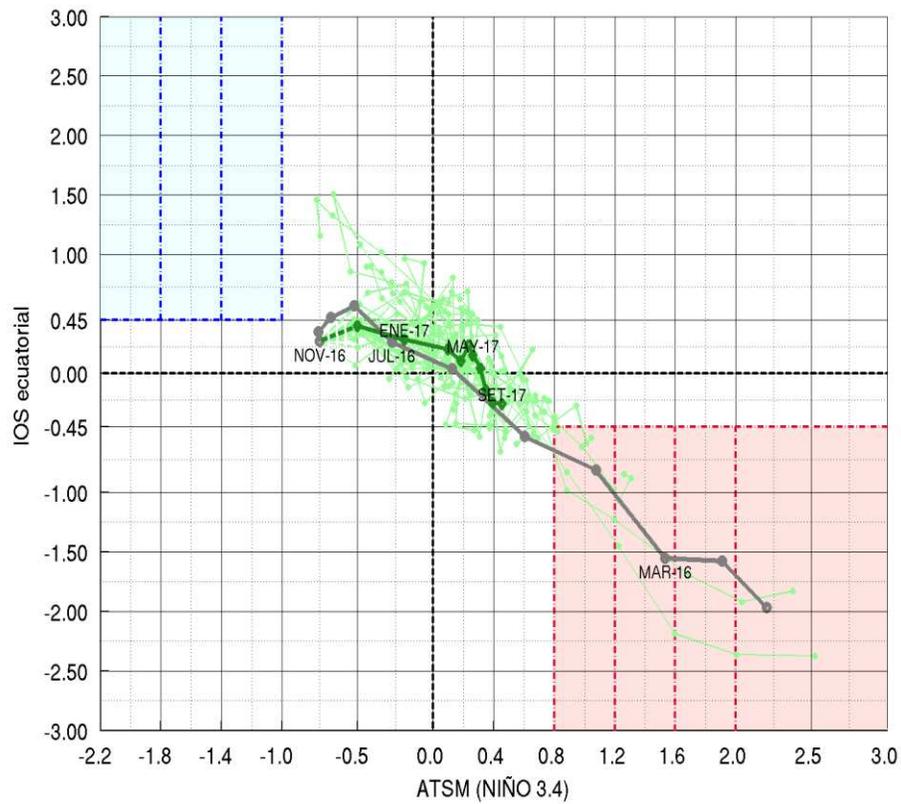


# INDICES DE MONITOREO Y PREDICCIÓN DEL ENOS



CHRISTIAN W. BARRETO SCHULER  
SUBDIRECCIÓN DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA  
SENAMHI

DICIEMBRE, 2016

## INDICE

I.	INTRODUCCION .....	2
II.	MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES .....	3
III.	OBJETIVO .....	8
IV.	DATOS .....	9
V.	METODOLOGÍA.....	10
VI.	RESULTADOS .....	13
VII.	CONCLUSIONES .....	17
VIII.	RECOMENDACIONES.....	18
IX.	BIBLIOGRAFÍA .....	19
X.	ANEXOS .....	20

# INDICES DE MONITOREO Y PREDICCIÓN DEL ENOS

## I. INTRODUCCION

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es un modo natural de variabilidad del sistema climático acoplado océano-atmósfera y surge de las interacciones aire-mar que tienen lugar en el Pacífico Tropical. Debido a esta interacción, es preciso analizar ambas componentes para el monitoreo de este evento. En **SENAMHI (2015)** se propuso una metodología para monitorearlo, en donde se analizaron las variaciones conjuntas del océano y la atmósfera en el Pacífico ecuatorial usando una variable para cada uno de estos componentes. Este esquema de propuesta de monitoreo fue basado en el mecanismo de Bjerknes. En el presente informe se plantea la ligera modificación de los umbrales para el reconocimiento de los eventos El Niño/ La Niña.

La variable usada como indicador de los cambios en océano es la anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central-este, llamada Niño 3.4 (ATSM3.4) y para analizar la respuesta de la atmósfera, se escogió el Índice de Oscilación del Sur ecuatorial (IOSec), el cual es un índice que mide la diferencia entre la presión reducida al nivel del mar promedio sobre la zona del Pacífico Oriental y las que se encuentran sobre Indonesia.

Por otro lado, una de las herramientas más utilizadas para el pronóstico del ENOS son los modelos climáticos. Es así que en el presente trabajo se explica la implementación de un sistema en el que se puedan analizar los pronósticos mensuales del modelo CFSv2 de las variables ATSM3.4 e IOSec de modo que al esquema de monitoreo planteado por SENAMHI (2015), se le puedan adicionar los pronósticos mensuales realizados por este modelo.

## II. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES

### 2.1. Índices para monitoreo de ENOS

En el estudio SENAMHI (2015), se planteó un sistema de monitoreo de ENOS, en el que se usan las siguientes variables (calculadas como medias móviles de cada 3 meses):

- Anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central-este, llamada Niño 3.4 (ATSM 3.4): representado por el promedio espacial de las anomalías de temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4 (190°E-120°W, 5°S-5°N).
- El Índice de Oscilación del Sur ecuatorial (IOSec): Anomalías estandarizadas de la diferencia de presión reducida al nivel de mar entre el Pacífico este (80°W-130°W, 5°N-5°S) e Indonesia (90°E-140°E, 5°N-5°S).

Estas variables fueron elegidas debido a su alta correlación espacial ( $\geq 0.7$ ), tal como se muestra en la Figura 1.

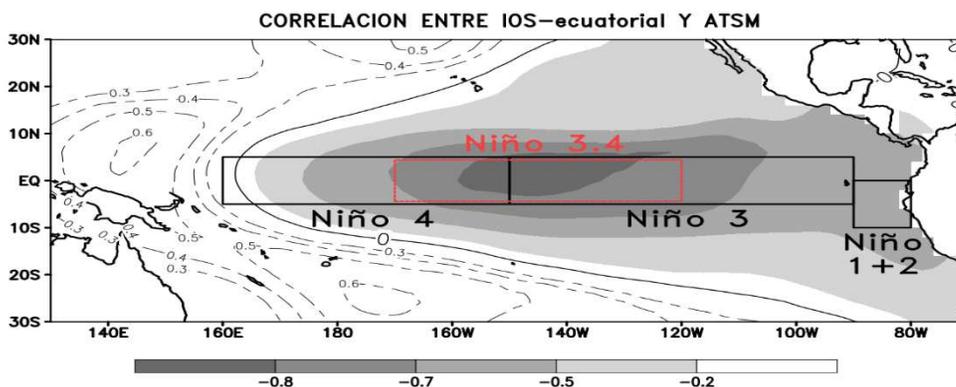


Figura 1. Distribución espacial de la correlación temporal entre las medias móviles (cada 3 meses) del IOSec y la ATSM en el Pacífico tropical (SENAMHI, 2015).

