

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**MECANISMOS GENERADORES DE SEQUÍAS
PROLONGADAS EN EL CORREDOR SECO
CENTROAMERICANO**

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar al grado y título de Maestría
Académica en Hidrología

JORGE ANDRÉS HIDALGO MADRIZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2020

Dedicatoria

A mis amadas Ericka, Victoria y Amalia

Agradecimientos

A Dios, de quien proviene el conocimiento, el razonamiento y la capacidad de llevar a cabo todas las tareas, quien a través de múltiples experiencias me ha forjado en la persona que soy hoy.

A mí esposa Ericka y mis hijas Victoria y Amalia, por ser la motivación para querer cada día ser una mejor persona, esposo, y profesional.

Al Dr. Hugo Hidalgo León, de quien tengo el más alto concepto y la más profunda admiración, por su sabio consejo no solo en el desarrollo de este proyecto, sino a lo largo de todo el posgrado, por la paciencia y acompañamiento en el desarrollo de la investigación, por la siempre amable atención, por dedicar el tiempo a este proyecto en medio de su apretada rutina y por compartirme su amplio y extenso conocimiento.

A los Drs. Tito Maldonado, Rodrigo Castillo y Ana María Durán, por sus valiosos aportes al desarrollo de esta investigación, por dedicar tiempo y atención a la mejora del proyecto y por participar de este.

Al Ingeniero Adrián Rojas Barrantes, por el interés y apoyo a lo largo de todo este extenso proceso.

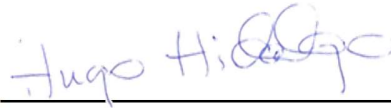
A la Universidad de Costa Rica, por brindar a sus estudiantes educación de altísima calidad impartida por brillantes académicos y profesionales.

“Esta T esis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrología”



Dra. Ana María Durán Quesada

**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**



Dr. Hugo Hidalgo León

Director de tesis



Dr. Rodrigo Castillo Rodríguez

Asesor



Asesor



Dr. Eric Alfaro Martínez

**Representante del Director del
Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera**



Jorge Andrés Hidalgo Madriz

Sustentante

Tabla de contenidos

	Dedicatoria	ii
	Agradecimientos	ii
	Hoja de aprobación	iii
1.	Introducción	1
1.1.	Objetivo.....	4
1.2.	Objetivos específicos	4
1.3.	Antecedentes	5
2.	Marco teórico	7
2.1.	Tipos de Sequía.....	8
2.1.1.	Sequía meteorológica	8
2.1.2.	Sequía hidrológica	8
2.1.3.	Sequía agrícola.....	9
2.1.4.	Sequía socioeconómica	9
2.2.	Procesos atmosféricos.....	10
2.2.1.	Oscilación del Atlántico Norte	10
2.2.2.	Oscilación Multidecenal del Atlántico	11
2.2.3.	Oscilación Decenal del Pacífico.....	12
2.2.4.	El Chorro de Bajo Nivel del Caribe	13
2.2.5.	El Niño Oscilación del Sur.....	14
2.2.6.	Índice Oceánico de El Niño.....	18
2.2.7.	Índice Tropical del Atlántico Norte	19
2.2.8.	El veranillo	20
2.3.	Índices de precipitación.....	21
2.3.1.	Índice Normalizado de Precipitación.....	21
2.3.2.	Índice de Reconocimiento de Sequías.....	22

2.3.3.	Índice de Severidad de Sequía de Palmer.....	22
2.3.4.	El Índice Autocalibrado de Severidad de Sequía de Palmer.....	23
2.3.5.	Índice Z de Palmer.....	23
2.3.6.	Índice Hidrológico de Sequía de Palmer.....	23
2.4.	Transformadas de onduletas (Wavelet transforms)	24
3.	Datos utilizados.....	29
3.1.	Fuente de los datos	29
3.2.	Series de precipitación.....	29
3.3.	Definición de las estaciones del CSC	35
4.	Métodos de análisis	36
4.1.	Análisis de correlaciones	36
4.2.	Composiciones	37
4.3.	Variación de la precipitación	37
4.4.	Correlaciones espaciales.....	38
5.	Análisis de resultados	40
6.	Conclusiones y recomendaciones	80
	Bibliografía	82
	Anexo A: Procedimiento de cálculo de índices de precipitación	91
	Anexo B: Cuadros de correlaciones entre procesos atmosféricos e índices de precipitación	94
	Anexo C: Composiciones de presión atmosférica, velocidad y dirección, y cortante de viento	100
	Anexo D: Gráficos de onduletas de índices de precipitación	129
	Anexo E: ACF y PACF de las funciones de ponderación de correlaciones espaciales	132

Anexo F: Correlación entre series de procesos atmosféricos y series de índices de correlación espacial con rezagos 1 a 6 meses	136
--	-----

RESUMEN

El Corredor Seco Centroamericano es una zona de alta vulnerabilidad hídrica y socioeconómica, propensa a la ocurrencia de extensas de sequías afectando severamente a más de 10 millones de personas. La comprensión de la duración y periodicidad de estos periodos de sequía es esencial para la mitigación de los impactos que éstas originan. Haciendo uso de diversas técnicas estadísticas, aplicadas a índices meteorológicos e hidrológicos, se analizaron las condiciones antecedentes de la ocurrencia de la sequía, su duración, severidad y recurrencia. Se identificaron los fenómenos de El Niño Oscilación del Sur y el Chorro de bajo nivel del Caribe como los principales disparadores de la ocurrencia de sequías prolongadas en el Corredor Seco Centroamericano.

ABSTRACT

The Central American Dry Corridor is a highly hydrologically and socioeconomically vulnerable zone, prone to the occurrence of extensive droughts that severely affect more than 10 million people. Understanding the duration and periodicity of these drought periods is essential for mitigation of their impacts. Various statistical techniques are applied to meteorological and hydrological indexes, the conditions prior to the occurrence of drought, its duration, severity and recurrence were analyzed. The El Niño Southern Oscillation and the Caribbean Low-Level Jet phenomena were identified as the main precursors for the occurrence of prolonged droughts in the Central American Dry Corridor.

Lista de cuadros

Cuadro 1. Correlaciones significativas entre procesos atmosféricos (columnas) e índices de precipitación (filas). Las correlaciones significativas se muestran resaltadas en negrita. La escala de colores utiliza tonos rojos para correlaciones positivas y azul para negativas.	41
Cuadro 2. Años de mayor y menor intensidad de la señal media anual de los procesos que se ha considerado más influyen en la ocurrencia de sequías en el CSC.	51

Lista de figuras

Figura 1. Definición de la FAO del CSC, basada en características ecológicas de ecosistemas de bosque tropical seco en la región.....	2
Figura 2. Serie de tiempo de la Oscilación del Atlántico Norte, en el periodo de análisis (1970-2000), generada a partir del primer modo de la diferencia de presión entre Azores y la zona subpolar islandesa (Hurrell, 1995).....	11
Figura 3. Serie de tiempo de la Oscilación Multidecenal del Atlántico en el periodo de análisis (1970-2000), generada a partir de la fluctuación de la temperatura superficial de mar en el Atlántico norte (Goldenberg et al., 2001).	12
Figura 4. Serie de tiempo de la Oscilación Decenal del Pacífico en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de la serie de anomalías de la temperatura superficial del mar sobre las latitudes medias del océano Pacífico Norte (Mantua et al., 1999).	13
Figura 5. Serie de tiempo del índice del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Amador 2008) y valor medio (línea punteada), en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de los vientos zonales a 925 hPa en el área de interés.	14
Figura 6. Series de tiempo Niño3, Niño3.4 y Niño4 de índices de El Niño (componente oceánico del ENOS), en el periodo de análisis (1970 - 2000), a partir de la temperatura media del mar en las respectivas regiones.	17
Figura 7. Serie del Índice Oceánico de El Niño en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de la desviación respecto a la media de la temperatura a nivel del mar en la región del Niño3.4 (Trenberth, 2018).	18
Figura 8. Serie de tiempo del Índice Tropical del Atlántico Norte en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de la anomalía de la temperatura media de la superficie del mar entre las latitudes 5.5 °N y 23.5 °N y las longitudes 15 °O y 57.5 °O.....	20
Figura 9. Procedimiento de análisis de onduletas, mediante el traslado (a) y escalado (b) de la función de transformación (Torrence y Compo, 1998).....	25
Figura 10. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas (círculos de colores) en América Central de la base de datos NUMEROSA del CIGEFI. Los colores indican la aridez de acuerdo con la definición del CSC.....	30

Figura 11. Promedio de precipitación mensual de todas las estaciones (línea roja), de las estaciones del CSC (línea azul) y de las que no corresponden al CSC (línea verde) en el periodo de análisis (1970-2000).	31
Figura 12. Variación en la frecuencia de las series SPI promedio de todas las estaciones en escalas 1,3,6,12 y 24 meses en el periodo de análisis (1970-2000).	33
Figura 13. Similitud entre los índices de sequía de Palmer (PDSI, PHDI) y SPI_24 en el periodo de análisis (1970-2000).	34
Figura 14. Análisis espectral de frecuencias en AC de los índices de precipitación que se han considerado más relevantes en la variación de la precipitación.	49
Figura 15. Análisis espectral de frecuencias en el CSC de los índices de precipitación que se han considerado más relevantes en la variación de la precipitación.	50
Figura 16. Anomalías de presión a nivel del mar en los 5 años en que la señal del CLLJ es mayor y menor en MA y JA durante el periodo de análisis (1970-2000). 53	
Figura 17. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en los 5 años en que la señal del CLLJ es más y menos intensa, respectivamente, durante el periodo de análisis (1970 – 2000).	55
Figura 18. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en MA en los 5 años en que la señal del CLLJ es más y menos intensa, respectivamente, durante el periodo de análisis (1970 – 2000).	56
Figura 19. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa, y entre 925 y 500 hPa en los 5 años de CLLJ más fuerte y débil en JA en el periodo de análisis (1970-2000).....	57
Figura 20. Anomalías de presión a nivel del mar en los años de El Niño y La Niña en JA y SON durante el periodo de análisis (1970-2000).	58
Figura 21. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en los 5 años de El Niño y La Niña en el periodo de análisis (1970-2000).	59
Figura 22. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en SON en años de El Niño y La Niña en el periodo de análisis (1970-2000).	60
Figura 23. Cortante de viento en 10000 y 925 hPa, y entre 925 y 500 hPa en JA y SON durante años de El Niño y La Niña en el periodo de análisis (1970-2000)...	62

Figura 24. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en años TNA positivo y negativo en el periodo de análisis (1970-2000).....	63
Figura 25. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en MJ en los 5 años en años TNA positivo y negativo en el periodo de análisis (1970-2000).....	64
Figura 26. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en los años TNA positivo y negativo en el periodo de análisis (1970-2000). ...	65
Figura 27. Precipitación media mensual en los años El Niño (a) y en años La Niña. Se presentan en color verde los valores en el CSC y fuera de este en color rojo. Los valores medios del periodo de análisis (1970-2000) se muestran en líneas sólidas.	67
Figura 28. Variación porcentual de la precipitación media mensual en el CSC (barras rojas) y fuera de este (barras azules) con respecto al promedio (barras verdes), durante años Niño (a) y La Niña (b) en el periodo de análisis (1970-2000).	68
Figura 29. Precipitación media mensual en los 5 años en que la señal del CLLJ es mayor (a) y en los años en que es menor (b). Se presentan en color verde los valores en el CSC y fuera de este en color rojo. Los valores medios periodo del de análisis (1970-2000) se muestran en líneas sólidas.	69
Figura 30. Variación porcentual de la precipitación media mensual en el CSC (barras rojas) y fuera de este (barras azules) con respecto al promedio (barras verdes), durante los años en los que la señal del CLLJ es mayor (a) y menor (b) en el periodo de análisis (1970-2000).....	70
Figura 31. Precipitación media mensual en años en que la señal del TNA es positiva (a) y en los años en que es negativa (b). Se presentan en color verde los valores en el CSC y fuera de este en color rojo. Los valores medios del periodo de análisis (1970-2000) se muestran en líneas sólidas	71
Figura 32. Variación porcentual de la precipitación media mensual en el CSC (barras rojas) y fuera de este (barras azules) con respecto al promedio (barras verdes), durante los años en los que la señal del TNA es positiva (a) y negativa (b) en el periodo de análisis (1970-2000).....	72

Figura 33. Gráficos de onduletas de las series SPI_1 (a), SPI_3 (c), SPI_9 (e), SPI_12 (g) y las series reconstruidas (deconvolución) de las mismas series de índices de precipitación (b, d, f, h), en el periodo de análisis (1970-2000).	74
Figura 34. Gráficos de onduletas de los índices hidrológicos de Palmer (a y c) y las series reconstruidas (deconvolución) de los mismos índices (b y d), en el periodo de análisis (1970-2000).....	76
Figura 35. Cantidad de estaciones con aridez menor a 1 durante el periodo analizado. Los años de El Niño y CLLJ de mayor intensidad se muestran en líneas verdes y rojas punteadas, respectivamente	78
Figura 36. Cantidad de estaciones con aridez menor a 1 durante el periodo analizado Los años de La Niña y CLLJ de menor intensidad se muestran en líneas verdes y rojas punteadas, respectivamente	79

Lista de abreviaturas

AC: América Central.

ACF: función de autocorrelación.

AMO: Oscilación Multidecenal del Atlántico.

AWC: contenido disponible de agua.

CIGEFI: Centro de Investigaciones Geofísicas.

CLLJ: Chorro de Bajo Nivel del Caribe.

CSC: Corredor Seco Centroamericano.

DEF: diciembre – enero – febrero.

ENOS: El Niño Oscilación del Sur.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.

JA: julio – agosto.

MA: marzo – abril.

MJ: mayo – junio.

NAO: Oscilación del Atlántico Norte.

NASH: Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte.

NCAR: Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos.

NDEFMA: noviembre – diciembre – enero – febrero – marzo – abril.

ONI: Índice Oceánico de El Niño.

PACF: función de autocorrelación parcial.

PDO: Oscilación Decenal del Pacífico.

PHDI: Índice de Sequía Hidrológica de Palmer.

PNM: presión a nivel de mar.

PSDI: Índice de Severidad de Sequía de Palmer.

RDI: Índice de Reconocimiento de Sequía.

SHCI: Índice de Centro de Alta Presión Subtropical

SOI: Índice de Oscilación del Sur

SON: setiembre – octubre – noviembre.

SPI: Índice Normalizado de Precipitación.

SLP: presión a nivel del mar (acrónimo en inglés)

ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Jorge Andrés Hidalgo Madriz, con cédula de identidad 1 1102 0909, en mi condición de autor del TFG titulado Mecanismos generadores de sequías prolongadas en el Corredor Seco Centroamericano

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Jorge Andrés Hidalgo Madriz

Número de Carné: 992023 Número de cédula: 1 1102 0909

Correo Electrónico: jahmadriz@gmail.com

Fecha: 26 de noviembre de 2020 Número de teléfono: 8873 7616

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Hugo Hidalgo León, PhD


FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Introducción

La región centroamericana presenta, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (conocida como FAO por sus siglas en inglés), una variación anual de la precipitación media entre los 700 y 2500 mm, con una media anual de alrededor de 1800 mm (http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/americas/figure_ca01_eng.pdf). Todos los países de la región se ubican entre los 50 con mayor precipitación media anual (<https://www.indexmundi.com/facts/indicators/AG.LND.PRCP.MM/rankings>). Esta condición de aparente abundancia de precipitación o bajo estrés hídrico, hace que la ocurrencia de sequías en la región sea convencionalmente considerada como un fenómeno extremo aislado. Sin embargo, según estimaciones de la FAO (2016), existen cerca de 1.6 millones de personas en condiciones de inseguridad alimentaria y 3.5 millones con necesidad de asistencia humanitaria (Van der Zee Arias et al., 2012) producto de problemas asociados a la sequía, en el área conocida como el Corredor Seco Centroamericano (CSC). El CSC es una región claramente identificada, pero vagamente delimitada, ubicada según la FAO en la región Pacífica desde la frontera de Guatemala con México hasta el norte de Costa Rica junto con el Arco Seco de Panamá (Fig. 1). Se estima que producto de la sequía en el CSC, se presentan pérdidas de entre 50 y 90% de los cultivos durante este tipo de eventos (FAO, 2016).



Figura 1. Definición de la FAO del CSC, basada en características ecológicas de ecosistemas de bosque tropical seco en la región.
Fuente: FAO, 2016 (en Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio)

Esta realidad, sumada a la reducción esperada en la precipitación producto del cambio climático (Hidalgo et al., 2013; 2017; Castillo et al., 2018), se hace necesaria una mejor comprensión y caracterización de las sequías. Ante la seriedad de las consecuencias que el problema puede llegar a generar, podría traer grandes beneficios en la región. Sin embargo, son escasos. Por esa razón este estudio contribuye a aumentar nuestro entendimiento de los procesos de sequía en la región y en particular el CSC.

Las condiciones que anteceden la sequía, sus causas, extensión, severidad y periodicidad, son elementos que se consideran deben ser analizados prioritariamente, a fin de poder desarrollar estrategias para afrontar la sequía en el CSC. Se han considerado de especial importancia las causas, por lo que se ha propuesto realizar un análisis a partir de información existente de los procesos que

ocasionan las sequías en el CSC. De esta manera, se realiza un análisis de los procesos que modulan las estaciones seca y lluviosa en el CSC, partiendo de los procesos globales (i.e. Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), El Niño Oscilación del Sur (ENOS), entre otros), e incluyendo procesos de escala local (e.g. Chorro de Bajo Nivel del Caribe o CLLJ por sus siglas en inglés; Amador 1998). Estos son analizados estadísticamente en su relación con diversos índices meteorológicos de precipitación, a fin de identificar los procesos responsables de la ocurrencia de sequías en el CSC. Se parte de la presunción que los índices de precipitación mostrarán la respuesta de sequía en el CSC.

1.1. Objetivo

Determinar el o los mecanismos responsables de las sequías severas y sostenidas en la costa pacífica centroamericana y en particular del CSC.

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones que anteceden los eventos de sequía en la región centroamericana.
- Aplicar diversos índices de precipitación para la caracterización de los eventos de sequía en América Central (AC).
- Realizar análisis de tendencias periódicas de los eventos de sequía en la región centroamericana.

1.3. Antecedentes

La región centroamericana se ha establecido como una de las regiones que podría verse afectada con sequías como resultado de los efectos del cambio climático (Carrao et al., 2016), lo cual generaría grandes perjuicios en las zonas social y económicamente más vulnerables (Hidalgo y Alfaro, 2012). Al respecto se han realizado estudios que buscan analizar las tendencias de precipitación y temperatura en la región (Aguilar et al., 2005), así como la aplicación de modelos de escenarios de cambio climático para la medición de los impactos como resultado de la disminución de la precipitación y el incremento de la temperatura (Imbach et al., 2012, 2018, Hidalgo et al., 2013; 2017, Castillo et al., 2018). De todos estos estudios se desprenden claras tendencias ascendentes en los valores de temperaturas máximas y medias en la región y cambios en los patrones de precipitación, con importantes reducciones en la región más seca de AC, el CSC.

Existe una importante base de estudios que caracterizan los procesos meteorológicos en América Central (Amador et al., 2000; 2008; 2016; 2016b; Durán-Quesada, 2016) y su influencia en la precipitación regional (y el CSC). A partir de éstos se concluye que el CLLJ (Amador, 1998) es uno de los principales procesos que actúan en los eventos de sequía (Amador et al., 2000; Cook et al., 2010; Hidalgo et al., 2015; 2017; 2019; Maldonado et al., 2015; Muñoz et al., 2008; Wang, 2007; 2008), tanto durante el invierno boreal (época seca), como en el verano boreal (Mid summer drought o MSD según Magaña et al., 1999) y que su intensidad se encuentra directamente relacionada con el fenómeno ENOS. Con base en esta relación, diversos investigadores han abordado el tema de la relación del CLLJ y ENOS con los procesos de sequía en el CSC (Hidalgo et al., 2015; 2019; Durán-Quesada, 2016; Amador et al. 2000; Magaña et al., 1999, Cook et al., 2010; Maldonado et al., 2015; Martin, 2011, Wang, 2015). Paralelamente, se han realizado estudios hacia la caracterización de los fenómenos adicionales al CLLJ, que producen sequías sostenidas y prolongadas en el CSC (Carrao, 2016; Hidalgo et al., 2017; Magaña et al., 1999).

Los eventos de sequía asociados al CSC, actúan con diversa severidad y duración, lo cual ha sido objeto de estudio al relacionarle con los diferentes procesos meteorológicos oscilatorios de gran escala y baja frecuencia como el PDO (Pacific Decadal Oscillation en inglés; Mantua et al., 1997) y AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation en inglés; Enfield et al., 2001), procesos de escala regional y alta frecuencia como el CLLJ; o el ENOS y procesos asociados a este como NASH (North Atlantic Subtropical High en inglés; Davis et al., 1997) y la NAO (Walker, 1924). Hidalgo et al. (2019) han sugerido la existencia de un componente decenal en la severidad de las sequías en el CSC, que encuentra una explicación parcial en el CLLJ, ENOS y el NASH.

Este trabajo se considera como un punto de partida para la caracterización de las sequías en el CSC, a partir de la cual se ha propuesto analizar su severidad a través de la aplicación de diversos índices meteorológicos e hidrológicos, a saber, el SPI (Standardized Precipitation Index en inglés; McKee et al., 1993), RDI (Reconnaissance Drought Index en inglés; Tsakiris et al., 2005), mRAI (Modified Rainfall Anomaly Index en inglés; Van Rooy, 1965), PDSI, (Palmer Drought Severity Index en inglés; Palmer, 1965; Wells et al., 2000) y el Palmer Z Index (Palmer, 1965).

Finalmente, existen pocos estudios hacia el análisis de la variación espacial de las condiciones de la sequía en AC, siendo el más relevante el análisis de la variación en el tiempo de la sequía, realizada por Quesada-Hernández et al. (2019).

2. Marco teórico

La sequía es un proceso natural de alta complejidad, el cual se puede definir de forma simple como un evento climático extremo recurrente sobre el terreno, caracterizado por precipitación debajo de lo normal durante meses o años (Dai, 2011). La condición de sequía, aunque meteorológicamente medible, es normalmente cuantificada por el nivel de impacto que tiene sobre los distintos territorios y las actividades que en éstos se realizan.

El análisis de la sequía inicia por diferenciarle de la aridez y la escasez. A la ocurrencia de anomalías de precipitación o caudal se puede asociar una situación de insuficiencia en el suministro de agua, esta es ocasionada por una condición de sequía. No obstante, la escasez representa una situación permanente de déficit con respecto a la demanda de agua en un sistema de ámbito regional, la cual no necesariamente se relaciona con la sequía. Finalmente, la aridez por su parte es una situación natural de una región y condición permanente no provocada por la sequía. De esta manera, en el área objeto de este estudio (CSC), existen condiciones de aridez, con respecto al resto de AC. A pesar de la presencia de precipitaciones durante parte del año, se presentan condiciones de sequía estacional y condiciones de escasez, producto de la dinámica socioeconómica propia de la región.

Para una región cualquiera, la sequía es convencionalmente definida como un periodo prolongado (e.g. estacional, anual) de deficiencia de precipitación con respecto al valor medio estadístico, resultando en un faltante del recurso hídrico para el desarrollo de alguna actividad o sector medioambiental (Huschke, 1959). De esta definición se desprende que los efectos de la sequía pueden afectar a más de un sector o actividad productiva de manera simultánea; que pueden impactar con mayor intensidad a algunos sectores o actividades que a otras; y que su duración será proporcional a la afectación que generará en los sectores o actividades. A partir

de esto se han definido diversos tipos de sequía, con base en la duración de las mismas y de los sectores o actividades productivas afectadas (Dai, 2010).

2.1. Tipos de Sequía

2.1.1. Sequía meteorológica

La sequía meteorológica parte de una definición puramente estadística, a partir de la cual existe sequía en el momento en que se presentan periodos consecutivos con precipitaciones deficitarias respecto al valor medio (Palmer, 1965). Normalmente se le asocia también con temperaturas mayores a los valores medios, bajos valores de humedad relativa, etc. Por la naturaleza de esta definición, no se relaciona la sequía meteorológica con el impacto en ninguna actividad o sector, sino únicamente con valores de parámetros meteorológicos (con énfasis en la precipitación), por debajo de los valores esperados (valores medios). Con base en esto, para los análisis realizados en esta investigación, se ha considerado que la sequía meteorológica se produce después de un mes de valores de precipitación por debajo de la media.

2.1.2. Sequía hidrológica

La sequía hidrológica se relaciona directamente con caudales en cursos de agua o volúmenes embalsados, por debajo de lo normal. De forma más extensa se dice que la sequía hidrológica es aquella que se presenta cuando durante un periodo definido existe una disminución en la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas, la cual impide la cobertura del total de la demanda (Linsley, 1958). Por su naturaleza (y la naturaleza de su recarga), los tiempos de disminución de aguas superficiales y subterráneas varían significativamente, siendo la disminución en cauces casi inmediata y la de acuíferos más lenta y progresiva.

Con base en la anterior definición y consideraciones, se puede establecer que no existe una duración mínima a partir de la cual se presenta la condición de sequía hidrológica. Sin embargo, considerando la estacionalidad de las épocas seca y lluviosa en AC y especialmente en el CSC, se ha definido la sequía hidrológica como aquella que se sostiene por un periodo de nueve meses.

2.1.3. Sequía agrícola

De todos los tipos de sequía, la más compleja de establecer es la sequía agrícola, dado que esta se relaciona directamente con las necesidades hídricas de los cultivos, las cuales varían entre los mismos (Wilhite et al., 1956). De forma general, la sequía agrícola se define como el déficit de humedad en la zona radicular, para satisfacer las necesidades de un cultivo en un lugar y época determinada (Kulik, 1962).

En AC, pocas veces se diferencia el agua para suministro del agua para agricultura, por cuanto las fuentes de suministro suelen ser las mismas. De esta forma, para la región en consideración la sequía agrícola se encuentra más cercana a la hidrológica que a la meteorológica. Para efectos de análisis se ha establecido tres meses como la duración mínima para considerar una sequía como agrícola, partiendo de que a partir de esta duración existirá un efecto sobre el crecimiento de los cultivos.

2.1.4. Sequía socioeconómica

La sequía socioeconómica encuentra su definición predominantemente en las actividades productivas de la sociedad y minoritariamente en las condiciones propias del déficit de precipitación (Yevjevich, 1967). Así, habitualmente se habla de sequía socio-económica cuando algún sector económico se ve afectado por la

escasez hídrica, con las consecuentes pérdidas económicas asociadas (Sanford, 1979). Producto de la imprecisión de esta definición no se hace posible establecer una duración mínima de sequía para ser ésta considerada socioeconómica, dado que alguna actividad podría tener pérdidas en tan solo un mes de sequía, mientras alguna otra podría tomarle años. Adicionalmente el nivel de impacto, entre actividades también varía sustancialmente. Por tanto, se ha considerado que, para efectos de análisis de esta investigación, la sequía socioeconómica se produce cuando una mayoría de los sectores y actividades son afectados, lo cual se ha establecido ocurre en eventos de sequía de al menos doce meses de duración.

La ocurrencia de sequías en el CSC es un proceso reiterativo, cuya periodicidad no es totalmente conocida. La propuesta de esta investigación parte de la hipótesis de que las sequías en esta región se relacionan con fenómenos globales (e.g. ENOS, AMO) o locales (e.g. CLLJ) y que la condición de sequía ocasionada por estos puede ser analizada a partir de índices de precipitación utilizados para su clasificación. Así, seguidamente se mencionan primero los procesos atmosféricos que en las investigaciones del tema se ha determinado podrían ser causales de sequía y posteriormente los índices de sequía y su utilidad para la caracterización de la sequía.

2.2. Procesos atmosféricos

2.2.1. Oscilación del Atlántico Norte

La NAO es una fluctuación de la presión atmosférica entre la zona de bajas presiones islandesa y la zona de altas presiones de Azores (Walker, 1925). Su fase positiva se caracteriza por altas presiones por debajo de lo normal en el noreste de los Estados Unidos y cruzando el Atlántico hacia el oeste de Europa. Complementariamente, en su fase negativa se presentan mayores presiones sobre esta misma región (Greatbatch, 1999). El índice de la NAO se basa en la diferencia

de presión entre Azores y la zona subpolar islandesa (Hurrell, 1995). La Fig. 2 muestra la serie de la NAO entre los años 1970 y 2000.

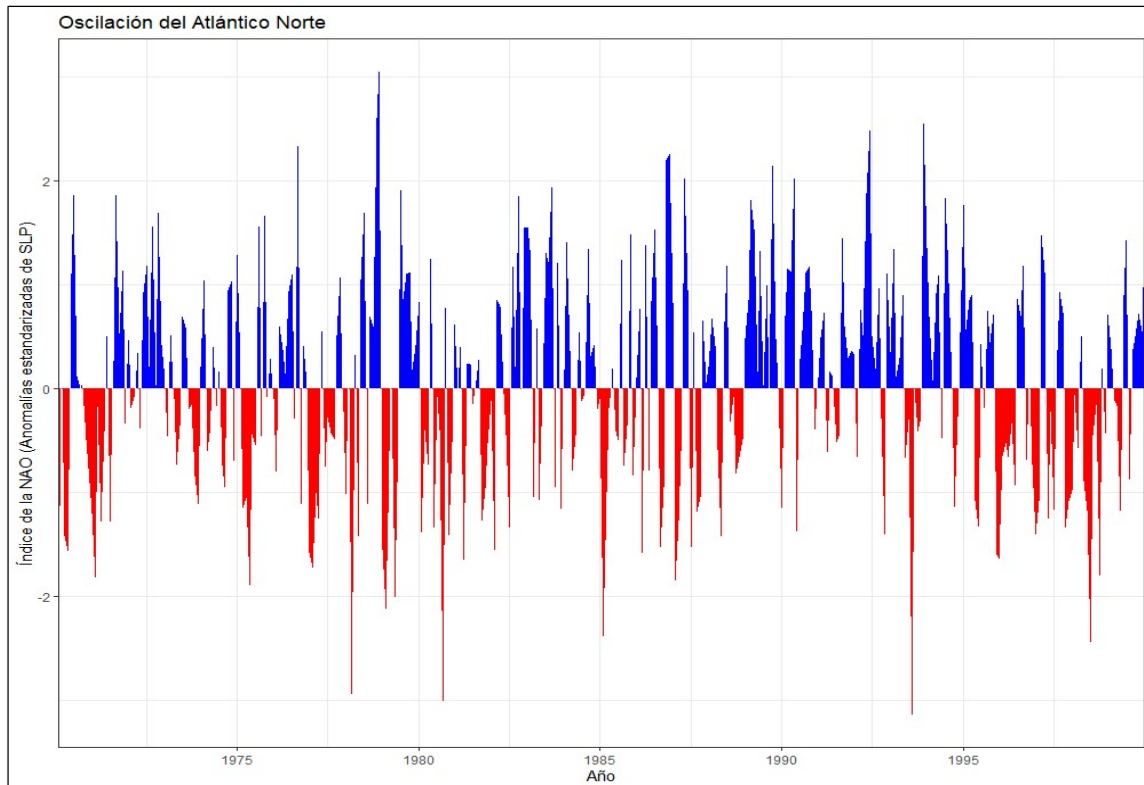


Figura 2. Serie de tiempo de la Oscilación del Atlántico Norte, en el periodo de análisis (1970-2000), generada a partir del primer modo de la diferencia de presión entre Azores y la zona subpolar islandesa (Hurrell, 1995).

2.2.2. Oscilación Multidecenal del Atlántico

La AMO (Goldenberg et al., 2001), es una fluctuación de la temperatura superficial de mar en el Atlántico norte, la cual ejerce una importante influencia en el clima de esta región (Knudsen et al., 2014). La AMO es, después del ENOS, el proceso que más modula la variación de la temperatura del Atlántico norte y por tanto se le atribuye gran influencia en la actividad ciclónica del Atlántico (Brown et al., 2016). Se correlaciona con la temperatura del aire y la precipitación en el norte de América y Europa. Su fase positiva (negativa), se asocia con reducciones (incrementos) en la precipitación (Ghosh et al., 2016). Durante el periodo de análisis,

la AMO es predominantemente negativa, no obstante, hacia el final del periodo de análisis se torna positiva (Fig. 3). Esto es importante porque podría afectar posibles tendencias en las variables hidroclimáticas, siendo el cambio de fase tan sólo parte de uno de los ciclos de la AMO.

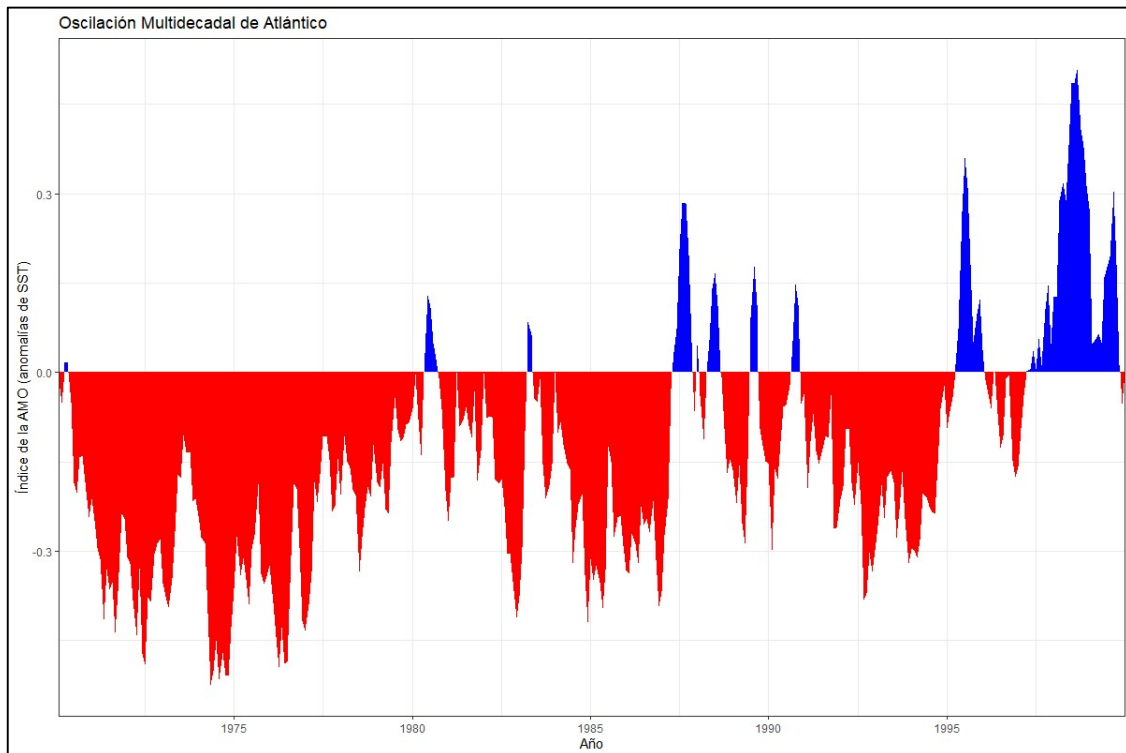


Figura 3. Serie de tiempo de la Oscilación Multidecadal del Atlántico en el periodo de análisis (1970-2000), generada a partir de la fluctuación de la temperatura superficial de mar en el Atlántico norte (Goldenberg et al., 2001).

2.2.3. Oscilación Decenal del Pacífico

La PDO (Mantua et al., 1997) es una fluctuación recurrente de variabilidad climática, la cual se ubica sobre las latitudes medias del océano Pacífico Norte. Se identifica con un patrón espacial de variación de la temperatura del agua del océano Pacífico, el viento superficial y la presión a nivel del mar. Durante su fase cálida la temperatura a nivel de superficie del mar tiende a ser anómalamente baja en el centro del Pacífico Norte. Entre noviembre y marzo, la presión a nivel de mar en el

Pacífico Norte se reduce, generando un incremento de los vientos del este y se incrementa en el Pacífico Norte subtropical, lo cual incrementa los vientos hacia el oeste (Mantua, 2002).

La amplitud de la señal PDO varía desde unos pocos años hasta múltiples décadas (Fig. 4). Durante su fase positiva (o cálida) el Pacífico Oeste se vuelve más frío y la parte este más cálida. Lo contrario ocurre durante su fase negativa.

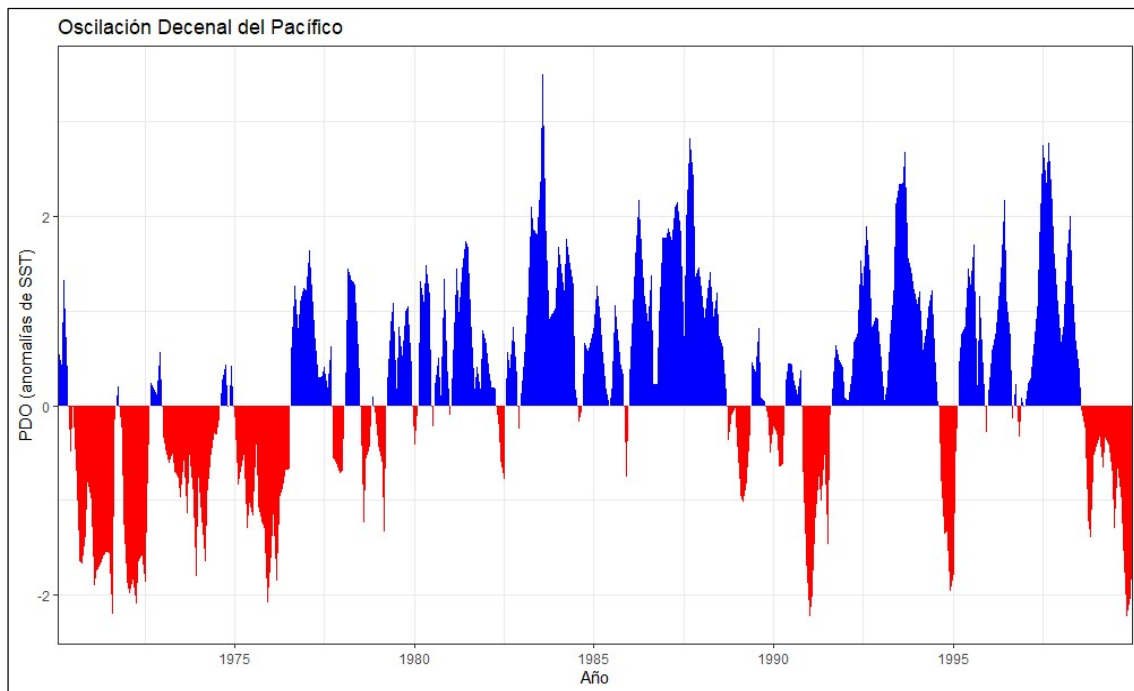


Figura 4. Serie de tiempo de la Oscilación Decenal del Pacífico en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de la serie de anomalías de la temperatura superficial del mar sobre las latitudes medias del océano Pacífico Norte (Mantua et al., 1999).

