



# El Sistema Climático

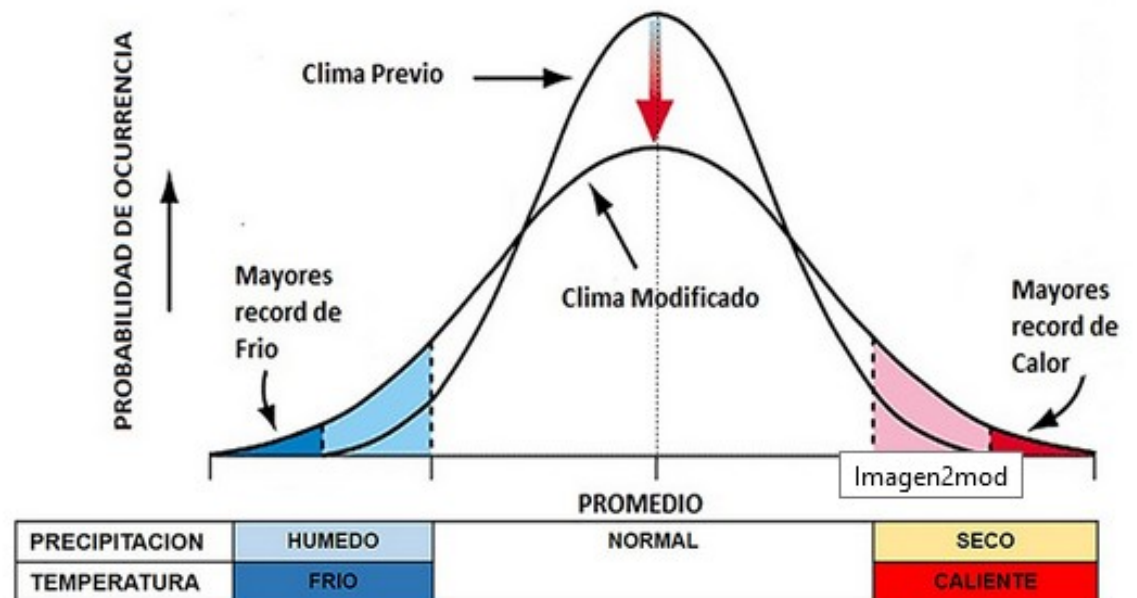
## Maestría en Geociencias

2023

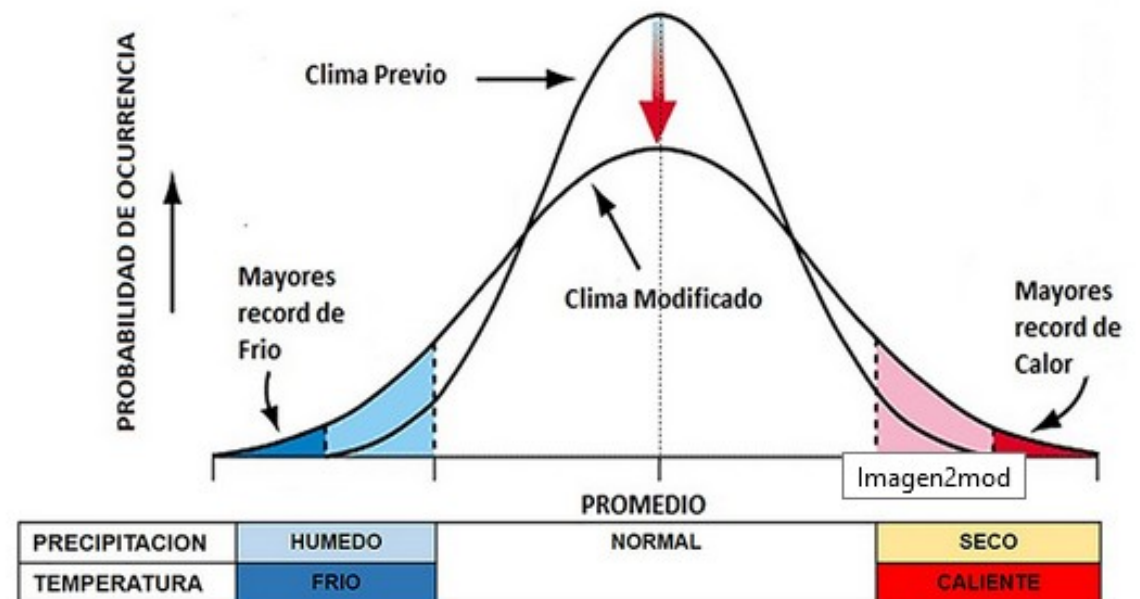
# Variabilidad Climática Natural

Modos de variabilidad climáticos

La variabilidad climática es una medida de la fluctuación de distintas variables, como pueden ser las temperaturas o las lluvias. En general, estas variables responden a un ciclo, o dicho de otra forma, oscilan alrededor de un estado de equilibrio. Pero, ¿qué genera estas fluctuaciones?

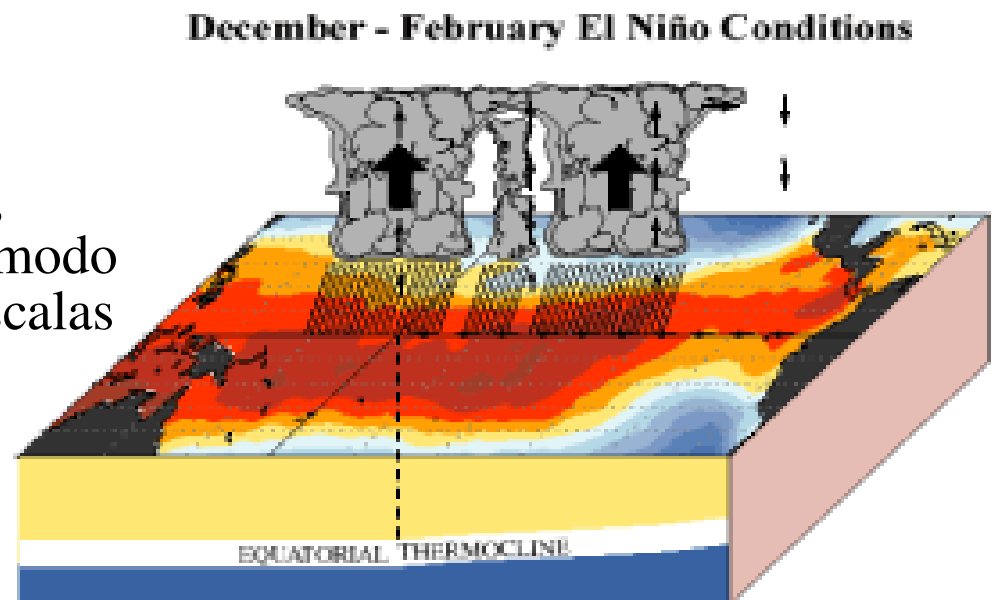


- Para estudiar la variabilidad climática es necesario definir un comportamiento del clima promedio durante un período de tiempo determinado.
- Nos referimos a la oscilaciones que ciertas magnitudes pueden tener respecto a sus valores medios.
- El estudio de la variabilidad climática se basa en la búsqueda de estos “modos de variabilidad”, de su evolución espacio-temporal y de la comprensión de los mecanismos físicos actuantes.



- No se tiene un inventario completo de estos patrones regionales ni entendemos perfectamente los mecanismos que los generan.
- Estos patrones varían en muchas escalas de tiempo y espacio y afectan el clima de diferentes regiones del planeta (lluvias, temperatura, ocurrencia de ciclones, huracanes).
- La exploración de estos modos de variabilidad es una forma de estudiar la predictibilidad del sistema climático.

El Niño se destaca por su intensidad, cobertura espacial e impactos. Es el modo de variabilidad más importante en escalas interanuales.



## La atmósfera tiene modos de variabilidad propios

- Modo Anular del Sur (SAM, Southern Annular Mode)
- Oscilación del Atlántico Norte (NAO, North Atlantic Oscillation)
- Patrones Pacífico - América del Sur (PSA, Pacific-South American modes).

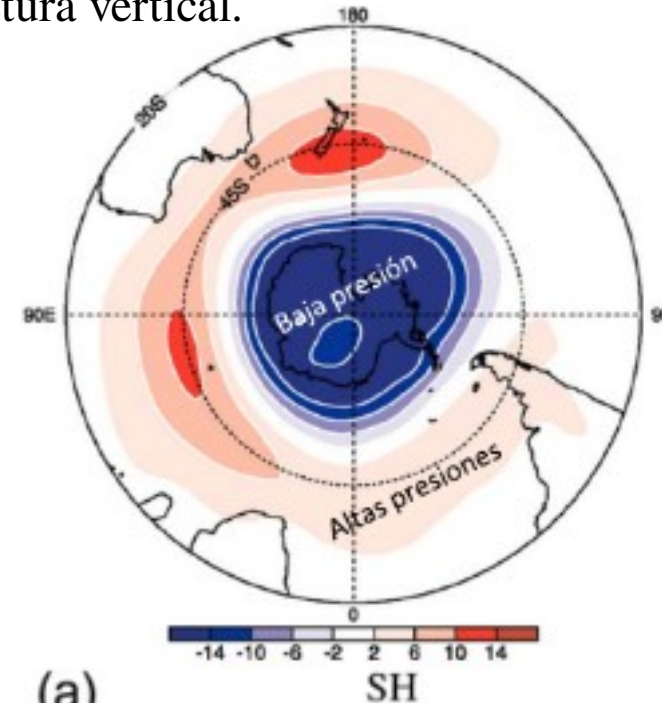
## Otros modos de variabilidad, donde el océano juega un rol importante incluyen

- Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, Pacific Decadal Oscillation)
- Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, Atlantic Multidecadal Oscillation).