Haciendo uso de estos índices y mediante un diagrama de dispersión de ambas variables se calcularon, en el mencionado estudio, los límites para la clasificación de eventos que se mencionan a continuación (además están ilustrados en la Figura 2):

Para un evento El Niño:

$$\text{ATSM 3.4} \geq +0.8 \text{ e IOsec} \leq -0.45$$

Y la determinación de la magnitud de los eventos El Niño se determina teniendo en cuenta el valor más alto que tome el evento y su ubicación dentro de los siguientes rangos:

$$\begin{aligned} \text{Débil: } & +0.8 \leq \text{ATSM3.4} < +1.2 \\ \text{Moderado: } & +1.2 \leq \text{ATSM3.4} < +1.6 \\ \text{Fuerte: } & +1.6 \leq \text{ATSM3.4} < +2.0 \\ \text{Muy Fuerte: } & \text{ATSM3.4} \geq +2.0 \end{aligned}$$

\* La intercalación entre la calificación de una magnitud a otra es cada 0.4 a partir del valor de +0.8.

Para un evento La Niña:

$$\text{ATSM3.4} < -1.0 \text{ e IOsec} \geq +0.45$$

Y la determinación de la magnitud de los eventos La Niña se determina teniendo en cuenta el valor más alto que tome el evento y su ubicación dentro de los siguientes rangos:

$$\begin{aligned} \text{Débil: } & -1.4 < \text{ATSM3.4} < -1.0 \\ \text{Moderado: } & -1.8 < \text{ATSM3.4} \leq -1.4 \\ \text{Fuerte: } & \text{ATSM3.4} \leq -1.8 \end{aligned}$$

\* La intercalación entre la calificación de una magnitud a otra es cada 0.4 a partir del valor de +0.8.

**Los puntos que se encuentran fuera de estos umbrales hacen referencia a periodos de transición y/o condiciones neutrales del ENSO.**

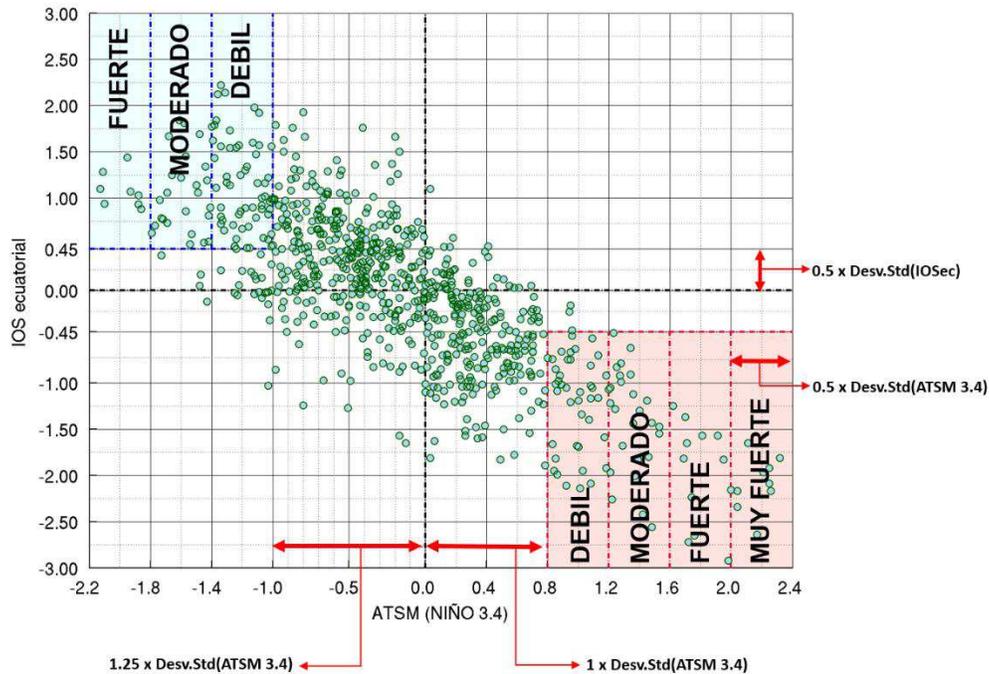


Figura 2. Actualización de los umbrales y procesos de clasificación de eventos ENOS en el sistema de monitoreo planteado por SENAMHI en 2015.

En el siguiente cuadro se indican los años Niño y Niña clasificados según este índice, desde 1951 a la actualidad.

Tabla 1. Eventos históricos El Niño

AÑO INICIAL	MES	AÑO FINAL	MES	DURACION (MESES)	MAGNITUD
1957	NOVIEMBRE	1958	MARZO	5	MODERADO
1965	AGOSTO	1966	ENERO	6	MODERADO
1972	AGOSTO	1973	FEBRERO	7	FUERTE
1982	AGOSTO	1983	MAYO	10	MUY FUERTE
1986	NOVIEMBRE	1987	DICIEMBRE	14	MODERADO
1991	OCTUBRE	1992	MAYO	8	FUERTE
1994	NOVIEMBRE	1995	ENERO	3	DEBIL
1997	JUNIO	1998	ABRIL	11	MUY FUERTE
2002	JULIO	2003	ENERO	7	MODERADO
2009	NOVIEMBRE	2010	MARZO	5	MODERADO
2015	MAYO	2016	ABRIL	12	MUY FUERTE

Tabla 2. Eventos históricos La Niña

AÑO INICIAL	MES	AÑO FINAL	MES	DURACION (MESES)	MAGNITUD
1954	AGOSTO	1954	SETIEMBRE	2	DEBIL
1955	AGOSTO	1956	ENERO	6	FUERTE
1964	JUNIO	1964	NOVIEMBRE	6	DEBIL
1970	AGOSTO	1971	OCTUBRE	15	MODERADO
1973	JUNIO	1974	JUNIO	13	FUERTE
1975	JUNIO	1976	ENERO	8	FUERTE
1988	JUNIO	1989	MARZO	10	FUERTE
1998	AGOSTO	1999	FEBRERO	7	MODERADO
1999	JULIO	2000	MARZO	9	MODERADO
2007	OCTUBRE	2008	MARZO	6	MODERADO
2010	AGOSTO	2011	FEBRERO	7	DEBIL

*\* Durante Mayo de 1955, y marzo de 1968 se dieron condiciones océano-atmosféricas asociados a La Niña, pero debido a su poca resolución temporal (1 solo promedio trimestral) no se consideraron dentro de la Tabla 2.*

## **2.2. Modelo acoplado de circulación global: Climate Forecast System versión 2 (CFSv2).**

Los modelos acoplados de circulación general son programas computacionales que incorporan ecuaciones que describen las leyes físicas que gobiernan la atmósfera y océano y sus interacciones, lo cual es esencial para simular el comportamiento del sistema climático a lo largo de períodos largos. Estos modelos deben representar y donde sea necesario conservar, las propiedades importantes tanto de la atmósfera, superficie de la tierra y los océanos en 3 dimensiones.