2.2.4. El Chorro de Bajo Nivel del Caribe

El mar Caribe, se encuentra ubicado al noreste de AC y el sur de México. Durante el verano boreal se caracteriza por presentar temperaturas a nivel de la superficie del mar, superiores a los 28 °C (en la época lluviosa entre mayo y octubre). A nivel superficial, el mar Caribe presenta vientos del este (comportamiento

asociado a los vientos alisios). A esta zona de vientos intensos de bajo nivel (925 hPa), se le denomina el Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés; Amador 1998; 2008). La Fig. 5 muestra la serie del índice del CLLJ 1970-2000. Presenta dos componentes principales, hacia AC y hacia el Golfo de México. El componente centroamericano encuentra en su trayectoria la región montañosa y atraviesa el territorio continental por las mayores planicies de la Región (e.g. Lago de Nicaragua).

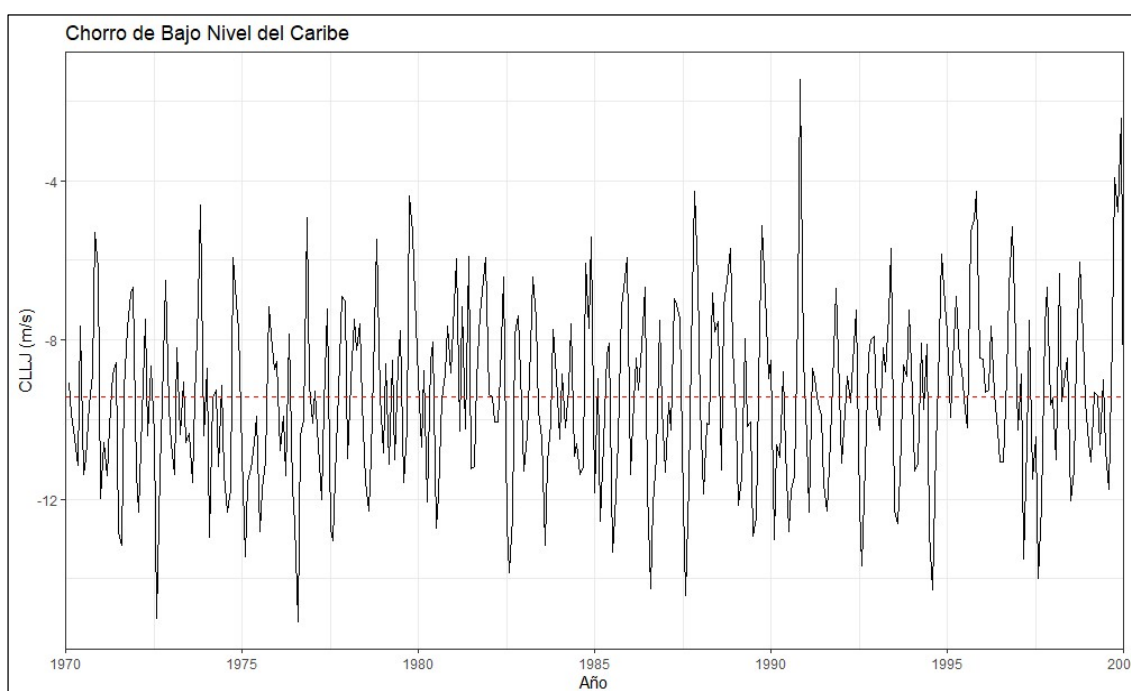


Figura 5. Serie de tiempo del índice del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Amador 2008) y valor medio (línea punteada), en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de los vientos zonales a 925 hPa en el área de interés.

2.2.5. El Niño Oscilación del Sur

El fenómeno de ENOS es quizás el que mejor ilustra el rol de la interacción entre la atmósfera y el mar en la variabilidad interanual en el trópico. Fue descubierta por Gilbert Walker, quien identificó los cambios en la presión a nivel de mar entre Indonesia y el Pacífico Tropical (Oscilación del Sur). Sin embargo, no

lo relacionó con el océano Pacífico. Fue Jacob Bjerknes (1969) quien realiza esta asociación y quien acuña el término El Niño Oscilación del Sur.

El Niño (La Niña) se le llama a la presencia de temperaturas del mar por encima (debajo) de lo normal cerca de las costas de Ecuador y Perú, lo cual ocurre alrededor de la celebración de la Navidad (de donde proviene el término El Niño). La presencia de esta anomalía en la temperatura del mar se asocia con el patrón circulatorio del Océano Pacífico, siendo ésta la componente oceánica de ENOS. Durante la influencia de El Niño (La Niña), se presenta una disminución (aumento) de la presión en gran parte del Pacífico Central, la cual es la componente atmosférica de ENOS, a la cual se asocia una disminución (aumento) de los vientos alisios y esta a su vez se asocia con una reducción (incremento) de la precipitación en el oeste del Pacífico y un aumento (disminución) en las tormentas y la precipitación convectiva en el Pacífico Central (Pidwirny, 2006).

Las series originales de tiempo de temperatura superficial del mar de la componente oceánica del ENOS se derivan de rutas de barco; además más recientemente se han puesto boyas flotantes en el Pacífico Tropical para registrar el fenómeno. A partir de todas estas fuentes se logró elaborar un registro continuo de la temperatura del mar desde finales del siglo XIX, pero con mejor calidad desde 1949. Así, se tiene una franja en el océano Pacífico para la cual se definen tres regiones que dan origen a las series Niño1+2, Niño3, Niño4 y Niño3.4.

- Niño1+2 (0-10 °S, 90-80 °O): es la región más corta y cercana las costas de Perú. Es además la región que tiende a tener mayor varianza en la temperatura a nivel de superficie del mar.
- Niño3 (5 °N-5 °S, 150 °O-90 °O): fue la región para la cual inicialmente se realizaron las predicciones y registro de El Niño, hasta que Trenberth (1997) determinó que las interacciones acopladas se encuentran más hacia el oeste,

con lo que el Niño3.4 y su índice oceánico se convirtieron en el estándar para análisis.

- Niño3.4 (5 °N-5 °S, 170 °O-120 °O): se considera que las anomalías de Niño3.4 representan la temperatura superficial del mar ecuatorial en todo el Pacífico desde la línea de datos hasta la costa sudamericana. Los eventos de El Niño o La Niña se definen cuando la temperatura superficial del mar supera los +/- 0.4°C durante un período de seis meses o más.
- Niño4 (5 °N-5 °S, 160 °E-150 °O): El índice de Niño4 captura anomalías de la temperatura a nivel de mar en el Pacífico ecuatorial central. Esta región tiende a tener menos varianza que las otras regiones de Niño. La Fig. 6 muestra las series Niño3, Niño3.4 y Niño4.

La distribución zonal del calentamiento superficial (continental y oceánico), genera una circulación hacia el oeste (circulación de Walker), la cual se ve alterada por el fenómeno de ENOS, lo cual propicia cambios en las precipitaciones en los trópicos (y el CSC). Complementariamente, la fase menos cálida de ENOS, se asocia a vientos alisios de mayor intensidad y temperaturas a nivel de mar más frías de lo normal (Pidwirny, 2006).

En el análisis, se consideró únicamente en la componente oceánica del ENOS, a través de las series de SST. No se consideró, por tanto, el índice de variación de presión atmosférica, conocida como el Índice de Oscilación del Sur (SOI).

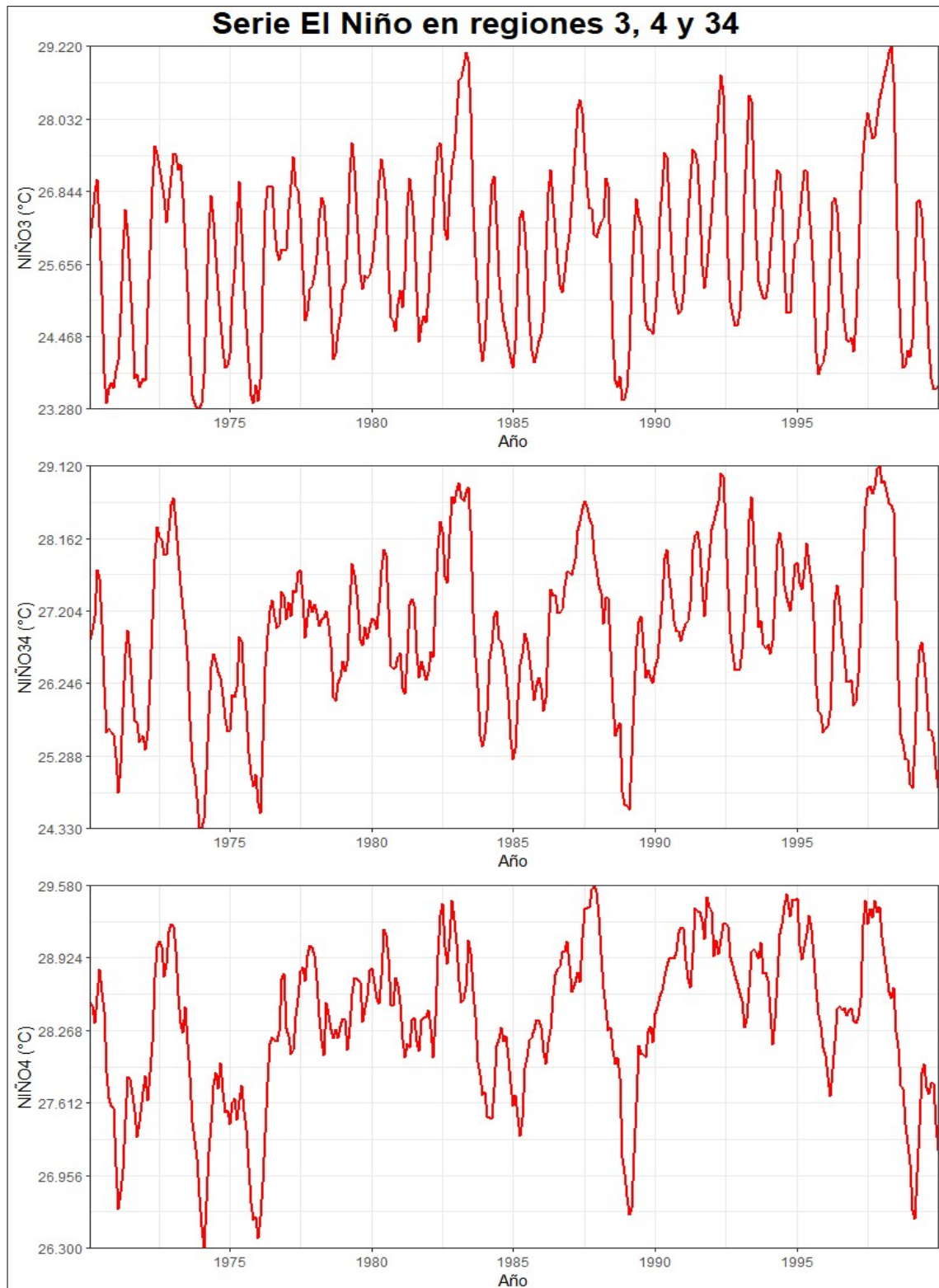


Figura 6. Series de tiempo Niño3, Niño3.4 y Niño4 de índices de El Niño (componente oceánico del ENOS), en el periodo de análisis (1970 - 2000), a partir de la temperatura media del mar en las respectivas regiones.

2.2.6. Índice Oceánico de El Niño

El Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés, 5 °N-5 °S, 170 °O-120 °O) se ubica en la misma región que el Niño3.4, pero considera un valor medio de 3 meses (Niño3.4 considera 5 meses). Se basa en la medición de la temperatura a nivel del mar en la región del Niño3.4. Su importancia radica en que clasifica el fenómeno de ENOS con mayor facilidad. Los eventos de El Niño (fase cálida del ENOS) se caracterizan por tener un ONI mayor o igual a 0.5 °C de la temperatura media mensual. Complementariamente, La Niña (fase fría del ENOS) se caracteriza por presentar un ONI menor o igual -0.5 °C (Trenberth, 2018).

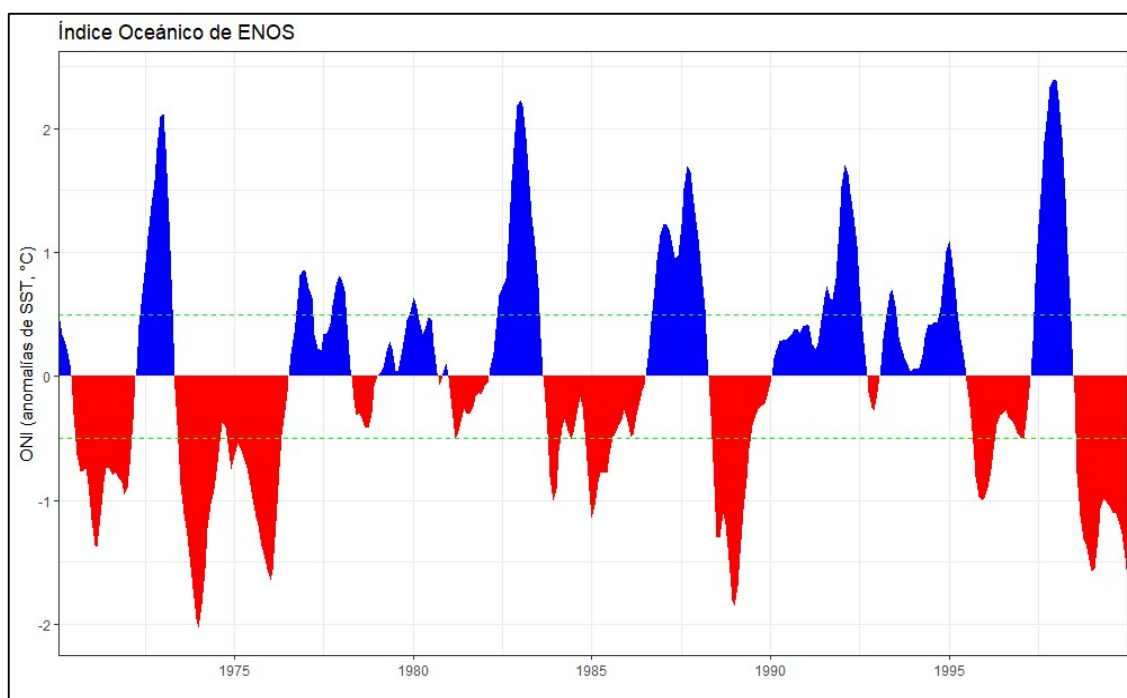


Figura 7. Serie del Índice Oceánico de El Niño en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de la desviación respecto a la media de la temperatura a nivel del mar en la región del Niño3.4 (Trenberth, 2018).

El Niño tiende a ocurrir cada 4 o 5 años y tiende a durar entre 12 y 15 meses. Sin embargo, pueden presentarse eventos de mayor duración, los cuales tienden a ocurrir cada 10 a 15 años (Wang, 2015). En promedio se puede decir que El Niño

tiene un periodo de retorno de entre 4 y 7 años. Complementariamente, La Niña tiende a durar entre 1 y 3 años (Mann, 2010).

Durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño se incrementan las precipitaciones en aquellas regiones en que la temperatura a nivel del mar es superior al promedio. Los impactos de La Niña tienden a ser menos predecibles que los impactos de El Niño (Masson, 2019). La fuerza de las corrientes de chorro (polares y subtropicales) en las partes superiores de ambos hemisferios tiende a incrementarse durante la ocurrencia de El Niño y disminuyen en La Niña (NASA, 1999).

2.2.7. Índice Tropical del Atlántico Norte

El índice TNA es una anomalía de la temperatura media de la superficie del mar entre las latitudes 5.5°N y 23.5°N y las longitudes 15°O y 57.5°O . Tal y como su nombre lo establece, el TNA es un indicador de las temperaturas superficiales en el este tropical del Océano Atlántico. La serie (junto con la serie del Atlántico Sur, TSA), fueron originalmente definidas por Enfield et al. (1999) como parte de un análisis de la desviación de las temperaturas de la superficie del mar en el Atlántico. La Fig. 8 muestra la serie TNA, considerada para análisis en esta investigación.

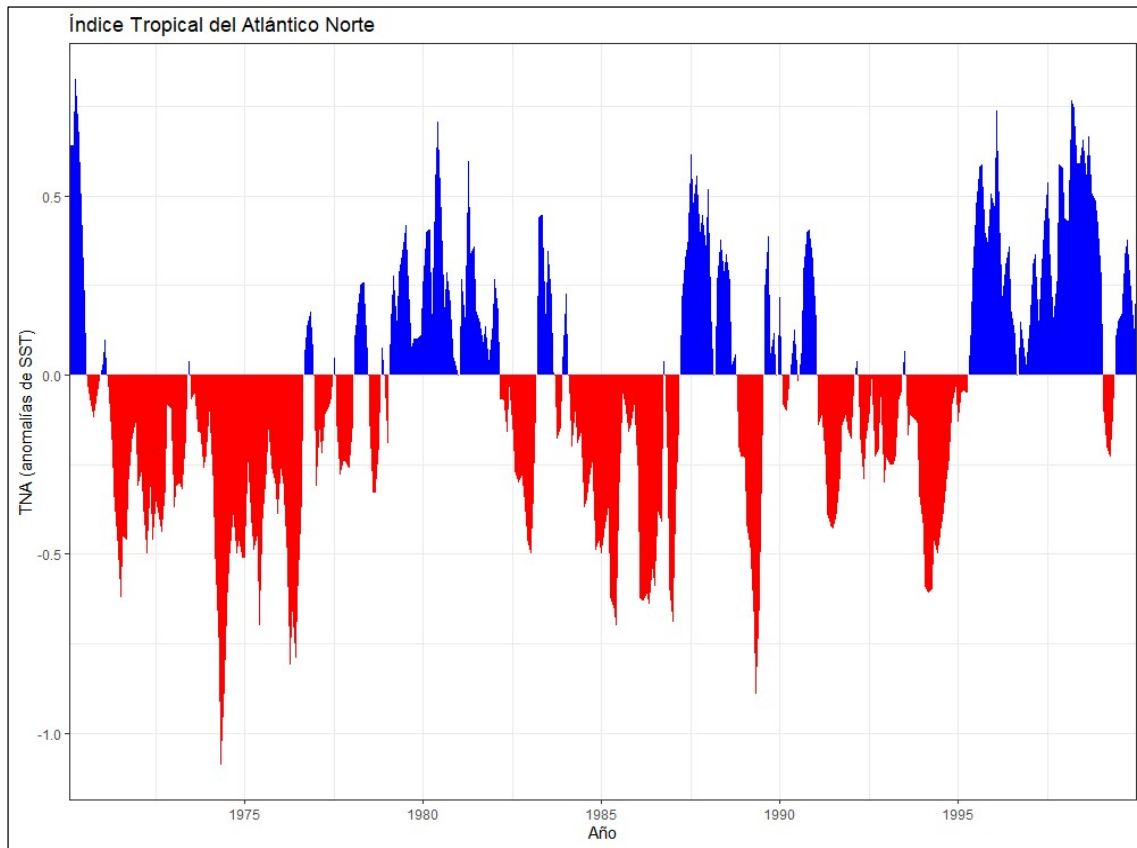


Figura 8. Serie de tiempo del Índice Tropical del Atlántico Norte en el periodo de análisis (1970-2000), a partir de la anomalía de la temperatura media de la superficie del mar entre las latitudes 5.5 °N y 23.5 °N y las longitudes 15 °O y 57.5 °O.

2.2.8. El veranillo

El veranillo o MSD es una reducción de los valores de precipitación de la época lluviosa de la vertiente Pacífica que ocurre usualmente en julio o agosto. Magaña et al. (1999), han indicado que el veranillo ocurre como resultado de la interacción entre las temperaturas a nivel del mar, el fenómeno de convección, la nubosidad y la intensidad de los vientos del este. Durante los meses de mayo y junio el fortalecimiento de los vientos del este induce convección hacia el este de AC y divergencia y hundimiento hacia el oeste, lo cual ocasiona un descenso en la precipitación junto a días despejados en esta última zona. Esta condición se asocia a un incremento en la convección, como resultado de un aumento en las

temperaturas a nivel del mar, lo cual, junto a un debilitamiento de los vientos del este en la zona de bajo nivel, ocasiona el inicio de la segunda parte de la época lluviosa. Los cambios en los vientos del este se asocian al CLLJ y de aquí se extrae que éste juega un importante papel en la modulación de la canícula y por tanto en la ocurrencia de posibles eventos secos en el CSC. La intensidad del CLLJ varía entre años, resultando en años sin veranillo o con mayores periodos de sequía (Magaña et al. 1999).

2.3. Índices de precipitación

El origen y supuestos de los índices de precipitación se detalla a continuación. El procedimiento de cálculo de estos se presenta en el anexo A.

2.3.1. Índice Normalizado de Precipitación

El Índice Normalizado de Precipitación (SPI, acrónimo en inglés), fue desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado en 1993 (McKee, et. al. 1993), como un indicador general para la definición y monitoreo de las sequías. Es destacado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO 2002) como el punto de partida para el monitoreo de los eventos de sequía. Para su cálculo se requiere como entrada únicamente series de precipitación total mensual, en estaciones cuyo registro se recomienda tenga extensiones mayores a los 30 años.

El SPI, al igual que otros índices de sequía, reconoce que la duración de las sequías varía entre unos pocos días y hasta varios años, por lo que establece escalas de tiempo para la medición de las sequías, promediando los valores de precipitación mensual.

2.3.2. Índice de Reconocimiento de Sequías

El Índice de Reconocimiento de Sequías (DRI, acrónimo en inglés), fue desarrollado en la Universidad Nacional Técnica de Atenas, Grecia (2005). Se basa en el cálculo de la razón entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (ver anexo A). En éste, se generan tres valores: el valor inicial (el cual es la razón de la suma de la precipitación y la suma de la evapotranspiración potencial, ecuación (A. 1)). El valor normalizado es la normalización del valor inicial, con $y_k = \ln(a_k)$, bajo el supuesto de una distribución log-normal, ecuación (A. 2). El valor estandarizado ajusta la función de densidad de probabilidad gamma a la distribución de frecuencia de a_k , ecuación (A. 3) (Asadi-Zarch, 2011).

El cálculo del RDI, conlleva un proceso de ajuste a una distribución gamma, similar al procedimiento de cálculo del SPI y al igual que este, genera valores de múltiples escalas temporales, lo cual adicionalmente hace estos dos índices comparables. El RDI representa un valor físicamente más representativo de los procesos naturales, por cuanto no considera únicamente la precipitación, sino que toma la razón de lo precipitado y lo evapotranspirado (Asadi-Zarch, 2011).

2.3.3. Índice de Severidad de Sequía de Palmer

El Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, Palmer, 1965), fue uno de los primeros índices de sequía desarrollados para comparación en diversos climas y escalas temporales. Fue inicialmente creado en los Estados Unidos para uso en regiones de cultivos. Se basa, al igual que el RDI, en la elaboración de un balance hídrico, el cual considera la precipitación, la temperatura y el contenido disponible de agua (AWC, acrónimo en inglés). El índice es esencialmente la

diferencia entre la precipitación requerida para mantener un nivel normal de balance hídrico y la cantidad realmente precipitada.

2.3.4. El Índice Autocalibrado de Severidad de Sequía de Palmer

El auge de las computadoras ha hecho posible sustituir los valores empíricos promedio del PDSI sugeridos por Palmer (1965) con valores del clima local, los cuales son dinámicamente reemplazados. Esto se realiza ponderando las características climáticas que afectan el rango de los valores del PDSI. Este procedimiento se conoce como el Índice Autocalibrado de Severidad de Sequía de Palmer (sc-PDSI, acrónimo en inglés; Wells, 2004).

2.3.5. Índice Z de Palmer

El cálculo del PDSI, genera una serie de resultados intermedios, uno de los cuales es la diferencia entre lo precipitado y el resultado del balance hídrico superficial. Este valor es ponderado con un parámetro de calibración local K. Esta ponderación es conocida como el Índice de Anomalía de Humedad ó índice Z. El índice provee una medición comparativa de anomalías relativas de una región para condiciones secas o húmedas al comparar los valores con el registro completo. El índice Z normalmente se calcula para escalas temporales cortas, permitiendo la identificación del desarrollo rápido de condiciones de sequía (Palmer, 1965).

2.3.6. Índice Hidrológico de Sequía de Palmer

A partir de su planteamiento original del PDSI, Palmer (1965) generó una versión que considera el efecto a largo plazo de la reducción en el almacenamiento subterráneo, el flujo superficial y el agua subterránea. A este índice se le llama Índice Hidrológico de Sequía de Palmer (PHDI). Este permite estimar el fin de una

sequía, a partir de la precipitación necesaria, mediante la utilización de la relación entre la humedad y la humedad requerida para finalizar las condiciones de sequía.

2.4. Transformadas de onduletas (Wavelet transforms)

Las transformadas de onduletas u ondículas, tienen su origen en la década de 1980, como una aplicación al análisis de señales sísmicas. A partir de ahí, evolucionan hacia aplicaciones ingenieriles y de ciencias exactas, encontrándose especialmente útiles en la meteorología y potenciando su aplicabilidad con el advenimiento de las computadoras personales (Torrence et al, 1998).

Una transformada de ondícula es una función que se aplica a una señal, para lograr descomponerla en componentes. Sin embargo, no cualquier función es admisible como transformada. Para esto la función debe cumplir una serie de condiciones (Sheng, 2000):

- Admisibilidad: Una función para ser utilizada como transformada, debe ser admisible, lo cual para una función integrable implica que su media sea cero.
- Similaridad: La descomposición de escala se debe obtener de la dilatación y translación de una sola función primaria. Por tanto, todas las transformadas deben ser mutuamente similares (i.e. tener covarianzas escaladas entre ellas).
- Inversibilidad: Debe de existir al menos una ecuación para recuperar la señal original a partir de los coeficientes de la ondícula.
- Regularidad: la ondícula debe existir en un dominio espacial finito y debe ser localizable en ambos extremos de la Transformada de Fourier.

La fortaleza del análisis de transformadas de ondulitas, radica en la función utilizada. La selección de esta depende de la aplicación que se desea realizar. A partir de la función seleccionada, el análisis de las señales mediante transformadas de ondulitas consiste en escalar y desplazar la función sobre la serie original (Fig. 9).

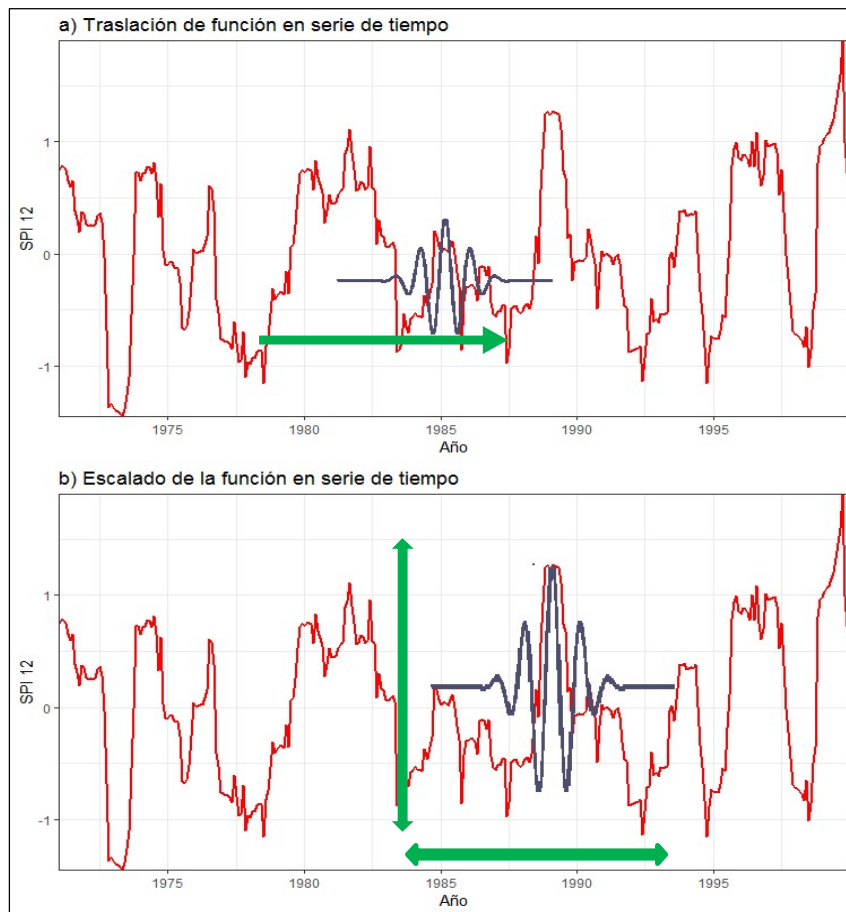


Figura 9. Procedimiento de análisis de ondulitas, mediante el traslado (a) y escalado (b) de la función de transformación (Torrence y Compo, 1998).

La transformada de ondulita estará dada por la ecuación (1):

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi * \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right] \quad (1)$$

Donde para una secuencia x_n en convolución con una versión transformada y escalada de la función de onduleta ψ normalizada, s es la escala de la onduleta, la cual es trasladada a lo largo del índice de tiempo n . Al variar la escala y trasladarla en el tiempo se puede construir una representación bidimensional del tiempo vs frecuencia (escalas), lo cual permite identificar las diferentes señales presentes en una serie de tiempo (Farge, 1992).

Dado que la transformación de una serie de tiempo mediante onduletas implica un proceso de filtrado con una función de respuesta conocida (transformada), es posible realizar una recomposición o reconstrucción de la serie original (Torrence et al, 1998). En series discretas este proceso permite la obtención de una reconstrucción perfecta (i.e. obtener una serie de tiempo igual a la original), pero en series de tiempo continuas el proceso es más complejo y es difícil recuperar la misma serie original. Esto se debe a la redundancia de las escalas y el tiempo. No obstante, esta misma redundancia permite realizar la reconstrucción utilizando una transformada diferente a la utilizada para la descomposición (Farge, 1992). En este caso la reconstrucción estará dada por la suma de la parte real de la transformada en todas las escalas.

2.5. Correlación espacial

En el análisis de información espacial, a menudo es valioso analizar si la información se puede clasificar por grupos, se encuentra dispersa o bien es totalmente aleatoria. La influencia de un proceso atmosférico sobre un área de la extensión del CSC (o bien toda AC), podría pensarse generaría una tendencia entre las estaciones de medición en el territorio. Para el análisis de este tipo de tendencia (o la ausencia de ella), es valiosa la utilización del análisis de correlación espacial, el cual es a menudo realizado mediante la prueba de la "I" de Moran. Esta fue desarrollada por Patrick Moran (1950) y está dada por la expresión:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

Donde, para el caso de análisis, N es el número total de estaciones, X es la variable de interés (i.e. índice de precipitación); \bar{X} es la media de X y w_{ij} es un elemento de una matriz de pesos espaciales. El cálculo de la correlación espacial requiere primero de la definición de la matriz de pesos espaciales, lo cual se realiza con base en algún criterio de selección, desde la inclusión de todas las estaciones o la agrupación con base en criterios espaciales de selección (e.g. proximidad por división territorial). Chen (2011), propone un criterio de selección basado en la comparación de 4 funciones de ponderación:

- Correlación global (ó de largas distancias), la cual se obtienen de una relación potencial inversa y está dada por

$$c_{ij} = r_{ij}^{-b} \quad (3)$$

donde r_{ij} es la distancia que existe entre dos ubicaciones i & j.

- Correlación cuasi-global, la cual se expresa mediante una función exponencial de la forma:

$$c_{ij} = e\left(\frac{-r_{ij}}{\bar{r}}\right) \quad (4)$$

donde \bar{r} es la distancia promedio entre todas las ubicaciones

- Correlación cuasi-local o de paso parcial, para la cual se establece un criterio de distancia r_0 :

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } r_{ij} \leq r_0 \\ 0, & \text{si } r_{ij} > r_0 \end{cases} \quad (5)$$

donde r_0 se tomó como la distancia promedio entre todas las ubicaciones.

- Correlación local o de paso, la cual se basa en que las ubicaciones sean colindantes.

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } i \text{ colinda con } j \\ 0, & \text{las demás} \end{cases} \quad (6)$$

Dado que en el caso de análisis se cuenta con ubicaciones puntuales, se establecieron regiones a partir de la generación de polígonos de Thiessen (Voronoi)

y la correlación entre dos estaciones i & j será 1 cuando sus respectivos polígonos de Thiessen sean colindantes, de lo contrario, 0.

La función de autocorrelación (ACF) de una serie de tiempo, expresa que tanto una serie se relaciona con sus valores con rezago. De igual forma, la función de autocorrelación parcial (PACF) expresa que tanto se relacionan los residuos de una serie con el siguiente rezago. Con base en esta definición, se puede pensar en generar series a partir de las matrices de ponderación generadas con las funciones de las ecuación (3) a (6), para las cuales se pueden calcular sus ACF y PACF, para determinar cuál de las funciones será la más apropiada para la definición de la matriz de ponderación a considerar en el cálculo de la correlación espacial. De esta manera, se generaron los gráficos de ACF y PACF de las estaciones del CSC, de las que se encuentran fuera del CSC y del total de estaciones. Estos gráficos de ACF y PACF de las funciones de ponderación consideradas se muestran en el anexo F.

Para una serie de elementos espaciales cualesquiera, se puede calcular para cada punto, el valor medio de los elementos circundantes a este punto. Así, para cada elemento se tendrá un par ordenado compuesto por su valor y el valor medio de los elementos circundantes. La correlación espacial será el resultado del ajuste de la regresión lineal a todos los pares ordenados de los elementos espaciales. Con base en esta definición, se puede analizar la uniformidad del comportamiento de la sequía en presencia de los diversos procesos atmosféricos en el territorio analizado.

3. Datos utilizados

3.1. Fuente de los datos

Para el análisis realizado, se utilizaron los datos de precipitación y temperatura de la base de Datos NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), la cual a su vez contiene datos provenientes de diversas fuentes, entre los que se encuentran conjuntos de datos de otros investigadores, información aportada por estudiantes participantes de cursos de entrenamientos, datos brindados por otras instituciones en trabajos conjuntos con Universidad de Costa Rica o el CIGEFI, así como los datos de los servicios meteorológicos e hidrológicos de la región. Los datos de temperatura son provistos por Hidalgo et al. (2017) obtenidos de un modelo de interpolación de datos espaciales en una cuadrícula de 5 x 5 km. Las series de datos de procesos atmosféricos se obtuvieron de la base de datos de Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR), de los Estados Unidos de America, la cual es de descarga libre a través del sitio <https://climatedataguide.ucar.edu>. Finalmente, los datos de AWC necesarios para el cálculo de algunos de los índices de sequía, provienen de Global Soil Texture and Derived Water (Webb, 2000).

3.2. Series de precipitación

Todos los datos utilizados para análisis se encuentran en una frecuencia mensual, la cual tiene el paso de tiempo necesario para el análisis de sequías. Los datos se obtuvieron en el formato de datos de Matlab®. Estos fueron incorporados a rutinas de R mediante las librerías existentes para el análisis de archivos de Matlab®. El grupo de datos utilizado se compone de las series de precipitación, temperatura y AWC del periodo entre 1970 y 2000, así como las coordenadas geográficas de cada una de las estaciones.