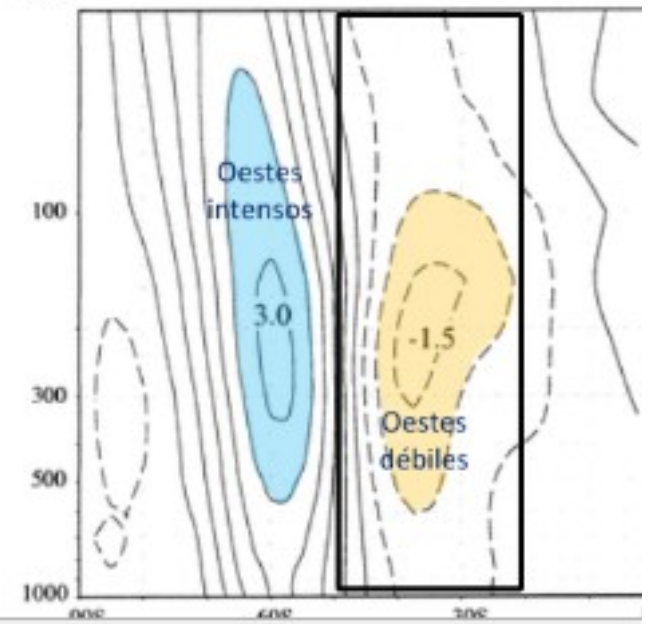
## Modo Anular del Sur

- Es el principal modo de variabilidad en escalas de tiempo mayores a meses en la circulación de la atmósfera al S de 20°S.
- Se define como un cinturón de vientos del W, que se mueve hacia el norte o el sur en su modo de variabilidad
  - En su fase positiva, este modo anular se contrae por el cinturón de vientos del oeste hacia Antártida; y, en su fase negativa implica este cinturón en movimiento hacia el ecuador
- Es zonalmente simétrico.
- Ocupa toda la tropósfera con el mismo signo.

Fase positiva de SAM en superficie y estructura vertical.

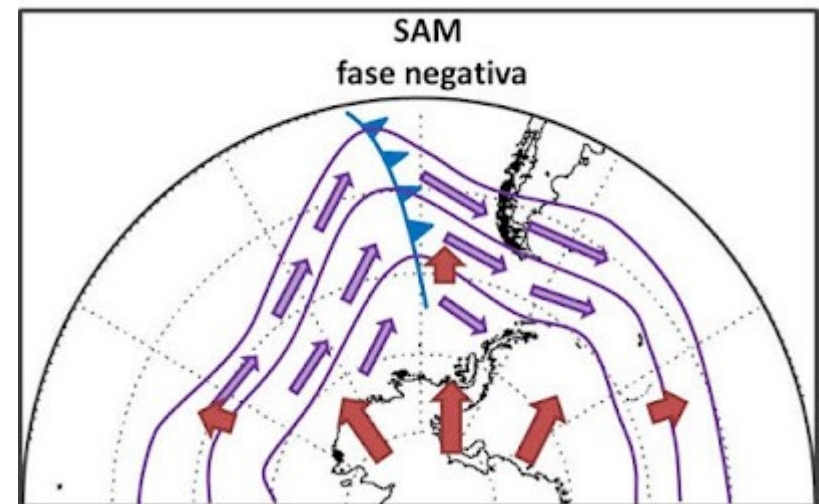
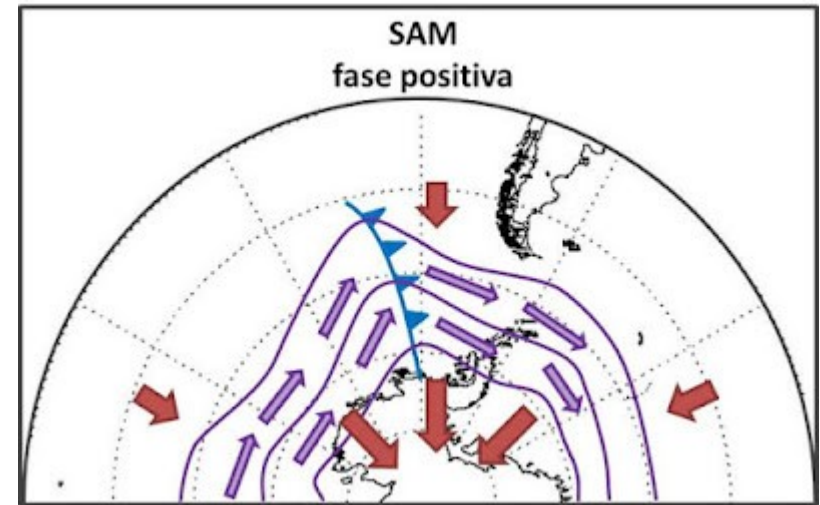


(a)



## Modo Anular del Sur

- Afecta la intensidad y posición de los frentes y otros sistemas de latitudes medias en el S de América del Sur.
- **Fase +:** Cinturón de vientos del W se desplaza hacia el sur (se contrae hacia la Antártida).
  - Limita la penetración de los frentes fríos, tiende a producir condiciones más estables.
  - Se asocia a anomalías + de P en el S de AS y - sobre la Antártida.
- **Fase -:** Cinturón de vientos del W se expande hacia el N.
  - Ayuda al ingreso a AS de frentes fríos provenientes del Sur. Se asocia con mayores pp y menores T.
  - En el campo de P se observan anomalías - en el sur de AS y anomalías + sobre la Antártida.
  - El mayor efecto de la fase - se produce en primavera. Provoca un aumento de la convergencia de humedad y un incremento de la precipitación sobre el SE de Sudamérica.