El modelo acoplado que se usará en el presente trabajo es el modelo llamado “Climate Forecast System version 2” o CFSv2 (Saha et. al 2014), el cual fue desarrollado por el Centro Nacional para Predicción Ambiental de la Administración Oceanográfica y Atmosférica Nacional estadounidense (NCEP-NOAA por sus siglas en inglés).

### 2.2.1. Algunos conceptos en relación a los modelos

- a) Condiciones iniciales: Es el estado del sistema climático en un momento dado a partir del cual se hará la predicción. Se estima mediante la combinación de las observaciones disponibles de diversas variables del sistema climático de una forma en la que pueda ser utilizada por el modelo.
- b) Ensemble: Grupo de simulaciones paralelas de los GCM's inicializadas con condiciones iniciales ligeramente diferentes pero que corresponden aproximadamente al tiempo en el que toman. La variación de los resultados obtenidos entre cada una de las simulaciones da un estimado del rango de escenarios posibles y por consiguiente de la incertidumbre.
- c) Member: Cada una de las simulaciones que forman parte del 'ensemble'.
- d) Lead: Tiempo de anticipación con el cual se realiza el pronóstico. En este trabajo, el lead, expresado en meses, denota el número de meses de anticipación desde el mes que corresponde a la condición inicial.
- e) Error sistemático del modelo: Diferencia entre la "climatología del modelo" y la climatología observada. "climatología del modelo" hace referencia al promedio de los pronósticos durante un largo período de tiempo (pronósticos retrospectivos).

### **III. OBJETIVO**

Implementar un sistema automático para la visualización de los pronósticos mensuales del modelo CFSv2 de los índices de anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central-este (ATSM3.4) y el índice de Oscilación del Sur ecuatorial (IOSec) siguiendo como base el esquema de monitoreo del El Niño Oscilación del Sur planteado en SENAMHI (2015).

## IV. DATOS

### 4.1. Datos Observados

Datos mensuales (1981-2016) de las siguientes variables:

Tabla 3. Datos observados y fuente

<b>Variable</b>	<b>Fuente</b>
Temperatura superficial del mar (TSM)	Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v4
Presión atmosférica al nivel del mar (SLP)	Reanálisis NCEP/NCAR.

### 4.2. Datos de Pronostico - Modelo CFSv2)

Pronósticos retrospectivos mensuales de TSM y SLP (mismas variables que en las observaciones) del modelo CFSv2 (1982-2016).

Tabla 4. Datos del modelo

<b>Modelo</b>	<b>Número de leads</b>	<b>Número de members</b>
Climate Forecast System (CFS) v2	9 (0.5, 1.5, ... 8.5 meses)	24

## V. METODOLOGÍA

1. Se descargaron los datos observados en formato netcdf de los servidores respectivos<sup>1</sup>.
2. Se descargaron los pronósticos retrospectivos mensuales del modelo CFSv2 de la librería de datos del International Research Institute for Climate and Society (IRI)<sup>2</sup>.
3. Se calculó la temperatura superficial del mar promedio en la zona Niño 3.4 (TMS3.4) en observaciones y pronósticos, haciendo un promedio espacial de TSM (latitud y longitud) en la zona de Niño 3.4 (190°E-120°W, 5°S-5°N).

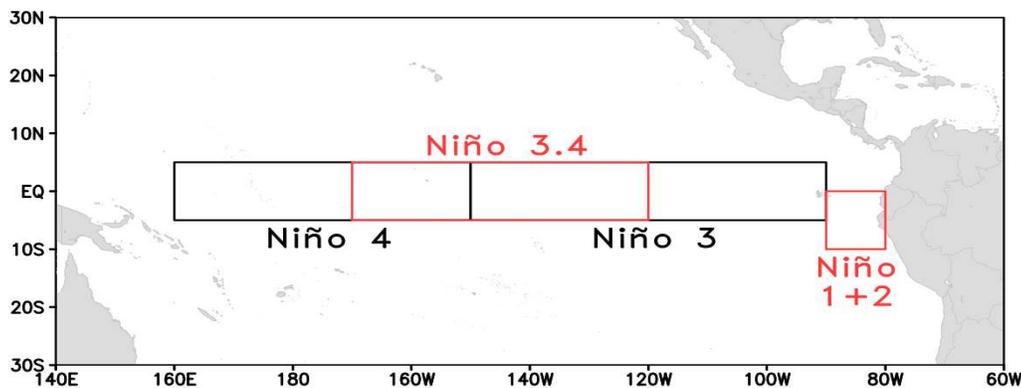


Figura 3. Regiones principales de monitoreo de las fases del ENSO, basados en la ATSM.

4. Se calculó la Presión atmosférica al nivel del mar promedio en la zona del Pacífico oriental ( $SLP_{pac.oriental}$ ) y en sobre Indonesia ( $SLP_{indonesia}$ ) en observaciones y pronósticos, haciendo un promedio espacial de SLP (latitud y longitud) sobre el Pacífico este (80°W-130°W, 5°N-5°S) e Indonesia (90°E-140°E, 5°N-5°S) respectivamente.

<sup>1</sup> TSM: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v4.html>

SLP: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surface.html>

<sup>2</sup> <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CFSv2/>

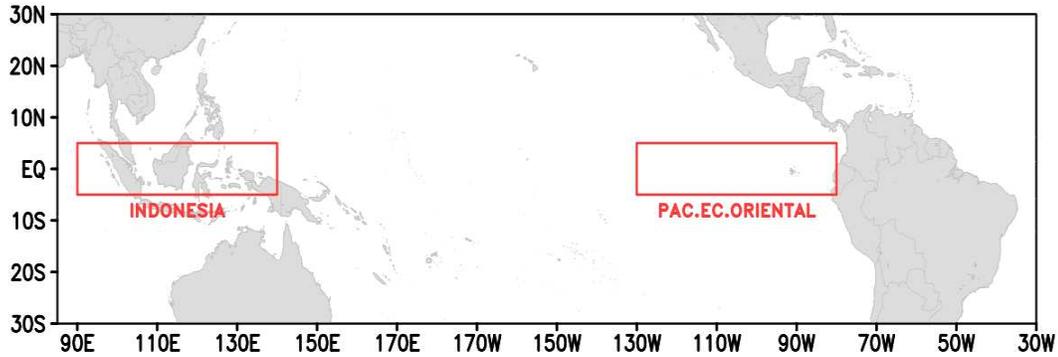


Figura 4. Ubicación de los cuadrantes: *Pacífico Ecuatorial Oriental* e *Indonesia*; las presiones atmosféricas en estos lugares son empleados para el cálculo del IOSec.