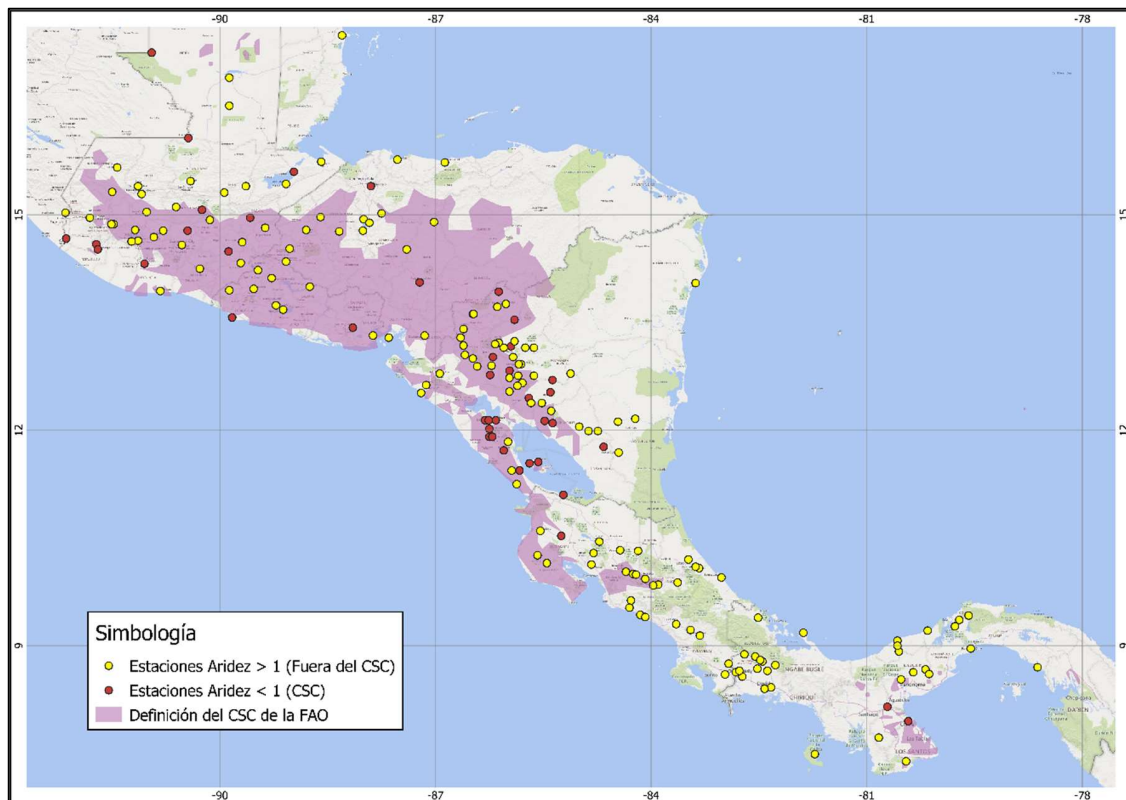


Figura 10. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas (círculos de colores) en América Central de la base de datos NUMEROSA del CIGEFI. Los colores indican la aridez de acuerdo con la definición del CSC.

La Fig. 10 muestra la ubicación de las 199 estaciones utilizadas para el análisis, sobre el mapa presentado en la Fig. 1 (área del CSC del Atlas Centroamericano para la Gestión Sostenible del Territorio, 2011). En rojo se muestran las estaciones que se ha considerado forman parte del CSC (con base en el criterio de aridez, según se explicará posteriormente) y en amarillo las restantes estaciones. De esta se observa que no existe total coincidencia entre el área del CSC definida por la FAO y el área definida por aquellas estaciones cuya aridez es menor a 1 (entre más pequeño el índice de aridez, mayor es la aridez climatológica). Sin embargo, se decidió conservar para análisis del CSC las estaciones definidas con este criterio como representantes de las estaciones con mayor aridez climatológica y representatividad de la región seca de AC, las cuales a su vez corresponden con la definición realizada por Hidalgo et al. (2019) del área del CSC. La Fig. 11 muestra las series del promedio mensual de precipitación de todas las

estaciones, de solo aquellas definidas como parte del CSC y de las restantes estaciones. Se observa que las estaciones del CSC tienen la menor precipitación, mientras que las restantes, la mayor.

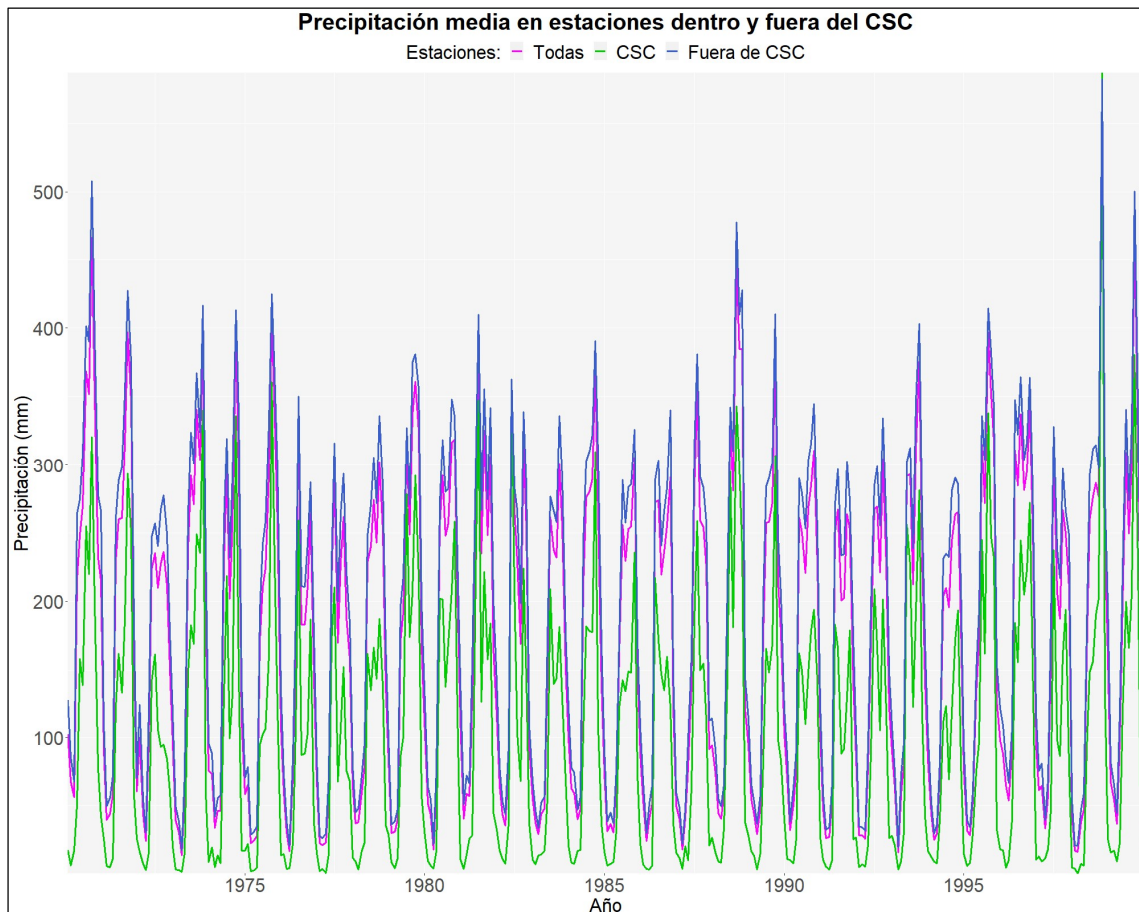


Figura 11. Promedio de precipitación mensual de todas las estaciones (línea roja), de las estaciones del CSC (línea azul) y de las que no corresponden al CSC (línea verde) en el periodo de análisis (1970-2000).

Para cada una de las estaciones se calculó el SPI, en escalas 1 a 36 meses y el RDI en las mismas 36 escalas. Adicionalmente se calcularon los índices el sc-PDSI, y el PHDI, a través de la rutina de cálculo disponible en <http://greenleaf.unl.edu>, la cual fue desarrollada por la Universidad de Nebraska – Lincoln. Los valores de SPI se calcularon con una rutina de elaboración propia, con la librería de R: SPI (Neves, 2012), y revisada con la rutina de MatLab® desarrollado por el Dr. Hugo Hidalgo (CIGEFI-Escuela de Física, Universidad de Costa Rica).

Adicionalmente, por la definición de los índices y a partir de lo reportado por otros autores, existe similitud entre los valores de SPI y RDI. Por lo tanto, la validación del RDI se realizó a partir de la similitud de sus valores con el índice SPI. Finalmente, a través de la librería de R: sc-PDSI (Zhong et al., 2018), se validaron los valores de PDSI y PHDI.

La Fig. 12 muestra la serie con el promedio de todas las estaciones del SPI en escalas 1, 3, 6, 12 y 24 meses, las cuales son algunas de las escalas consideradas para el análisis. Los valores del SPI a escalas cortas (e.g. 1,2,3, figuras 12.a a 12.c) tenderán a tener altas frecuencias al ser una medición de las desviaciones más rápidas. Este comportamiento se puede observar en las series de 1 y 3 meses presentadas en esta. De igual forma, por la naturaleza del índice, las escalas superiores son promedios de valores de los meses anteriores lo cual genera una atenuación de las variaciones de alta frecuencia y a medida que se incrementa la escala, el índice tenderá a mostrar con más realce las variaciones de baja frecuencia.

De las figuras 2 a 8 se extrae que la mayoría de los procesos meteorológicos considerados como disparadores de la sequía no presentan variaciones de baja frecuencia, por lo que es posible que sean los índices de mayores escalas los que mejor se relacionen con las series de procesos meteorológicos consideradas en el análisis.

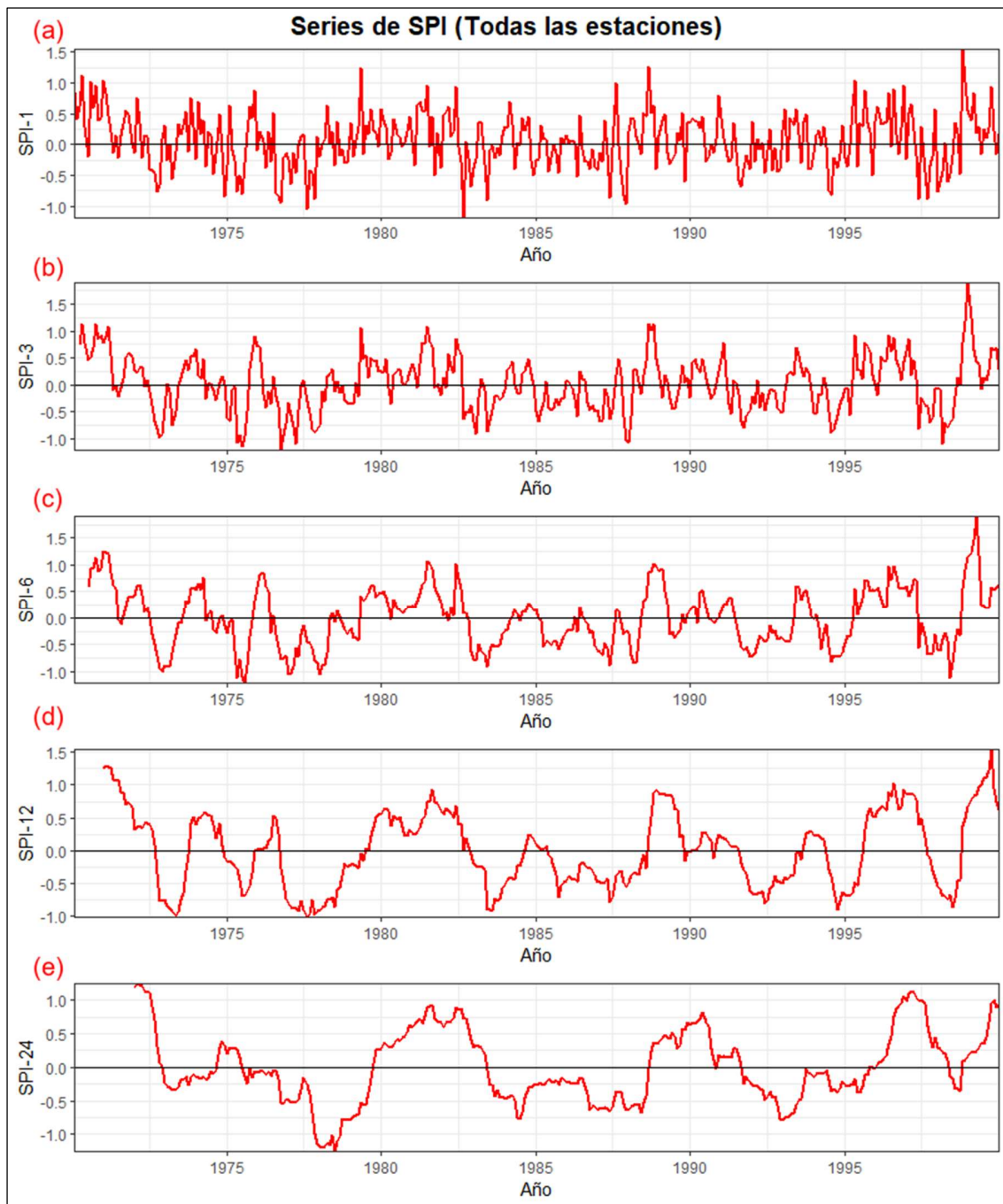


Figura 12. Variación en la frecuencia de las series SPI promedio de todas las estaciones en escalas 1,3,6,12 y 24 meses en el periodo de análisis (1970-2000).

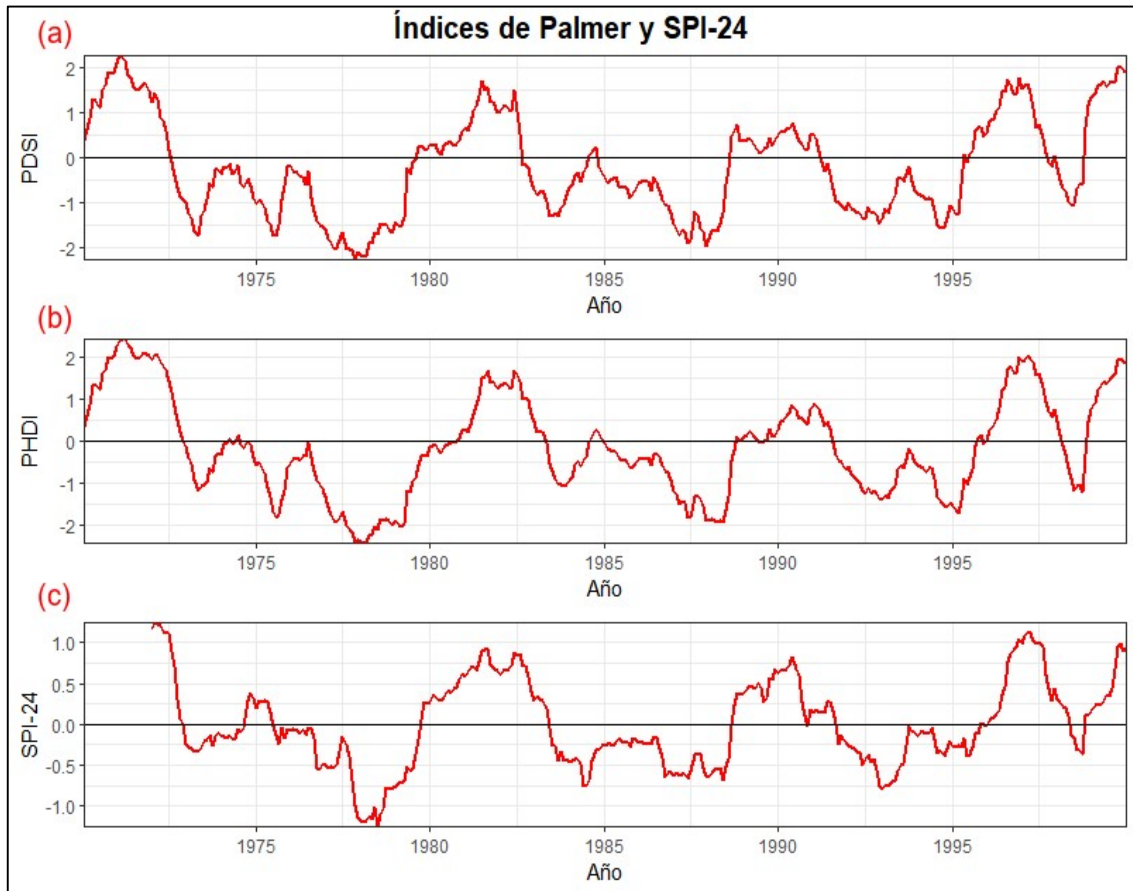


Figura 13. Similitud entre los índices de sequía de Palmer (PDSI, PHDI) y SPI_24 en el periodo de análisis (1970-2000).

La Fig. 13 muestra la serie promedio de todas las estaciones de los índices de Palmer: sc-PDSI y sc-PHDI. Se muestra adicionalmente la misma serie de SPI mostrada en la Fig. 12. Se observa que los índices hidrológicos de Palmer son de baja frecuencia, similar a los índices de precipitación en escalas superiores a los 12 meses. Adicionalmente, resalta la similitud entre el PDSI y PHDI, la cual según se comentó anteriormente se debe a que el procedimiento de cálculo es muy similar y la diferencia radica en la forma en que el índice PHDI aproxima una representación de los flujos lentos asociados con la variación en flujos base y volúmenes de acuíferos.

3.3. Definición de las estaciones del CSC

Dado que el interés de la investigación es el análisis de los eventos de sequía en el CSC, se utilizaron para análisis únicamente aquellas estaciones en las que la aridez es menor a 1 (Fig. 10). Donde la aridez se define como la razón entre la precipitación media y la evapotranspiración potencial media anual.

El cálculo de la evapotranspiración se realizó mediante la ecuación de Thornthwaite, la cual está dada por la Ecuación (7)

$$PET = 16 \left(\frac{L}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^\alpha \quad (7)$$

Donde T_a es la temperatura media mensual, N es el número de días en el mes y L es la longitud media del día en horas. Los valores de T_a se extrajeron de la base de datos NUMEROSA y la serie de valores de L se generó a partir de los valores de duración del día mostrado en <http://jan.moesen.nu/daylight-calculator/>. Finalmente, el valor de α está dado por la ecuación:

$$\alpha = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239 \quad (8)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{m_i}}{5} \right)^{1.514} \quad (9)$$

El valor de I es el Índice de Calor, para su cálculo se utiliza la temperatura media mensual del mes i (T_{m_i}) de cada año de análisis.

Así, del total de 199 estaciones utilizadas, 45 presentan una aridez menor a 1 y son estas las que se han considerado caracterizan la precipitación en el CSC, como se muestra en la Fig. 10.

4. Métodos de análisis

Todos los cálculos, figuras y rutinas para análisis se realizaron en el programa R, a partir de las siguientes librerías disponibles en el repositorio oficial: GridExtra (Augie, 2017), R.matlab (Bengtsson, 2016), biwavelet (Gouhier et al., 2016), lubridate (Grolemund et al., 2011), Hmisc (Harrel, 2018), ggcorrplot (Kassambara, 2016), RNCEP (Kemp et al., 2012), precintcon (Lucas, 2016), ape (Paradis et al., 2018), WaveletComp (Roesch et al., 2018), GGally (Schloerke et al., 2017), lctools (Stamatis, 2019), corrplot (Wei et al., 2017), ggplot2 (Wickham, 2009), reshape2 (Wickham, 2007) y animation (Xie, 2013).

4.1. Análisis de correlaciones

Con base en la revisión bibliográfica, se han propuesto los procesos atmosféricos del ENOS, CLLJ, TNA, PDO, AMO, NAO y SHCI, como los principales disparadores de las sequías observadas en las series de índices de precipitación para el periodo 1970-2000. Estos procesos atmosféricos podrían o no ocasionar eventos de sequía, la cual es considerada en esta investigación en los diversos índices (i.e. SPI, RDI, PSDI y PHDI); los cuales por la forma en que se da la sequía, reflejarían con rezago el efecto de los diversos procesos atmosféricos. Se analizó la normalidad de las series y los procesos atmosféricos se correlacionaron con los índices de sequía mediante correlaciones lineales de Pearson, las cuales se agruparon en matrices de correlación a fin de determinar las más significativas. La significancia se estableció a partir del valor de r para el cual se acepta la hipótesis nula en la Ecuación (10) de la distribución t con $n-2$ grados de libertad (siendo $n = 30$) y $t = 2.048$ para una distribución normal de dos colas.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (10)$$

Se calcularon los límites inferior y superior del intervalo de confianza del 95% de las correlaciones entre procesos atmosféricos y series de precipitación, las cuales se muestran tabuladas en el Anexo B.

El análisis de correlaciones (y posteriores análisis) se realizó para los periodos marzo y abril (MA), mayo y junio (MJ), julio y agosto (JA), setiembre, octubre y noviembre (SON) y diciembre, enero y febrero (DEF). Para todos los periodos se aplicó un rezago de 1 a 6 meses, bajo el supuesto de que podría existir una demora desconocida entre la ocurrencia del proceso atmosférico y la respuesta en el índice de precipitación.

4.2. Composiciones

Del análisis de correlaciones se seleccionaron aquellos procesos atmosféricos disparadores de la sequía (procesos de mayor correlación con los índices de precipitación en los distintos rezagos). Con base en esta discriminación, para los procesos atmosféricos más relevantes, se seleccionaron los 5 años del periodo de análisis en los que las series de procesos atmosféricos son de mayor intensidad y los 5 en que son de menor intensidad. A partir de los datos de Reanálisis de NCAR (Kalnay et al., 1996, Kanamitsu et al., 2002), se generaron para estos años, composiciones de los mapas de anomalías de velocidad y dirección de viento a nivel del mar (1000 hPa), a 925 hPa y a 500 hPa; del cortante de viento entre 1000 hPa y 500 hPa, entre 925 hPa y 500 hPa; y de las anomalías de la presión a nivel de mar.

4.3. Variación de la precipitación

Para los mismos años para los cuales se generaron las composiciones (asociados a la intensidad de los procesos atmosféricos más significativos), se calculó la precipitación promedio de los 5 años de mayor y menor promedio de estos

procesos en el CSC y fuera de este, la cual se comparó con la precipitación media en todo el periodo de análisis (tanto en el CSC como fuera de éste), a fin de analizar la reducción o incrementos en la precipitación.

4.4. Correlaciones espaciales

Para cada uno de los meses de las series de índices de precipitación de todas las estaciones se calculó la correlación espacial (I de Moran). En el cálculo de ésta, es necesario definir un criterio de ponderación que permita establecer cuántas ubicaciones circundantes se deben considerar para estimar la relación de similitud (i.e. con cuántas ubicaciones circundantes se va a correlacionar una ubicación cualquiera). A partir del análisis de las ACF y PACF de las series de aridez de las estaciones del CSC, de las que están fuera de éste, y de todas las estaciones; se determinó que tanto la función inversa (correlación global), como la ponderación por polígonos de Thiessen (correlación local), la correlación se disipa en pocos rezagos. Lo cual no sucede ni para la ponderación por distancia media (correlación semi-local), ni para la ponderación exponencial (correlación semi-global). Así, aunque el comportamiento de estas dos últimas es bastante similar, se seleccionó la ponderación con base en la distancia media de las estaciones circundantes para el cálculo de las correlaciones espaciales, en escala mensual y anual.

4.5. Onduletas

En aquellos índices de precipitación de escalas superiores (i.e. > 12) y en los índices hidrológicos de Palmer, parece existir una periodicidad en la ocurrencia de los eventos de sequía la cual puede ser estudiada mediante onduletas (power spectrums) dado que en estas se observa la intensidad y periodicidad de las posibles señales identificadas. Así, para las series de SPI, RDI, sc-PDSI y PHDI, se

calcularon las onduletas. Para todas estas series se calculó complementariamente la serie reconstruida a partir de las respectivas transformadas.

5. Análisis de resultados

Las tablas B1 a B8 del Anexo B muestran las matrices de correlación entre los procesos atmosféricos y los índices de precipitación de órdenes 1, 3, 6, 9, 12 y 24 con rezagos de 0 a 6 meses. A partir de la observación de las correlaciones significativas (resaltadas en negrita), se tiene que los procesos que más significativamente se correlacionan con los índices de precipitación son el ENOS y el CLLJ. Estos son seguidos en menor intensidad y reiteración de correlaciones significativas por el TNA y el AMO. Este último es un proceso de baja frecuencia, por lo cual, considerando el periodo analizado (30 años) y que este es un modulador del TNA (de mayor frecuencia), se descartó del análisis y únicamente se consideraron las correlaciones con el TNA. Los procesos SHCI, PDO y NAO tienen mayormente correlaciones no significativas con los índices de precipitación, por lo que se ha considerado no guardan relación con la ocurrencia de las sequías y no fueron tomados en cuenta en posteriores análisis.

Del Anexo B se extrae el Cuadro 1, el cual muestra las correlaciones entre los índices de precipitación y los procesos atmosféricos ENOS, CLLJ y TNA. Se han incluido en el análisis, las escalas de índices de precipitación que se han asociado a las definiciones de sequías. Adicionalmente se ha incluido el índice de 24 meses en virtud del conocimiento de sequías que se extienden más de un año. Los procesos atmosféricos seleccionados son coincidentes con aquellos que se ha identificado actúan en la generación de sequías en el CSC (Amador et al, 2006; 2008; 2015; Castillo et al, 2019; Cook, 2009; Duran et al, 2017; Hidalgo et al, 2015; 2017; 2019; Maldonado et al, 2015; 2016; 2017; Muñoz, 2008; Wang, 2005).

Cuadro 1. Correlaciones significativas entre procesos atmosféricos (columnas) e índices de precipitación (filas). Las correlaciones significativas se muestran resaltadas en negrita. La escala de colores utiliza tonos rojos para correlaciones positivas y azul para negativas.

		Rezago en meses respecto a ENOS						Rezago en meses respecto a CLLJ						Rezago en meses respecto a TNA								
		0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	4	5	6
Marzo - abril	RDI_1	0.15	-0.22	-0.22	0.01	-0.04	-0.24	-0.17	0.14	-0.20	-0.19	0.39	0.04	0.04	-0.22	0.06	-0.11	0.04	0.42	0.38	0.15	0.17
	SPI_1	0.12	-0.07	-0.08	0.13	0.02	-0.21	-0.16	0.41	-0.11	-0.10	0.44	0.39	0.05	-0.25	0.36	0.05	0.14	0.51	0.44	0.18	0.20
	RDI_3	-0.02	-0.12	-0.17	-0.10	-0.06	-0.12	-0.18	0.30	0.05	-0.11	0.05	0.28	0.25	0.03	0.21	0.09	0.03	0.20	0.40	0.39	0.23
	SPI_3	-0.07	-0.02	-0.05	0.04	0.08	-0.04	-0.14	0.41	0.14	-0.05	0.12	0.34	0.29	0.04	0.22	0.19	0.13	0.31	0.50	0.40	0.28
	RDI_6	-0.28	-0.24	-0.20	-0.10	-0.07	-0.18	-0.22	-0.07	-0.04	-0.08	0.14	0.26	0.16	0.02	-0.07	-0.01	0.00	0.21	0.34	0.29	0.26
	SPI_6	-0.25	-0.14	-0.08	0.04	0.07	-0.04	-0.11	-0.08	-0.01	-0.04	0.18	0.31	0.22	0.07	-0.02	0.09	0.11	0.13	0.46	0.40	0.37
	RDI_9	-0.58	-0.56	-0.47	-0.25	-0.12	-0.19	-0.23	-0.25	-0.30	-0.28	-0.02	0.22	0.17	0.05	-0.34	-0.34	-0.22	0.09	0.31	0.27	0.26
	SPI_9	-0.56	-0.54	-0.40	-0.14	0.03	-0.06	-0.10	-0.26	-0.30	-0.27	0.02	0.27	0.22	0.10	-0.29	-0.29	-0.13	0.20	0.44	0.38	0.38
	RDI_12	-0.47	-0.56	-0.59	-0.58	-0.54	-0.46	-0.33	-0.17	-0.26	-0.29	-0.22	-0.12	-0.06	-0.04	-0.24	-0.28	-0.29	-0.25	-0.12	0.03	0.20
	SPI_12	-0.45	-0.52	-0.55	-0.52	-0.45	-0.34	-0.20	-0.18	-0.25	-0.29	-0.20	-0.09	-0.02	0.00	-0.18	-0.21	-0.21	-0.15	0.00	0.16	0.32
	RDI_24	-0.10	-0.16	-0.20	-0.21	-0.28	-0.40	-0.42	-0.17	-0.24	-0.30	-0.30	-0.25	-0.19	-0.17	0.02	-0.04	-0.08	-0.04	0.02	0.05	0.07
	SPI_24	-0.11	-0.16	-0.19	-0.18	-0.24	-0.33	-0.34	-0.18	-0.23	-0.30	-0.28	-0.21	-0.14	-0.13	0.06	0.02	-0.01	0.05	0.14	0.16	0.18
	PDHI	-0.21	-0.24	-0.28	-0.28	-0.27	-0.31	-0.31	-0.13	-0.16	-0.17	-0.10	-0.01	0.01	-0.04	-0.09	-0.10	-0.10	-0.03	0.10	0.14	0.17
PDSI	-0.34	-0.34	-0.36	-0.32	-0.29	-0.32	-0.31	-0.18	-0.18	-0.17	-0.06	0.03	0.00	-0.06	-0.08	-0.03	0.02	0.15	0.27	0.27	0.28	
Mayo - junio	RDI_1	-0.15	-0.21	-0.44	-0.60	-0.53	-0.23	-0.03	0.43	0.48	0.33	0.30	0.10	-0.24	-0.29	0.04	0.50	0.43	0.23	0.24	0.34	0.26
	SPI_1	-0.06	-0.11	-0.39	-0.59	-0.52	-0.15	0.02	0.52	0.54	0.38	0.33	0.08	-0.26	-0.26	0.12	0.59	0.51	0.29	0.28	0.33	0.19
	RDI_3	-0.11	-0.10	-0.30	-0.49	-0.58	-0.54	-0.40	0.46	0.56	0.57	0.42	0.25	0.06	-0.13	0.03	0.22	0.46	0.43	0.31	0.29	0.31
	SPI_3	-0.03	-0.01	-0.19	-0.43	-0.55	-0.51	-0.34	0.51	0.63	0.65	0.48	0.28	0.07	-0.13	0.11	0.32	0.57	0.51	0.38	0.35	0.36
	RDI_6	-0.09	-0.08	-0.21	-0.42	-0.54	-0.54	-0.52	0.45	0.57	0.61	0.57	0.45	0.30	0.17	0.00	0.24	0.39	0.37	0.34	0.42	0.43
	SPI_6	-0.02	0.00	-0.13	-0.34	-0.46	-0.47	-0.47	0.51	0.65	0.68	0.63	0.51	0.35	0.21	0.09	0.35	0.50	0.47	0.46	0.53	0.51
	RDI_9	-0.10	-0.07	-0.19	-0.41	-0.52	-0.52	-0.52	0.02	0.36	0.54	0.55	0.45	0.35	0.31	-0.14	0.16	0.37	0.35	0.35	0.41	0.42
	SPI_9	-0.08	-0.02	-0.12	-0.34	-0.44	-0.44	-0.43	0.07	0.45	0.63	0.63	0.52	0.41	0.37	-0.05	0.28	0.49	0.46	0.47	0.52	0.53
	RDI_12	-0.16	-0.18	-0.26	-0.40	-0.49	-0.51	-0.51	-0.11	-0.04	0.06	0.29	0.38	0.33	0.31	-0.19	-0.14	-0.01	0.15	0.31	0.40	0.42
	SPI_12	-0.15	-0.16	-0.23	-0.36	-0.43	-0.43	-0.43	-0.06	0.02	0.16	0.39	0.45	0.39	0.37	-0.10	-0.03	0.12	0.29	0.43	0.52	0.53
	RDI_24	0.21	0.20	0.09	-0.12	-0.26	-0.32	-0.34	-0.27	-0.19	-0.08	0.07	0.13	0.09	0.05	-0.05	0.01	0.09	0.16	0.20	0.22	0.22
	SPI_24	0.18	0.18	0.07	-0.14	-0.26	-0.30	-0.32	-0.24	-0.14	-0.01	0.15	0.19	0.15	0.11	0.03	0.12	0.22	0.28	0.31	0.32	0.32
	PDHI	0.15	0.12	0.02	-0.12	-0.20	-0.23	-0.27	-0.20	-0.11	0.02	0.12	0.14	0.09	0.05	-0.07	0.02	0.16	0.23	0.27	0.34	0.37
PDSI	-0.06	-0.13	-0.24	-0.37	-0.41	-0.40	-0.38	0.06	0.19	0.27	0.28	0.24	0.15	0.10	0.09	0.25	0.38	0.39	0.40	0.44	0.44	
Julio - agosto	RDI_1	-0.57	-0.73	-0.75	-0.49	-0.20	0.20	0.42	0.71	0.76	0.67	0.49	0.27	0.14	-0.07	0.49	0.31	0.31	0.39	0.35	0.34	0.22
	SPI_1	-0.53	-0.72	-0.74	-0.41	-0.19	-0.45	-0.58	0.72	0.77	0.68	0.41	0.25	0.45	0.58	0.55	0.37	0.37	0.38	0.31	0.18	0.31
	RDI_3	-0.34	-0.61	-0.76	-0.77	-0.67	-0.51	-0.38	0.55	0.75	0.78	0.75	0.66	0.52	0.46	0.32	0.46	0.41	0.40	0.42	0.36	0.42
	SPI_3	-0.28	-0.56	-0.74	-0.75	-0.62	-0.45	-0.47	0.55	0.76	0.80	0.75	0.62	0.47	0.51	0.42	0.54	0.48	0.46	0.46	0.39	0.38
	RDI_6	-0.22	-0.47	-0.65	-0.73	-0.74	-0.75	-0.76	0.47	0.65	0.73	0.80	0.81	0.79	0.73	0.22	0.27	0.31	0.46	0.53	0.41	0.35
	SPI_6	-0.21	-0.44	-0.61	-0.68	-0.70	-0.73	-0.74	0.49	0.66	0.75	0.81	0.81	0.79	0.73	0.29	0.35	0.40	0.55	0.61	0.46	0.39
	RDI_9	0.15	-0.44	-0.61	-0.68	-0.69	-0.70	-0.72	0.44	0.63	0.72	0.78	0.79	0.78	0.80	0.22	0.27	0.33	0.42	0.44	0.36	0.42
	SPI_9	-0.16	-0.42	-0.59	-0.65	-0.66	-0.66	-0.67	0.48	0.65	0.75	0.79	0.80	0.79	0.80	0.30	0.35	0.42	0.50	0.52	0.46	0.51
	RDI_12	-0.04	-0.29	-0.52	-0.64	-0.68	-0.67	-0.68	0.27	0.51	0.68	0.77	0.78	0.78	0.79	0.13	0.24	0.33	0.42	0.44	0.38	0.38
	SPI_12	-0.06	-0.30	-0.51	-0.62	-0.65	-0.64	-0.64	0.35	0.58	0.73	0.79	0.80	0.80	0.80	0.24	0.34	0.42	0.50	0.52	0.47	0.47
	RDI_24	0.24	0.00	-0.21	-0.29	-0.31	-0.31	0.33	-0.01	0.22	0.38	0.47	0.48	0.46	0.47	0.14	0.21	0.29	0.34	0.35	0.24	0.24
	SPI_24	0.15	-0.08	-0.26	-0.33	-0.34	-0.32	-0.33	0.13	0.35	0.48	0.55	0.56	0.53	0.53	0.25	0.31	0.37	0.42	0.43	0.32	0.33
	PDHI	0.15	-0.02	-0.16	-0.26	-0.33	-0.39	-0.43	0.15	0.34	0.44	0.52	0.57	0.58	0.61	0.21	0.30	0.35	0.44	0.47	0.36	0.37
PDSI	-0.19	-0.35	-0.46	-0.51	-0.52	-0.53	-0.55	0.56	0.68	0.74	0.75	0.76	0.75	0.77	0.46	0.48	0.52	0.57	0.58	0.48	0.48	
Setiembre - octubre - noviembre	RDI_1	-0.68	-0.44	-0.10	0.32	0.42	0.17	-0.20	0.35	0.18	0.07	0.01	-0.11	0.07	0.36	0.15	0.42	0.48	0.57	0.34	0.22	0.21
	SPI_1	-0.62	-0.43	-0.52	-0.53	-0.43	-0.05	-0.04	0.29	0.14	0.37	0.43	0.07	-0.11	0.08	0.22	0.43	0.30	0.03	-0.06	0.03	0.19
	RDI_3	-0.80	-0.74	-0.60	-0.50	-0.41	-0.22	-0.25	0.51	0.40	0.26	0.23	0.18	0.01	0.13	0.09	0.22	0.28	0.39	0.38	0.21	0.22
	SPI_3	-0.78	-0.69	-0.54	-0.54	-0.53	-0.34	-0.20	0.51	0.37	0.24	0.30	0.27	0.10	0.08	0.18	0.30	0.35	0.37	0.17	0.00	0.11
	RDI_6	-0.67	-0.76	-0.78	-0.78	-0.73	-0.62	-0.54	0.54	0.53	0.48	0.43	0.34	0.26	0.31	0.08	0.18	0.18	0.13	0.19	0.28	0.39
	SPI_6	-0.65	-0.72	-0.75	-0.75	-0.69	-0.56	-0.44	0.51	0.51	0.47	0.43	0.33	0.25	0.29	0.18	0.28	0.27	0.21	0.26	0.34	0.46
	RDI_9	-0.60																				

	Rezago en meses respecto a ENOS							Rezago en meses respecto a CLLJ						Rezago en meses respecto a TNA								
	0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	4	5	6	
	PDHI	-0.14	-0.24	-0.25	-0.35	-0.39	-0.42	-0.45	0.43	0.44	0.32	0.35	0.36	0.36	0.39	0.30	0.34	0.31	0.24	0.24	0.24	0.26
	PDSI	-0.44	-0.48	-0.47	-0.52	-0.54	-0.55	-0.54	0.58	0.56	0.45	0.46	0.45	0.45	0.46	0.35	0.39	0.36	0.31	0.30	0.32	0.36
Diciembre – enero - febrero	RDI_1	0.31	0.40	0.20	-0.19	-0.26	-0.06	0.12	0.25	0.30	0.18	0.26	0.49	0.59	0.41	0.40	0.26	0.15	0.10	0.27	0.42	0.34
	SPI_1	-0.48	-0.43	-0.05	-0.04	-0.04	0.08	0.21	-0.44	-0.09	0.31	0.59	0.55	0.63	0.43	-0.07	0.04	0.16	0.29	0.29	0.45	0.36
	RDI_3	-0.47	-0.38	-0.19	-0.24	-0.19	-0.15	-0.03	0.08	0.05	0.09	0.46	0.53	0.58	0.62	0.23	0.28	0.26	0.23	0.25	0.30	0.40
	SPI_3	-0.50	-0.48	-0.29	-0.19	-0.06	-0.02	0.11	-0.04	-0.11	0.03	0.43	0.56	0.61	0.64	0.17	0.14	0.11	0.23	0.29	0.35	0.44
	RDI_6	-0.79	-0.72	-0.60	-0.52	-0.33	-0.20	-0.10	-0.24	-0.11	0.07	0.33	0.48	0.55	0.62	0.03	0.07	0.16	0.26	0.27	0.29	0.37
	SPI_6	-0.77	-0.69	-0.56	-0.43	-0.19	-0.06	0.06	-0.21	-0.10	0.06	0.34	0.51	0.58	0.65	0.08	0.10	0.19	0.31	0.34	0.34	0.42
	RDI_9	-0.72	-0.79	-0.82	-0.82	-0.75	-0.57	-0.28	-0.26	-0.27	-0.22	-0.14	0.06	0.34	0.56	0.05	0.05	0.07	0.07	0.15	0.30	0.41
	SPI_9	-0.71	-0.76	-0.79	-0.78	-0.70	-0.46	-0.12	-0.22	-0.24	-0.21	-0.13	0.08	0.39	0.60	0.12	0.13	0.13	0.12	0.20	0.37	0.47
	RDI_12	-0.67	-0.67	-0.69	-0.76	-0.80	-0.81	-0.75	-0.26	-0.24	-0.22	-0.17	-0.11	-0.02	0.10	0.05	0.05	0.04	0.08	0.12	0.17	0.21
	SPI_12	-0.66	-0.66	-0.66	-0.71	-0.75	-0.75	-0.66	-0.21	-0.20	-0.20	-0.16	-0.10	0.01	0.14	0.13	0.13	0.12	0.16	0.19	0.25	0.30
	RDI_24	-0.23	-0.25	-0.27	-0.32	-0.37	-0.40	-0.45	-0.17	-0.18	-0.17	-0.16	-0.15	-0.10	-0.02	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.15	0.22
	SPI_24	-0.26	-0.26	-0.27	-0.30	-0.33	-0.36	-0.38	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.14	-0.08	0.01	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.25	0.33
	PDHI	-0.35	-0.39	-0.42	-0.46	-0.49	-0.50	-0.47	-0.18	-0.17	-0.15	-0.10	-0.05	0.02	0.11	0.14	0.13	0.14	0.16	0.19	0.24	0.31
PDSI	-0.53	-0.55	-0.56	-0.56	-0.54	-0.50	-0.41	-0.13	-0.11	-0.06	0.02	0.11	0.21	0.27	0.20	0.20	0.23	0.28	0.34	0.41	0.47	

De forma general, excepto por el ENOS (observado en las series Niño3.4 y ONI), todos los restantes procesos atmosféricos (i.e. CLLJ y TNA), se correlacionan positivamente con la ocurrencia de sequías en el CSC. Considerando que ascensos (descensos) en los valores de los índices de precipitación implican aumentos (reducciones) en la precipitación, esto implica para el TNA, que cuando su señal es más intensa (débil) se presentan mayores (menores) precipitaciones. Caso contrario sucede con el CLLJ dado que esta es una serie de vectores de velocidades de viento, por lo que cuando es más intenso (débil) el valor de la serie desciende (asciende) y los índices precipitación también descienden (ascienden) por lo que la correlación con esta serie es positiva. Las series TNA y AMO se encuentran altamente correlacionadas por lo que se espera que, si existe correlación de una con los índices de precipitación, también exista con la otra. No obstante, los rezagos y escalas de correlaciones más significativas no coinciden en todos los periodos analizados. Finalmente, en el caso de la serie del Niño3.4, cuando el índice asciende (desciende), los índices de precipitación decrecen (crecen) y por tanto la correlación es negativa.