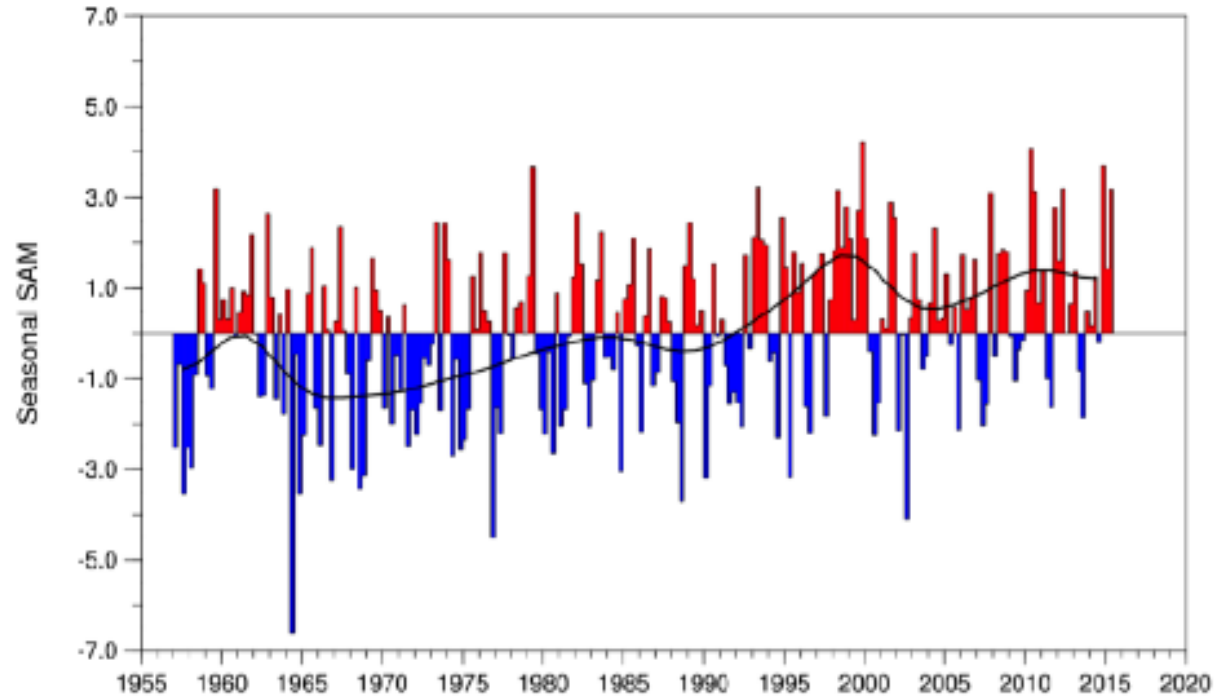




## Modo Anular del Sur

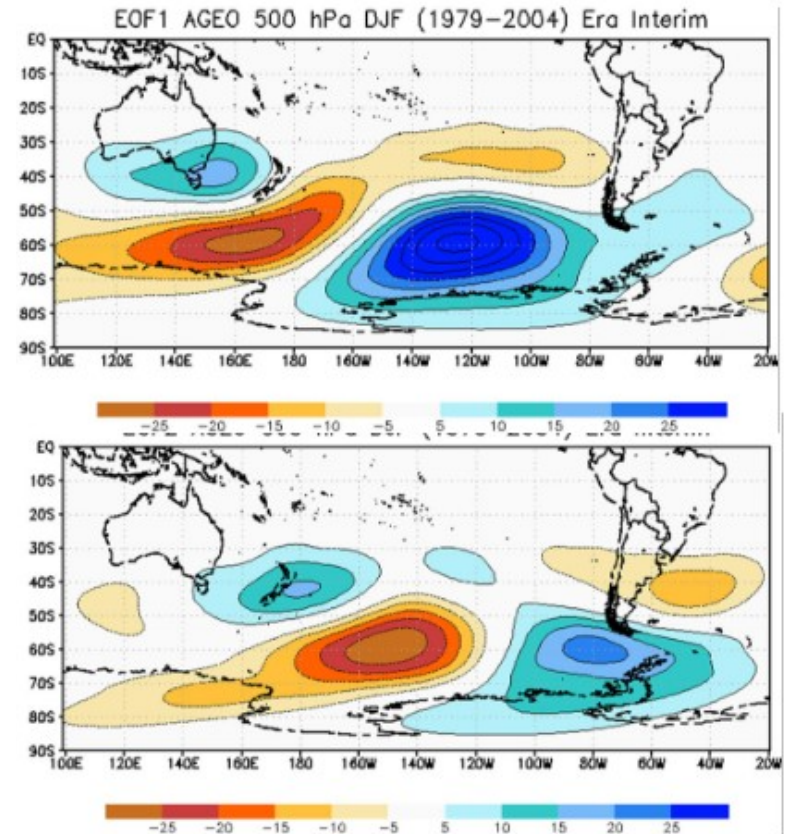
- SAM tiene una tendencia:
  - La fase + se ha vuelto más probable que la - desde mediados de los '90.
- Además de la tendencia, muestra variabilidad a escala estacional evidenciado por rápido cambio de signo del índice.

La evolución temporal de un índice que caracteriza al SAM



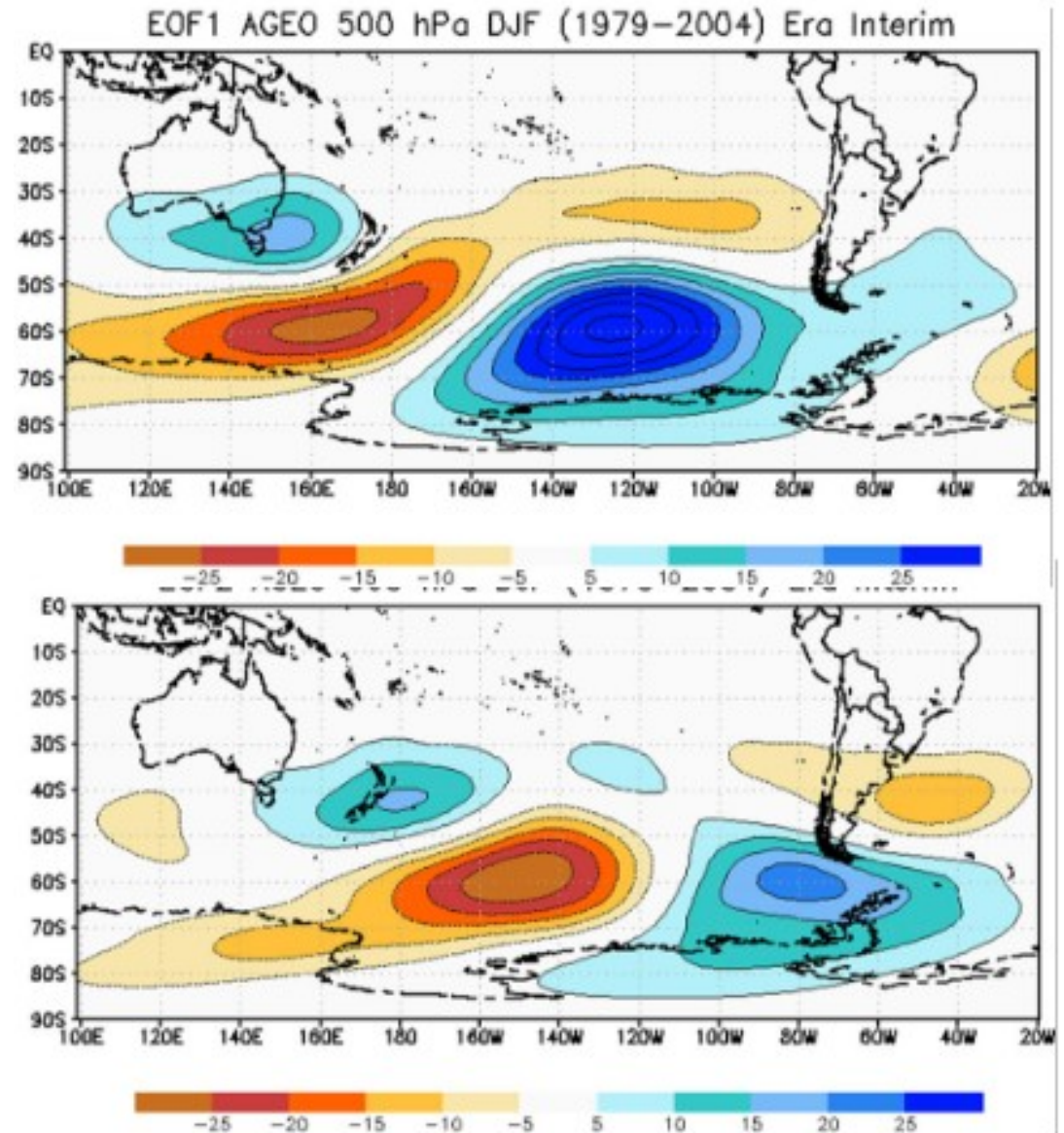
## Modos Pacífico-America del Sur (PSA)

- Son un par de estructuras espaciales que ocurren en forma recurrente en la atmósfera del HS.
- Luego de SAM son los modos de variabilidad más comunes en el HS.
- Consisten en trenes de ondas estacionarios con origen en la región Indo-Pacífica y finalizan en el Atlántico S, describiendo una trayectoria en forma de arco.
- En equilibrio geostrófico, los trenes de onda tienen asociados vientos que circulan paralelos a las isolíneas, modifican las corrientes en chorro en el HS.



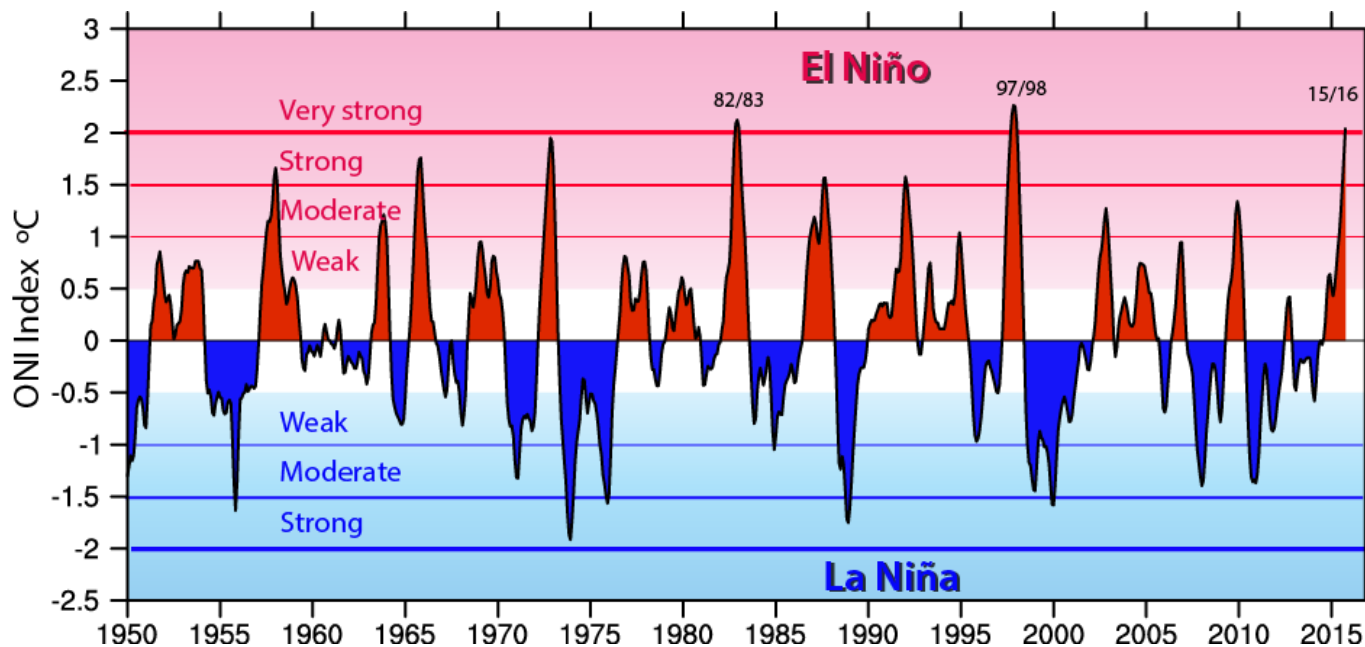
## Modos Pacifico-America del Sur

- En el PSA2 se observa un centro ciclónico situado al S de Uruguay, tiene asociado vientos en sentido horario.
- Estos patrones no tienen una escala de tiempo definida, varían en todas las escalas de tiempo.
- El fenómeno de El Niño puede generar estos patrones en la atmósfera.