5. Se calcularon las anomalías de TSM3.4 ( $ATSM3.4$ ),  $SLP_{pac.oriental}$  ( $ASLP_{pac.oriental}$ ) y  $SLP_{indonesia}$  ( $ASLP_{indonesia}$ ). Para el caso de las observaciones se usó la climatología desde 1981-2010. Mientras que en los pronósticos se calcularon anomalías corregidas (corrección de error sistemático promedio), lo cual se logra usando la “climatología” del modelo, lo cual vienen a ser el promedio de los pronósticos retrospectivos desde 1983 hasta 2010, el cual depende del lead y mes de condición inicial, de este modo, las anomalías ya no tienen el sesgo promedio que el modelo posee al alejarse de las condiciones iniciales observadas.
6. Para el cálculo de IOSec:
  - a) Se calcula anomalías estandarizadas de presión en la zona de Indonesia y Pacífico ecuatorial oriental del siguiente modo:

$$z_x = \frac{ASLP_x}{s_x} \quad (1)$$

Donde:

$z_x$  = Anomalía estandarizada en zona x

$ASLP_x$  = Anomalía de presión en zona x

$s_x$  = Desviación estándar correspondiente al mes objetivo (y mes de condición inicial para el caso de los pronósticos), en zona x. Para el caso de observaciones se usa la desviación estándar mensual del período de 1981-2010 y para los pronósticos, se usa la desviación estándar de los pronósticos retrospectivos desde 1983-2010.

- b) Se calcula la diferencia entre las anomalías de presión estandarizadas en el Pacífico ecuatorial oriental y en la zona de Indonesia.

$$\Delta z = z_{Pac.oriental} - z_{Indonesia} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta z$  = Diferencia entre anomalías estandarizadas.

$z_{Pac.oriental}$  = Anomalía estandarizada en el Pacífico ecuatorial oriental.

$z_{Indonesia}$  = Anomalía estandarizada en Indonesia.

- c) Se vuelve a estandarizar la diferencia  $\Delta z$  usando usando la fórmula de la ecuación (1), solo cambiando ASLP por  $\Delta z$ , para así obtener el índice de oscilación sur ecuatorial mensual (IOSec).
7. Se transformaron los datos mensuales a trimestrales tanto los observados como los pronósticos. Para el caso de la transición entre pronósticos y observados, se usarán datos observados y pronósticos para calcular los datos trimestrales. Por ejemplo, para un pronóstico inicializado en julio, para calcular el trimestre Junio-Julio-Agosto (JJA) se usará el primer mes de datos observado y los restantes del modelo. Pero desde que se use, aunque sea un solo mes de datos proveniente del modelo, se graficará la dispersión de las distintas corridas del modelo.
8. Se generó la presentación gráfica de los índices calculados previamente (ATSM3.4 e IOSec), juntando observaciones con pronósticos del modelo CFSv2 y se creó un sistema automatizado para la generación de estos gráficos.

## VI. RESULTADOS

A continuación, se presentarán ejemplos de cómo se hubieran visto los pronósticos en distintos eventos clasificados como El Niño y La Niña en SENAMHI (2015), pero antes se explicará algunos puntos a tomar en cuenta para la interpretación de estos gráficos.

### Tener en cuenta:

- Las fechas de los datos están etiquetados como meses, pero se debe recordar que son promedios trimestrales centrados en el mes que se indica.
- La línea ploma representa los datos observados.
- Las verdes son pronósticos del modelo. La línea verde oscura más gruesa es el promedio de los members y las líneas verdes claro representan cada uno de los members.
- **Existen 2 trimestres que son una combinación de datos observados con pronosticados y son los 2 primeros trimestres luego del último trimestre con observaciones mensuales completas.** Por ejemplo, para un pronóstico inicializado en junio (inicios del mes), el último trimestre completo sería del de marzo-abril-mayo (MAM); mientras que en abril-mayo-junio (AMJ), solo abril y mayo son datos observados pero junio sería el pronóstico con 0.5 meses de anticipación del modelo; en mayo-junio-julio (MJJ), solo mayo es dato observado, junio es el pronóstico con 0.5 meses de anticipación y julio con 1.5 meses de anticipación y finalmente los trimestres posteriores ya estarían compuestos sólo de pronósticos.