Para los procesos ENOS y CLLJ, las correlaciones más (menos) significativas con los índices de precipitación se presentan en JA (MA). A pesar de que las señales de estos procesos tienden a variar en DEF y MA, la precipitación en el CSC es normalmente escasa (o nula) durante estos periodos, por lo que existe muy poca variación de sus índices de precipitación, lo cual se refleja en la baja correlación en las series sin rezago y de índices de precipitación de escalas 1 y 3. Durante MA existen correlaciones significativas entre el ENOS y los índices de precipitación de escalas mayores (i.e. 9 y 12 meses), lo cual se debe a la baja frecuencia de la señal de ambas series y al efecto acumulado de ponderación de un periodo largo que incluye los meses más lluviosos por parte de los índices de precipitación.

Durante MJ existen correlaciones significativas con los procesos CLLJ, ENOS y TNA. En el primero de estos, se presentan con las series con rezagos entre

0 y 2 meses, y en los restantes con rezagos entre 2 y 6 meses. Adicionalmente la mayor correlación del ENOS y el TNA con índices de precipitación se da con escalas 1 a 3 meses, y del CLLJ y el AMO, con escala de 6 meses.

Las correlaciones más significativas corresponden a JA y SON, las cuales se presentan en escalas entre 1 y 12 meses con el proceso del ENOS y tienden a alcanzar las mayores correlaciones a medida que se incrementa el rezago y la escala de los índices de precipitación. Adicionalmente, en escalas de entre 3 y 12 meses se dan correlaciones significativas con el CLLJ, las cuales se presentan mayormente sin rezago. El proceso TNA se correlaciona de menor manera que el ENOS y el CLLJ y con menor claridad en la tendencia hacia escalas y rezagos.

Finalmente, en el periodo DEF, las correlaciones más significativas son aquellas asociadas a escalas mayores (12 y 24 meses) con el proceso del ENOS, las cuales ponderan la precipitación de los meses anteriores de mayor precipitación. De forma similar sucede con el CLLJ, pero para índices de escalas 1 a 6 meses con rezagos de entre 3 y 6 meses, lo cual indica que la respuesta en ausencia de precipitación se observará al iniciar la estación lluviosa. El detalle de cada uno de los procesos considerados se muestra a continuación

ENOS

El proceso atmosférico del ENOS es el que muestra correlaciones más significativas con los índices de sequía a lo largo del año. No obstante, los rezagos y escalas mayormente correlacionados varían para los cinco periodos del año seleccionados. En MA no se presentan correlaciones relevantes, en índices de escalas 1 a 6 en cualquier de los rezagos considerados. Esto debido a que los meses de cálculo de los índices de estos periodos corresponden a la época seca del CSC en la cual la precipitación es escasa (o nula) y por tanto son poco sensibles a los cambios del ENOS. Por esta misma razón, en las escalas de 9 y 12 meses se

presentan correlaciones significativas con rezagos entre 0 y 3 meses. Estas escalas de índices de precipitación consideran las variaciones de los meses lluviosos previos a MA (i.e. SON). Resalta que en el caso de los índices hidrológicos e índices de precipitación de 24 meses la correlación es poco significativa, lo cual se asocia a la duración media de las fases cálida (El Niño) o fría (La Niña) del ENOS, el cual no tiende a alcanzar duraciones de hasta dos años (en el periodo analizado).

Durante MJ la reducción en la precipitación como resultado de la presencia de eventos El Niño (fase cálida de ENOS) y viceversa para La Niña (fase fría de ENOS), se observará con un rezago de entre 3 y 4 meses de forma consistente entre las escalas 1 y 12 meses. MJ es el inicio de la época lluviosa en el CSC (y en toda AC), por lo que, similar a lo que sucede en MA, los índices de rezagos 0 a 2 en escalas 1 y 6 meses serán poco sensibles a la variación del índice Niño3.4 y esta se observa a partir del rezago 3. Resalta que los índices en todas las escalas mayores (9 a 12 meses) se correlacionan pobremente con el ENOS, lo cual sustenta que la duración de El Niño, en el periodo de análisis, es cercana a un año y por tanto en años consecutivos, poco se observan dos inicios de época lluviosa con sequías de forma tal que se refleje en los índices de precipitación de escalas mayores.

En JA las correlaciones más relevantes se observan en los índices de escala 1 sin rezago, pero no así para los índices de escala 3 a 12, para los cuales las correlaciones más significativas existen en rezago de 2 a 4 meses. Las correlaciones más significativas tienden a presentarse en mayores rezagos a medida que se incrementa la escala, lo cual se debe a la acumulación en la reducción de la precipitación al avanzar la época lluviosa en el CSC; efecto que se propaga hacia el cierre de esta época en el periodo de SON, para el cual las correlaciones sin rezagos son las más significativas. En ambos periodos los índices de precipitación de escala 3 meses son lo que más significativamente se correlacionan con el ENOS. En DEF las correlaciones más significativas se presentan para los índices de precipitación sin rezago, de escalas 6, 9 y 12 meses, lo cual se debe a la reducción a lo largo de toda la época lluviosa y reflejada en los

índices de estas escalas. En todos los periodos destaca que las correlaciones más significativas se presentan en escala de 1 a 12 meses. En la escala de 24 meses, la correlación no es significativa (o ligeramente significativa) en todos los casos, lo cual puede encontrar su explicación en la duración de los eventos de El Niño (o La Niña), los cuales, en el periodo analizado, no tienden a durar dos años (o más) para correlacionarse significativamente con índices de precipitación de esta escala.

Finalmente, destaca que, aunque los índices de precipitación de escala 12 y los índices hidrológicos se correlacionan de forma directa, la correlación con los procesos atmosféricos no es correspondientemente proporcional, siendo las series con rezagos de entre 5 y 6 meses las que mejor se correlacionan con el ENOS, lo cual parece indicar que el componente hidrológico parece presentar una respuesta diferente a la sequía de la que se observa de forma directa en los índices de precipitación. Esto podría indicar que la función de transferencia precipitación-escurrimiento atenúa los efectos de la sequía de forma que los efectos de El Niño (o La Niña) no son observables en los índices de escalas grandes como si se observan en la precipitación, posiblemente debido a una diferencia de escalas de tiempo.

CLLJ

La serie del CLLJ en el periodo de análisis (y en general) es de más alta frecuencia que la serie del Niño 3.4 (utilizada para analizar el ENOS), lo cual se refleja en la forma en que se correlaciona con los índices de precipitación, mostrando correlaciones más significativas con los índices de escalas 1 y 2 que las observadas con la serie del Niño 3.4. Adicionalmente, la serie del CLLJ no se correlaciona de forma significativa con los índices de precipitación en todos los periodos como si sucede con la serie del Niño 3.4. El CLLJ presenta las correlaciones más significativas en JA y en DEF con rezagos de 4 a 6 meses, con su pico en el mes de julio, lo cual es coincidente con lo expuesto por Muñoz et al. (2008) y Maldonado et al. (2015), quienes señalan los meses febrero y julio como

aquellos en que el viento del este se presenta con mayor intensidad. En MA, la correlación del CLLJ con los índices de precipitaciones es poco significativa, no solo por ser el CLLJ débil en este periodo, sino también por ser este un periodo transicional de escasa precipitación. De forma similar, en MJ se observan correlaciones significativas, para las series entre 0 y 2 meses de rezago, lo cual indica que, si bien el CLLJ alcanza su pico en julio, en términos de escasez de precipitación los efectos son observables desde el inicio de la época lluviosa en mayo, como resultado de su influencia.

En el análisis de correlaciones realizado existe una clara similitud entre los índices del Niño3.4 y CLLJ de JA, la cual no se muestra tan dominante en los demás periodos analizados, aunque destaca que las correlaciones en escalas entre 1 y 12 en todos los rezagos son más significativas que las observadas para la serie del Niño3.4. Al respecto, Amador et al. (2003) señalan que la correlación entre CLLJ y ENOS es negativa en el invierno boreal. Mientras que durante eventos El Niño (La Niña), el CLLJ es más intenso (débil) de lo normal en el verano boreal, de forma similar a lo mostrado por los resultados obtenidos.

En SON el CLLJ se correlaciona con los índices de precipitación de escalas entre 6 y 12 meses, siendo las más significativas las correlaciones de rezago 0. El incremento del viento en el Caribe hacia el CSC tiene un efecto en el mismo mes en la reducción de las precipitaciones. No obstante, en ninguno de los casos las correlaciones son tan significativas como las observadas en JA. En el periodo DEF, las correlaciones con los índices de precipitación son poco significativas en las escalas 1 a 3 y rezagos 0 a 3 meses. Para los índices de escalas 3 a 9 existe una máxima correlación con el CLLJ cuando el rezago es 6. Esto se asocia al inicio de la época lluviosa, por lo que, si bien la precipitación en el CSC tendrá muy poca variación (por ser casi nula) en el periodo DEF, la señal del CLLJ más intensa (mayores velocidades de viento) en esta época, se correlaciona con una reducción de la precipitación en el pico del CLLJ en JA. Finalmente, destaca que en DEF para

las escalas y rezagos para los cuales el ENOS presenta sus correlaciones menos significativas, el CLLJ presenta las más significativas.

El comportamiento del componente hidrológico en la ocurrencia de la sequía parece guardar una mejor correlación con el ENOS que el CLLJ, lo cual puede deberse a la duración de la ocurrencia de ambos procesos (o de los picos de estos). La menor duración del CLLJ parece hacer que encuentre correlaciones más significativas en MA, JA y SON.

TNA

El proceso TNA se correlaciona de forma positiva con los índices de precipitación en todos los periodos. No obstante, se observan pocas correlaciones significativas en MA. La correlación entre procesos atmosféricos e índices de precipitación indican que los incrementos en la señal del TNA no se asocian a condiciones de sequía sino de incremento en las precipitaciones. El comportamiento de las correlaciones en MJ y JA es similar, presentando las correlaciones más significativas para índices de escalas entre 6 y 9 meses con rezagos de entre 3 y 5 meses. Complementariamente, en SON y DEF se presentan las mayores correlaciones con rezagos de 6 meses en índices de escalas de 6 meses, lo que parece indicar que la presencia del TNA tiende a incrementar la ocurrencia de precipitaciones en meses de escasa precipitación y la época transicional, pero no afecta la precipitación en meses de mayor precipitación (SON).

Los índices de precipitación de escalas mayores (9 o 12) o bien los índices de Palmer, parecen ser los que mejor reflejan una respuesta al TNA. Destaca de forma general la respuesta a este proceso tiende a presentarse con rezago importante de entre 3 y 6 meses. Además, este proceso no se correlaciona con los índices de precipitación como lo hacen el ENOS y el CLLJ. Ya Hidalgo et al. (2019)

encontró rezagos de varios meses con los procesos de ENOS, el CLLJ y la precipitación en el CSC.

Con el objetivo de validar lo observado en las correlaciones, se realizó un análisis espectral de frecuencias para las estaciones del CSC y las de toda AC. Las figuras 14 y 15 muestran los valores de las frecuencias consideradas para toda AC y el CSC, respectivamente, en la frecuencia de 0 a 1, la intensidad de la señal es mayormente baja para todos los casos, por lo cual no fue incluida en estas figuras.

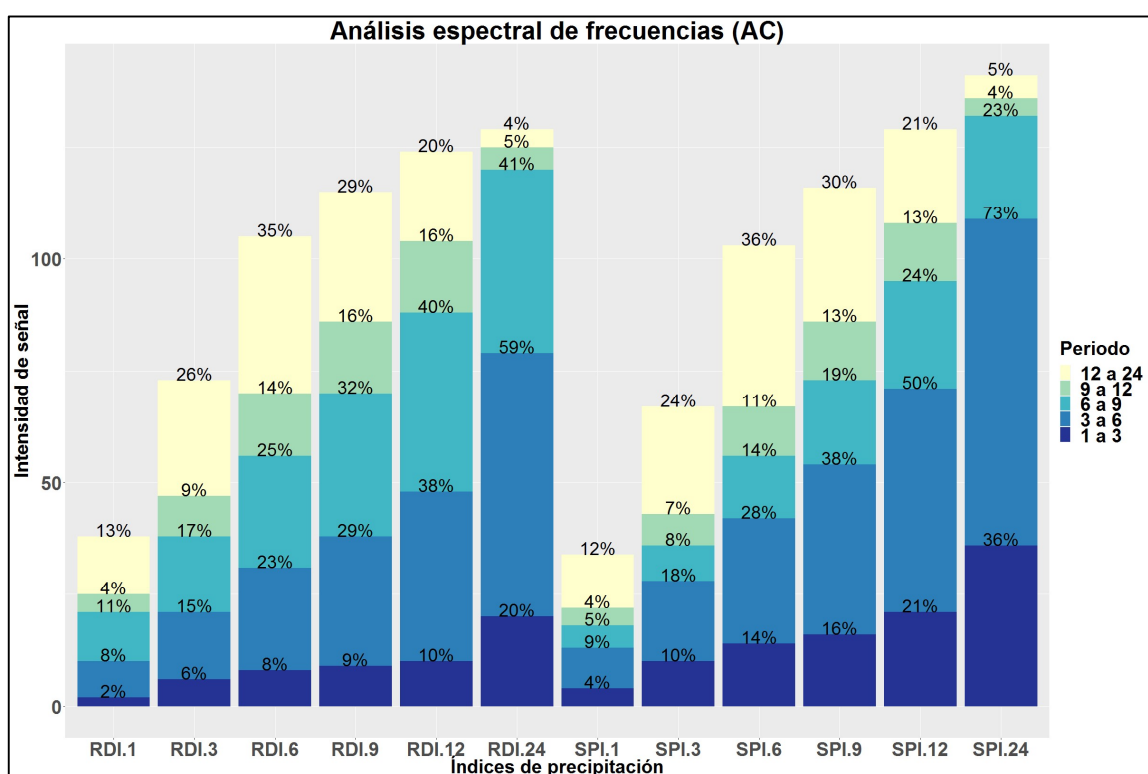


Figura 14. Análisis espectral de frecuencias de precipitación en AC de los índices de precipitación que se han considerado más relevantes en la variación de la precipitación.

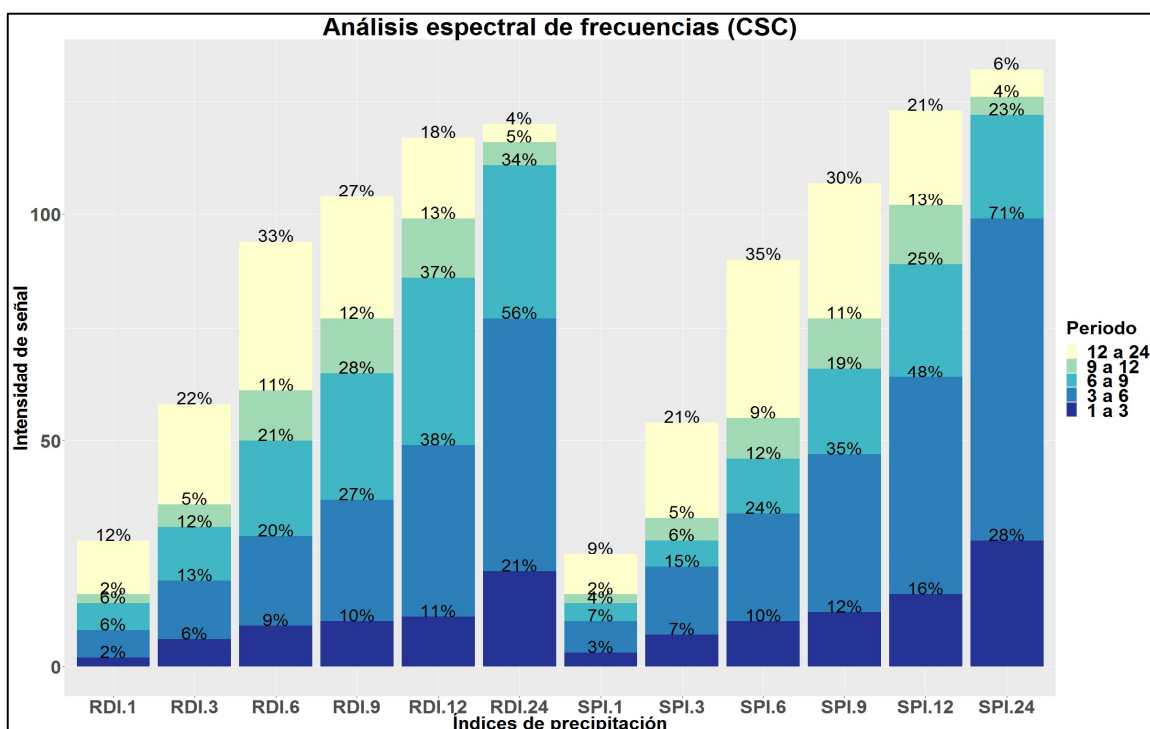


Figura 15. Análisis espectral de frecuencias en el CSC de los índices de precipitación que se han considerado más relevantes en la variación de la precipitación.

De estas figuras se observa que los mayores porcentajes de la intensidad de la señal se encuentran en las frecuencias de 3 a 6 meses y de 12 a 24 meses. Estas frecuencias se ajustan a lo mostrado en las correlaciones donde las mayores se encuentran para índices de precipitación de escalas 3, 6, 12 y 24 meses. Los efectos de procesos atmosféricos que afecten las precipitaciones tienden a ser observables para plazos de entre 3 y 6 meses.

Se ha establecido una relación entre procesos atmosféricos e índices de precipitación, en función de la duración de efectos y tiempos de respuesta, pero no se han establecido los procesos físicos que les producen. Para esto, se calculó el valor medio anual de las señales del Niño3.4, CLLJ y TNA, se ordenaron de forma descendente y se seleccionaron los primeros 5 y los últimos 5 para cada una de las series. En el caso del ENOS, los cinco años mayores (menores), serán los cinco años en que la anomalía de SST sea más positiva (negativa), lo cual corresponde con años El Niño (La Niña) respectivamente. De igual manera, sucede con la serie

de TNA, para la cual los primeros (últimos) años corresponden a su fase positiva (negativa). Este ordenamiento se realizó con el objetivo de analizar las condiciones atmosféricas que prevalecen durante estos años y a partir de estas determinar las condiciones que prevalecen durante los eventos de sequía. En el cuadro 2 muestra los 5 años extremos de los procesos considerados.

Cuadro 2. Años de mayor y menor intensidad de la señal media anual de los procesos que se ha considerado más influyen en la ocurrencia de sequías en el CSC.

Proceso atmosférico	Intensidad o fase	Años				
ENOS	El Niño	1972	1982	1987	1991	1997
	La Niña	1971	1974	1975	1988	1999
CLLJ	Menor intensidad	1979	1981	1988	1995	1999
	Mayor intensidad	1972	1975	1976	1986	1997
TNA	Fase positiva	1980	1987	1995	1997	1998
	Fase negativa	1972	1974	1975	1986	1994

Si bien se ha encontrado que el ENOS y el CLLJ se encuentran correlacionados (Amador, 2015; Castillo et al. 2019; Hidalgo et al. 2019), en términos de extremos de los valores medios anuales en el periodo analizado, no parece existir una coincidencia que indiquen que estarán relacionados, dado que como anteriormente se señaló, esta correlación existe durante el verano boreal, pero posteriormente se debilita.

Con base en los datos mostrados en el cuadro 2 se generaron las composiciones de presión atmosférica a nivel de mar, anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa; y de los cortantes de viento entre estas presiones atmosféricas. Se muestran en esta sección las más relevantes para el análisis realizado y las restantes se muestran en el Anexo C.

La Fig. 16 muestra las anomalías de presión a nivel del mar (SLP) de los 5 años en los que la señal del CLLJ es más intensa y los 5 en que es menos intensa en MA (16.a y 16.b) y JA (16.c y 16.d). Estos meses corresponden a los que se

encontró que el CLLJ se correlaciona más y menos significativamente con los índices de precipitación. MA no solo es un periodo de escasa precipitación en el CSC, sino que también corresponde con el mínimo de la primavera del CLLJ, lo cual explica la baja correlación entre índices de precipitación y el CLLJ observada en el Cuadro 1. En este periodo, en aquellos años en los que el CLLJ es menos intenso se observa una distribución más uniforme de las anomalías positivas de presión atmosférica sobre el Caribe (Fig. 16.a), lo cual es una condición que propicia el retroceso del NASH (no visible en la figura) hacia el este y un debilitamiento del CLLJ y el viento asociado a este. Lo contrario sucede en los años en los que CLLJ es más intenso (Fig. 16.b), donde se tienen menores anomalías de presión sobre el golfo de México y la península de Yucatán y un núcleo de anomalías de presión positiva más hacia el norte, la cual se ha asociado a una posición del NASH más hacia el oeste y un consecuente incremento del CLLJ. No obstante, en cualquiera de los dos casos, las anomalías de SLP se muestran uniformes y la NASH se encuentra mayormente retirada hacia el este, con lo cual se debilita el CLLJ. Finalmente, en este mismo periodo, en los años de mayor CLLJ, se observa la teleconexión del ENOS (anomalías de presión positiva hacia las costas de los Estados Unidos y una baja presión hacia el centro), la cual es un mecanismo modulador de la variación de la NAO (y por tanto el NASH y el CLLJ).

Durante los años en que el CLLJ es más y menos intenso en JA, la configuración de la SLP cambia con respecto a MA (figuras 16.d y 16.c). Se tiene un gradiente de SLP meridional en el Caribe (entre 10° y 20° N) orientado de mayor a menor presión hacia al norte (sur) cuando el CLLJ es menos (más) intenso. Esta orientación del gradiente de presión propicia una disminución (incremento) en la velocidad del viento del CLLJ. Al gradiente en dirección hacia el norte (sur), se asocia el flujo de viento geostrófico en la dirección de las isobaras del gradiente de presión, el cual fortalece (debilita) el viento asociado al CLLJ.

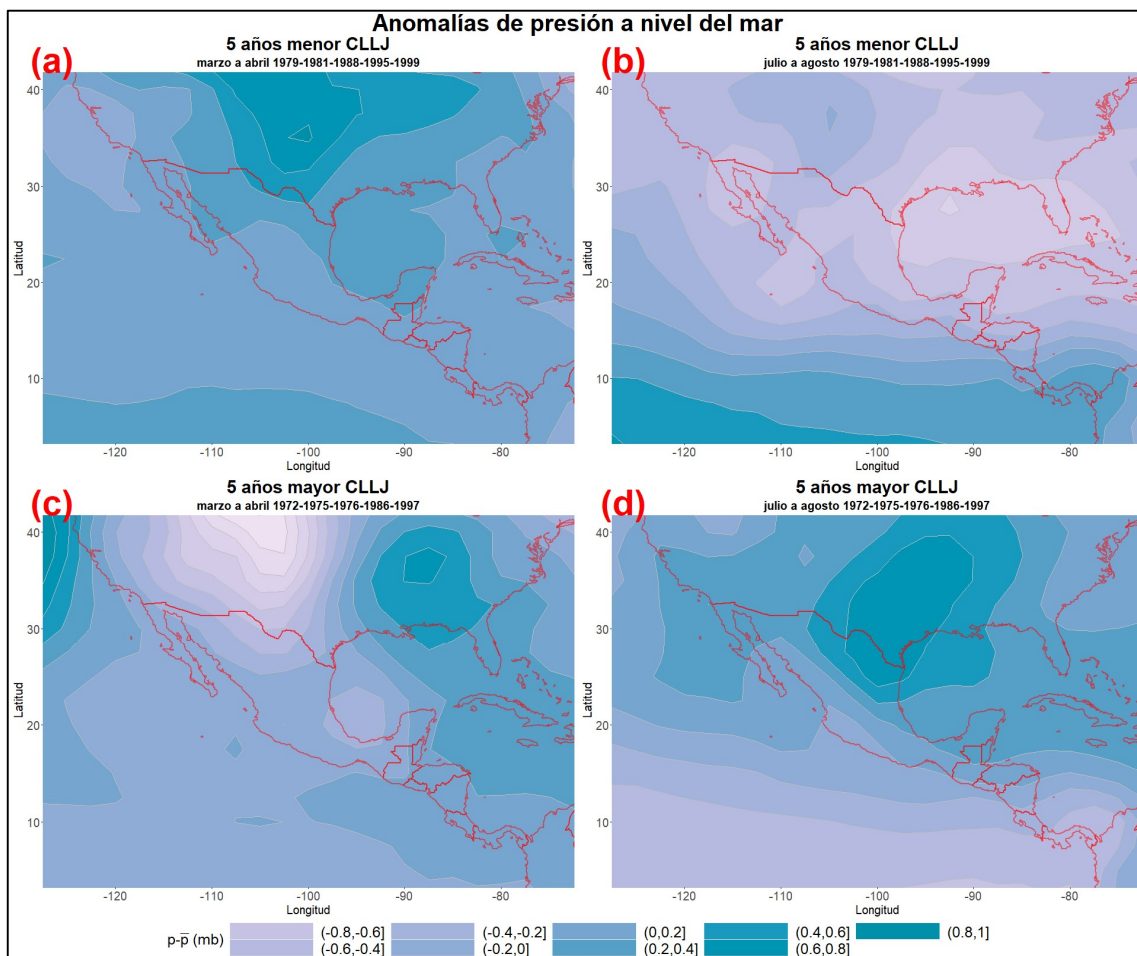


Figura 16. Anomalías de presión a nivel del mar en los 5 años en que la señal del CLLJ es mayor y menor en MA y JA durante el periodo de análisis (1970-2000).

Complementariamente, las figuras 17 y 18 muestran los mapas de anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en los mismos años de la figura 16 y para los mismos meses de JA y MA. De forma consistente con lo observado en las anomalías de SLP, en JA las anomalías de vientos zonal superficial y a 925 hPa, muestran una dirección hacia el este (oeste) en el Pacífico en los años en que la señal del CLLJ es más débil (fuerte) y meridionalmente hacia el norte (sur) en el Caribe. Las anomalías meridionales hacia el norte (sur), debilitan (potencian) la dirección de viento del CLLJ a través de AC. Así, en aquellos años en que el CLLJ es más (menos) intenso el gradiente de presión y las consecuentes anomalías de la velocidad de viento en el Caribe propiciarán el incremento (reducción) de la velocidad asociada al CLLJ. Resulta relevante observar que en los

años en lo que el CLLJ es más débil, a 500 hPa las anomalías de viento zonal en el Pacífico mantienen una dirección hacia el este, favoreciendo en transporte de humedad hacia el CSC, mientras que en los años en los que es más intenso, las anomalías tanto en el Pacífico como en el Atlántico son casi nulas, lo cual sugiere menores transporte de humedad hacia el CSC.

Durante MA, entre 1000 y 500 hPa las anomalías de viento se orientan predominantemente hacia el oeste (este) cuando la señal del CLLJ es más fuerte (débil). No obstante, similar a lo observado en las anomalías de SLP, las diferencias entre años de mayor y menor intensidad son mucho menores que las observadas en JA. Las condiciones son uniformes con anomalías entre 0 y 1 m/s entre 1000 y 500 hPa. La poca variación de las anomalías entre los vientos superficiales y la tropósfera media sugiere una cortante débil y por tanto condiciones para la presencia de precipitación convectiva.

Las condiciones en SON y MJ son similares a las de JA, empero con menor intensidad en las anomalías. De la misma manera, las condiciones de DEF son similares a las observadas en MA, con condiciones de velocidad, dirección de viento y cortante que no inhiben la ocurrencia de las precipitaciones (Anexo C).

La Fig. 19 muestra la cortante de viento entre 1000 y 925 hPa, y entre 925 y 500 hPa en JA en los años extremos del CLLJ en el periodo de análisis. Se tiene un incremento en la cortante en ambos rangos de elevación en los años en los que la señal del CLLJ es más intensa (figura 19. b y d), con respecto a los años de menor intensidad de la señal en JA (figura 19. a y c), tal y como se esperaba, a partir de lo observado en las anomalías de velocidad de viento. La cortante en JA en años de CLLJ más intenso es más propicia para la inhibición de los procesos de precipitación convectiva.

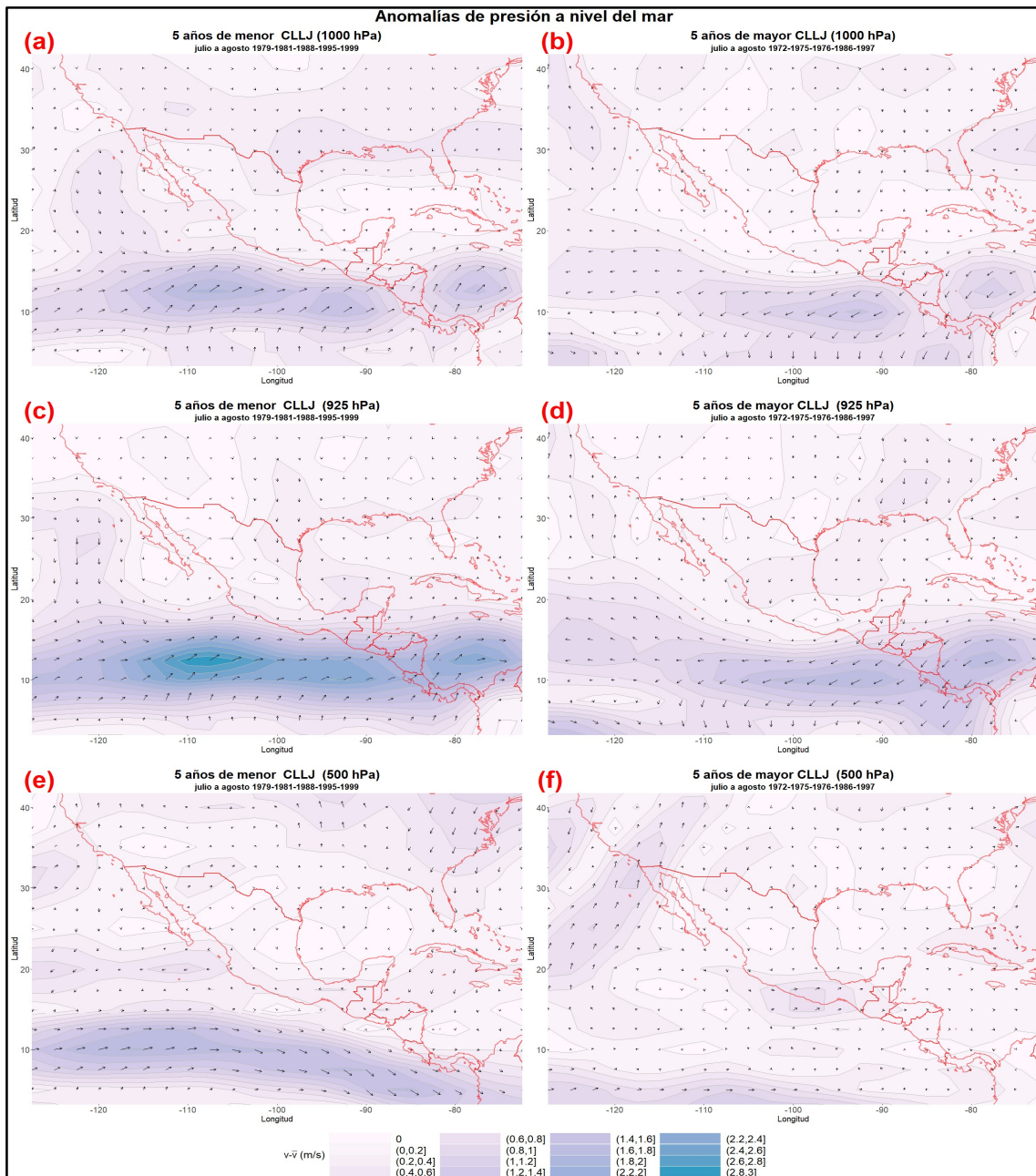


Figura 17. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en los 5 años en que la señal del CLLJ es más y menos intensa, respectivamente, durante el periodo de análisis (1970 – 2000).

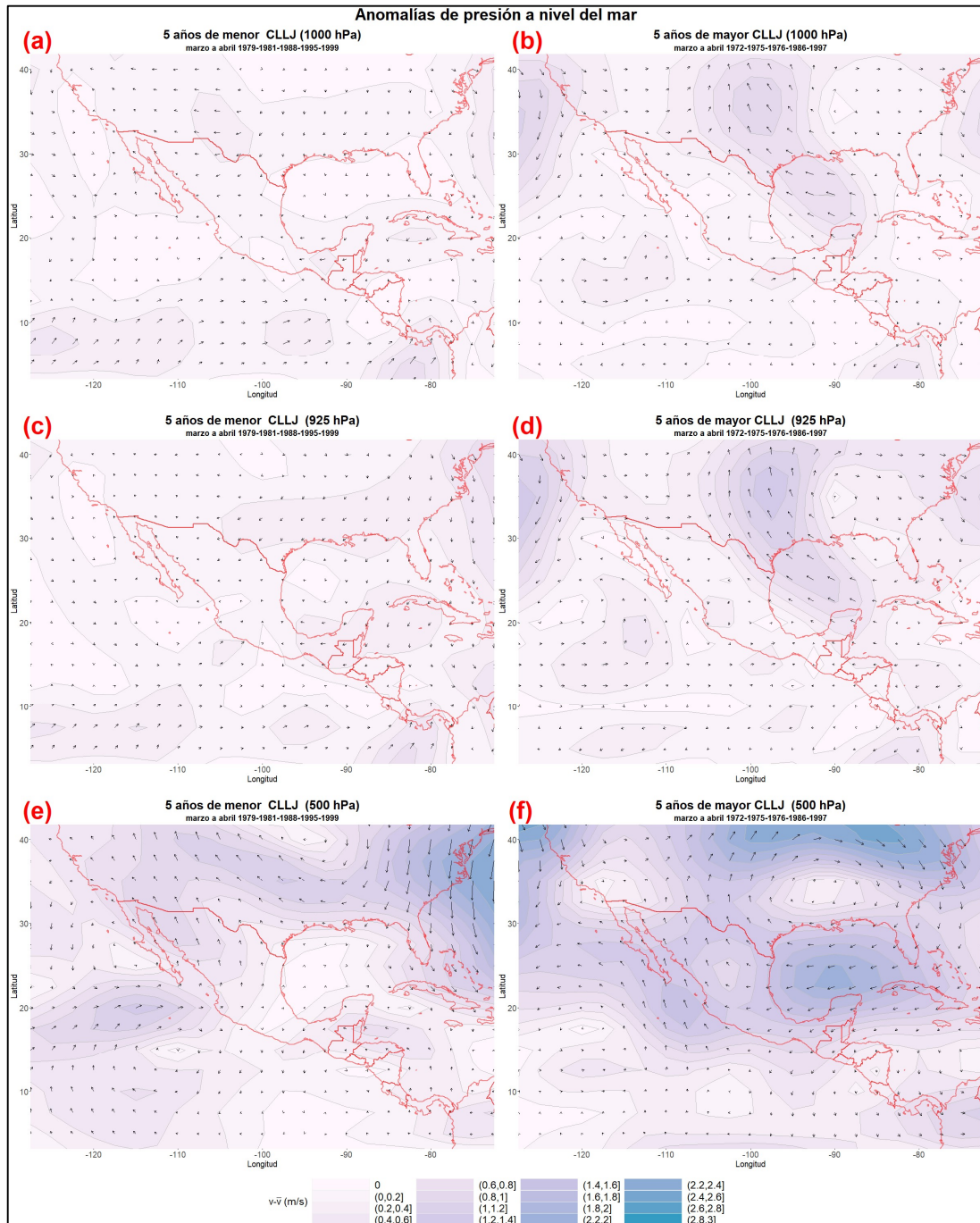


Figura 18. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en MA en los 5 años en que la señal del CLLJ es más y menos intensa, respectivamente, durante el periodo de análisis (1970 – 2000).