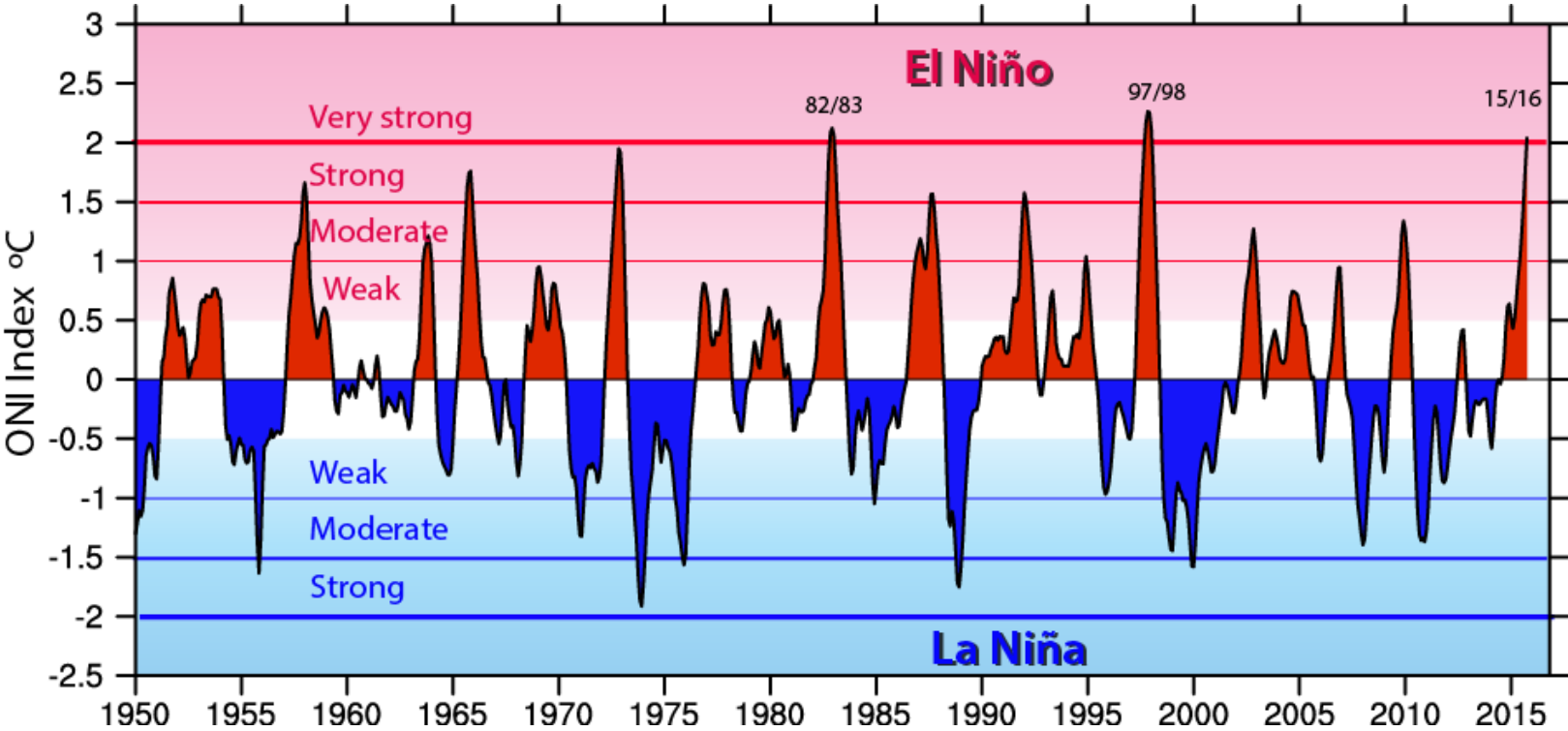


## El Niño-Oscilación Sur

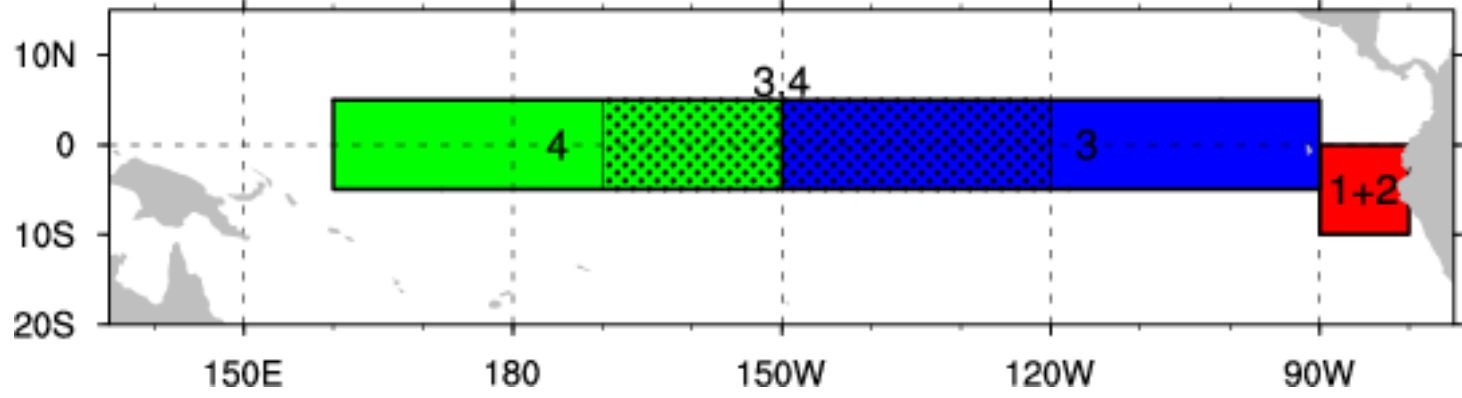
- En condiciones normales el Pacífico ecuatorial E es más frío que el W debido al afloramiento que eleva a la superficie aguas más frías de subsuperficie.
- Estas condiciones normales ocurren en promedio una tercera parte de los años.
- Durante el resto de los años ocurren fenómenos de El Niño y La Niña



# El Niño-Oscilación Sur



Nino Index Regions (SST)



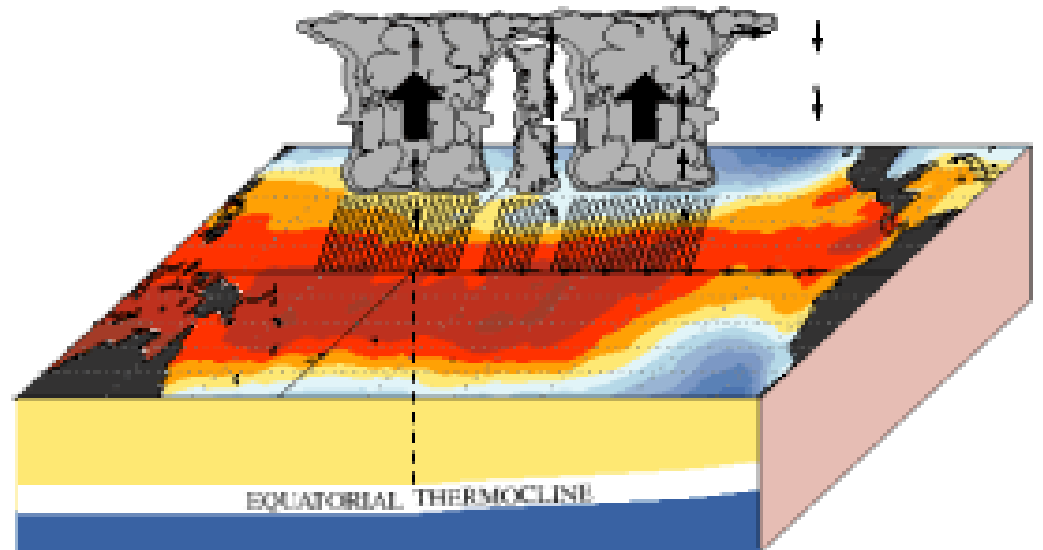
## El Niño-Oscilación Sur

Durante El Niño en el Pacífico E ecuatorial aumenta la TSM, aumentan las lluvias, decrece la P de superficie y disminuyen los Alisios.

Debido a este corrimiento hacia el Este de la convección, el N de Australia e India experimentan disminución de lluvias.

En subsuperficie la Termoclina es tan profunda en el E como en el W, mostrando una redistribución de las aguas cálidas en la región del Pacífico ecuatorial.