6.1. Evento La Niña 1998-99 (pronóstico con condiciones iniciales de julio de 1998)

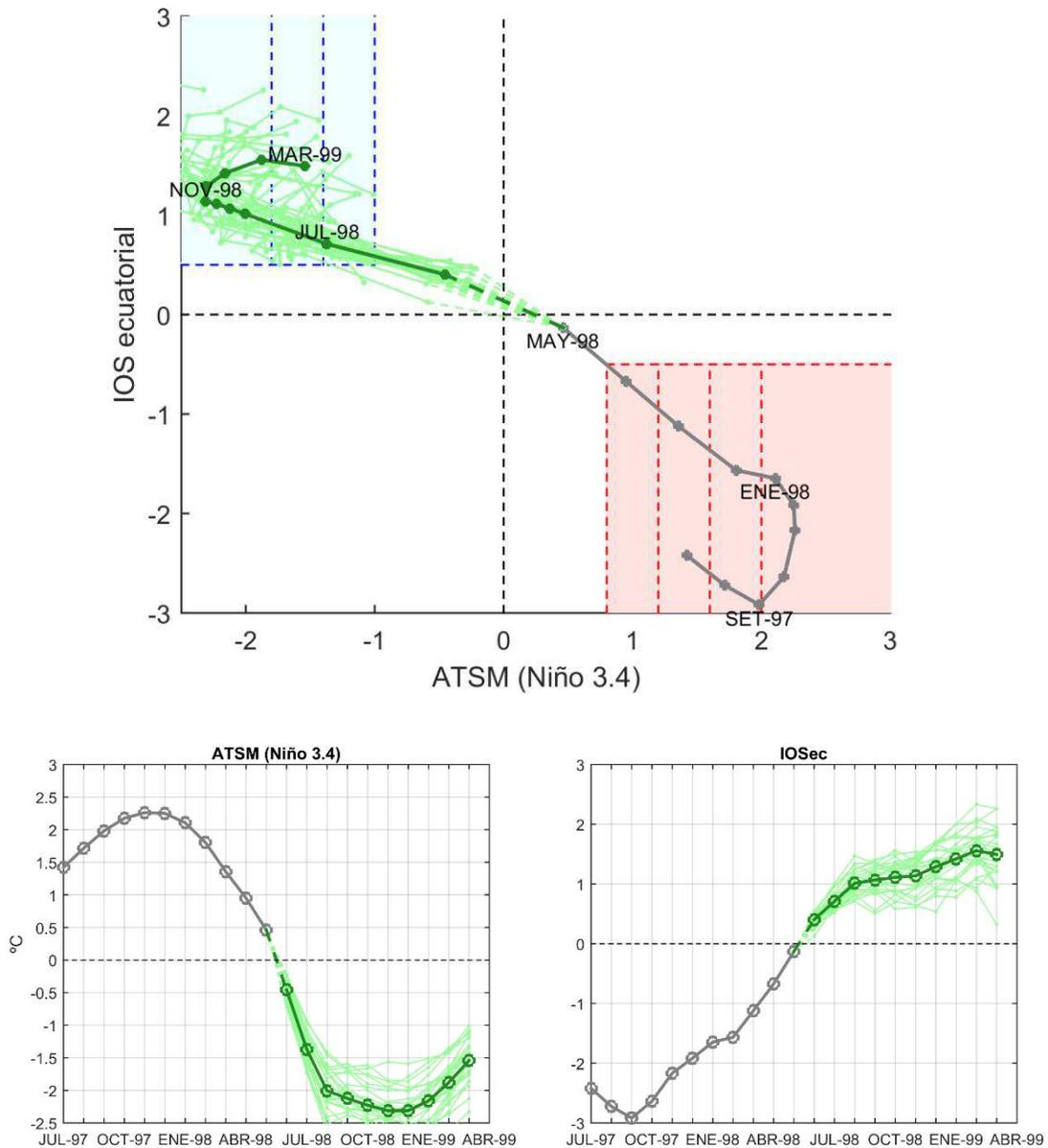


Figura 5. Pronóstico del modelo CFSv2, iniciado en julio de 1998

En este evento el modelo pronosticaba, en promedio (promedio de members), condiciones La Niña fuerte, pero lo que ocurrió es un evento La Niña moderado.

6.2. Evento El Niño 2009-10 (pronóstico con condiciones iniciales de agosto de 2009)

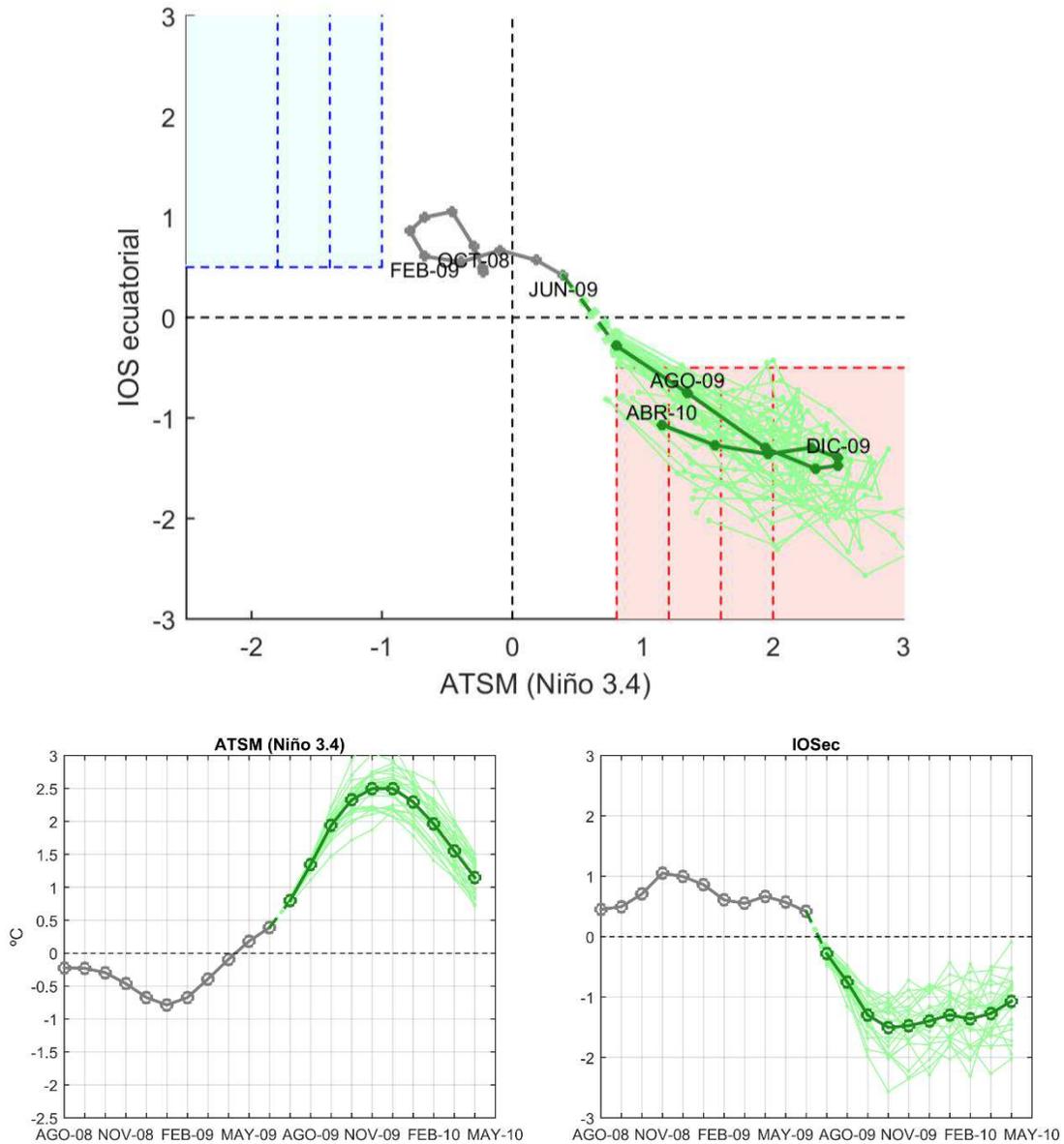


Figura 6. Pronóstico del modelo CFSv2, iniciado en agosto de 2009.

En este evento el modelo pronosticaba, en promedio (promedio de members), condiciones El Niño muy fuerte, pero lo que ocurrió es un evento El Niño moderado.