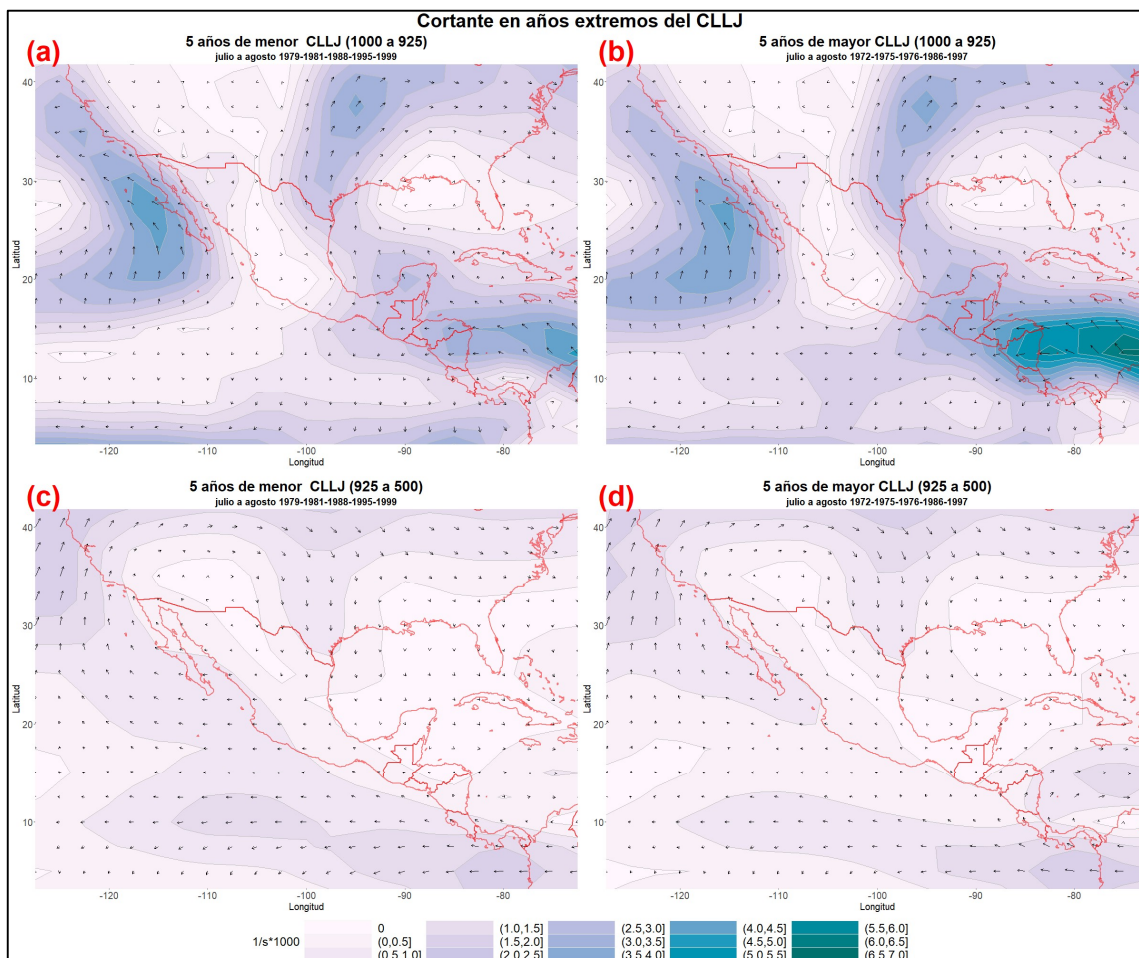


Figura 19. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa, y entre 925 y 500 hPa en los 5 años de CLLJ más fuerte y débil en JA en el periodo de análisis (1970-2000).

La figura 20 muestra las anomalías de SLP en JA y SON en los 5 primeros (últimos) años del ordenamiento descendente de la señal media anual del Niño3.4, correspondientes a años El Niño (La Niña). Se han seleccionado JA y SON basados en la cantidad de correlaciones significativas entre la serie Niño 3.4 y los índices de precipitación en múltiples escalas; y en la relevancia de lo precipitado en el CSC en el periodo. Con base en esto, si bien existe una cantidad significativa de correlaciones en DEF, la precipitación en este periodo en el CSC es escasa. En JA y SON, se observa que existe una variación opuesta en la SLP en años El Niño y La Niña. Cuando se presentan condiciones de El Niño (La Niña), la presión en el mar Caribe y en el este del Pacífico es anómalamente menor (mayor). Las menores presiones en JA (figura 20.a), asociadas a menores SST, generan condiciones que

inhiben la formación de ciclones tropicales en el Caribe y la precipitación que a éstos se asocian sobre el CSC (y AC). Adicionalmente, el gradiente meridional de SLP observado entre 10° y 20° N, es el mismo que anteriormente se asoció al fortalecimiento del CLLJ y la reducción de precipitación por el aumento en la cortante. Por el contrario, en años La Niña, de la SLP se extrae que las SST son mayores y se dan condiciones para la formación de ciclones en el Caribe; así como la reversión del gradiente meridional de SLP, el cual se ha asociado a una reducción de la intensidad del CLLJ y un aumento en la precipitación. Durante SON (figuras 20.c y 20.d), durante los años El Niño (La Niña) las anomalías de SLP negativa (positiva) en el Pacífico se extienden más hacia el sur oeste, propiciando un descenso (ascenso) de la ZCIT y una consecuente reducción (incremento) en la precipitación.

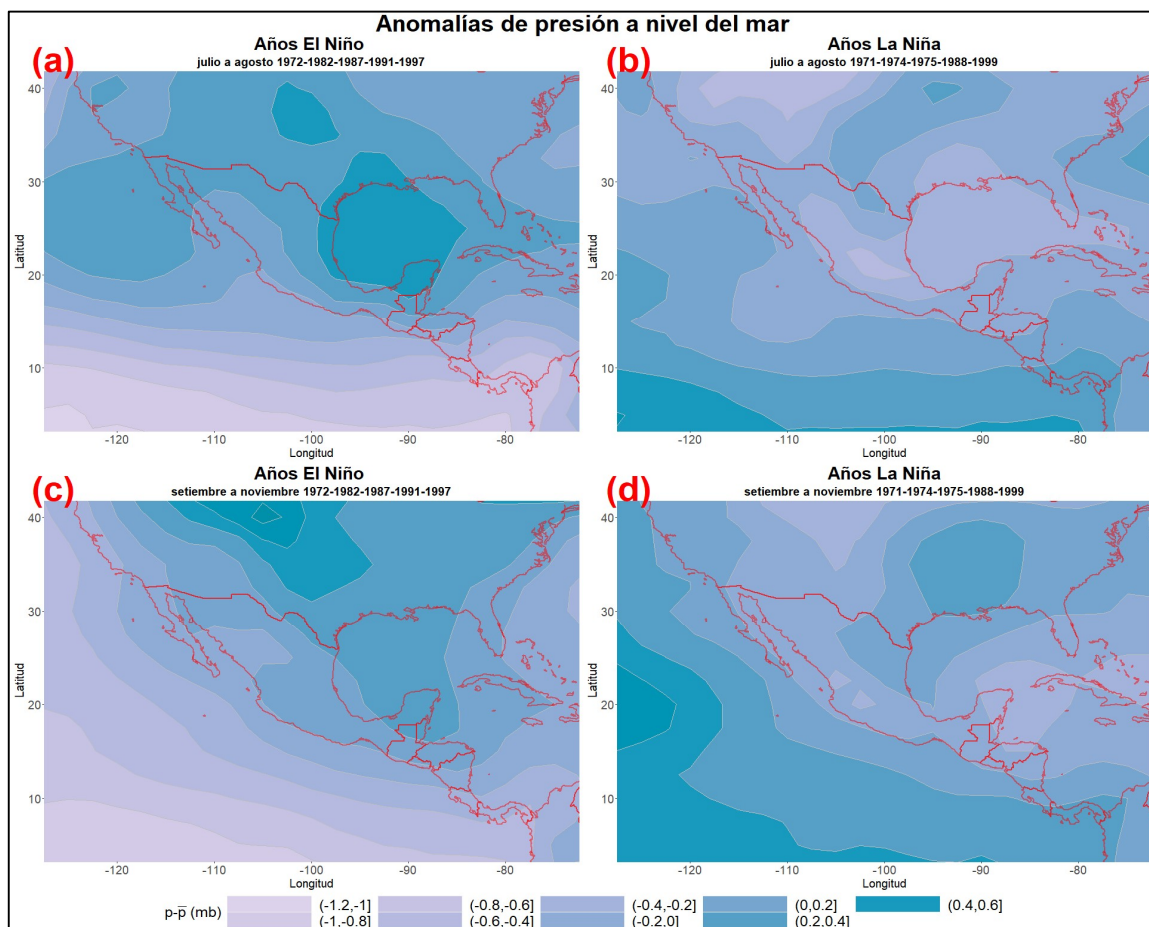


Figura 20. Anomalías de presión a nivel del mar en los años de El Niño y La Niña en JA y SON durante el periodo de análisis (1970-2000).

La orientación opuesta de los gradientes de anomalías SLP de la figura 20, sugieren el mismo tipo de comportamiento opuesto en la velocidad de viento. Las figuras 21 y 22 muestran las anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa de JA y SON, respectivamente, de los mismos periodos y años de la figura 20.

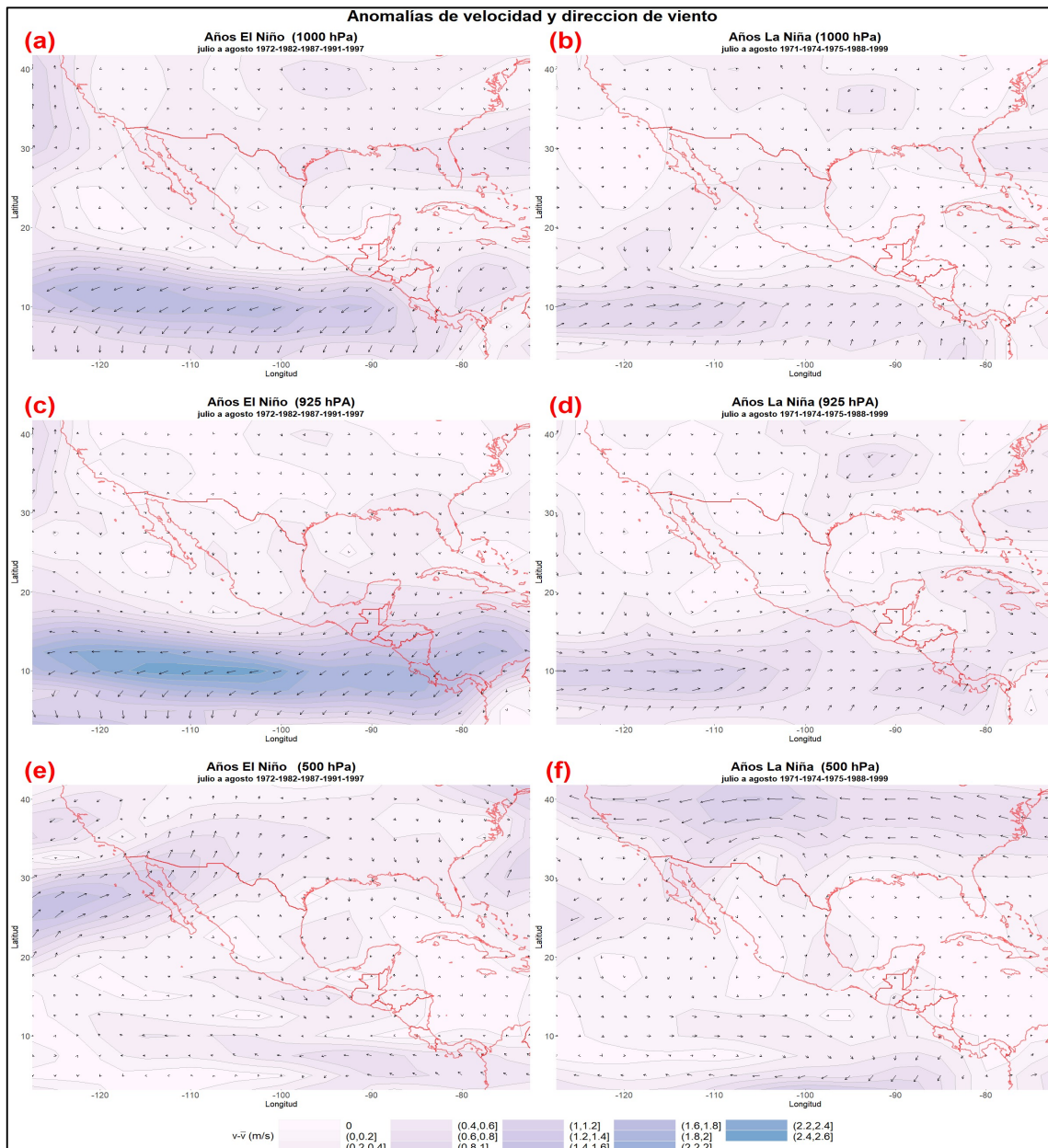


Figura 21. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en los 5 años de El Niño y La Niña en el periodo de análisis (1970-2000).

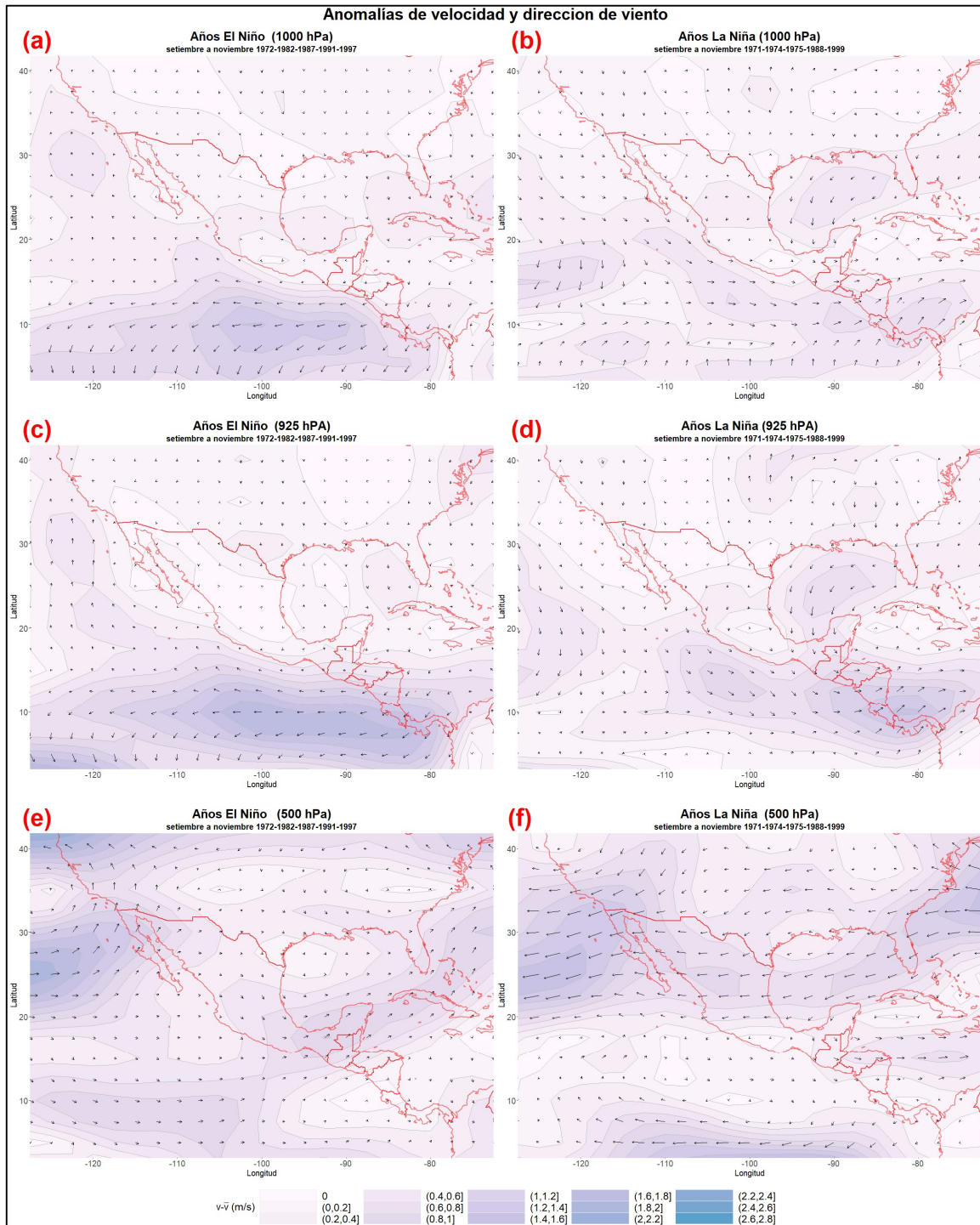


Figura 22. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en SON en años de El Niño y La Niña en el periodo de análisis (1970-2000).

Durante los años en que El Niño es positivo en JA, las anomalías de viento superficial (figuras 21.a y 21.c) en el Pacífico se orientan hacia al oeste. De igual forma en el Caribe las anomalías se orientan hacia el oeste, cruzando AC. En la tropósfera media (figura 21.e) las anomalías disminuyen y se casi se anulan, inhibiendo los procesos convectivos de precipitación. Lo contrario sucede en los años La Niña (figuras 21.b y 21.d), las anomalías de velocidad de viento se orientan hacia el este con menor intensidad, con lo cual se favorece el ingreso de humedad de la ZCIT al CSC y genera una menor cortante favoreciendo el incremento de precipitación convectiva.

En SON (figura 22), cuando se presentan condiciones de El Niño, se tiene un comportamiento similar al de JA. No obstante, las anomalías en el Pacífico se debilitan y esto se asocia no solo mayor ingreso de humedad al CSC, sino también una disminución en la cortante. De igual forma en los años La Niña, las anomalías hacia el este a través de AC se incrementan, propiciando un mayor ingreso de humedad desde el Pacífico. Finalmente, la cortante (figura 23), es mayor en años El Niño que en años La Niña (tanto en JA como en SON), lo cual concuerda con los observado anteriormente en las anomalías de velocidad y dirección de viento, propiciando la inhibición de la precipitación en años El Niño. Destaca que es mucho mayor en JA que en SON, lo cual también es un resultado consistente y esperado con base en lo observado.

El comportamiento de los vientos durante los años El Niño es similar al comportamiento de los años de mayor intensidad del CLLJ (velocidad, dirección y cortante). Estos años tienden a coincidir únicamente para los periodos en los que el CLLJ tiene un pico (JA). Esto ha sido señalado por Amador et al. (2015), quien indica que el primero es modulador del segundo. No obstante, en los restantes periodos no se muestra relación entre estos.

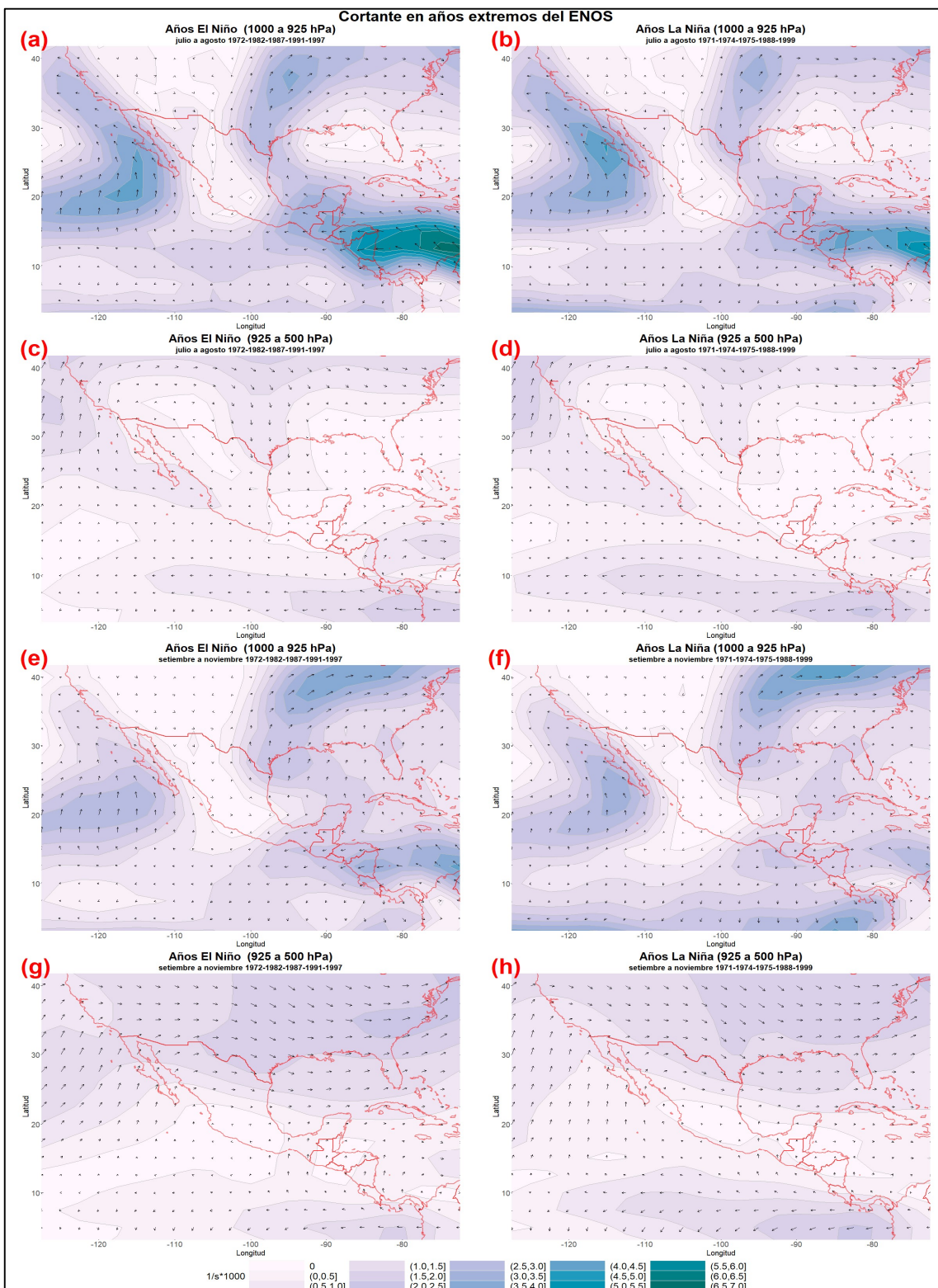


Figura 23. Cortante de viento en 10000 y 925 hPa, y entre 925 y 500 hPa en JA y SON durante años de El Niño y La Niña en el periodo de análisis (1970-2000).

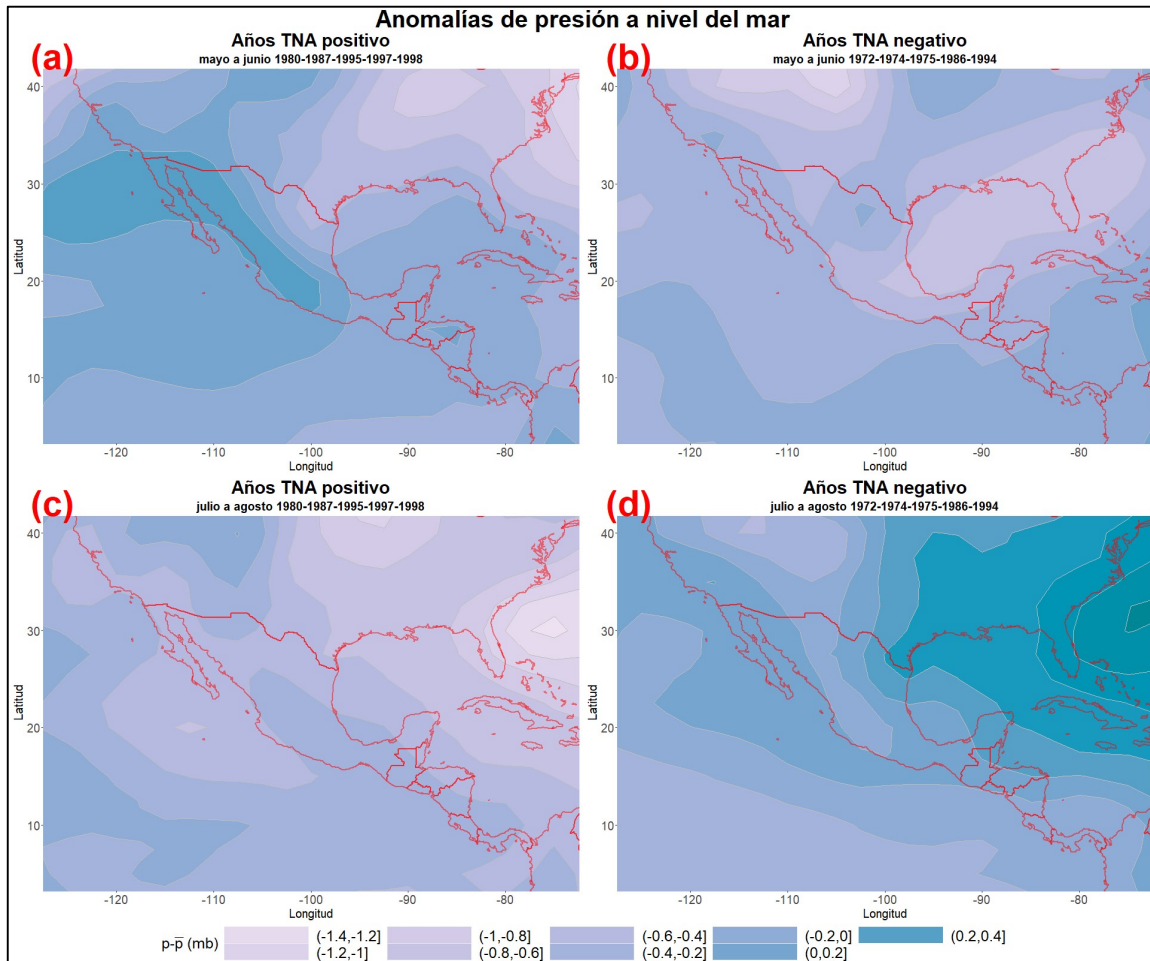


Figura 24. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en años TNA positivo y negativo en el periodo de análisis (1970-2000).

La Fig. 24 muestra las anomalías de presión de mar en MJ (24.a y 24.b) y JA (24.c y 24.d) en los años en los que la TNA es positivo y negativo. Estos periodos corresponden aquellos en los que se ha encontrado que existe mayor correlación con los índices de precipitación. Las anomalías de presión atmosférica en MJ muestran poca diferencia entre años de fase positiva y negativa de TNA. Lo cual cambia en JA, donde en años de TNA positivo (negativo), la SLP en el Atlántico norte tiende a ser menor (mayor) de lo normal. Estas condiciones propician el debilitamiento (fortalecimiento) de vientos alisios del este a través de AC y el fortalecimiento (debilitamiento) de la ZCIT.

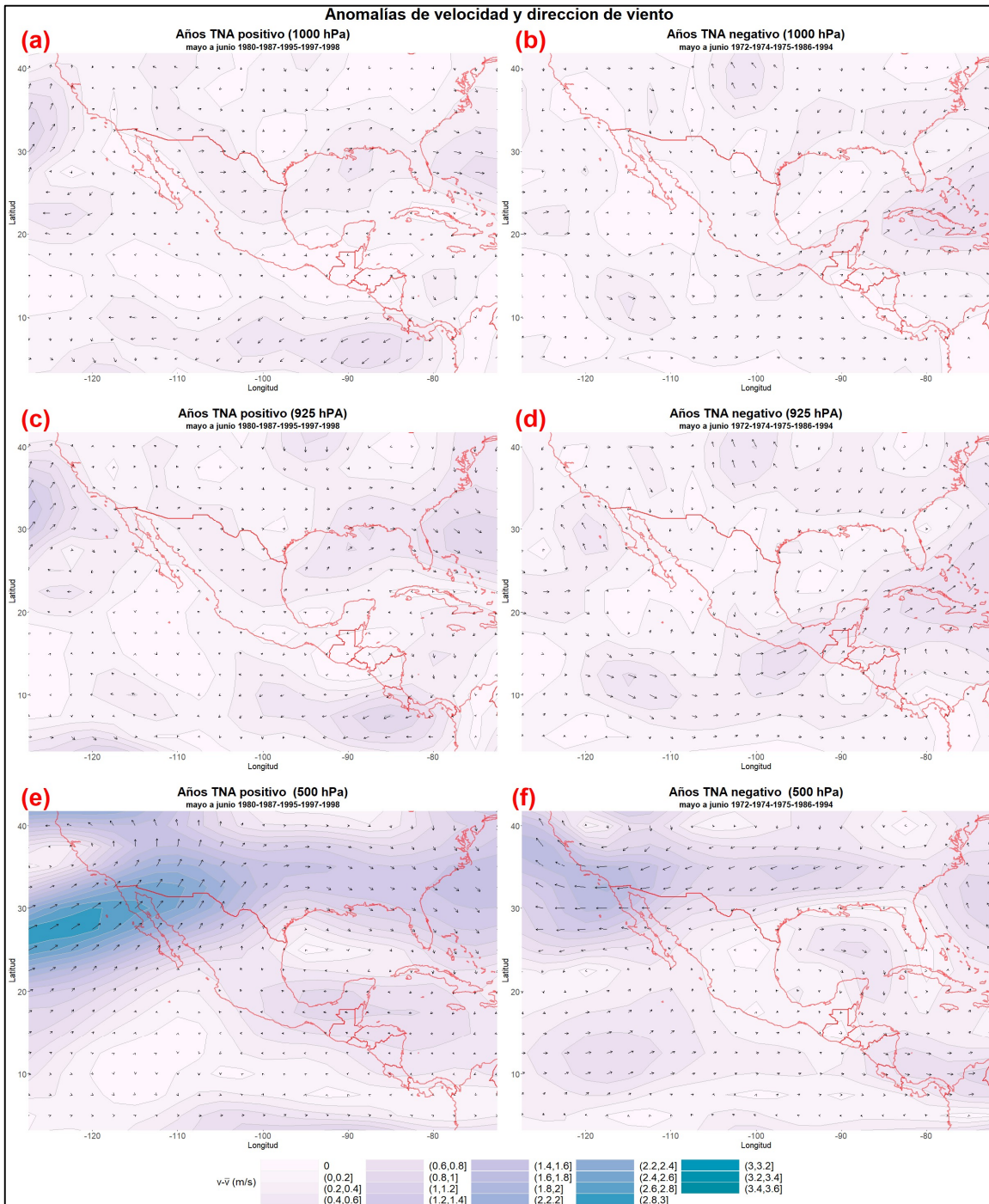


Figura 25. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en MJ en los 5 años en años TNA positivo y negativo en el periodo de análisis (1970-2000).

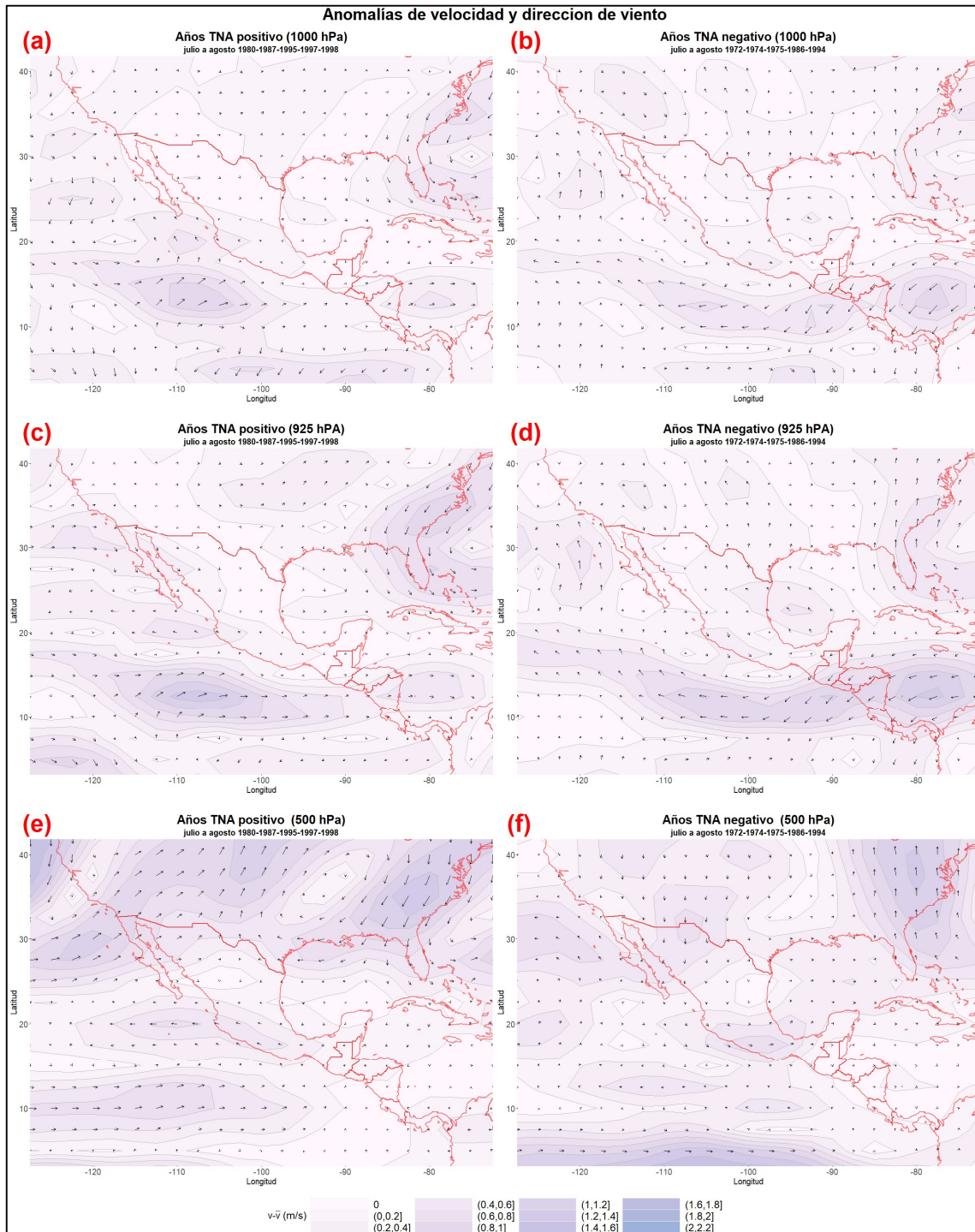


Figura 26. Anomalías de velocidad y dirección de viento a 1000, 925 y 500 hPa en JA en los años TNA positivo y negativo en el periodo de análisis (1970-2000).

Complementariamente se muestran las anomalías de velocidad y dirección de viento en MA (figura 25) y JA (figura 26). De la misma manera en MA, las anomalías en el Caribe y Pacífico en AC muestran poca variación entre años de positivos y negativo de TNA. No obstante, en JA, producto de la mayor presión en Caribe, se observa el mismo patrón de viento desde el este, a través de AC (figuras 26.b y 26.d) , el cual se había anteriormente relacionado al gradiente meridional de presiones asociado a la NASH y el cual inhibe la ZCIT sobre AC (y el CSC).

Análisis de la precipitación.

