturer som är associerad med den av människan förorsakade förändringen i atmosfärens sammansättning (svart stapel), (ii) ENSO (blå stapel), och (iii) all annan naturlig variabilitet – förutom ENSO – som förekommer i klimatsystemet (röd stapel). Denna uppdelning i ”förklarad” varians är gjord för jorden som helhet (vänstra stapeln), jorden landområden (mellersta stapeln), och jordens havsområden (högra stapeln).