6.3. Evento El Niño 1997-98 (pronóstico con condiciones iniciales de marzo de 1997)

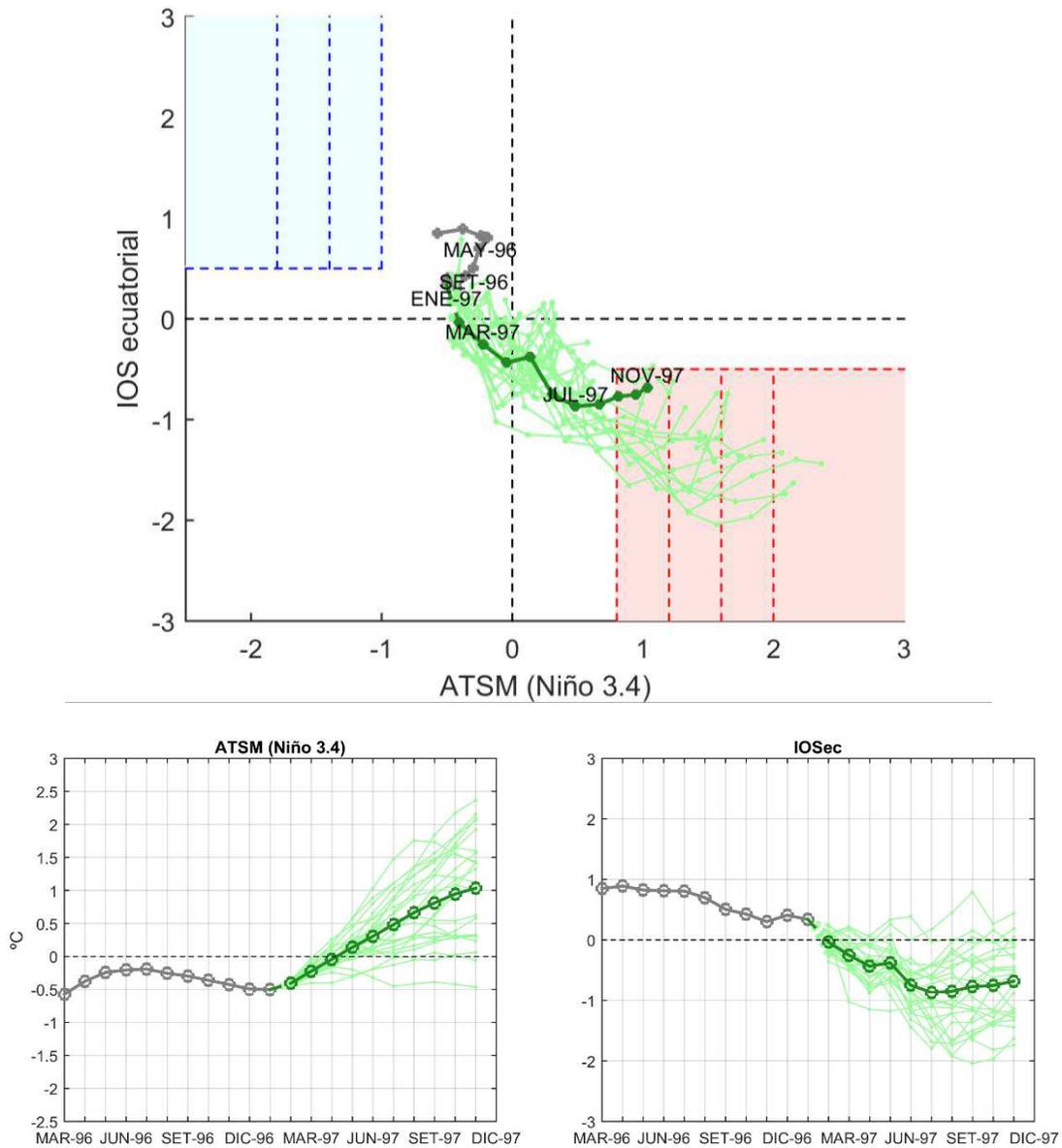


Figura 7. Pronóstico del modelo CFSv2, iniciado en marzo de 1997.

En este evento el modelo pronosticaba, en promedio (promedio de members), condiciones El Niño débil (aunque con algunos members llegaban hasta muy fuerte), pero lo que ocurrió es que un evento El Niño muy fuerte.

## VII. CONCLUSIONES

1. La metodología desarrollada para el monitoreo del ENOS, mediante el IOsec y la ATSM (Niño 3.4), permite hacer seguimiento del acople océano-atmósfera, pudiéndose identificar el inicio y fin de los eventos El Niño/La Niña.
2. El análisis de los eventos El Niño pasados, permiten determinar que cada vez que se sobrepasen los umbrales establecidos, las condiciones océano-atmosféricas muestran un patrón asociado a este evento climático, y persisten por los menos tres meses. Similar para el caso de eventos La Niña; sin embargo no se asegura una persistencia de estas condiciones por tres meses consecutivos.
3. Se logró implementar el sistema automático para la visualización de los pronósticos mensuales del modelo CFSv2 de los índices de anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central-este (ATSM3.4) y el índice de Oscilación del Sur ecuatorial (IOsec) siguiendo como base el esquema de monitoreo del El Niño Oscilación del Sur planteado en SENAMHI (2015).
4. Los pronósticos del CFSv2 deben ser tomados como herramientas referenciales (y relativas) en la predicción de las fases del ENOS. Es decir, no deben tomarse decisiones absolutas solo considerando las salidas de este modelo climático; es necesario el análisis conjunto de otros índices e indicadores, así como la revisión de otras salidas provenientes de otros modelos.
5. Sobre la región Niño 1+2 existe menor correlación entre el IOsec y la ATSM 3.4, lo cual dificulta el monitoreo de El Niño/La Niña mediante el esquema propuesto; así como, el pronóstico.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

- 1.** Este sistema fue implementado, pero no se ha realizado una verificación, de la bondad de pronóstico del modelo CFSv2. Es por ello que se recomienda hacer una verificación más a profundidad usando indicadores cuantitativos que documenten la bondad de pronóstico para diferentes meses objetivo y tiempos de anticipación.
- 2.** Se recomienda también, usar otros modelos, de forma que se pueda crear un promedio multimodelo, con el que se pueda realizar pronósticos con errores reducidos.

## **IX. BIBLIOGRAFÍA**

Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, 116, p. 505-524. Part II Upper air Circulation. *Journal of Climate*, 2, p. 341-355.

Bjerknes, J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.*, 97, 163-172.

Diaz, H.F. and Markgraf, V. 1992. *El Niño, historical and paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press.

Enfield, D.B. 1989. El Niño, past and Present. *Review of Geophysics*, 27, pp. 159-187.

Kessler, W.S., Is ENSO a cycle or a series of events?. *Geophys. Res. Lett.*, 29(23), 2125. DOI: 10.1029/2002GL015924, 2002.

Kuball, C.D. 2007. *Diagnosis of the Pacific Decadal Oscillation in Global Climate Models*. Iowa, Ames 16 pp.

Ramusson, E.M. 1985. El Niño and variations in climate. *American Scientist*, Vol. 73, pp. 168-177.

Rebert, J.P. and Donguy, J.R. 1988. The Southern Oscillation Index since 1882. Intergovernmental Oceanographic Commission technical series. Time series of ocean measurements, Vol. 4, Unesco, pp. 49-53.

Saha, S.; Moorthi, S.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; Tripp, P.; Behringer, D.; Hou, Y.; Chuang, H. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27(6), pp.2185-2208.