Con base en la misma selección de años utilizada para elaborar las composiciones de SLP, anomalías y cortante de viento, se generó una comparación de precipitación promedio con respecto al valor mensual durante todo el periodo analizado (1970-2000), tanto en el CSC como fuera de este. Para todos los casos se muestran los años anteriores y posteriores a los años de interés de comparación. Así, de forma general, se ha observado que la disminución en las precipitaciones en el CSC, asociada a El Niño, CLLJ y en menor grado al TNA, se presenta de manera relevante en el mes de agosto y en el periodo SON. Complementariamente, se ha encontrado que la disminución del empuje del viento desde el océano Pacífico hacia las costas inhibe el ingreso de humedad y esto se ha asociado a una reducción de las precipitaciones en el CSC

La Fig. 27 muestra la precipitación media mensual en los 5 primeros (últimos) años del ordenamiento descendente del valor medio anual de la serie del Niño 3.4, correspondiente a años El Niño (La Niña). En los años de El Niño (La Niña), tanto en el CSC como fuera de éste, la precipitación entre enero y julio se muestra similar al promedio, es a partir de agosto que esta desciende (asciende) por debajo (encima) de este y continúa de esa forma el resto del año. Durante este periodo, la reducción (incremento) en la precipitación es proporcionalmente mayor en el CSC que fuera de este. La Fig. 28 muestra la variación porcentual de la precipitación en estos años,

se observa como referencia comparativa la precipitación media de AC en el periodo de análisis

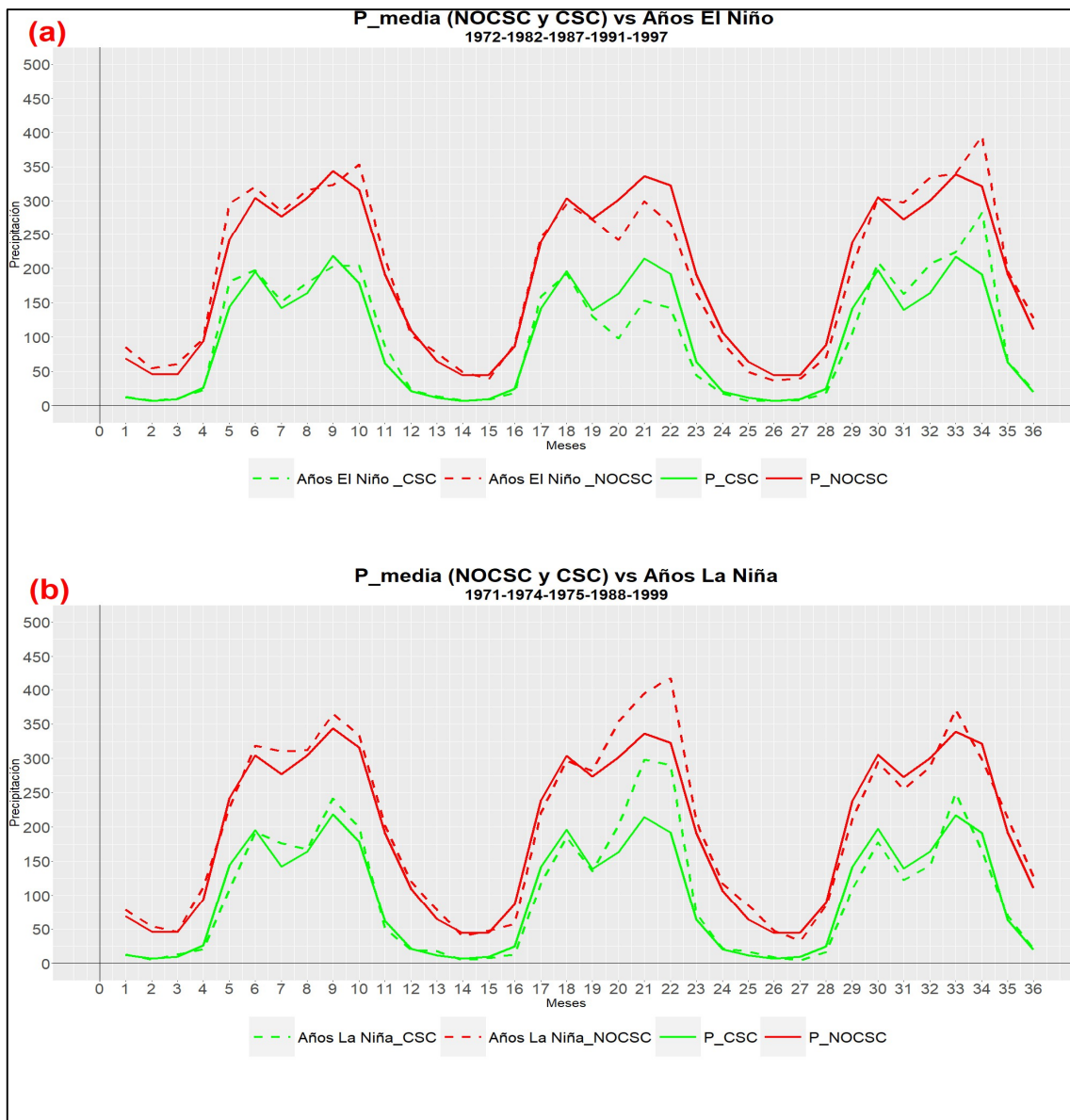


Figura 27. Precipitación media mensual en los años El Niño (a) y en años La Niña. Se presentan en color verde los valores en el CSC y fuera de este en color rojo. Los valores medios del periodo de análisis (1970-2000) se muestran en líneas sólidas.

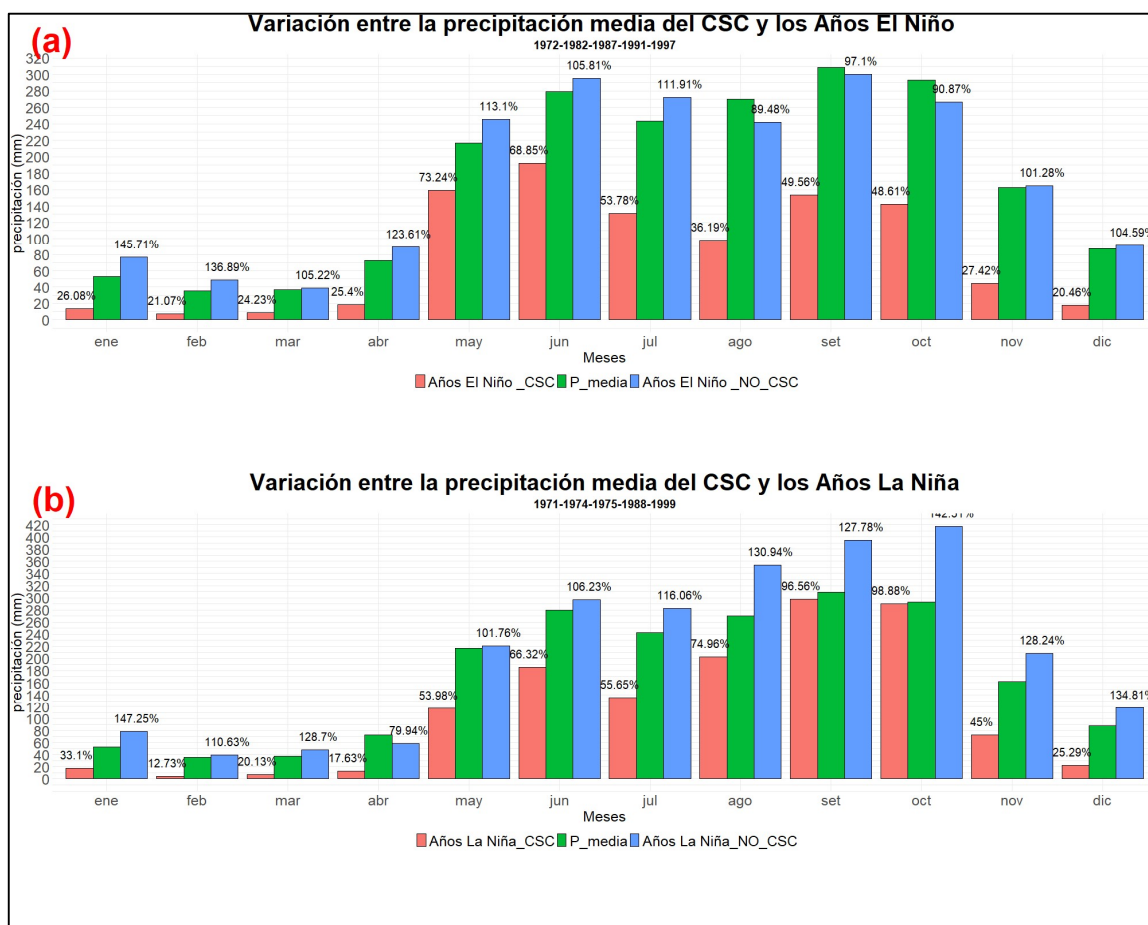


Figura 28. Variación porcentual de la precipitación media mensual en el CSC (barras rojas) y fuera de este (barras azules) con respecto al promedio (barras verdes), durante años Niño (a) y La Niña (b) en el periodo de análisis (1970-2000).

Durante el primer cuatrimestre del año, la precipitación en el CSC es muy baja con respecto al resto de AC, independientemente de la fase el ENOS. Durante los meses de mayo, junio y julio, precipitación en el CSC tiende incluso a ser mayor en los años El Niño que en los años La Niña (pero ambos casos, menor al resto de AC). Es entre los meses de agosto y diciembre que se observa una reducción de la precipitación entre los años El Niño y La Niña, siendo la precipitación entre agosto y noviembre cerca de la mitad de la de los años La Niña. Este comportamiento se observa también en el resto de AC, pero la reducción de la precipitación es mucho menor.

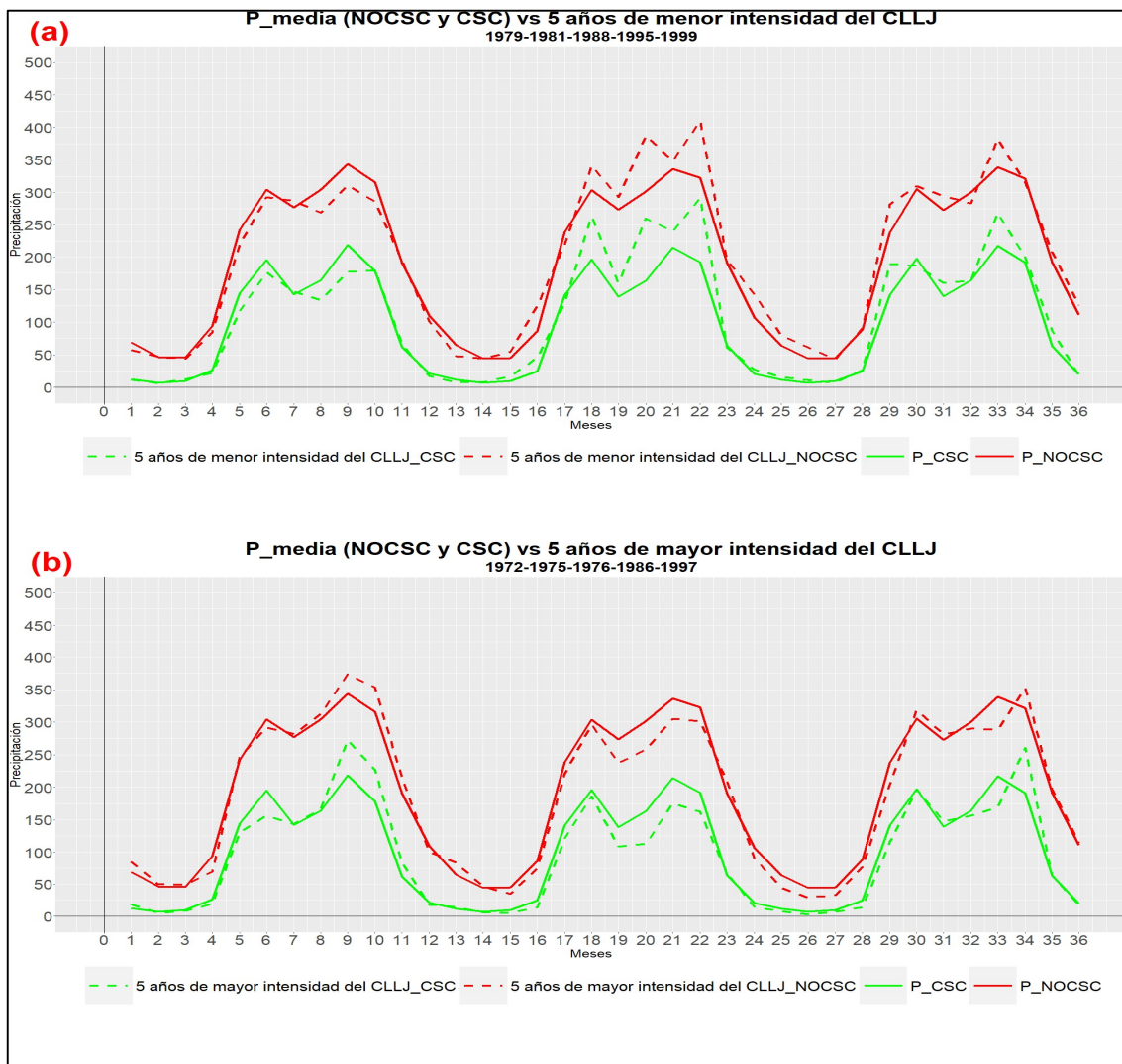


Figura 29. Precipitación media mensual en los 5 años en que la señal del CLLJ es mayor (a) y en los años en que es menor (b). Se presentan en color verde los valores en el CSC y fuera de este en color rojo. Los valores medios periodo del de análisis (1970-2000) se muestran en líneas sólidas.

La Fig. 29 muestra el gráfico de precipitación media mensual del CLLJ con respecto a los valores medios del periodo de análisis, en los años de mayor y menor intensidad del CLLJ. Análogo a lo observado con el ENOS, la reducción en la precipitación es proporcionalmente mayor en el CSC que fuera de éste. Sin embargo, como se había observado en las composiciones y las correlaciones, la menor reducción se presenta cuando la señal de CLLJ alcanza su pico. Durante el primer cuatrimestre del año la precipitación es cercana al valor medio en toda AC. A partir de mayo se observa una reducción (incremento) en la precipitación con

respecto al valor medio, en los años en los que la intensidad del CLLJ es mayor (menor), lo cual sucede hasta el mes de octubre, a partir de entonces las condiciones son nuevamente similares.

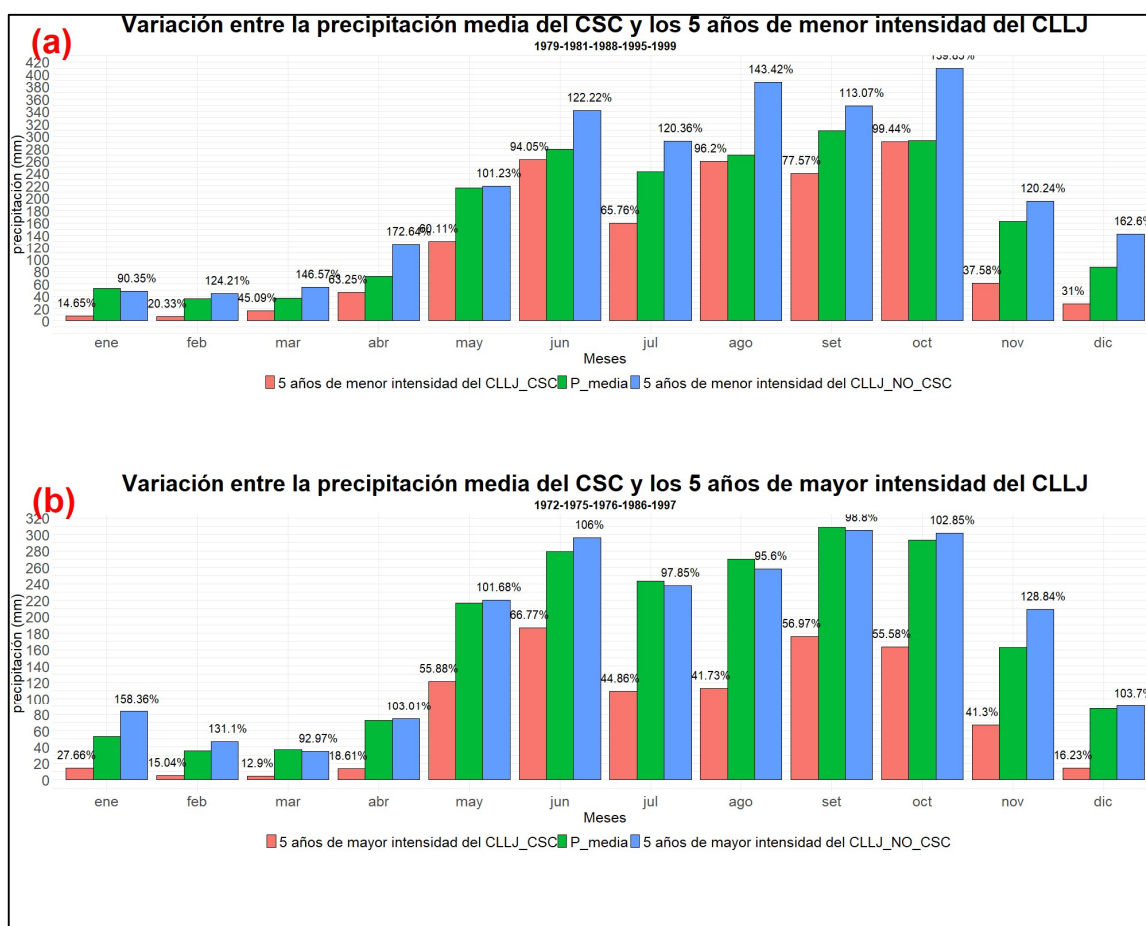


Figura 30. Variación porcentual de la precipitación media mensual en el CSC (barras rojas) y fuera de este (barras azules) con respecto al promedio (barras verdes), durante los años en los que la señal del CLLJ es mayor (a) y menor (b) en el periodo de análisis (1970-2000).

La Fig. 30 muestra la variación porcentual de la precipitación con respecto al promedio de AC para el CSC y fuera de este. El periodo de reducción de la precipitación asociado al CLLJ es menor que el asociado a ENOS. No obstante, la variación se observa desde junio y hasta octubre, siendo agosto el mes en el cual se observa la mayor reducción, de forma coincidente con el pico del proceso, según se comentó anteriormente. Destaca que la reducción es menor que la asociada a

eventos de El Niño. Adicionalmente se observa que la reducción afecta solo al CSC pues la precipitación en el resto de AC en los años en que el CLLJ es más intenso es similar al valor promedio de AC durante todo el año.

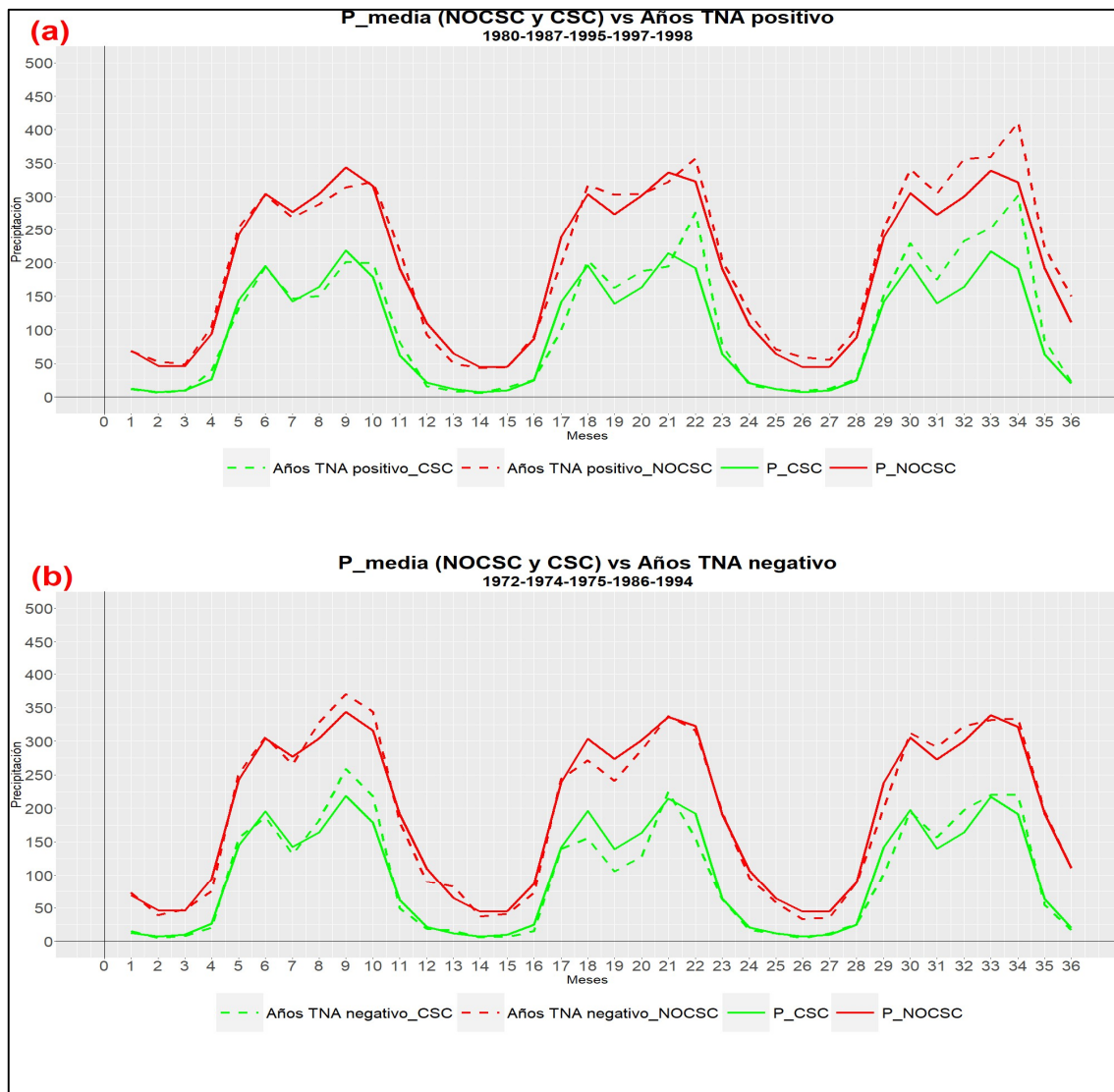


Figura 31. Precipitación media mensual en años en que la señal del TNA es positiva (a) y en los años en que es negativa (b). Se presentan en color verde los valores en el CSC y fuera de este en color rojo. Los valores medios del periodo de análisis (1970-2000) se muestran en líneas sólidas

La Fig. 31 muestra el gráfico de precipitación media mensual del TNA con respecto a los valores medios del periodo de análisis, en los años positivos y negativos del TNA (según el ordenamiento de la señal media anual del TNA en el

periodo de análisis). Al igual que en los demás procesos analizados durante el primer cuatrimestre del año, la precipitación en el CSC es escasa y experimenta poca afectación como resultado de la variación del TNA. A partir del mes de mayo se observa una reducción en la precipitación cuando la señal del TNA asume valores negativos, la cual se sostiene hasta el mes de setiembre cuando la precipitación es similar a los valores medios.

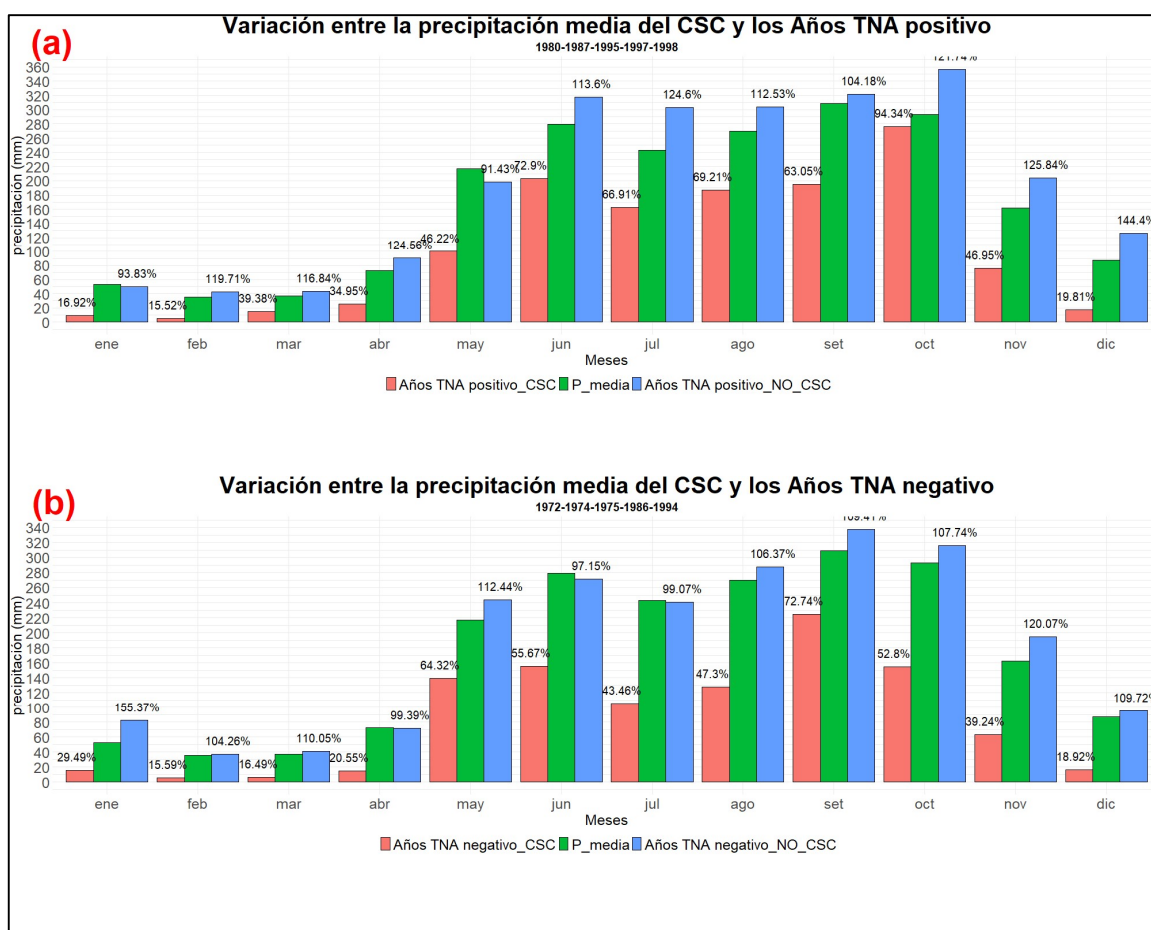


Figura 32. Variación porcentual de la precipitación media mensual en el CSC (barras rojas) y fuera de este (barras azules) con respecto al promedio (barras verdes), durante los años en los que la señal del TNA es positiva (a) y negativa (b) en el periodo de análisis (1970-2000).

La Fig. 32 muestra la variación porcentual de la precipitación en el CSC y fuera de éste en los años en los que la señal del TNA es positiva (a) y negativa (b). Se observa que la reducción de precipitación con respecto al promedio de AC es

mayor en los meses de junio, julio y agosto. Esta reducción es interrumpida por un incremento en el mes de setiembre y continúa con una reducción en el mes de octubre. En los meses de noviembre y diciembre la precipitación muestra poca afectación como resultado de las variaciones en el TNA.

La posible periodicidad en la ocurrencia de sequía se analizó a partir de los gráficos de onduletas, los cuales permiten identificar señales y su intensidad. La Fig. 33 muestra los gráficos de onduletas del índice de precipitación SPI_1 (a), SPI_3 (c), SPI_9 (e), SPI_12 (g). Complementariamente se muestra a la derecha de cada onduleta, la reconstrucción de las series originales por deconvolución. Adicionalmente, en el anexo C se muestran los gráficos de onduleta de los índices de RDI 3, 6, 9, 12.

La intensidad de la onduleta se asocia a la periodicidad en la señal. Así, de las onduletas se observa que existe una tendencia hacia una periodicidad en la ocurrencia de las sequías de 4 años en los primeros 10 a 15 años del periodo de análisis, la cual se observa desde la serie de mayor frecuencia (SPI_3). No obstante, en la segunda mitad del periodo de análisis, se presenta una periodicidad claramente acentuada hacia los 8 años, la cual se consolida en series de menor frecuencia (SPI_9 a SPI_24), pero no es observable en series de mayor frecuencia (SPI_3).

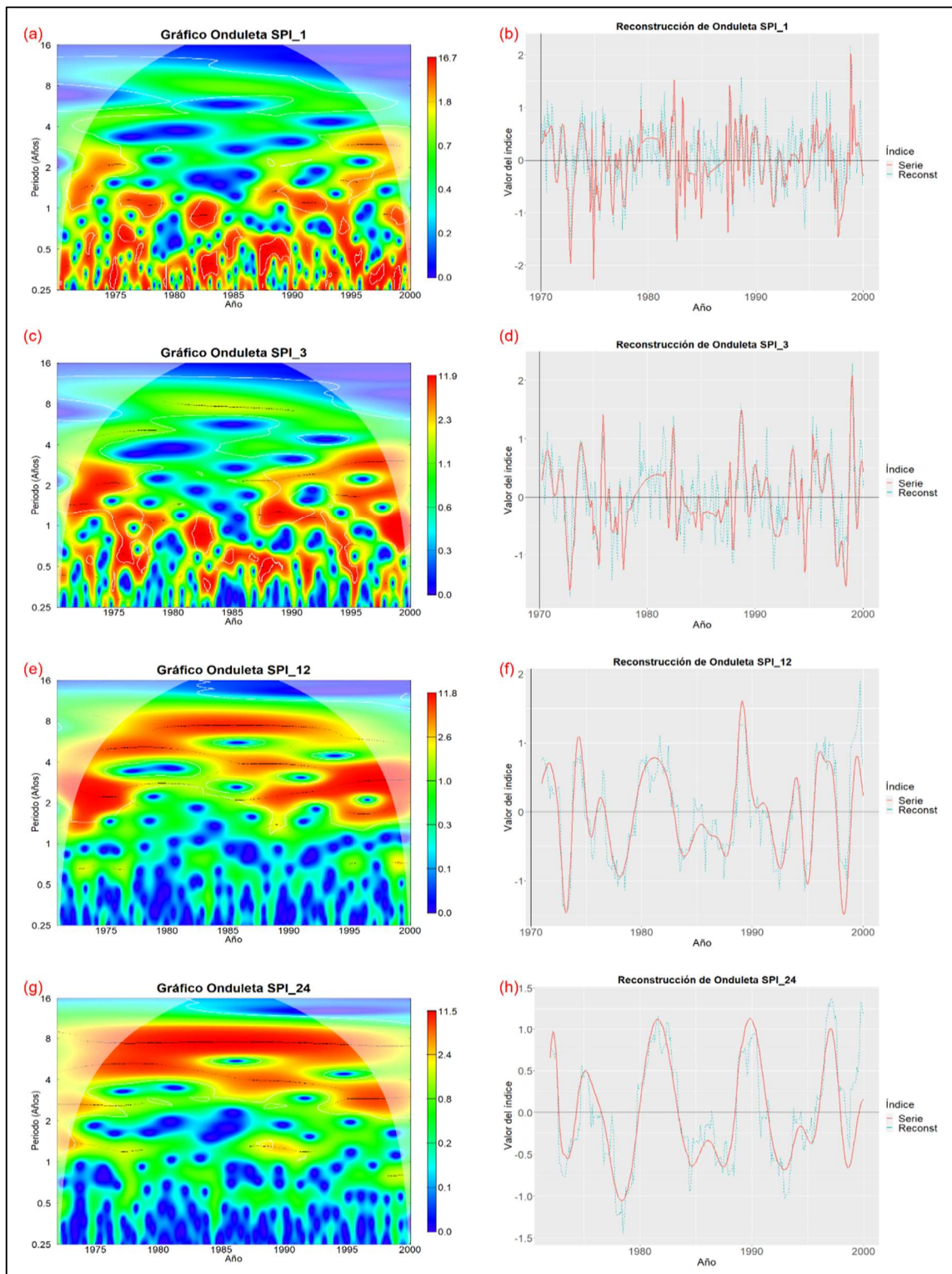


Figura 33. Gráficos de onduletas de las series SPI₁ (a), SPI₃ (c), SPI₉ (e), SPI₁₂ (g) y las series reconstruidas (deconvolución) de las mismas series de índices de precipitación (b, d, f, h), en el periodo de análisis (1970-2000).

Este comportamiento encuentra su explicación en la naturaleza del cálculo de los mismos índices la cual promedia una mayor cantidad de valores en cada observación lo cual actúa como un filtro; y en la naturaleza de la ocurrencia de las sequías cuyos efectos en los índices de precipitación se observan en escalas de tiempo mayores. Esta misma periodicidad de entre 4 y 8 años para la ocurrencia de la sequía y la consolidación de este periodo en escalas mayores, se extrae de los índices de precipitación RDI en escalas 1 a 24 (anexo C), lo cual es un resultado esperable dada la alta correlación entre estos índices. No obstante, destaca que la sequía muestra una periodicidad más clara hacia los 8 años a medida que se incrementa el índice de la escala. Esto se ve de forma muy concisa tanto en el gráfico de onduleta, como en la reconstrucción de la serie. Aquí se extrae que las sequías largas (24 meses en este caso), parecen tener una periodicidad más visiblemente definida que las sequías de menor duración. La periodicidad encontrada en la ocurrencia de sequías es cercana a la frecuencia de ocurrencia de eventos de fase positiva del ENOS (El Niño).

La Fig. 34 muestra los gráficos de onduleta de los índices hidrológicos de Palmer (sc-PDSI y sc-PHDI) y la reconstrucción de estas series. A partir de las correlaciones se ha asociado estos índices con los índices de precipitación de escala 12 meses, con lo cual se espera encontrar en los índices hidrológicos una periodicidad similar a la observada en estos índices meteorológicos. Se observa que se tiene el mismo periodo de entre 4 y 8 años, el cual se muestra en el periodo de análisis, a partir de 1980. En los 10 años anteriores las sequías muestran una periodicidad entre 5 y 9 años. Finalmente, en estas series parece también existir una periodicidad de eventos cercana a los 8 años. Considerando la reconstrucción de estas series de se tiene que son los eventos de mayor intensidad (índices superiores a 1 los que tienden a tener una periodicidad mayor, cercana al límite superior de este intervalo).

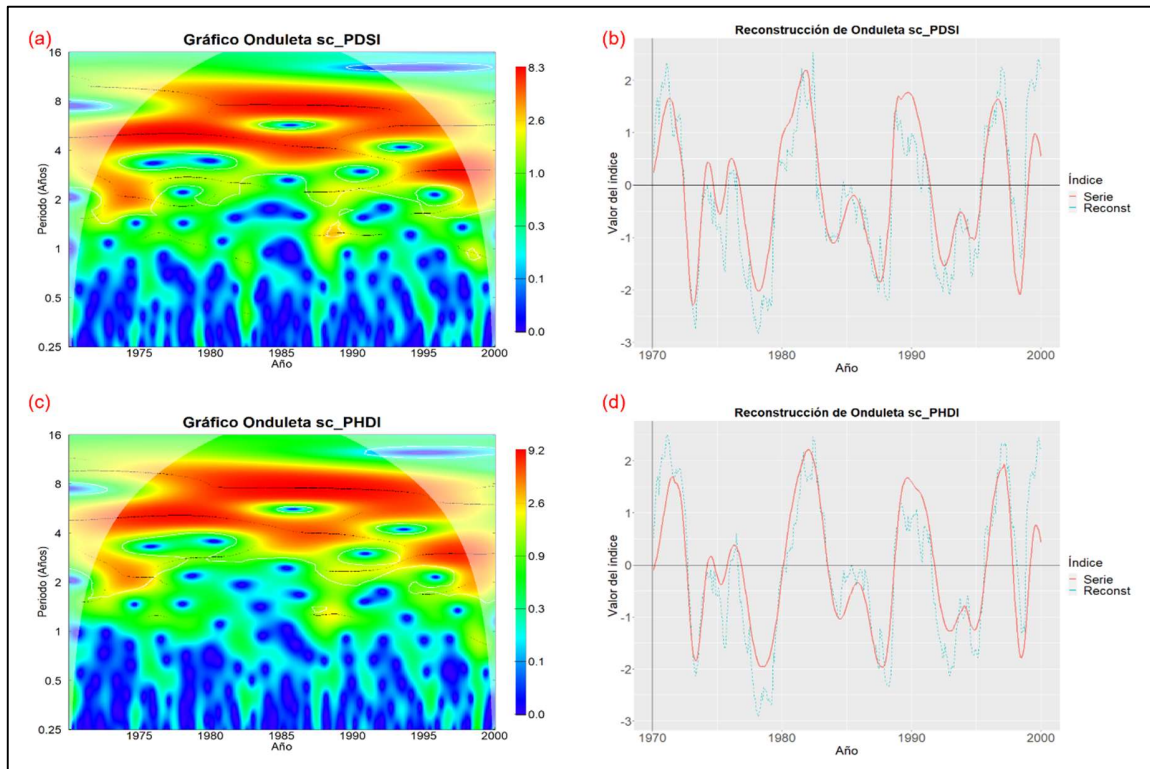


Figura 34. Gráficos de onduletas de los índices hidrológicos de Palmer (a y c) y las series reconstruidas (deconvolución) de los mismos índices (b y d), en el periodo de análisis (1970-2000).

Con base en la metodología propuesta por Chen (2011), se calcularon las ACF y PACF para las funciones global, semi-global, semi-local y local. A partir de la ponderación semi-local, basada en la distancia media entre estaciones, se calculó la correlación espacial de todos los meses de las series de índices SPI 1 3, 6, 9 y 12. A éstas se les generaron rezagos de entre 1 y 6 meses. Las series resultantes se correlacionaron con los procesos atmosféricos analizados. Los gráficos de las correlaciones se muestran en el Anexo H.

De forma general se tiene que las correlaciones espaciales no se muestran tan directamente relacionadas con los procesos atmosféricos como lo hacen las series de índices de precipitación con estos procesos. No obstante, se observa una tendencia hacia un incremento en la correlación a medida que se incrementa la escala del índice de precipitación utilizado para la

generación de la correlación espacial. Esto se ha atribuido a la misma variabilidad en la precipitación como resultados de los microclimas, la cual tiende a disminuir a medida que ponderan más meses de datos (mayores escalas de índices de precipitación).