December - February El Niño Conditions



## El Niño-Oscilación Sur

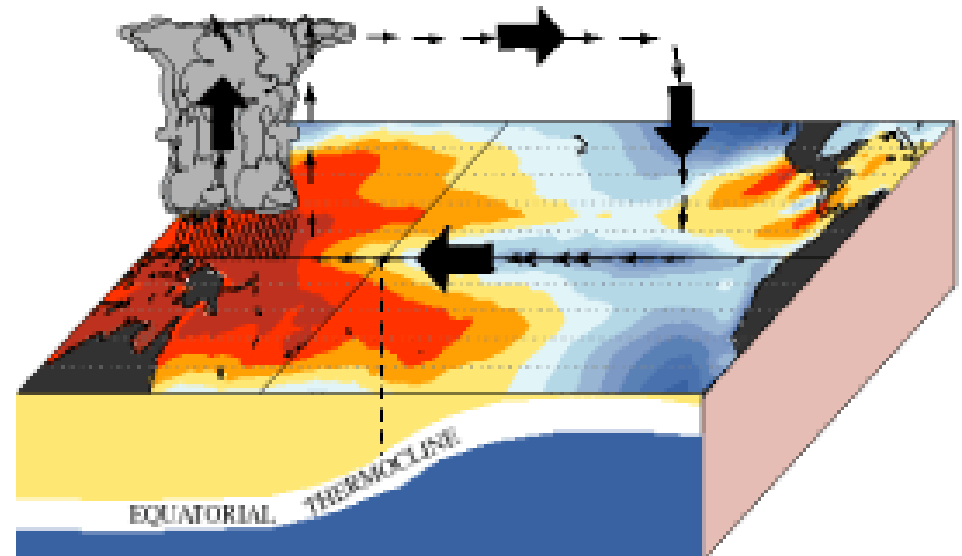
Durante La Niña ocurre lo opuesto:

la piscina de aguas cálidas en el W se achica y se enfría el Pacífico E

Sobre el Pacífico E los Alisios se intensifican y las lluvias decrecen.

La Termoclina es muy somera en el E y profunda en el W

December - February La Niña Conditions





## El Niño-Oscilación Sur

A las condiciones medias de circulación en el plano vertical en el Pacífico ecuatorial se denomina celda de Walker.

La Oscilación Sur se puede ver entonces como la variación interanual en la intensidad de la celda de Walker.



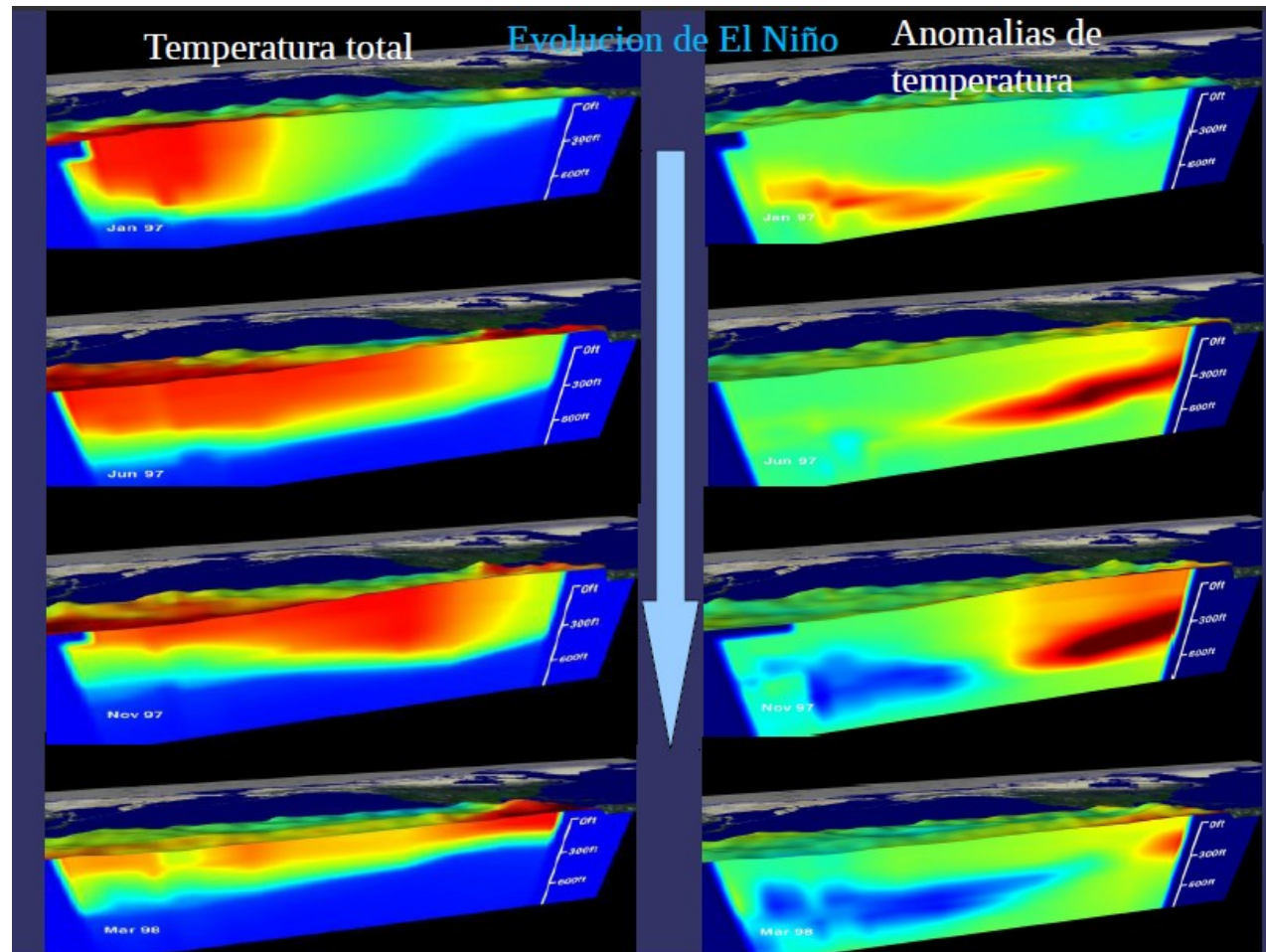
# El Niño-Oscilación Sur

El Niño es una fase de un ciclo. La fase opuesta de El Niño, La Niña. Corresponde a un modo natural de oscilación del sistema acoplado océano-atmósfera

El proceso de crecimiento de un evento Niño involucra una retroalimentación + (retroalimentación de Bjerkness):

**Alisios débiles** → profundiza termoclina y decrece afloramiento en el Pacífico E  
 → Calienta el Pacífico E → decrece diferencia E-W TSM y disminuye la diferencia de presión W-E → alisios débiles  
 → ...

La retroalimentación + en el Pacífico E dura unos 6 meses.



## El Niño-Oscilación Sur

Existe un proceso que debilita al Niño y retorna al Pacífico a sus condiciones medias o La Niña.

Durante el debilitamiento de los Alisios se crea una onda que profundiza la termoclina ecuatorial y se propaga al E

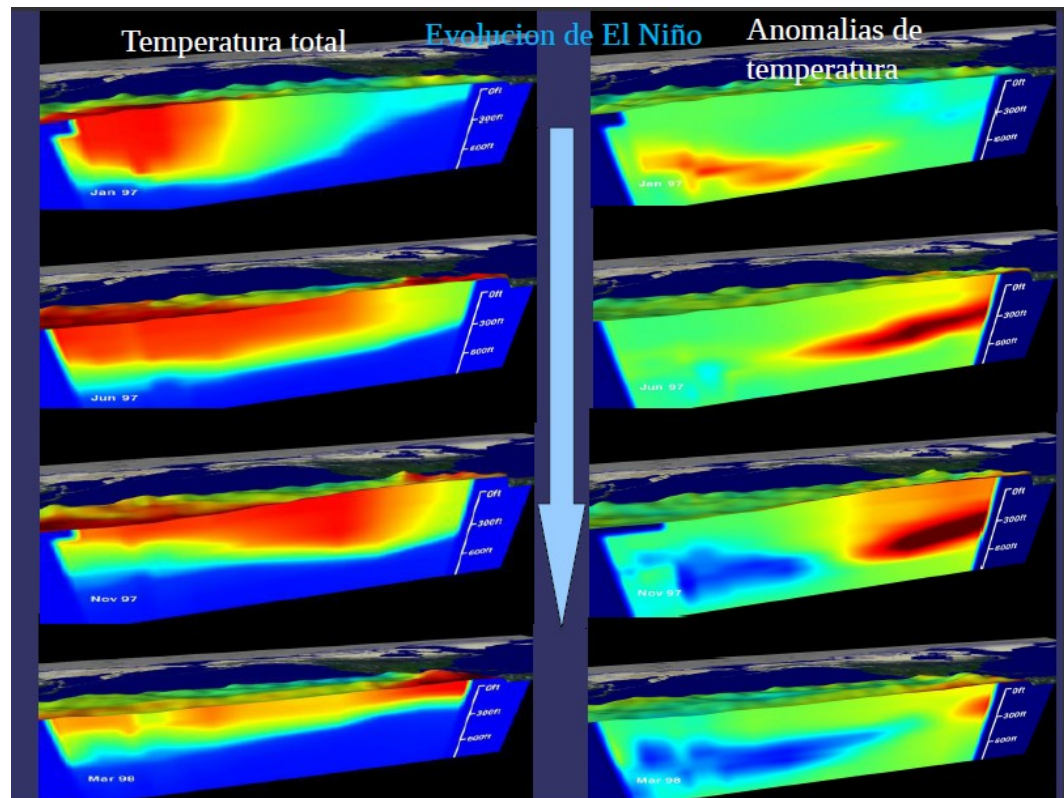
Se crea una perturbación en la termoclina al N y S del ecuador que la vuelve mas somera.