SENAMHI. 2015. *Estudio sobre índices atmosféricos experimentales con fines de pronóstico de El Niño Fase II*.

Trenberth, K.E. 1984. On the evolution of the Southern Oscillation. *Monthly weather Review*, Vol. 115, No. 12, pp. 3078-3096.

## X. ANEXOS

### 10.1. DISPERSIÓN DE DATOS, IOSeq Y ATSM EN AREAS NIÑO 1+2 y NIÑO 3.4

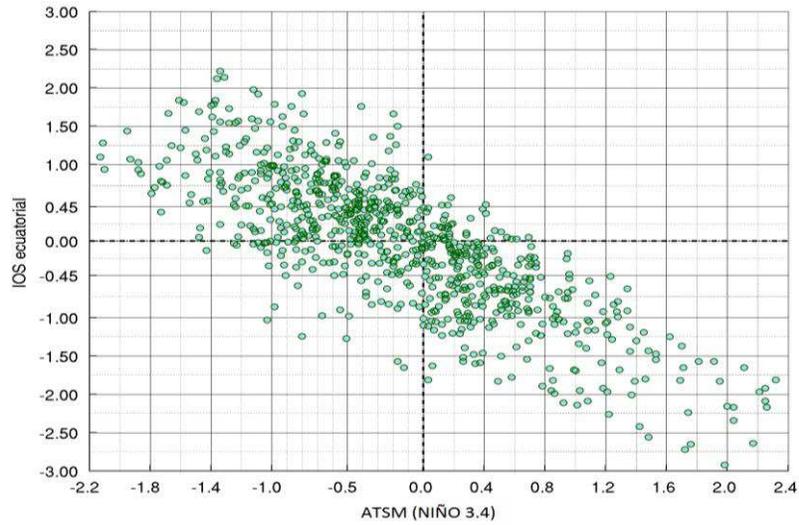


Figura A.1. IOSeq VS ATSM(NIÑO 3.4). La correlación entra las variables es de  $-0.7879$ .

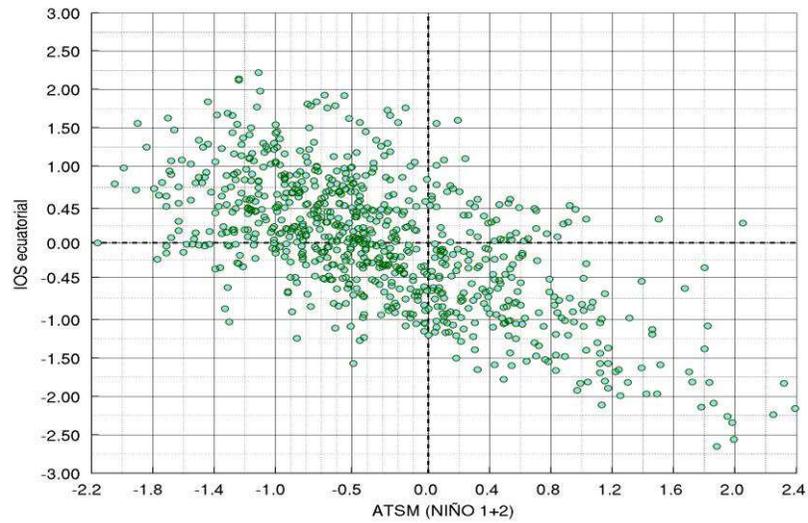


Figura A.2. IOSeq VS ATSM(NIÑO 1+2). La correlación entra las variables es de  $-0.6786$ .

Tras la dispersión de los datos de IOSec y ATSM(NIÑO 1+2), se trató de formular la misma metodología de monitoreo propuesto para el Pacífico central; sin embargo, se identificaron 3 principales inconvenientes:

1. La mayoría de eventos La Niña son débiles y algunos moderados, sin que casi ninguno llegue a tener una magnitud fuerte (la única excepción es el evento Niña fuerte en 1954 que duró 2 meses). Al parecer, las condiciones promedio frías de esta zona contribuyen a tener anomalías negativas pequeñas.
2. Se observó un cambio en la media en los datos de ATSM1+2 en el año 1979 (Figura 3), lo que ocasiona que el sistema de clasificación sea dependiente del período utilizado para la climatología. Además, casi todos los eventos que se califican como “La Niña” ocurren previo al año 1979, que son años en que la media es menor.

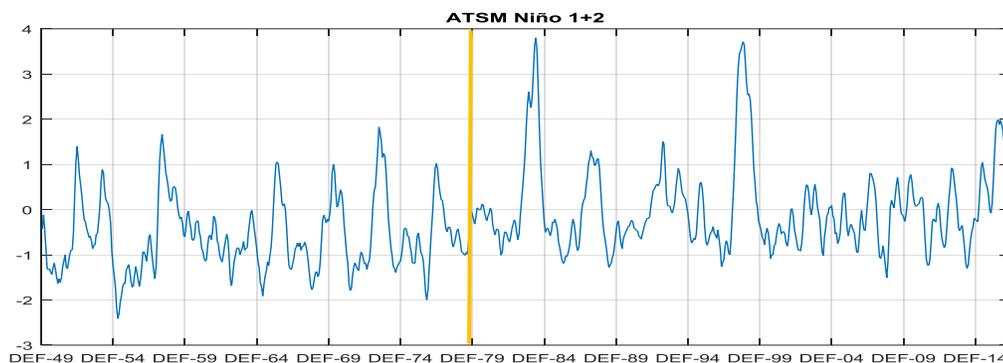


Figura A.3. Serie temporal de anomalías de temperatura en la región Niño 1+2.

3. En los eventos El Niño, se puede ver que a partir aproximadamente de +1 °C, las variaciones de ATSM 1+2 no varían proporcionalmente con las de IOSec, en donde se pueden observar aumentos de ATSM1+2 mientras se mantienen valores similares de IOSec; es decir, se pierde la linealidad que sí se observa cuando se usa ATSM3.4.

## 10.2. CORRELACION ENTRE DIVERSOS INDICADORES ATMOSFERICOS SOBRE LA REGIÓN NIÑO 1+2

- Datos mensuales (1949-2015) del NCEP/NCAR reanálisis (Kalnay et al 1996) en la zona Niño 1+2. de las siguientes variables:
  - Velocidad vertical promedio entre 500 y 200 hPa (W500a200).
  - Velocidad vertical promedio entre 1000 y 850 hPa (W1000a850).
  - Temperatura del aire promedio entre 1000 y 850 hPa (TA1000a850).
  - Velocidad zonal del viento a 200 hPa (U200).
  - Velocidad zonal del viento a 850 hPa (U850).
  - Velocidad zonal del viento en superficie (Usfc).
  - Velocidad meridional del viento en superficie (Vsfc).
  