Del análisis de los periodos en particular, se tiene que en JA existe una correlación entre la I de Moran con rezago 1 y el CLLJ, la cual tiende a incrementarse a medida que se incrementa la escala del índice de precipitación, hasta alcanzar un valor de -0.54 con el SPI_12. De igual forma sucede con El Niño 3.4, el cual alcanza un pico con el SPI_12 y rezago 1 (0.5). De este comportamiento se extrae que el efecto de El Niño (o el CLLJ) impacta espacialmente al CSC con un rezago de 1 mes en el periodo JA. En el caso del periodo MJJ, se observa para el Niño3.4 el mismo comportamiento observado en JA, alcanzando un pico de correlación con el índice de precipitación de 12 meses de 0.49, pero sin rezago. Resalta que en MJJ no se observa ninguna correlación relevante con CLLJ en ninguno de los casos de índices de precipitación.

Durante DEF la más significativa de las correlaciones se observa con las correlaciones espaciales de índices de precipitación de 12 meses con rezago, lo cual proviene de una serie de precipitación de valores promediados a lo largo de doce meses y correlacionadas con el periodo pico del CLLJ en JA. Existe adicionalmente una fuerte correlación entre el Niño 3.4 y la correlación espacial con rezagos entre 3 y 5 meses, lo cual resalta el efecto del Niño 3.4 en la ocurrencia de sequías en SON.

Durante MA, existe una correlación entre el CLLJ, el Niño3.4 y la correlación espacial de entre 1 y 3 meses para el caso de las series de precipitación de 9 y 12 meses. Ésta se atribuye a la escala de la correlación, la cual acumula los faltantes de toda la época lluviosa anterior y actúa sobre todo el área del CSC.

Finalmente, durante el periodo SON no se observa ninguna correlación relevante entre las series de correlaciones espaciales y los procesos atmosféricos, lo cual se considera se debe a la variabilidad de las precipitaciones, como resultado mayormente de la orografía en este periodo que es el más húmedo.

La Fig. 35 muestra la cantidad de estaciones por año en las cuales la aridez es menor a 1, durante el periodo de análisis. Se muestra también en el eje secundario el valor medio de aridez de estas estaciones. Finalmente, las líneas azules discontinuas, corresponden a los años en los que el Niño 3.4 es más intenso, durante el periodo analizado, y las líneas de puntos corresponden a los años en los que el CLLJ es más intenso.

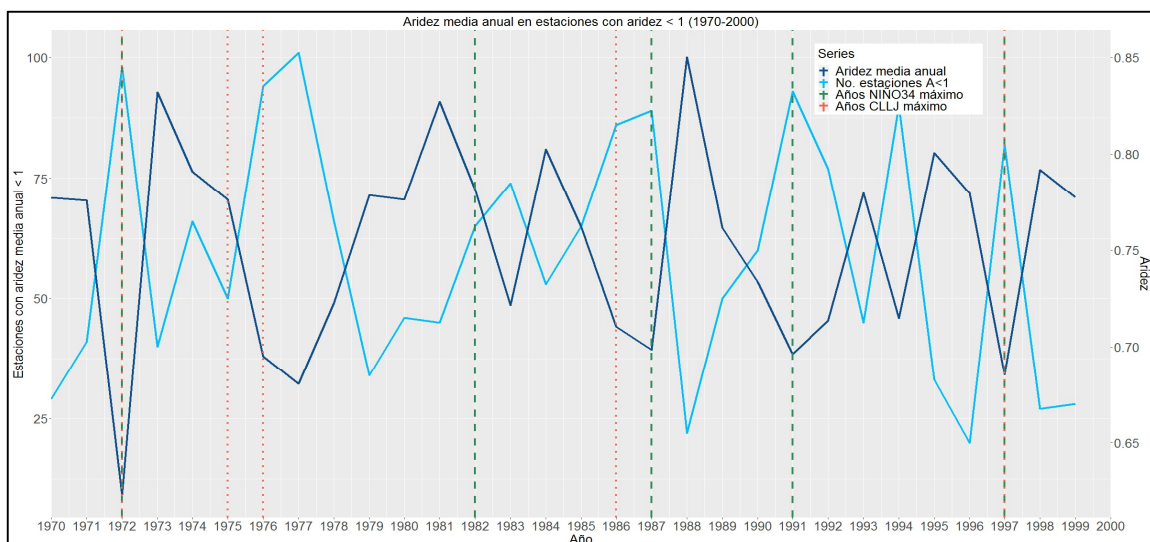


Figura 35. Cantidad de estaciones con aridez menor a 1 durante el periodo analizado. Los años de El Niño y CLLJ de mayor intensidad se muestran en líneas verdes y rojas punteadas, respectivamente

De la Fig. 35 se extrae que existe una relación tanto entre el Niño3.4 y el CLLJ, la cual genera que en los años que estos son más fuertes, el CSC tenderá a extenderse (considerado desde la definición utilizada de aridez menor a 1) hacia una mayor cantidad de estaciones y por tanto a una mayor área; y la aridez será mayor en promedio en la región. Complementariamente a lo observado en la Fig. 35, en los años en los que estos procesos son más débiles, la extensión del CSC

tiende a reducirse (cantidad de estaciones con aridez menor a 1) y la aridez en estas mismas estaciones tiende a ser menor.

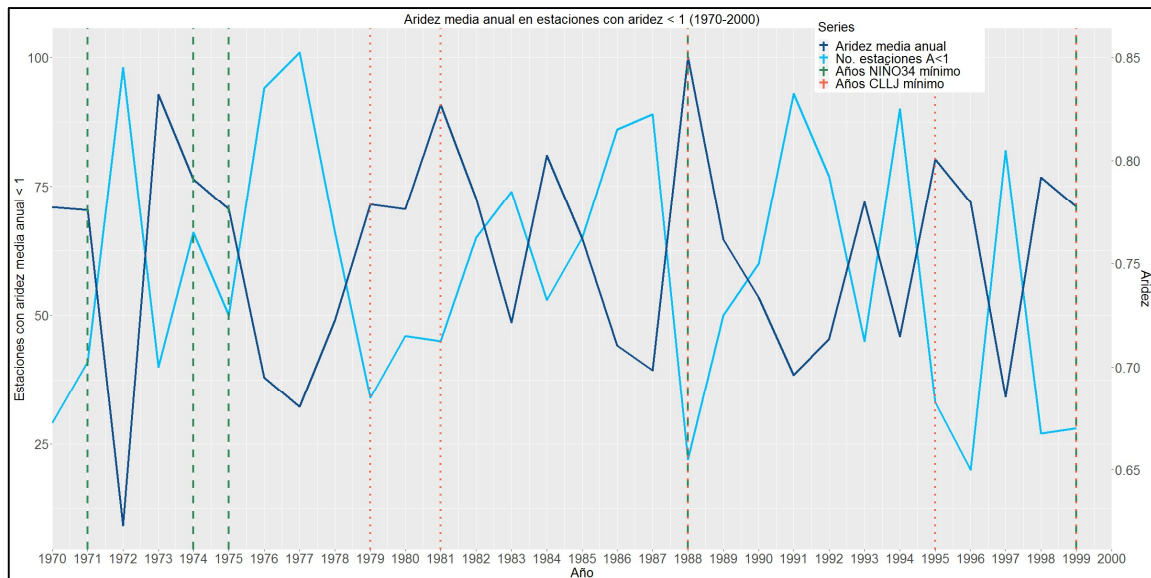


Figura 36. Cantidad de estaciones con aridez menor a 1 durante el periodo analizado Los años de La Niña y CLLJ de menor intensidad se muestran en líneas verdes y rojas punteadas, respectivamente

6. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y de su análisis, se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- La precipitación en el CSC a lo largo del año presenta dos periodos de mayor intensidad de precipitación, MJ y SON; dos de menor precipitación, MA y MJ; y uno de casi nula precipitación, DEF. En estos actúan el ENOS, el CLLJ y la variación de temperatura en el Atlántico (analizada mediante el índice TNA), como los principales procesos que alteran las precipitaciones y generan condiciones de sequía. La presencia de El Niño implica reducción en la precipitación de MA hasta SON, afectando principalmente la precipitación en JA y SON. La mayor afectación de El Niño es percibida entre 3 y 6 meses después de los picos del proceso atmosférico. Los eventos de sequía más largos en el CSC se asocian al efecto de El Niño. La presencia del CLLJ implica reducción de la precipitación en MJ y especialmente en JA, la cual se observa de forma inmediata (sin rezago) o con un mes con respecto a la ocurrencia de picos de intensidad del CLLJ. Las sequías propiciadas por el CLLJ son de menor duración que las de El Niño, pero de mayor severidad en JA. El TNA actúa en las condiciones de precipitación mayormente entre MJ y JA. No obstante, su efecto es hacia incrementos en la precipitación en sus picos y ligeramente menores cuando su señal es más negativa. La variación de las temperaturas a nivel de mar en el Pacífico y especialmente en el Atlántico, entre años de El Niño y La Niña, así como la variación de la presión atmosférica, son las principales características que afectan la ocurrencia de sequías relacionadas con el ENOS. En el caso del CLLJ, se asocia a la variación de la posición de la NASH y su intensidad, la cual se ve su vez afectada por su conexión con el ENOS como resultado de la variación de la SST en el Caribe. Los efectos de ENOS y CLLJ en la reducción de la precipitación son más severos y más e identificables en el CSC que en el resto de AC.

- Los índices de precipitación (e hidrológicos), representan una herramienta de aplicación práctica en la caracterización de las sequías en el CSC. La posibilidad de ponderar la precipitación en periodos largos (e.g. 12 meses), permite realizar una evaluación de las sequías de diversa duración. Los índices de precipitación responden a las variaciones de los procesos atmosféricos que alteran la precipitación en el CSC, permitiendo evaluar la duración y severidad de las sequías. Se tiene que el efecto de las sequías en el CSC es mayormente observable en periodos de entre 3 y 6 meses de sequía en los índices de precipitación. Complementariamente, los índices hidrológicos, por su naturaleza de cálculo, brindan una herramienta para la evaluación de sequías de mayor duración. En los procesos de escorrentía, infiltración y recarga de flujo base, parece existir un efecto atenuador de los efectos acumulados de la sequía, lo cual hace que esta no se esté reflejando en los índices hidrológicos, de la misma forma en que lo hacen los de precipitación. Es posible que los índices hidrológicos considerados muestren los efectos de la sequía en rezagos mayores al máximo considerado en esta investigación o simplemente es un producto de que los índices hidrológicos tienen diferentes escalas de tiempo de la variable precursora, lo cual es un tema que se recomienda investigar.
- Las sequías prolongadas (definidas como aquellas mayores a 6 meses) son las que muestran una más clara periodicidad en su ocurrencia. No obstante, no se tiene del periodo analizado una certeza en la periodicidad, por lo que se ha concluido que las sequías extensas (de más de 6 meses) ocurren en el CSC entre cada 4 y 8 años. Este mismo resultado se encontró de la correlación espacial y los índices de precipitación, no obstante, estos muestran una tendencia más cercana a los 4 años que a los 8 años en la ocurrencia de las sequías. Especialmente el CSC tiende a variar su extensión según la severidad de la sequía, siendo un área que no se comporta de forma homogénea ante eventos de sequía.

Bibliografía

- Aguilar, E., y Coautores, 2005, Changes in precipitation and temperature extremes in central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D23107, <https://doi:10.1029/2005JD006119>
- Amador, J., 1998. A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Top. Meteor. Oceanogr.* **5**, 91–102.
- Amador, J.A., 2008, The Intra-Americas Sea Low-level Jet, Overview and Future Research. *Trends and Directions in Climate Research: Ann. N.Y. Acad. Sci.* **1146**, 153–88, <https://doi:10.1196/annals.1446.012>
- Amador, J.A., Durán-Quesada, A.M., Rivera, E.R., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., Mora N., 2016, The easternmost tropical Pacific. Part II: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability, *Revista de Biología Tropical.* **64**, S23-S57.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O., 2006, Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review, *Progress in Oceanography*, **69**, 101–142, doi:10.1016/j.pocean.2006.03.007
- Amador, J.A., Durán-Quesada, A.M., Rivera, E.R., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., Mora N., 2016, The easternmost tropical Pacific. Part I: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability, *Revista de Biología Tropical.* **64**, S1-S22
- Amador, J.A., V.O. Magaña, and J.B. Pérez, 2000, The Low Level Jet and continental activity in the Caribbean. Proceedings of the 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, FT. Lauderdale, American Meteorological Society, 114-115.
- Asadi Zarch, M.A., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Dastorani, M.T., Kousari, M.R., 2011, Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resour Management*, **3485**. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9867-1>
- Augie B., 2017, GridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics. R package version 2.3., <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>.

- Bengtsson H., 2016, R.matlab: Read and Write MAT Files and Call MATLAB from Within R. R package, version 3.6.1. <https://CRAN.R-project.org/package=R.matlab>.
- Bjerknes, J. 1969, Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific. *Journal of Physical Oceanography*. **97(3)**, 163-172, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2).
- Brown, P.T., Lozier, M.S., Zhang, R., Li, W.H., 2016, The necessity of cloud feedback for a basin-scale Atlantic Multidecadal Oscillation, *Geophysical Research Letters*. **43 (8)**: 3955–3963. Bibcode:2016 GeoRL..43.3955B., <http://doi:10.1002/2016GL068303>
- Castillo , R., Nieto, R., Gimeno , L., & Drumond, A. 2019, Influencia de los principales modos anulares hemisféricos y El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en las fuentes de humedad globales de Mesoamérica. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*. **43(169)**, 746-763, <https://doi:10.18257/raccefyn.859>
- Castillo, R., Montero, R., Amador, J., and Durán, A.M. 2018, Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística. *Revista de Climatología*, **18**, 1-12.
- Carrao, H., Naumann, G., and Barbosa, P., 2016, Climate Change Impacts on Droughts: Desertification, Land Degradation and Drought (DLDD), and bio-physical modelling for crop yield estimation in Latin America under a changing climate, Joint Research Center, European Comission.
- Chen, Y.G. 2011, On the Four Types of Weight Functions for Spatial Contiguity Matrix. *Letters in Spatial and Resource Sciences*. **5**. 5, 65–72, <https://doi:10.1007/s12076-011-0076-6>.
- Cook, K.H., E.K. Vizy, 2010, Hydrodynamics of the Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship to Precipitation. *J. Clim.*, **23**, 1477-1494, <https://doi:10.1175/2009JCLI3210.1>

- Dai A.G., 2010, Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **2**, 45–65, <https://doi:10.1002/wcc.81>
- Davis, R.E., Hayden, B.P., Gay, D.A., Phillips, W.L., Jones, G.V., 1997, The North Atlantic subtropical anticyclone. *J. Climate*, **10**, 728–744.
- Durán-Quesada, A.M., Gimeno, L., Amador, J., 2016, Role of moisture transport for Central American precipitation. *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, **8**, 147–161, <https://doi.org/10.5194/esd-8-147-2017>.
- Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A.M., Mayer D.A., Cid-Serrano, L., 1999, How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *J. Geophys. Res.*, **104**, 7841–7848 .
- Enfield, D.B., Mestas-Nuñez, A.M., Trimble, P.J., 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2077–2080. <https://doi.org/10.1029/2000GL012745>
- FAO, 2016, Corredor Seco AC, informe de situación, junio 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 3 pp.
- Farge, M., 1992, Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. **24**. 395-457. <https://doi:10.1146/annurev.fl.24.010192.002143>.
- Goldenberg, S.B., Landsea, C.W., & Mestas-Nunez, A.M., & Gray, W., 2001, *The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implication. Science*. **293**. 474-479. [10.1126/science.1060040](https://doi.org/10.1126/science.1060040).
- Greatbatch, R.J., 2000, The North Atlantic Oscillation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* **14**, 213–242. <https://doi.org/10.1007/s004770000047>
- Ghosh, R., Müller, W.A., Baehr, J., Bader, J., 2016, Impact of observed North Atlantic multidecadal variations to European summer climate: a linear baroclinic response to surface heating. *Climate Dynamics*. **48** (11–12): 3547. Bibcode:2017CIDy...48.3547G. <https://doi:10.1007/s00382-016-3283-4>.

- Gouhier T.C., 2016, Grinstead A., Simko V., biwavelet: Conduct univariate and bivariate wavelet analyses (Version 0.20.10). <http://github.com/tgouhier/biwavelet>.
- Golemund G., Wickham H., 2011, Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of, Statistical Software*, **40(3)**, 1-25. <http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>.
- Harrell F.E., 2018, Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 4.1-1. <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>.
- Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., Quesada-Montano, B., 2017, Observed (1970–1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change* **141**, 13–28 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1786-y>
- Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., Amador, J.A., Bastidas, A., 2019, Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor. *Clim Dyn* **53**, 1307–1322. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04638-y>
- Hidalgo, H.G., Amador, J.A & Alfaro, E.J, Quesada, B., 2013, Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*. **495**. 94–112. [10.1016/j.jhydrol.2013.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.004).
- Hidalgo H.G., Durán-Quesada, A.M., Amador, J.A., Alfaro, E.J., 2015, The Caribbean low level jet, the inter-tropical convergence zone and precipitation patterns in the intra Americas sea: a proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler, series a. Phys Geogr*, **97**,41–59, <https://doi:10.1111/geoa.1208>
- Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., 2012, Some Physical and Socio-economical Aspects of Climate Change in Central America. *Progress in Physical Geography*. **36(3)**, 380-399. [https://doi: 0.1177/0309133312438906](https://doi:0.1177/0309133312438906).
- Hurrell, J.M., 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation. *Science*, 269, 676–679.
- Huschke, R.E., 1959, Glossary of Meteorology, American Meteorological Society, Boston, Estados Unidos de América.
- Imbach, P., Chou, S.C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., Siqueira, G., Silva, A., Garofolo, L., Georgiou, S., 2018. Future climate

- change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLOS ONE* **13**, e0193570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193570>
- Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., Roupsard, O., Mahé, G., Neilson, R., Corrales, L., Scholze, M., Ciais, P., 2012. Modeling Potential Equilibrium States of Vegetation and Terrestrial Water Cycle of Mesoamerica under Climate Change Scenarios. *Journal of Hydrometeorology* **13**, 665–680. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-023.1>
 - Kalnay et al, 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-470.
 - Kanamitsu et al, 2002, NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
 - Kassambara A., 2016, ggcorrplot: Visualization of a Correlation Matrix using 'ggplot2'. R package version 0.1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=ggcorrplot>.
 - Kemp, M.U., Van Loon, E.E., Shamoun-Baranes, J., Bouten, W., 2012, RNCEP: global weather and climate data at your fingertips. *Methods in Ecology and Evolution*, **3**, 65-70., R package version 1.0.8.
 - Knudsen, M. F., Jacobsen, B. H., Seidenkrantz, M. S., Olsen, J., 2014, Evidence for external forcing of the Atlantic Multidecadal Oscillation since termination of the Little Ice Age, *Nature Communications*, **5**:3323, <https://doi:10.1038/ncomms4323>, 2014.
 - Kulik, M.S. ,1962, Agroclimatic indices of drought': *Compendium of abridged reports to the Second Session of CagM (WMO)*.Hydrometeorological Publishing. Moscú, pp. 75-81.
 - Linsley, R. K., Kohler, M. A., Paulhus, J. L. H., 1958, *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, pp. 508.
 - Lucas P., Teixeira J., 2016, precintcon: Precipitation Intensity, Concentration and Anomaly Analysis. R package version 2.3.0.
 - Magaña, V., Amador, J.A., Medina, S., 1999, The mid-summer drought over Mexico and Central America. *J. Clim.*, **12**, 1577–1588.

- Maldonado T., Rutgersson, A., Amador, J., Alfaro, E., Claremar, B., 2015, Variability of the Caribbean low-level jet during boreal winter: large-scale forcings. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1954–1969, <https://doi: 10.1002/joc.4472>
- Maldonado T., Rutgersson, A., Amador, J., Alfaro, E., Claremar, B., 2016b, Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures, *Advances in Geosciences*, **42**, 35-50, <https://doi:10.5194/adgeo-42-35-2016>.
- Mann, A, 2010, Return of La Niña, Nature, *International weekly Journal of Science*, <http://doi:10.1038/news.2010.477>. Consultado el 26 de junio de 2019.
- Mantua, N. J., 1997, A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production, *Bulletin of the American Meteorological Society* **78(6)**:1069-1079.
- Mantua, N. J., 2002, Pacific-Decadal Oscillation; Volume 1, The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change; *Encyclopedia of Global Environmental Change*, MacCracken and Perry; pp 592-594.
- Martin, E.R., 2011, Schumacher, C., The Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship with Precipitation in IPCC AR4 Models, *J. of Climate*. **24**, 5935-5950, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00134.1
- Masson, M., 2020: El Niño and La Niña: Their Impact on the Environment, consultado el 26 de junio de 2019, <https://www.environmentalscience.org/el-nino-la-nina-impact-environment>.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, Amer. Meteor. Soc., 179–184,
- Muñoz, E., Busalacchi, A.J., Nigam, S., Ruiz-Barradas, A., 2008, Winter and Summer Structure of the Caribbean Low-Level Jet. *J. Clim.* **21**, 1260-1276, <https://doi: 10.1175/2007JCLI1855.1>

- NASA-Earth Observatory 1999: The Effects of La Niña, consultado el 26 de junio de 2019. https://earthobservatory.nasa.gov/features/LaNina/la_nina_2.php.
- Neves, J., spi: Compute SPI index. R package version 1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=spi>.
- Palmer, W. C., 1965, Meteorological drought. Office of Climatology Research Paper 45, Weather Bureau, Washington, D.C., pp 58 .
- Paradis E., Schliep K. 2018, ape 5.0: an environment for modern phylogenetics and evolutionary analyses in R. *Bioinformatics* **35**: 526-528.
- Pidwirny, M. 2006, El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. consultado el 25 de junio de 2019, <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7z.html>.
- Quesada-Hernández, L.E., Calvo-Solano, O.D., Hidalgo, H.G., Perez-Briceño, P.M., Alfaro, E.J., 2019. Dynamical delimitation of the Central American Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, **43**, <https://doi.org/10.1177/0309133319860224>.
- Roesch, A., Schmidbauer, H., 2018, WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>.
- Schloerke, B., Crowley, J., Cook D., Briatte, F., Marbach, M., Thoen, E., Elberg, A., Larmarange, J., 2017, GGally: Extension to 'ggplot2'. R package version 1.3.2. <https://CRAN.R-project.org/package=Ggally>.
- Sheng, Y. 2000, Wavelet Transform. The Transforms and Applications Handbook: Second Edition. Ed. Alexander D. Poularikas, Boca Raton: CRC Press LLC.
- Sandford, S., 1979, Towards a definition of drought., Botswana Drought Symposium, *Botswana Society*, Gaborone, Botswana.
- Stamatis, K., 2019, lctools: Local Correlation, Spatial Inequalities, Geographically Weighted Regression and Other Tools. R package version 0.2-7.

- Tsakiris, G., Vangelis, H., 2005. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration, *European Water* 9/10:3-11.
- Torrence, D. C., Compo, G. P., 1998, A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61-78, [https://doi:10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- Trenberth, K. E., 1997, The Definition of El Niño, National Center for Atmospheric Research, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **78**, 2771-2777.
- Trenberth, K. E., National Center for Atmospheric Research Staff (Eds), 2018, The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)., Consultado el 26 de junio de 2019, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.
- Van der Zee Arias, A., Van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C., Picado, L., 2012a, Estudio de la caracterización del Corredor Seco Centroamericano, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), pp. 92.
- Van-rooy, M.P. (1965) A Rainfall Anomaly Index (RAI), Independent of the Time and Space. *Notos*, **14**, 43-48.
- Walker, G.T., 1924, Correlation In Seasonal Variations of Weather, IX: A further study of world weather, *Mem. Ind. Meteor. Dept.*, **24**, 275-332.
- Wang, C., 2007, Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *Clim Dyn*, **29**,411–422, doi 10.1007/s003820070243z.
- Wang, C., Lee, S.-K., Enfield, D.B., 2008. Climate Response to Anomalously Large and Small Atlantic Warm Pools during the Summer. *J. Climate* **21**, 2437–2450. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI2029.1>
- Wang, S. Y., Jiang, X. N., Fosu, B., 2015, Global eastward propagation signals associated with the 4–5-year ENSO cycle. *Climate Dynamics*. **44**. 10.1007/s00382-014-2422-z.
- Webb, R. W., Rosenzweig, C. E., Levine, E. R., 2000: Global Soil Texture and Derived Water-Holding Capacities, Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, descargado el 17 de diciembre de 2017, <https://doi:10.3334/ORNLDAAAC/548>

- Wei, T.Y., Simko V., 2017, R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84), <https://github.com/taiyun/corrplot>, 2017.
- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M. J., 2004, A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *J. Clim.* **17**, 2335-2351.
- Wilhite, D.A, Glantz, M.H., 2002, Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions, *Water International*, **10:3**, 111-120, 1985. <https://doi:10.1080/02508068508686328>
- Wickham H., 2009, ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.
- Wickham H., 2007, Reshaping Data with the reshape Package. *Journal of Statistical Software*, **21(12)**, 1-20, <http://www.jstatsoft.org/v21/i12/>.
- Xie, Y.H., 2013, animation: An R Package for Creating Animations and Demonstrating Statistical Methods. *Journal of Statistical Software*, **53(1)**, 1-27. <http://www.jstatsoft.org/v53/i01/>.
- Yevjevich, V., 1967, An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *Hydrology Papers*, **23**, Colorado State University, Fort Collins.
- Zhong, R.D., Chen,X.H., Wang, Z.L., Lai C.G., 2018, scPDSI: Calculation of the Conventional and Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. R package version 0.1.3. <https://CRAN.R-project.org/package=scPDSI>

Anexo A:
Procedimiento de cálculo de índices de precipitación

Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El cálculo del SPI se realiza según el siguiente procedimiento (Guenang, 2014):

1. En una estación con una serie de datos de precipitación mensual x_n con $n = 1 \dots N$, el índice estandarizado de precipitación de escala M , se calcula con la serie generada a partir de los promedios de precipitación de los M meses anteriores a n , tomando para $n < M$, el promedio de los 1 hasta n meses de precipitación.
2. A partir de la serie generada con los promedios, se extraen los valores de cada uno de los meses y se ajustan a una distribución de probabilidad Gamma (Thom, 1966) o Log-Normal.
3. A los valores ajustados se les calcula la anomalía estandarizada. La serie de SPI resulta de la composición de todos los meses para los cuales se calculó la anomalía estandarizada.

Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI)

El cálculo del RDI se realiza según el siguiente procedimiento:

1. Se calcula la razón entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (PET).

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, i = 1 \text{ a } N \quad (\text{A. 1})$$

2. Se calcula el valor "normalizado"

$$RDI_n^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_{y_k}} \quad (\text{A. 2})$$

donde: $y_k = \ln(a)$

3. Se calcula el valor estandarizados, el cual está dado por:

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{a_k^{(i)}}{\bar{a}_k} - 1 \quad (\text{A. 3})$$

Índice de Severidad de Sequía de Palmer

El procedimiento de cálculo implica la obtención de valores α , β , γ y δ los cuales están dados por las expresiones:

$$\alpha_i = \frac{\overline{ET}_i}{\overline{PE}_i} \quad (\text{A. 4})$$

$$\beta_i = \frac{\overline{R}_i}{\overline{PR}_i} \quad (\text{A. 5})$$

$$\gamma_i = \frac{\overline{RO}_i}{\overline{PRO}_i} \quad (\text{A. 6})$$

$$\delta_i = \frac{\overline{L}_i}{\overline{PL}_i} \quad (\text{A. 7})$$

Donde en las expresiones (A. 4) a (A. 7), los numeradores representan la evapotranspiración (ET), recarga (R), escorrentía (RO) y pérdidas (L); y los denominadores, representan los valores potenciales de cada uno de esos 4 parámetros. Se obtiene para cada instante i la diferencia entre la precipitación real y la precipitación climáticamente apropiada para las condiciones existentes (CAFEC), la cual está dada por

$$d = P - \hat{P} = P - (\alpha_i PE + \beta_i PR + \gamma_i PRO + \delta_i PL) \quad (11)$$

El valor de d asumirá valores propios de las condiciones del año y lugar para el cual está siendo calculado, lo cual lo hace poco comparable y para solventar esto se incorpora un coeficiente K , cuyo producto con d , genera el índice de anomalía de humedad (Z), el cual finalmente se utiliza para el cálculo del índice de Severidad de Sequía de Palmer para cada mes (Palmer, 1965).

Anexo B:
Cuadros de correlaciones entre procesos atmosféricos e
índices de precipitación

Tabla B1. Correlaciones marzo - abril con rezagos 0 a 3 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

		Sin Rezago							1 mes de rezago							2 meses de rezago							3 meses de rezago										
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Mazo - abril	SPI_1	0.27	0.41	-0.08	0.12	0.07	0.31	-0.33	0.36	-0.13	-0.11	0.00	-0.07	-0.09	-0.06	-0.05	0.05	-0.05	-0.10	-0.10	-0.08	-0.09	0.00	-0.19	0.14	0.41	0.44	-0.23	0.13	0.10	0.44	-0.49	0.51
	SPI_3	0.21	0.41	-0.06	-0.07	-0.14	0.17	-0.29	0.22	0.03	0.14	-0.02	-0.02	-0.06	0.12	-0.19	0.19	-0.07	-0.05	-0.04	-0.05	-0.07	0.02	-0.15	0.13	0.12	0.12	-0.11	0.04	0.01	0.19	-0.32	0.31
	SPI_6	0.18	-0.08	0.03	-0.25	-0.32	-0.25	-0.10	-0.02	0.03	-0.01	0.01	-0.14	0.20	-0.12	-0.16	0.09	-0.07	-0.04	-0.02	-0.08	-0.11	-0.01	-0.15	0.11	0.15	0.18	-0.10	0.04	0.00	0.21	-0.34	0.33
	SPI_9	-0.12	-0.26	0.05	-0.56	-0.62	-0.38	0.07	-0.29	-0.13	-0.30	0.04	-0.54	-0.59	-0.42	0.10	-0.29	-0.02	-0.27	-0.04	-0.40	-0.46	0.34	-0.02	-0.13	0.20	0.02	-0.11	-0.14	-0.20	-0.01	-0.29	0.20
	SPI_12	-0.04	-0.18	0.08	-0.45	-0.50	0.24	0.02	-0.18	-0.07	-0.25	0.06	-0.52	-0.58	0.29	0.04	-0.21	-0.10	-0.29	0.02	-0.55	-0.61	0.32	0.01	-0.21	-0.06	-0.20	-0.01	-0.52	-0.59	0.29	-0.07	-0.15
	SPI_24	0.19	-0.18	0.10	-0.11	-0.13	-0.24	-0.06	0.06	0.14	-0.23	0.12	-0.16	-0.18	-0.28	-0.02	0.02	0.10	-0.30	0.12	-0.19	-0.22	-0.32	-0.04	-0.01	0.13	-0.28	0.08	-0.18	-0.22	-0.28	-0.15	0.05
	RDI_1	0.01	0.14	0.15	0.15	0.14	0.14	0.03	0.06	-0.23	-0.20	0.03	-0.22	-0.24	-0.10	0.06	-0.11	-0.15	-0.19	-0.12	-0.22	-0.23	-0.07	-0.18	0.04	0.31	0.39	0.23	0.01	-0.02	0.41	-0.45	0.42
	RDI_3	0.28	0.30	0.10	-0.02	-0.09	0.13	-0.24	0.21	-0.04	0.05	0.03	-0.12	-0.17	0.05	-0.09	0.09	-0.15	-0.11	-0.05	-0.17	-0.19	-0.03	-0.12	0.03	0.02	0.05	-0.13	-0.10	-0.13	0.13	-0.29	0.20
	RDI_6	0.11	-0.07	0.01	-0.28	-0.35	-0.24	-0.06	-0.07	-0.07	-0.04	0.03	-0.24	-0.30	-0.15	-0.11	-0.01	-0.16	-0.08	-0.02	-0.20	-0.23	-0.05	-0.11	0.00	0.05	0.14	-0.10	-0.10	-0.14	0.16	-0.29	0.21
	RDI_9	-0.18	-0.25	0.07	-0.58	-0.63	-0.37	0.11	-0.34	-0.20	-0.30	0.05	-0.56	-0.62	-0.41	0.14	-0.34	-0.11	-0.28	-0.03	-0.47	-0.53	0.35	0.03	-0.22	0.09	-0.02	-0.10	-0.25	-0.31	-0.05	-0.22	0.09
	RDI_12	-0.12	-0.17	0.11	-0.47	-0.51	-0.25	0.08	-0.24	-0.16	-0.26	0.08	-0.56	-0.61	-0.30	0.10	-0.28	-0.19	-0.29	0.04	-0.59	-0.65	0.33	0.06	-0.29	-0.16	-0.22	0.01	-0.58	-0.64	-0.30	-0.01	-0.25
	RDI_24	0.12	-0.17	0.12	-0.10	-0.12	-0.23	-0.03	0.02	0.06	-0.24	0.14	-0.16	-0.18	-0.28	0.02	-0.04	0.01	-0.30	0.14	-0.20	-0.22	-0.31	0.02	-0.08	0.02	-0.30	0.12	-0.21	-0.24	-0.28	-0.06	-0.04
	PDSI	0.10	-0.18	0.10	-0.34	-0.40	-0.28	-0.03	-0.08	0.11	-0.18	0.05	-0.34	-0.41	-0.26	-0.08	-0.03	0.12	-0.17	-0.02	-0.36	-0.43	-0.21	-0.15	0.02	0.23	-0.06	-0.10	-0.32	-0.40	-0.06	-0.27	0.15
	PDHI	0.10	-0.13	0.13	-0.21	-0.25	-0.30	0.02	-0.09	0.07	-0.16	0.13	-0.24	-0.29	-0.32	0.02	-0.10	0.04	-0.17	0.12	-0.28	-0.33	-0.32	-0.01	-0.10	0.09	-0.10	0.07	-0.28	-0.33	-0.25	-0.10	-0.03

Tabla B2. Correlaciones marzo - abril con rezagos 4 a 6 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

		4 meses de rezago							5 meses de rezago							6 meses de rezago									
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Mazo - abril	SPI_1	0.41	0.39	-0.32	0.02	-0.01	0.42	-0.45	0.44	0.25	0.05	-0.41	-0.21	-0.25	0.19	-0.33	0.18	0.32	-0.25	-0.41	-0.16	-0.20	0.05	-0.25	0.20
	SPI_3	0.37	0.34	-0.26	0.08	0.04	0.40	-0.52	0.50	0.40	0.29	-0.36	-0.04	-0.08	0.37	-0.48	0.40	0.36	0.04	-0.40	-0.14	-0.18	0.23	-0.35	0.28
	SPI_6	0.31	0.31	-0.20	0.07	0.03	0.36	-0.45	0.46	0.32	0.22	-0.31	-0.04	-0.09	0.32	-0.46	0.40	0.36	0.07	-0.39	-0.11	-0.15	0.26	-0.43	0.37
	SPI_9	0.32	0.27	-0.19	0.03	-0.02	0.28	-0.46	0.44	0.31	0.22	-0.30	-0.06	-0.11	0.29	-0.45	0.38	0.36	0.10	-0.38	-0.10	-0.15	0.27	-0.43	0.38
	SPI_12	0.08	-0.09	-0.12	-0.45	-0.53	-0.19	-0.21	0.00	0.25	-0.02	-0.29	-0.34	-0.42	-0.03	-0.35	0.16	0.39	0.00	-0.39	-0.20	-0.27	0.12	-0.42	0.32
	SPI_24	0.21	-0.21	-0.03	-0.24	-0.29	-0.20	-0.29	0.14	0.26	-0.14	-0.16	-0.33	-0.39	-0.10	-0.35	0.16	0.30	-0.13	-0.22	-0.34	-0.41	-0.04	-0.32	0.18
	RDI_1	0.35	0.35	-0.32	-0.04	-0.07	0.39	-0.42	0.38	0.21	0.04	-0.40	-0.24	-0.27	0.18	-0.31	0.15	0.29	-0.22	-0.41	-0.17	-0.21	0.05	-0.24	0.17
	RDI_3	0.27	0.28	-0.29	-0.06	-0.10	0.36	-0.49	0.40	0.33	0.25	-0.37	-0.12	-0.16	0.35	-0.45	0.33	0.32	0.03	-0.39	-0.18	-0.22	0.22	-0.32	0.23
	RDI_6	0.21	0.26	-0.20	-0.07	-0.12	0.31	-0.40	0.34	0.22	0.16	-0.32	-0.18	-0.22	0.27	-0.42	0.29	0.26	0.02	-0.40	-0.22	-0.27	0.21	-0.39	0.26
	RDI_9	0.21	0.22	-0.18	-0.12	-0.17	0.23	-0.41	0.31	0.21	0.17	-0.30	-0.19	-0.25	0.25	-0.41	0.27	0.27	0.05	-0.38	-0.23	-0.29	0.23	-0.39	0.26
	RDI_12	-0.04	-0.12	-0.09	-0.54	-0.61	-0.22	-0.13	-0.12	0.13	-0.06	-0.28	-0.46	-0.54	-0.08	-0.29	0.03	0.28	-0.04	-0.39	-0.33	-0.40	0.08	-0.37	0.20
	RDI_24	0.08	-0.25	0.02	-0.28	-0.33	-0.21	-0.19	0.02	0.13	-0.19	-0.12	-0.40	-0.46	-0.13	-0.27	0.05	0.19	-0.17	-0.19	-0.42	-0.49	-0.06	-0.25	0.07
	PDSI	0.34	0.03	-0.20	-0.29	-0.38	0.06	-0.40	0.27	0.35	0.00	-0.29	-0.32	-0.40	0.06	-0.43	0.27	0.40	-0.06	-0.33	-0.31	-0.38	0.06	-0.41	0.28
	PDHI	0.21	-0.01	-0.02	-0.27	-0.34	-0.15	-0.25	0.10	0.27	0.01	-0.13	-0.31	-0.38	-0.10	-0.33	0.14	0.32	-0.04	-0.20	-0.31	-0.39	-0.09	-0.34	0.17