Se propaga al W como onda de Rossby.

La onda de Rossby “somera” se propaga al W hasta Australia, donde se refleja como onda de Kelvin somera, se propaga al E y llega a las costas de Sudamérica 7-8 meses más tarde.

Cuando llega, genera una termoclina somera en el E, induce un enfriamiento de las aguas que afloran.

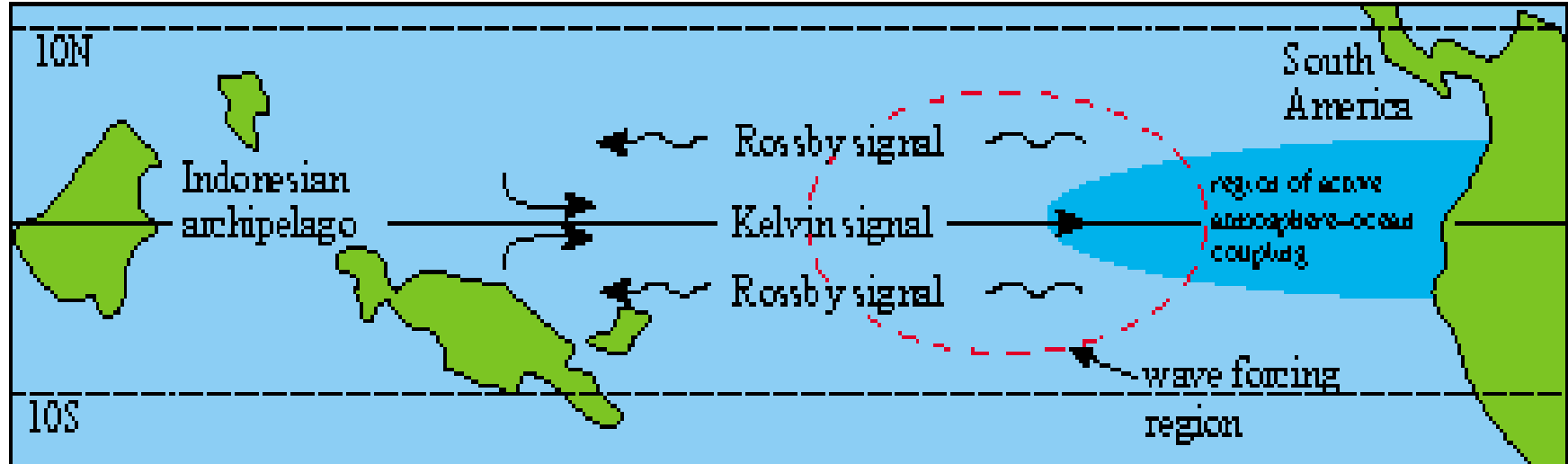
Corta la retroalimentación de + del Niño.



# Variabilidad climática

## El Niño-Oscilación Sur

La dinámica de El Niño implica una retroalimentación + (de Bjerkness) en el Pacífico E que depende de una profundización de la termoclina inducida por una onda de Kelvin más una respuesta retardada en el tiempo debido a la propagación de una onda de Rossby hacia el oeste, luego reflejada hacia el este en forma de onda de Kelvin que genera una termoclina más somera.



Ambas ondas son forzadas por los el debilitamiento de los alisios en el Pacífico central.

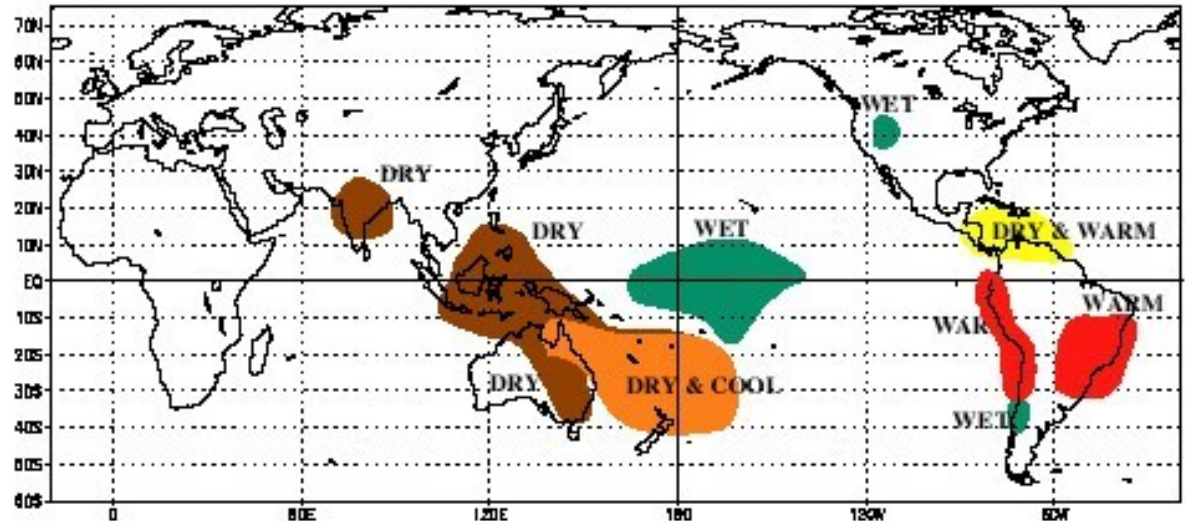


## El Niño-Oscilación Sur

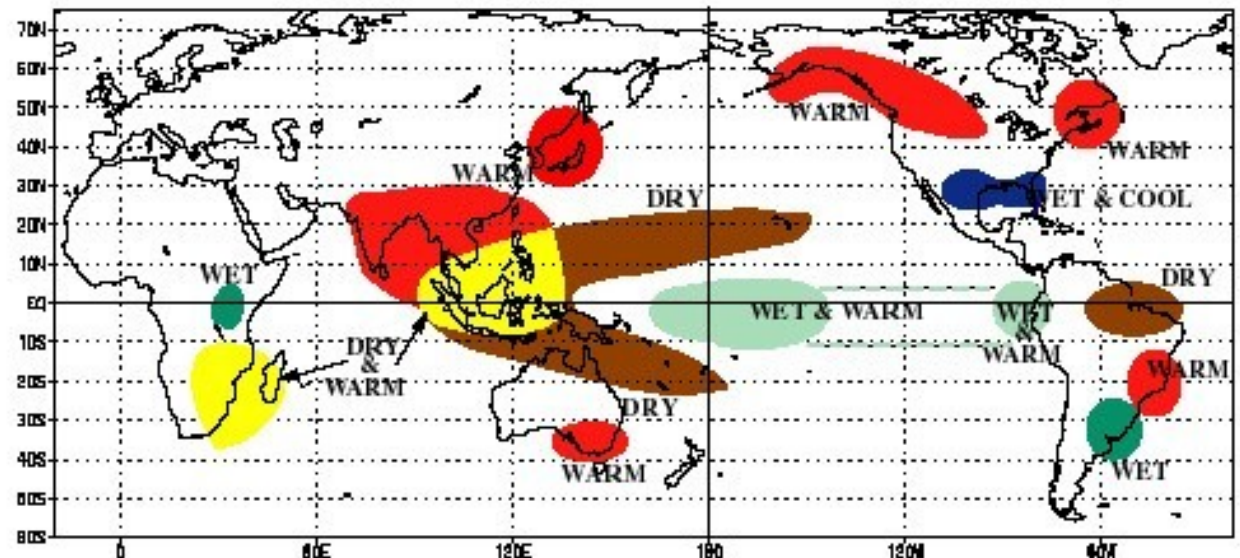
El Niño afecta a todo el mundo:

- Directamente debido a su influencia sobre el clima y tiempo.
- Indirectamente a través de su efecto en la economía mundial.

WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST



WARM EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



# El Niño-Oscilación Sur

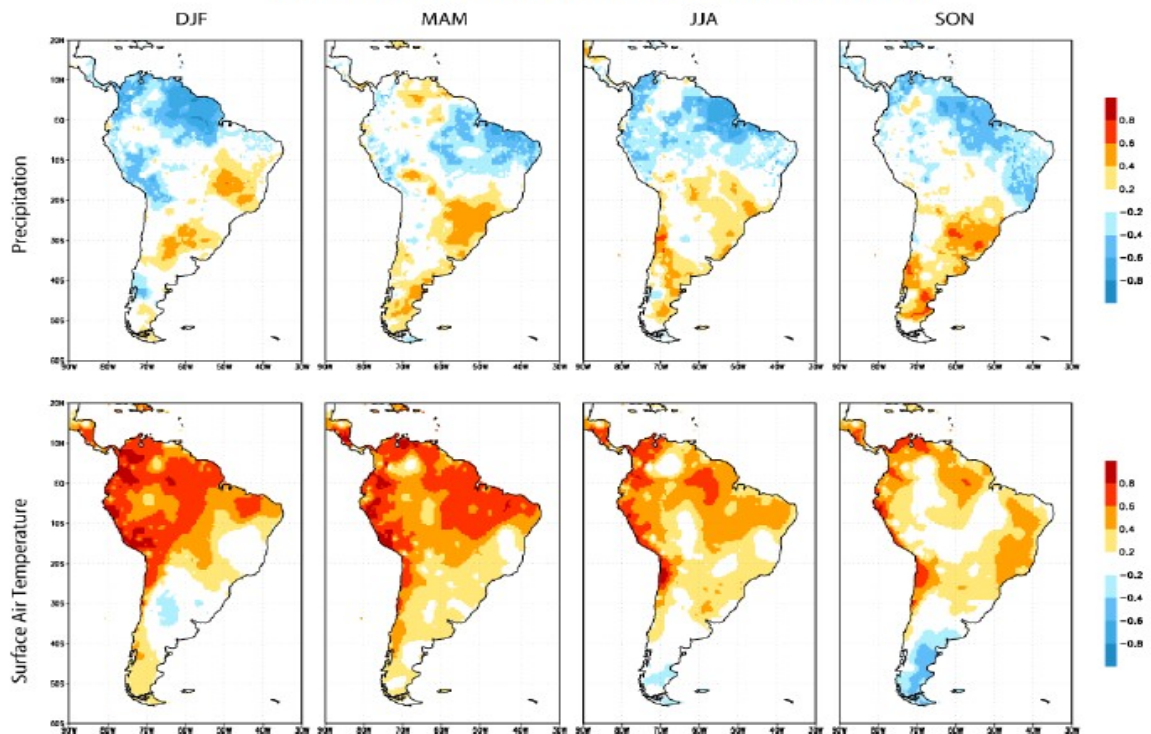
## ¿Cómo influye El Niño regiones tan remotas?

El calentamiento asociado a El Niño en la región ecuatorial cambia las regiones de lluvia en el Pacífico.

En la formación de nubes se libera QL a la atmósfera tropical en lugares donde comúnmente no pasa.

Esas regiones deben sacarse energía extra y lo hacen a través de la propagación de ondas hacia los dos hemisferios.

Seasonal correlation between Precip/SAT and Multivariate ENSO Index (50 years of data)



En el HS uno de los patrones fundamentales que induce El Niño es una combinación de PSA1 y PSA2, que depende de la estructura de las anomalías de TSM.

# Oscilaciones decadales

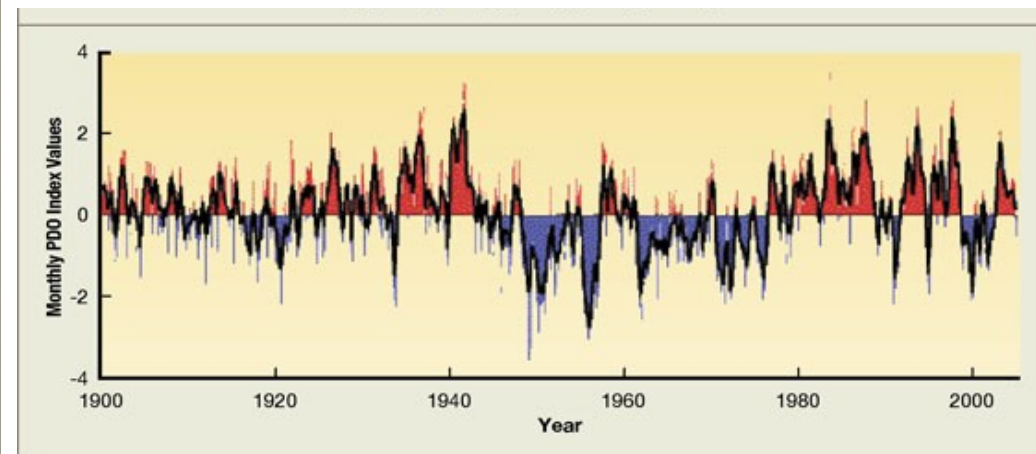
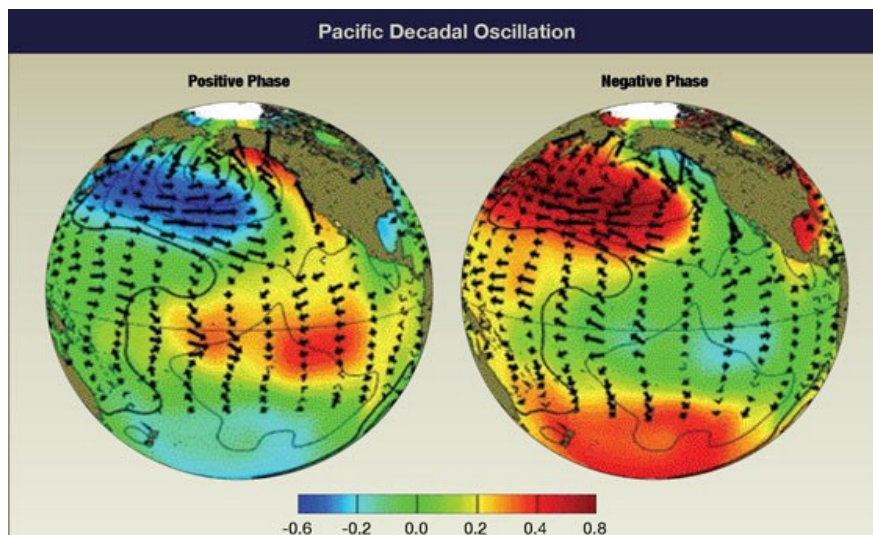
El Niño es **EL** ejemplo de fluctuación climática en escalas interanuales.

En escalas más largas los modos de variabilidad dominante son la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).

La PDO es el patrón de TSM dominante en el Pacífico en escalas de décadas.

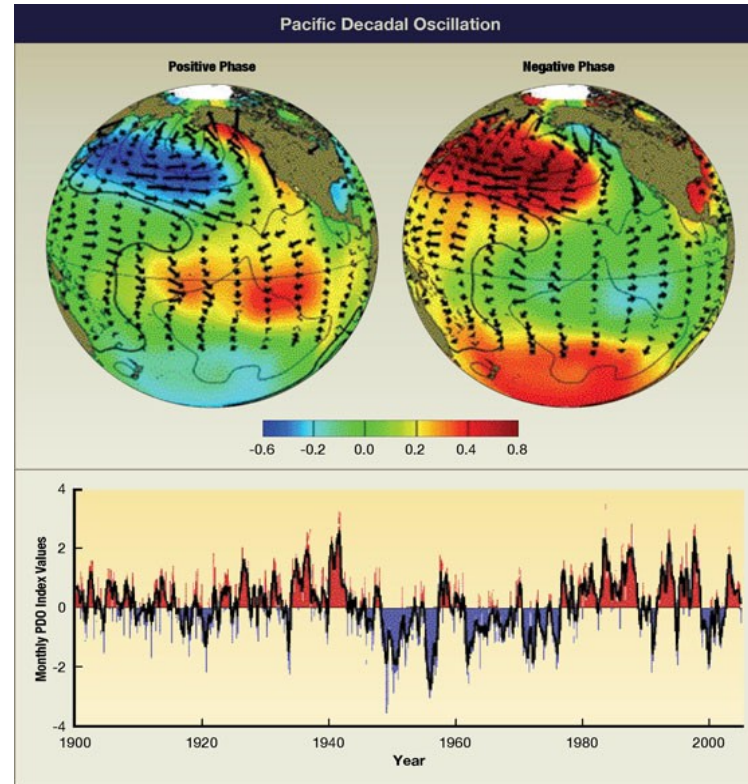
En su fase + consiste en un calentamiento de la región tropical y un enfriamiento del Pacífico norte; lo opuesto en su fase - .

Tiene escalas temporales entre 15-25 años y 50-70 años, dado que el registro histórico tiene cerca de 100 años no es posible asignarle una frecuencia definida.





# Oscilaciones decadales



El patrón espacial de la PDO es similar al de El Niño pero el mayor peso se encuentra en la región del Pacífico N, y no en la región ecuatorial.

La PDO intensifica o disminuye los impactos de El Niño de acuerdo a su fase.