- Temperatura superficial del mar mensual (1949-2015) de ERSST v4 (TSM NIÑO 1+2).

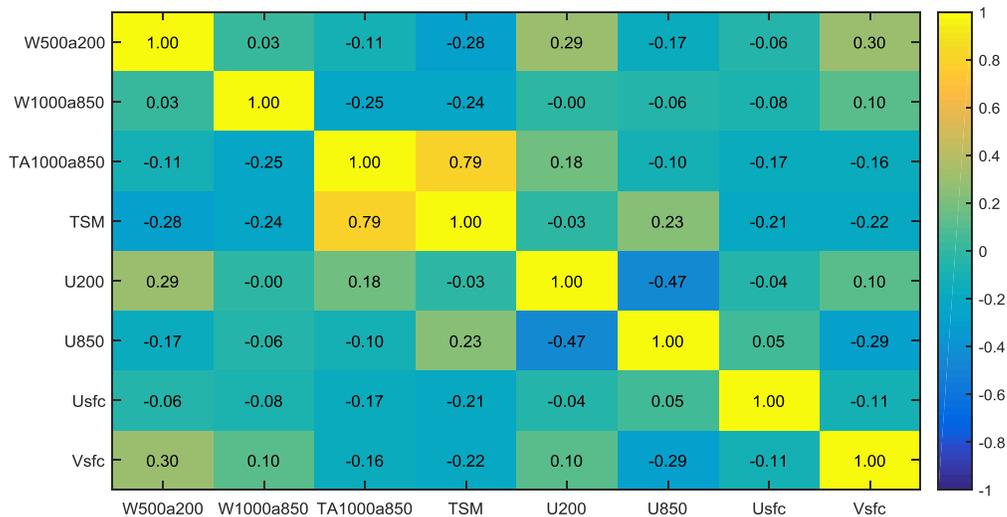


Figura A.4. Valores de correlación entre cada para de variables

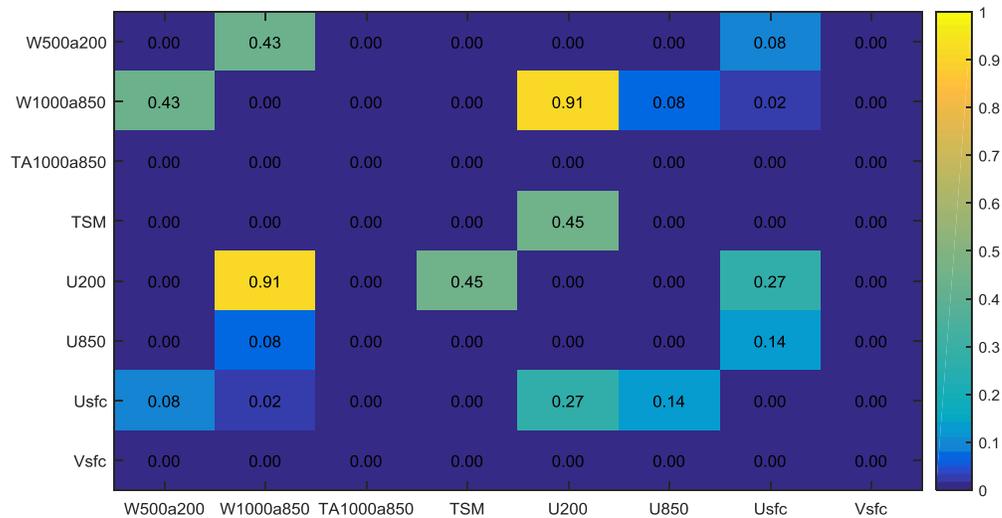


Figura A.5. P-valor de las correlaciones mostradas en la figura A.4.

La correlación más alta es entre TSM y TA1000a850 (0.79), lo cual era de esperarse dado que el mar está en contacto directo con esta primera capa de la atmósfera, y por ende tienen un comportamiento similar. La segunda más alta es entre U850 y U200 con un valor de -0.47 (con p-valor < 0.01 lo cual significa que se puede afirmar con más de 99% de confianza que la correlación entre ambas variables sea diferente de 0) si bien esta correlación no es muy alta, indica que ambas variables tienen una relación inversamente proporcional gran parte del tiempo; es decir, cuando hay vientos del oeste en niveles bajos (850 hPa), debería haber vientos del este en altos niveles (200 hPa), las demás variables tienen correlación menor a  $\pm 0.3$ .

Esa última relación inversa entre los vientos en bajos y altos niveles fue encontrada por Takahashi (2004) al analizar el patrón sinóptico de vientos en días lluviosos en la región de Piura durante el evento de 1997-98 (ver figura 6) por lo que esta relación podría ser de interés para el pronóstico de eventos lluviosos en la costa norte de Perú.

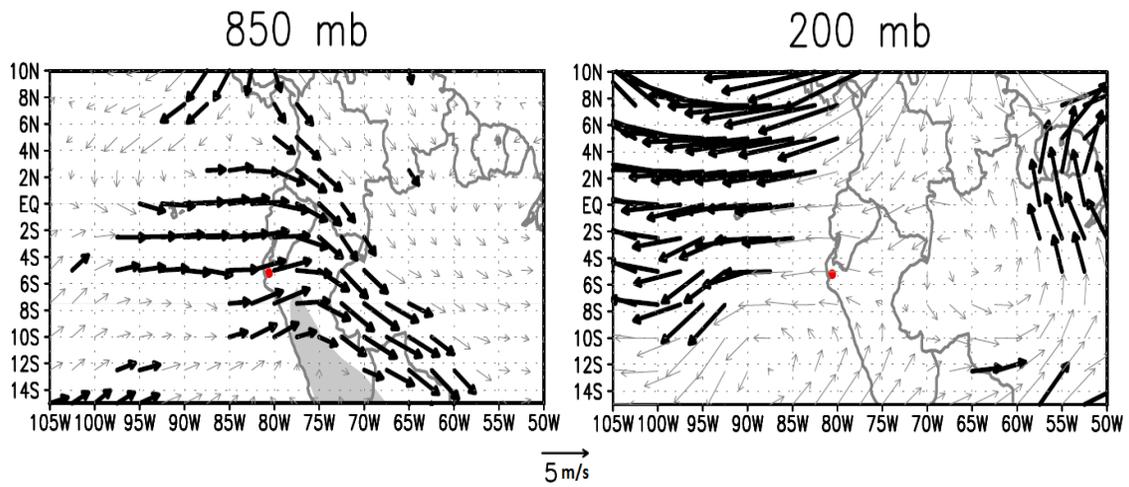


Figura A.6. Diferencia de circulación entre días lluviosos menos días secos entre diciembre de 1997 y abril de 1998. Los vectores más gruesos son los vectores con diferencias significativas al 95% de confianza con un test t-student.