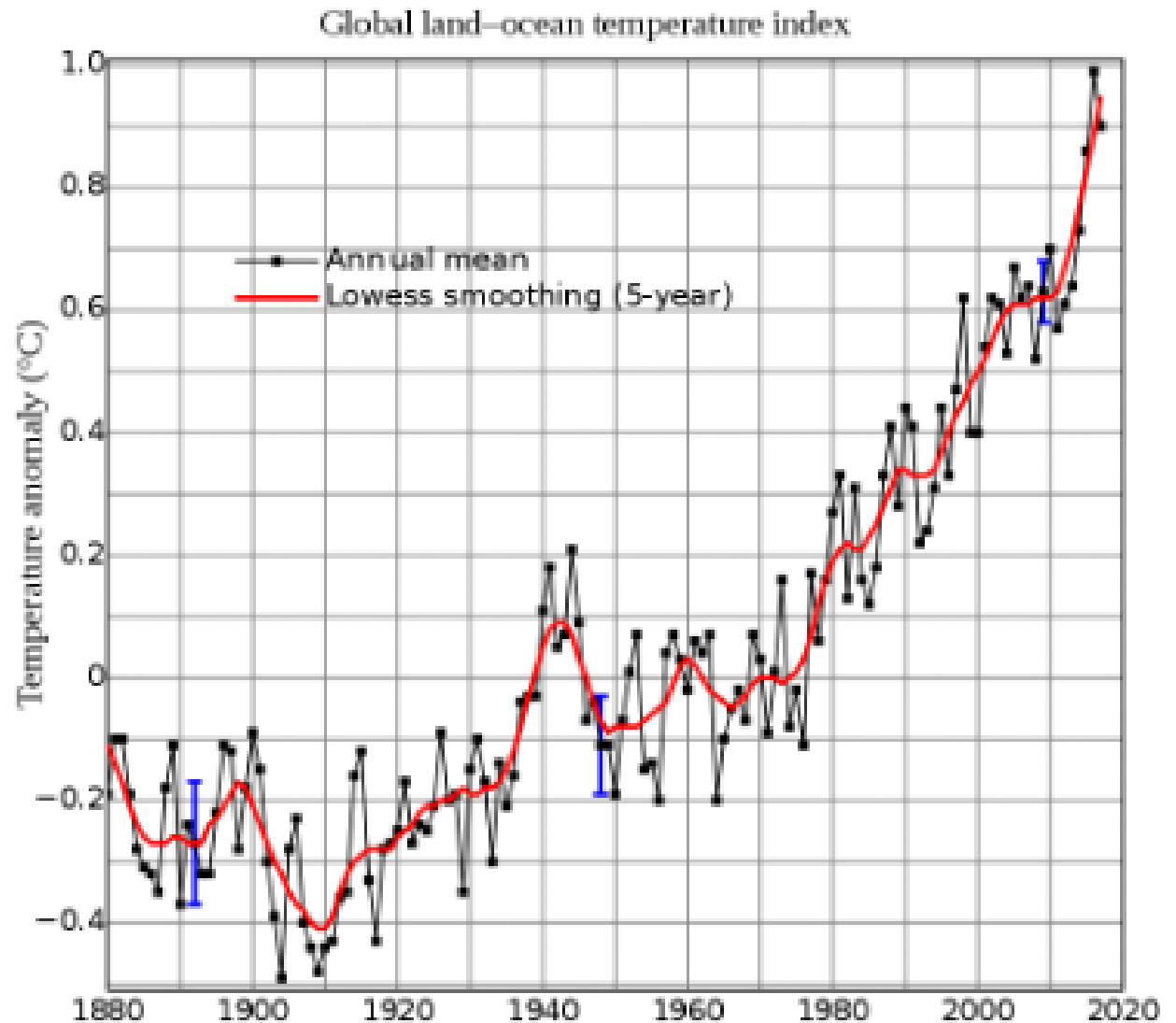
En nuestra región, la ocurrencia de un Niño durante una fase positiva de la PDO genera impactos mayores en las lluvias.

## Oscilaciones decadales

La PDO jugó un rol en el “hiatus” del calentamiento global ocurrido durante 1998-2013.

El calentamiento terrestre fue mas lento que en décadas anteriores entre 1998 y 2013.

La explicación mas aceptada es que la PDO entró en fase - en 1998 por lo que el Pacífico tropical estuvo mas frío de lo normal. El océano absorbió mas E que en promedio disminuyendo la E disponible para calentar la superficie terrestre.





## Oscilaciones decadales

Se han propuesto varios mecanismos de generación de la PDO:

- \* Interacción océano-atmósfera en los extratropicos
- \* Respuesta del océano a la variabilidad atmosférica
- \* Teleconexiones entre los trópicos y extratropicos

Al día de hoy no existe una teoría aceptada para explicar la PDO.

# Oscilaciones decadales

## Oscilación Multidecadal del Atlántico

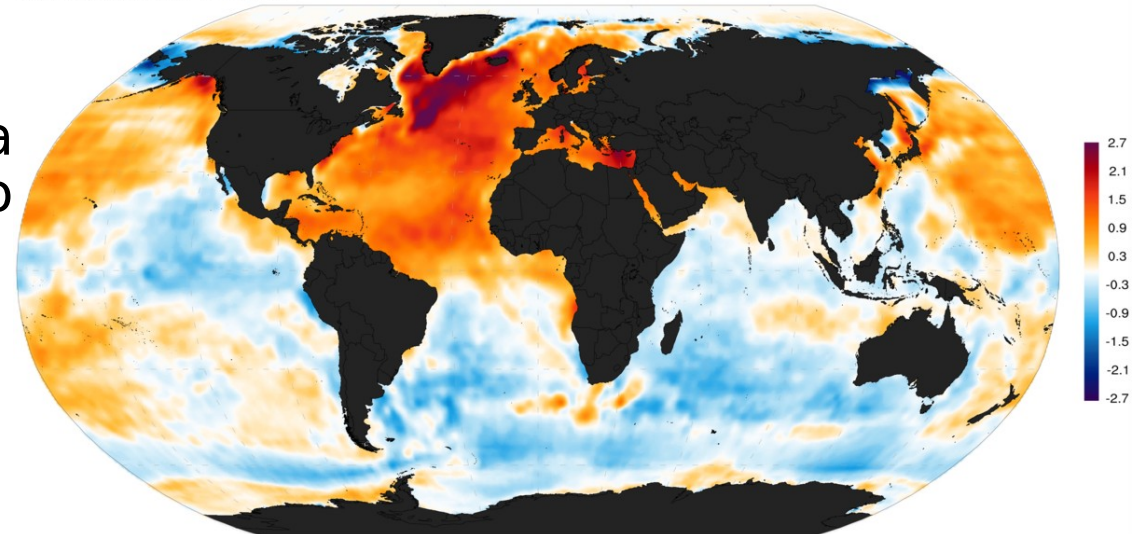
Atlantic Multidecadal Oscillation

La AMO es un patrón de anomalía de TSM que ocurre en el Atlántico N

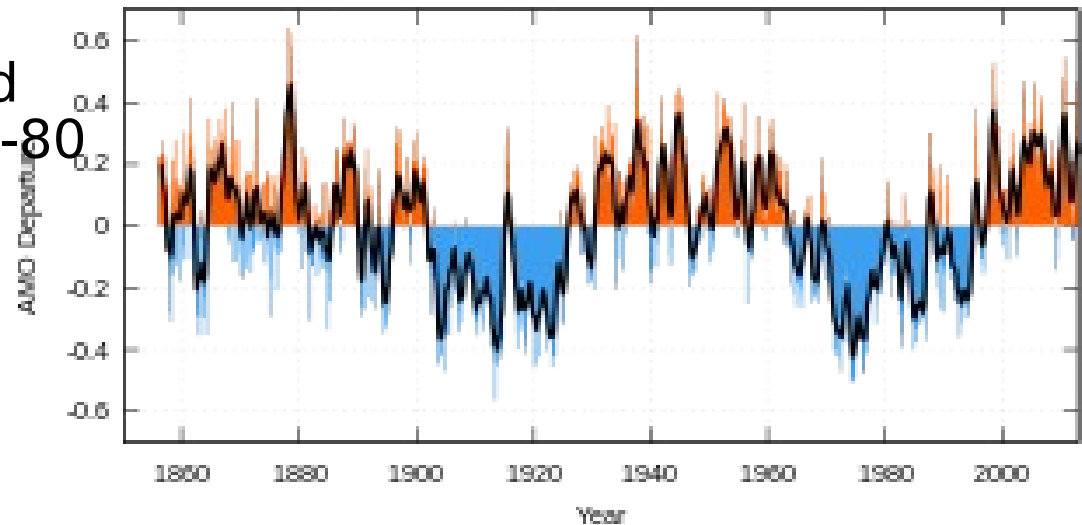
En su fase + toda la cuenca del ecuador al Ártico se calienta, con valores máximos cerca de Groenlandia

Durante la fase - se enfría.

La AMO exhibe una variabilidad con períodos cercanos a los 60-80 años, pero al igual que para la PDO no se puede asignar un período típico.



Monthly values for the AMO Index, 1856 -2013



## Oscilaciones decadales

Una AMO en fase cálida asocia al aumento en frecuencia de ocurrencia de huracanes en el Atlántico.

Asimismo, las temperaturas cálidas en la región tropical tienden a correr la ZCIT hacia el N generando déficit de lluvias en el NE brasilero. De esta forma, estas regiones muestran variaciones decadales en las lluvias.

La ocurrencia de una cierta fase de la AMO junto a otra de la PDO puede generar anomalías climáticas en diferentes regiones del planeta, por ejemplo en norte América.