Tabla B3. Correlaciones mayo - junio con rezagos 0 a 3 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

	Sin Rezago								1 mes de rezago								2 meses de rezago								3 meses de rezago								
	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	
Mayo - junio	SPI_1	-0.05	0.52	-0.02	-0.06	-0.05	0.05	-0.02	0.12	0.44	0.54	0.14	-0.11	-0.12	0.43	-0.12	0.59	0.53	0.38	0.06	-0.39	-0.41	0.30	-0.10	0.51	0.42	0.33	-0.01	-0.59	-0.63	0.17	-0.31	0.29
	SPI_3	-0.06	0.51	-0.05	-0.03	-0.02	0.04	-0.01	0.11	0.12	0.63	0.00	-0.01	0.00	0.22	-0.07	0.32	0.43	0.65	0.04	-0.19	-0.20	0.39	-0.15	0.57	0.53	0.48	0.04	-0.43	-0.46	0.33	-0.26	0.51
	SPI_6	-0.07	0.51	-0.01	-0.02	-0.02	0.05	-0.04	0.09	0.15	0.65	0.01	0.00	0.00	0.27	-0.11	0.35	0.36	0.68	0.01	-0.13	-0.14	0.34	-0.14	0.50	0.42	0.63	-0.01	-0.34	-0.36	0.29	-0.23	0.47
	SPI_9	-0.03	0.07	0.05	-0.08	-0.11	-0.19	-0.24	-0.05	0.18	0.45	0.06	-0.02	-0.05	0.08	-0.19	0.28	0.36	0.63	0.02	-0.12	-0.14	0.29	-0.15	0.49	0.41	0.63	0.00	-0.34	-0.36	0.28	-0.24	0.46
	SPI_12	-0.05	-0.06	-0.03	-0.15	-0.19	-0.13	-0.27	-0.10	-0.01	0.02	0.05	-0.16	-0.19	-0.09	-0.29	-0.03	0.14	0.16	0.07	-0.23	-0.27	-0.03	-0.31	0.12	0.33	0.39	0.07	-0.36	-0.41	0.05	-0.34	0.29
	SPI_24	0.05	-0.24	-0.28	0.18	0.15	-0.13	-0.26	0.03	0.09	-0.14	-0.28	0.18	0.15	-0.08	-0.29	0.12	0.18	-0.01	-0.23	0.07	0.02	-0.02	-0.32	0.22	0.27	0.15	-0.16	-0.14	-0.20	0.05	-0.38	0.28
	RDI_1	-0.14	0.43	0.03	-0.15	-0.14	0.01	-0.01	0.04	0.35	0.48	0.18	-0.21	-0.22	0.40	-0.12	0.50	0.47	0.33	0.08	-0.44	-0.47	0.28	-0.09	0.43	0.37	0.30	0.03	-0.60	-0.65	0.16	-0.28	0.23
	RDI_3	-0.12	0.46	0.01	-0.11	-0.10	0.00	0.00	0.03	0.02	0.56	0.06	-0.10	-0.10	0.17	-0.06	0.22	0.33	0.57	0.09	-0.30	-0.31	0.34	-0.14	0.46	0.46	0.42	0.06	-0.49	-0.53	0.31	-0.25	0.43
	RDI_6	-0.15	0.45	0.06	-0.09	-0.09	0.01	-0.03	0.00	0.05	0.57	0.08	-0.08	-0.08	0.23	-0.11	0.24	0.26	0.61	0.06	-0.21	-0.23	0.30	-0.15	0.39	0.33	0.57	0.03	-0.42	-0.45	0.25	-0.24	0.37
	RDI_9	-0.12	0.02	0.08	-0.10	-0.14	-0.17	-0.24	-0.14	0.07	0.36	0.11	-0.07	-0.10	0.07	-0.20	0.16	0.25	0.54	0.08	-0.19	-0.21	0.26	-0.16	0.37	0.31	0.55	0.06	-0.41	-0.44	0.25	-0.25	0.35
	RDI_12	-0.15	-0.11	-0.01	-0.16	-0.19	-0.13	-0.28	-0.19	-0.12	-0.04	0.07	-0.18	-0.21	-0.09	-0.29	-0.14	0.01	0.06	0.10	-0.26	-0.30	-0.04	-0.30	-0.01	0.20	0.29	0.11	-0.40	-0.45	0.03	-0.34	0.15
	RDI_24	-0.04	-0.27	-0.27	0.21	0.19	-0.13	-0.25	-0.05	-0.02	-0.19	-0.27	0.20	0.18	-0.09	-0.28	0.01	0.05	-0.08	-0.23	0.09	0.06	-0.02	-0.32	0.09	0.14	0.07	-0.17	-0.12	-0.17	0.04	-0.40	0.16
	PDSI	0.12	0.06	-0.12	-0.06	-0.11	-0.05	-0.30	0.09	0.26	0.19	-0.08	-0.13	-0.18	0.09	-0.33	0.25	0.41	0.27	-0.07	-0.24	-0.30	0.18	-0.34	0.38	0.45	0.28	-0.07	-0.37	-0.43	0.17	-0.37	0.39
	PDHI	-0.05	-0.20	-0.14	0.15	0.11	-0.14	-0.21	-0.07	0.01	-0.11	-0.10	0.12	0.08	-0.07	-0.23	0.02	0.15	0.02	-0.10	0.02	-0.03	0.01	-0.26	0.16	0.25	0.12	-0.10	-0.12	-0.18	0.05	-0.34	0.23

Tabla B4. Correlaciones mayo - junio con rezagos 0 a 3 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

	4 meses de rezago								5 meses de rezago								6 meses de rezago								
	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	
Mayo - junio	SPI_1	0.44	0.08	-0.28	-0.52	-0.59	-0.04	-0.30	0.28	0.37	-0.26	-0.46	-0.15	-0.20	-0.05	-0.05	0.33	0.19	-0.26	-0.19	0.02	0.01	0.02	0.05	0.19
	SPI_3	0.52	0.28	-0.12	-0.55	-0.61	0.15	-0.30	0.38	0.52	0.07	-0.32	-0.51	-0.58	0.02	-0.31	0.35	0.49	-0.13	-0.44	-0.34	-0.41	-0.05	-0.20	0.36
	SPI_6	0.48	0.51	-0.12	-0.46	-0.50	0.20	-0.29	0.46	0.60	0.35	-0.23	-0.47	-0.52	0.19	-0.30	0.53	0.62	0.21	-0.24	-0.47	-0.53	0.18	-0.28	0.51
	SPI_9	0.48	0.52	-0.11	-0.44	-0.49	0.22	-0.30	0.47	0.57	0.41	-0.24	-0.44	-0.49	0.19	-0.30	0.52	0.58	0.37	-0.27	-0.43	-0.49	0.18	-0.29	0.53
	SPI_12	0.49	0.45	-0.08	-0.43	-0.49	0.12	-0.34	0.43	0.57	0.39	-0.24	-0.43	-0.49	0.16	-0.30	0.52	0.57	0.37	-0.26	-0.43	-0.49	0.18	-0.29	0.53
	SPI_24	0.35	0.19	-0.16	-0.26	-0.33	0.07	-0.42	0.31	0.40	0.15	-0.20	-0.30	-0.38	0.07	-0.40	0.32	0.40	0.11	-0.21	-0.32	-0.39	0.08	-0.40	0.32
	RDI_1	0.40	0.10	-0.20	-0.53	-0.59	-0.03	-0.30	0.24	0.39	-0.24	-0.41	-0.23	-0.29	-0.05	-0.06	0.34	0.27	-0.29	-0.28	-0.03	-0.07	0.09	-0.04	0.26
	RDI_3	0.46	0.25	-0.08	-0.58	-0.63	0.14	-0.30	0.31	0.47	0.06	-0.27	-0.54	-0.62	0.02	-0.31	0.29	0.46	-0.13	-0.39	-0.40	-0.48	-0.06	-0.22	0.31
	RDI_6	0.38	0.45	-0.07	-0.54	-0.58	0.15	-0.29	0.34	0.50	0.30	-0.18	-0.54	-0.60	0.15	-0.30	0.42	0.55	0.17	-0.20	-0.52	-0.59	0.16	-0.29	0.43
	RDI_9	0.38	0.45	-0.05	-0.52	-0.57	0.18	-0.31	0.35	0.47	0.35	-0.19	-0.52	-0.58	0.15	-0.32	0.41	0.49	0.31	-0.23	-0.52	-0.58	0.14	-0.31	0.42
	RDI_12	0.37	0.38	-0.03	-0.49	-0.55	0.09	-0.36	0.31	0.47	0.33	-0.19	-0.51	-0.57	0.14	-0.33	0.40	0.48	0.31	-0.21	-0.51	-0.57	0.15	-0.32	0.42
	RDI_24	0.24	0.13	-0.16	-0.26	-0.33	0.07	-0.45	0.20	0.30	0.09	-0.20	-0.32	-0.39	0.07	-0.43	0.22	0.30	0.05	-0.21	-0.34	-0.41	0.07	-0.43	0.22
	PDSI	0.50	0.24	-0.15	-0.41	-0.48	0.12	-0.38	0.40	0.56	0.15	-0.25	-0.40	-0.47	0.10	-0.36	0.44	0.56	0.10	-0.28	-0.38	-0.46	0.10	-0.35	0.44
	PDHI	0.33	0.14	-0.16	-0.20	-0.27	0.03	-0.37	0.27	0.42	0.09	-0.27	-0.23	-0.31	0.01	-0.36	0.34	0.45	0.05	-0.31	-0.27	-0.34	0.03	-0.35	0.37

Tabla B5. Correlaciones julio - agosto con rezago 0 a 3 meses de series de precipitación y procesos atmosféricos

		Sin Rezago								1 mes de rezago								2 meses de rezago								3 meses de rezago							
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Julio - agosto	SPI_1	0.49	0.72	-0.18	-0.53	-0.55	-0.04	-0.11	0.55	0.33	0.77	-0.26	-0.72	-0.74	-0.21	-0.03	0.37	0.38	0.68	-0.15	-0.74	-0.77	-0.37	0.11	0.37	0.42	0.41	0.12	-0.41	-0.43	-0.31	0.25	0.38
	SPI_3	0.29	0.55	-0.25	-0.28	-0.27	0.18	-0.03	0.42	0.44	0.76	-0.22	-0.56	-0.58	0.00	-0.06	0.54	0.45	0.80	-0.23	-0.74	-0.76	-0.24	0.00	0.48	0.48	0.75	-0.15	-0.75	-0.78	-0.35	0.11	0.46
	SPI_6	0.18	0.49	-0.24	-0.21	-0.19	0.13	0.02	0.29	0.25	0.66	-0.29	-0.44	-0.44	-0.01	0.00	0.35	0.34	0.75	-0.31	-0.61	-0.62	-0.14	0.03	0.40	0.51	0.81	-0.25	-0.68	-0.70	-0.18	0.04	0.55
	SPI_9	0.20	0.48	-0.22	-0.16	-0.15	0.11	-0.04	0.30	0.24	0.65	-0.27	-0.42	-0.42	0.00	0.00	0.35	0.34	0.75	-0.28	-0.59	-0.60	-0.12	0.03	0.42	0.45	0.79	-0.26	-0.65	-0.66	-0.19	0.06	0.50
	SPI_12	0.15	0.35	-0.09	-0.06	-0.08	-0.04	-0.22	0.24	0.27	0.58	-0.22	-0.30	-0.33	-0.08	-0.21	0.34	0.38	0.73	-0.28	-0.51	-0.53	-0.16	-0.09	0.42	0.46	0.79	-0.25	-0.62	-0.64	-0.20	0.03	0.50
	SPI_24	0.21	0.13	0.12	0.15	0.16	0.04	0.11	0.25	0.25	0.35	-0.01	-0.08	-0.09	-0.02	0.13	0.31	0.30	0.48	-0.09	-0.26	-0.27	-0.08	0.15	0.37	0.36	0.55	-0.09	-0.33	-0.35	-0.13	0.14	0.42
	RDI_1	0.42	0.71	-0.19	-0.57	-0.60	-0.08	-0.10	0.49	0.27	0.76	-0.26	-0.73	-0.76	-0.24	0.00	0.31	0.31	0.67	-0.12	-0.75	-0.78	-0.35	0.13	0.31	0.42	0.49	0.15	-0.49	-0.51	-0.33	0.23	0.39
	RDI_3	0.20	0.55	-0.24	-0.34	-0.33	0.10	0.01	0.32	0.36	0.75	-0.21	-0.61	-0.63	-0.05	-0.02	0.46	0.37	0.78	-0.22	-0.76	-0.78	-0.25	0.03	0.41	0.41	0.75	-0.13	-0.77	-0.80	-0.35	0.13	0.40
	RDI_6	0.10	0.47	-0.23	-0.22	-0.21	0.09	0.03	0.22	0.17	0.65	-0.28	-0.47	-0.47	-0.06	0.02	0.27	0.25	0.73	-0.30	-0.65	-0.66	-0.20	0.05	0.31	0.41	0.80	-0.23	-0.73	-0.75	-0.22	0.07	0.46
	RDI_9	0.11	0.44	-0.20	-0.15	-0.15	0.09	-0.05	0.22	0.16	0.63	-0.26	-0.44	-0.44	-0.03	0.00	0.27	0.25	0.72	-0.27	-0.61	-0.62	-0.15	0.03	0.33	0.36	0.78	-0.25	-0.68	-0.69	-0.22	0.07	0.42
	RDI_12	0.04	0.27	-0.04	-0.04	-0.06	-0.02	-0.19	0.13	0.16	0.51	-0.18	-0.29	-0.31	-0.08	-0.18	0.24	0.28	0.68	-0.25	-0.52	-0.54	-0.16	-0.08	0.33	0.37	0.77	-0.23	-0.64	-0.67	-0.22	0.03	0.42
	RDI_24	0.09	-0.01	0.15	0.24	0.24	0.09	0.10	0.14	0.13	0.22	0.02	0.00	0.00	0.03	0.13	0.21	0.20	0.38	-0.06	-0.21	-0.22	-0.04	0.16	0.29	0.27	0.47	-0.06	-0.29	-0.31	-0.09	0.15	0.34
	PDSI	0.36	0.56	0.01	-0.19	-0.21	0.00	-0.01	0.46	0.40	0.68	-0.03	-0.35	-0.38	-0.08	-0.02	0.48	0.46	0.74	-0.05	-0.46	-0.49	-0.16	0.02	0.52	0.53	0.72	-0.04	-0.51	-0.54	-0.22	0.06	0.57
	PDHI	0.16	0.15	0.20	0.15	0.14	0.08	0.07	0.21	0.23	0.34	0.14	-0.02	-0.04	0.03	0.06	0.30	0.30	0.44	0.10	-0.16	-0.18	-0.04	0.07	0.35	0.40	0.52	0.09	-0.26	-0.28	-0.11	0.11	0.44

Tabla B6. Correlaciones julio - agosto con rezagos 4 a 6 meses de series de precipitación y procesos atmosféricos

		4 meses de rezago								5 meses de rezago								6 meses de rezago							
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Julio - agosto	SPI_1	0.28	0.25	0.31	-0.19	-0.17	-0.18	0.32	0.31	0.11	0.45	0.01	-0.45	-0.45	-0.14	0.07	0.18	0.29	0.58	-0.25	-0.58	-0.57	-0.11	0.27	0.31
	SPI_3	0.50	0.62	-0.01	-0.62	-0.65	-0.37	0.19	0.46	0.43	0.47	0.17	-0.45	-0.47	-0.34	0.30	0.39	0.37	0.51	0.16	-0.47	-0.46	-0.29	0.35	0.38
	SPI_6	0.57	0.81	-0.17	-0.70	-0.73	-0.21	0.04	0.61	0.45	0.79	-0.10	-0.73	-0.76	-0.29	0.14	0.46	0.39	0.73	-0.06	-0.74	-0.77	-0.35	0.22	0.39
	SPI_9	0.47	0.80	-0.24	-0.66	-0.67	-0.21	0.08	0.52	0.41	0.79	-0.22	-0.66	-0.67	-0.19	0.14	0.46	0.46	0.80	-0.18	-0.67	-0.69	-0.17	0.13	0.51
	SPI_12	0.47	0.80	-0.23	-0.65	-0.66	-0.20	0.08	0.52	0.41	0.80	-0.19	-0.64	-0.65	-0.17	0.14	0.47	0.41	0.80	-0.20	-0.64	-0.65	-0.17	0.14	0.47
	SPI_24	0.37	0.56	-0.08	-0.34	-0.35	-0.13	0.13	0.43	0.23	0.53	0.00	-0.32	-0.33	-0.11	0.26	0.32	0.23	0.53	-0.01	-0.33	-0.33	-0.11	0.26	0.33
	RDI_1	0.35	0.27	0.25	-0.20	-0.21	-0.17	0.29	0.35	0.41	0.14	-0.04	0.20	0.13	0.18	-0.32	0.34	0.35	-0.07	-0.05	0.42	0.35	0.17	-0.32	0.22
	RDI_3	0.45	0.66	0.03	-0.67	-0.70	-0.39	0.20	0.42	0.39	0.52	0.20	-0.51	-0.53	-0.37	0.30	0.36	0.41	0.46	0.26	-0.38	-0.39	-0.25	0.35	0.42
	RDI_6	0.49	0.81	-0.15	-0.74	-0.77	-0.24	0.07	0.53	0.38	0.79	-0.09	-0.75	-0.79	-0.29	0.16	0.41	0.33	0.73	-0.05	-0.76	-0.79	-0.35	0.23	0.35
	RDI_9	0.39	0.79	-0.23	-0.69	-0.71	-0.25	0.10	0.44	0.31	0.78	-0.19	-0.70	-0.71	-0.24	0.18	0.36	0.35	0.80	-0.16	-0.72	-0.74	-0.22	0.17	0.42
	RDI_12	0.38	0.78	-0.22	-0.68	-0.69	-0.23	0.09	0.44	0.31	0.78	-0.17	-0.67	-0.69	-0.20	0.17	0.38	0.31	0.79	-0.18	-0.68	-0.69	-0.21	0.17	0.38
	RDI_24	0.28	0.48	-0.05	-0.31	-0.33	-0.11	0.14	0.35	0.13	0.46	0.04	-0.31	-0.31	-0.11	0.27	0.24	0.14	0.47	0.04	-0.33	-0.34	-0.12	0.27	0.24
	PDSI	0.54	0.76	-0.01	-0.52	-0.55	-0.23	0.09	0.58	0.41	0.75	0.06	-0.53	-0.55	-0.22	0.21	0.48	0.41	0.77	0.04	-0.55	-0.57	-0.22	0.21	0.48
	PDHI	0.44	0.51	0.09	-0.33	-0.35	-0.15	0.14	0.47	0.29	0.58	0.17	-0.39	-0.40	-0.18	0.28	0.36	0.31	0.51	0.14	-0.43	-0.44	-0.19	0.28	0.37

Tabla B7. Correlaciones setiembre – octubre - noviembre con rezagos 0 a 3 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

		Sin Rezago								1 mes de rezago								2 meses de rezago								3 meses de rezago							
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Setiembre – octubre - noviembre	SPI_1	0.40	0.29	-0.27	-0.62	-0.63	-0.59	-0.17	0.22	0.56	0.14	-0.35	-0.43	-0.44	-0.49	-0.35	0.43	0.42	0.37	-0.14	-0.52	-0.52	-0.53	-0.10	0.30	0.14	0.43	-0.08	-0.53	-0.53	-0.14	0.22	0.03
	SPI_3	0.34	0.51	-0.25	-0.78	-0.80	-0.43	0.03	0.18	0.48	0.37	-0.37	-0.69	-0.72	-0.54	-0.16	0.30	0.52	0.24	-0.37	-0.54	-0.56	-0.60	-0.26	0.35	0.52	0.30	-0.31	-0.54	-0.55	-0.58	-0.25	0.37
	SPI_6	0.29	0.51	-0.29	-0.65	-0.67	-0.18	0.14	0.18	0.42	0.51	-0.36	-0.72	-0.75	-0.30	0.02	0.28	0.43	0.47	-0.40	-0.75	-0.77	-0.34	-0.06	0.27	0.38	0.43	-0.33	-0.75	-0.77	-0.46	-0.10	0.21
	SPI_9	0.25	0.51	-0.25	-0.60	-0.62	-0.16	0.17	0.16	0.35	0.49	-0.31	-0.63	-0.65	-0.24	0.11	0.23	0.34	0.46	-0.35	-0.63	-0.65	-0.21	0.10	0.21	0.35	0.47	-0.38	-0.67	-0.69	-0.22	0.03	0.23
	SPI_12	0.29	0.56	-0.25	-0.54	-0.57	-0.17	0.16	0.22	0.36	0.51	-0.31	-0.61	-0.63	-0.23	0.10	0.25	0.34	0.48	-0.35	-0.61	-0.64	-0.19	0.09	0.21	0.33	0.48	-0.34	-0.62	-0.65	-0.20	0.07	0.21
	SPI_24	0.21	0.45	-0.24	-0.22	-0.24	-0.18	0.03	0.22	0.27	0.45	-0.27	-0.26	-0.29	-0.21	-0.01	0.26	0.23	0.32	-0.33	-0.22	-0.23	-0.07	-0.03	0.22	0.19	0.33	-0.30	-0.25	-0.27	-0.10	-0.08	0.19
	RDI_1	0.33	0.35	-0.25	-0.68	-0.69	-0.59	-0.13	0.15	0.55	0.18	-0.38	-0.44	-0.46	-0.52	-0.37	0.42	0.58	0.07	-0.25	-0.10	-0.12	-0.44	-0.39	0.48	0.56	0.01	-0.13	0.32	0.27	0.13	-0.25	0.57
	RDI_3	0.25	0.51	-0.21	-0.80	-0.82	-0.42	0.08	0.09	0.39	0.40	-0.33	-0.74	-0.76	-0.54	-0.11	0.22	0.44	0.26	-0.36	-0.60	-0.62	-0.60	-0.23	0.28	0.51	0.23	-0.36	-0.50	-0.51	-0.57	-0.35	0.39
	RDI_6	0.17	0.54	-0.23	-0.67	-0.69	-0.21	0.19	0.08	0.31	0.53	-0.30	-0.76	-0.78	-0.32	0.08	0.18	0.33	0.48	-0.37	-0.78	-0.80	-0.33	0.00	0.18	0.29	0.43	-0.30	-0.78	-0.80	-0.43	-0.05	0.13
	RDI_9	0.15	0.55	-0.19	-0.60	-0.62	-0.17	0.23	0.08	0.24	0.53	-0.25	-0.65	-0.67	-0.25	0.16	0.14	0.22	0.48	-0.30	-0.65	-0.67	-0.21	0.15	0.10	0.23	0.48	-0.32	-0.70	-0.72	-0.24	0.09	0.11
	RDI_12	0.18	0.59	-0.19	-0.53	-0.56	-0.16	0.22	0.14	0.26	0.55	-0.26	-0.62	-0.64	-0.23	0.16	0.17	0.22	0.49	-0.30	-0.62	-0.65	-0.18	0.15	0.12	0.21	0.49	-0.29	-0.64	-0.66	-0.21	0.12	0.11
	RDI_24	0.12	0.41	-0.18	-0.15	-0.17	-0.14	0.05	0.16	0.18	0.42	-0.22	-0.21	-0.23	-0.18	0.01	0.20	0.13	0.29	-0.28	-0.17	-0.18	-0.06	-0.01	0.15	0.09	0.31	-0.24	-0.23	-0.24	-0.10	-0.05	0.12
	PDSI	0.39	0.33	-0.35	-0.44	-0.47	-0.27	-0.02	0.35	0.45	0.34	-0.38	-0.48	-0.51	-0.33	-0.06	0.39	0.43	0.45	-0.45	-0.47	-0.49	-0.24	-0.09	0.36	0.38	0.46	-0.42	-0.52	-0.54	-0.27	-0.12	0.31
PDHI	0.26	0.43	-0.27	-0.14	-0.17	-0.12	0.01	0.30	0.34	0.44	-0.32	-0.24	-0.26	-0.20	-0.04	0.34	0.32	0.32	-0.41	-0.25	-0.27	-0.13	-0.06	0.31	0.27	0.35	-0.37	-0.35	-0.37	-0.19	-0.11	0.24	

Tabla B8. Correlaciones setiembre – octubre - noviembre con rezagos 4 a 6 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

		4 meses de rezago								5 meses de rezago								6 meses de rezago							
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Setiembre – octubre - noviembre	SPI_1	0.21	0.07	-0.23	-0.43	-0.46	-0.21	0.23	-0.06	0.24	-0.11	0.00	-0.05	-0.08	-0.17	0.18	0.03	0.22	0.08	-0.07	-0.04	-0.05	-0.08	-0.11	0.19
	SPI_3	0.38	0.27	-0.19	-0.53	-0.54	-0.48	0.01	0.17	0.22	0.10	-0.02	-0.34	-0.36	-0.21	0.23	0.00	0.25	0.08	-0.11	-0.20	-0.22	-0.17	0.01	0.11
	SPI_6	0.45	0.33	-0.37	-0.69	-0.71	-0.54	-0.19	0.26	0.54	0.25	-0.32	-0.56	-0.59	-0.63	-0.23	0.34	0.60	0.29	-0.32	-0.44	-0.46	-0.55	-0.32	0.46
	SPI_9	0.38	0.48	-0.38	-0.72	-0.74	-0.27	-0.02	0.24	0.41	0.47	-0.37	-0.75	-0.78	-0.36	-0.08	0.25	0.42	0.46	-0.35	-0.76	-0.79	-0.47	-0.12	0.24
	SPI_12	0.33	0.47	-0.34	-0.62	-0.65	-0.21	0.07	0.20	0.33	0.46	-0.34	-0.63	-0.66	-0.23	0.08	0.19	0.38	0.49	-0.39	-0.67	-0.70	-0.23	0.01	0.25
	SPI_24	0.20	0.33	-0.30	-0.26	-0.27	-0.10	-0.07	0.19	0.20	0.34	-0.30	-0.26	-0.28	-0.11	-0.07	0.19	0.22	0.38	-0.31	-0.29	-0.30	-0.12	-0.06	0.21
	RDI_1	0.23	-0.11	-0.13	0.42	0.39	0.25	-0.20	0.34	0.14	0.07	0.11	0.17	0.15	0.13	-0.20	0.22	0.05	0.36	-0.12	-0.20	-0.19	0.06	-0.29	0.21
	RDI_3	0.50	0.18	-0.29	-0.41	-0.42	-0.48	-0.18	0.38	0.39	0.01	-0.13	-0.22	-0.26	-0.14	0.21	0.21	0.31	0.13	-0.15	-0.25	-0.27	-0.17	0.02	0.22
	RDI_6	0.37	0.34	-0.36	-0.73	-0.75	-0.54	-0.16	0.19	0.47	0.26	-0.29	-0.62	-0.64	-0.63	-0.21	0.28	0.53	0.31	-0.30	-0.54	-0.56	-0.57	-0.30	0.39
	RDI_9	0.27	0.48	-0.34	-0.76	-0.78	-0.30	0.03	0.13	0.32	0.47	-0.34	-0.79	-0.81	-0.38	-0.04	0.15	0.33	0.46	-0.34	-0.80	-0.82	-0.47	-0.09	0.16
	RDI_12	0.22	0.47	-0.29	-0.65	-0.67	-0.23	0.12	0.10	0.22	0.45	-0.29	-0.67	-0.70	-0.26	0.12	0.09	0.28	0.49	-0.37	-0.73	-0.75	-0.27	0.04	0.15
	RDI_24	0.09	0.31	-0.24	-0.26	-0.26	-0.12	-0.04	0.11	0.09	0.32	-0.24	-0.28	-0.29	-0.13	-0.03	0.11	0.11	0.37	-0.27	-0.32	-0.33	-0.15	-0.03	0.13
	PDSI	0.38	0.45	-0.43	-0.54	-0.56	-0.29	-0.11	0.30	0.42	0.45	-0.42	-0.55	-0.58	-0.31	-0.11	0.32	0.46	0.46	-0.43	-0.54	-0.57	-0.31	-0.13	0.36
PDHI	0.28	0.36	-0.38	-0.39	-0.41	-0.22	-0.09	0.24	0.30	0.36	-0.37	-0.42	-0.44	-0.25	-0.08	0.24	0.32	0.39	-0.38	-0.45	-0.47	-0.28	-0.09	0.26	

Tabla B9. Correlaciones diciembre – enero - febrero con rezagos 0 a 3 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos.

		Sin Rezagó							1 mes de rezagó							2 meses de rezagó							3 meses de rezagó										
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Diciembre - enero - febrero	SPI_1	0.08	-0.44	0.35	-0.48	-0.49	-0.31	0.27	-0.07	0.25	-0.09	0.38	-0.43	-0.46	-0.04	0.21	0.04	0.25	0.31	0.17	-0.05	-0.07	0.09	0.03	0.16	0.19	0.59	-0.07	-0.04	-0.05	0.06	-0.07	0.29
	SPI_3	0.31	-0.04	0.31	-0.50	-0.51	-0.56	0.32	0.17	0.29	-0.11	0.46	-0.48	-0.50	-0.46	0.34	0.14	0.24	0.03	0.33	-0.29	-0.32	-0.14	0.12	0.11	0.24	0.43	0.12	-0.19	-0.21	-0.01	0.03	0.23
	SPI_6	0.21	-0.21	0.22	-0.77	-0.78	-0.46	0.18	0.08	0.26	-0.10	0.24	-0.69	-0.70	-0.49	0.21	0.10	0.35	0.06	0.26	-0.56	-0.57	-0.51	0.22	0.19	0.39	0.34	0.19	-0.43	-0.45	-0.43	0.21	0.31
	SPI_9	0.23	-0.22	0.19	-0.71	-0.72	-0.27	0.15	0.12	0.24	-0.24	0.20	-0.76	-0.77	-0.32	0.16	0.13	0.26	-0.21	0.21	-0.79	-0.79	-0.38	0.17	0.13	0.24	-0.13	0.21	-0.78	-0.79	-0.45	0.18	0.12
	SPI_12	0.22	-0.21	0.18	-0.66	-0.66	-0.24	0.14	0.13	0.22	-0.20	0.18	-0.66	-0.67	-0.24	0.14	0.13	0.22	-0.20	0.19	-0.66	-0.67	-0.25	0.14	0.12	0.25	-0.16	0.18	-0.71	-0.72	-0.27	0.15	0.16
	SPI_24	0.19	-0.17	0.28	-0.26	-0.26	-0.19	0.17	0.20	0.19	-0.17	0.29	-0.26	-0.27	-0.19	0.16	0.20	0.20	-0.16	0.29	-0.27	-0.28	-0.20	0.16	0.20	0.18	-0.16	0.26	-0.30	-0.31	-0.22	0.16	0.20
	RDI_1	0.56	0.25	-0.02	0.31	0.29	0.03	-0.23	0.40	0.24	0.30	-0.20	0.40	0.40	0.19	-0.32	0.26	0.17	0.18	-0.14	0.20	0.20	0.06	-0.34	0.15	-0.06	0.26	-0.17	-0.19	-0.18	-0.03	-0.04	0.10
	RDI_3	0.33	0.08	0.27	-0.47	-0.47	-0.52	0.27	0.23	0.36	0.05	0.38	-0.38	-0.39	-0.47	0.30	0.28	0.40	0.09	0.29	-0.19	-0.21	-0.11	-0.02	0.26	0.21	0.46	-0.01	-0.24	-0.26	-0.03	-0.04	0.23
	RDI_6	0.15	-0.24	0.22	-0.79	-0.80	-0.43	0.18	0.03	0.21	-0.11	0.23	-0.72	-0.73	-0.47	0.20	0.07	0.29	0.07	0.24	-0.60	-0.62	-0.49	0.21	0.16	0.31	0.33	0.16	-0.52	-0.53	-0.43	0.21	0.26
	RDI_9	0.12	-0.26	0.15	-0.72	-0.73	-0.27	0.12	0.05	0.15	-0.27	0.19	-0.79	-0.79	-0.32	0.16	0.05	0.18	-0.22	0.20	-0.82	-0.83	-0.38	0.17	0.07	0.18	-0.14	0.20	-0.82	-0.83	-0.44	0.18	0.07
	RDI_12	0.12	-0.26	0.14	-0.67	-0.67	-0.23	0.11	0.05	0.12	-0.24	0.16	-0.67	-0.68	-0.24	0.12	0.05	0.13	-0.22	0.16	-0.69	-0.70	-0.26	0.12	0.04	0.16	-0.17	0.15	-0.76	-0.77	-0.27	0.14	0.08
	RDI_24	0.10	-0.17	0.24	-0.23	-0.23	-0.16	0.15	0.13	0.09	-0.18	0.25	-0.25	-0.26	-0.18	0.15	0.12	0.09	-0.17	0.25	-0.27	-0.28	-0.19	0.14	0.12	0.07	-0.16	0.20	-0.32	-0.33	-0.20	0.13	0.11
	PDSI	0.25	-0.13	0.20	-0.53	-0.55	-0.31	0.19	0.20	0.26	-0.11	0.22	-0.55	-0.57	-0.30	0.20	0.20	0.30	-0.06	0.22	-0.56	-0.58	0.30	0.18	0.23	0.34	0.02	0.21	-0.56	-0.58	-0.28	0.16	0.28
	PDHI	0.19	-0.18	0.23	-0.35	-0.36	-0.26	0.22	0.14	0.19	-0.17	0.25	-0.39	-0.40	-0.27	0.23	0.13	0.20	-0.15	0.25	-0.42	-0.44	0.28	0.22	0.14	0.21	-0.10	0.24	-0.46	-0.47	-0.29	0.22	0.16

Tabla B10. Correlaciones noviembre a abril con rezagos 4 a 6 meses de las series de precipitación y procesos atmosféricos

		4 meses de rezagó							5 meses de rezagó							6 meses de rezagó									
		AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA	AMO	CLLJ	NAO	NINO34	ONI	PDO	SHCI	TNA
Diciembre - enero - febrero	SPI_1	0.10	0.55	-0.04	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	0.29	0.32	0.63	-0.13	0.08	0.09	0.18	-0.15	0.45	0.37	0.43	0.06	0.21	0.21	0.23	-0.08	0.36
	SPI_3	0.15	0.56	-0.04	-0.06	-0.07	0.00	-0.04	0.29	0.16	0.61	-0.10	-0.02	-0.01	0.06	-0.07	0.35	0.30	0.64	-0.03	0.11	0.11	0.16	-0.10	0.44
	SPI_6	0.24	0.51	0.07	-0.19	-0.20	-0.20	0.08	0.34	0.18	0.58	-0.04	-0.06	-0.06	0.03	-0.04	0.34	0.29	0.65	-0.02	0.06	0.06	0.14	-0.08	0.42
	SPI_9	0.30	0.08	0.21	-0.70	-0.71	-0.47	0.19	0.20	0.38	0.39	0.14	-0.46	-0.47	-0.32	0.12	0.37	0.43	0.60	0.07	-0.12	-0.12	-0.05	0.02	0.47
	SPI_12	0.27	-0.10	0.18	-0.75	-0.76	-0.31	0.15	0.19	0.31	0.01	0.17	-0.75	-0.75	-0.33	0.14	0.25	0.36	0.14	0.20	-0.66	-0.67	-0.34	0.13	0.30
	SPI_24	0.17	-0.14	0.22	-0.33	-0.34	-0.23	0.14	0.21	0.17	-0.08	0.16	-0.36	-0.36	-0.23	0.10	0.25	0.25	0.01	0.15	-0.38	-0.38	-0.19	0.08	0.33
	RDI_1	0.09	0.49	-0.08	-0.26	-0.25	-0.06	-0.01	0.27	0.29	0.59	-0.14	-0.06	-0.06	0.16	-0.09	0.42	0.36	0.41	0.06	0.12	0.12	0.23	-0.03	0.34
	RDI_3	0.13	0.53	-0.10	-0.19	-0.19	-0.03	-0.05	0.25	0.13	0.58	-0.14	-0.15	-0.15	0.03	-0.04	0.30	0.27	0.62	-0.06	-0.03	-0.03	0.15	-0.06	0.40
	RDI_6	0.18	0.48	0.04	-0.33	-0.33	-0.22	0.10	0.27	0.15	0.55	-0.07	-0.20	-0.20	0.00	-0.01	0.29	0.26	0.62	-0.06	-0.10	-0.10	0.12	-0.05	0.37
	RDI_9	0.23	0.06	0.18	-0.75	-0.76	-0.45	0.19	0.15	0.31	0.34	0.11	-0.57	-0.58	-0.32	0.13	0.30	0.38	0.56	0.05	-0.28	-0.29	-0.07	0.05	0.41
	RDI_12	0.18	-0.11	0.15	-0.80	-0.81	-0.31	0.15	0.12	0.22	-0.02	0.14	-0.81	-0.82	-0.33	0.15	0.17	0.27	0.10	0.17	-0.75	-0.76	-0.33	0.15	0.21
	RDI_24	0.05	-0.15	0.15	-0.37	-0.37	-0.21	0.12	0.12	0.05	-0.10	0.09	-0.40	-0.40	-0.20	0.08	0.15	0.12	-0.02	0.08	-0.45	-0.45	-0.17	0.08	0.22
	PDSI	0.38	0.11	0.20	-0.54	-0.56	-0.25	0.14	0.34	0.45	0.21	0.19	-0.50	-0.51	-0.17	0.12	0.41	0.51	0.27	0.20	-0.41	-0.43	-0.09	0.10	0.47
	PDHI	0.22	-0.05	0.22	-0.49	-0.50	-0.30	0.21	0.19	0.25	0.02	0.21	-0.50	-0.51	-0.27	0.19	0.24	0.33	0.11	0.22	-0.47	-0.49	-0.22	0.19	0.31

Anexo C:
Composiciones de presión atmosférica, velocidad y
dirección, y cortante de viento

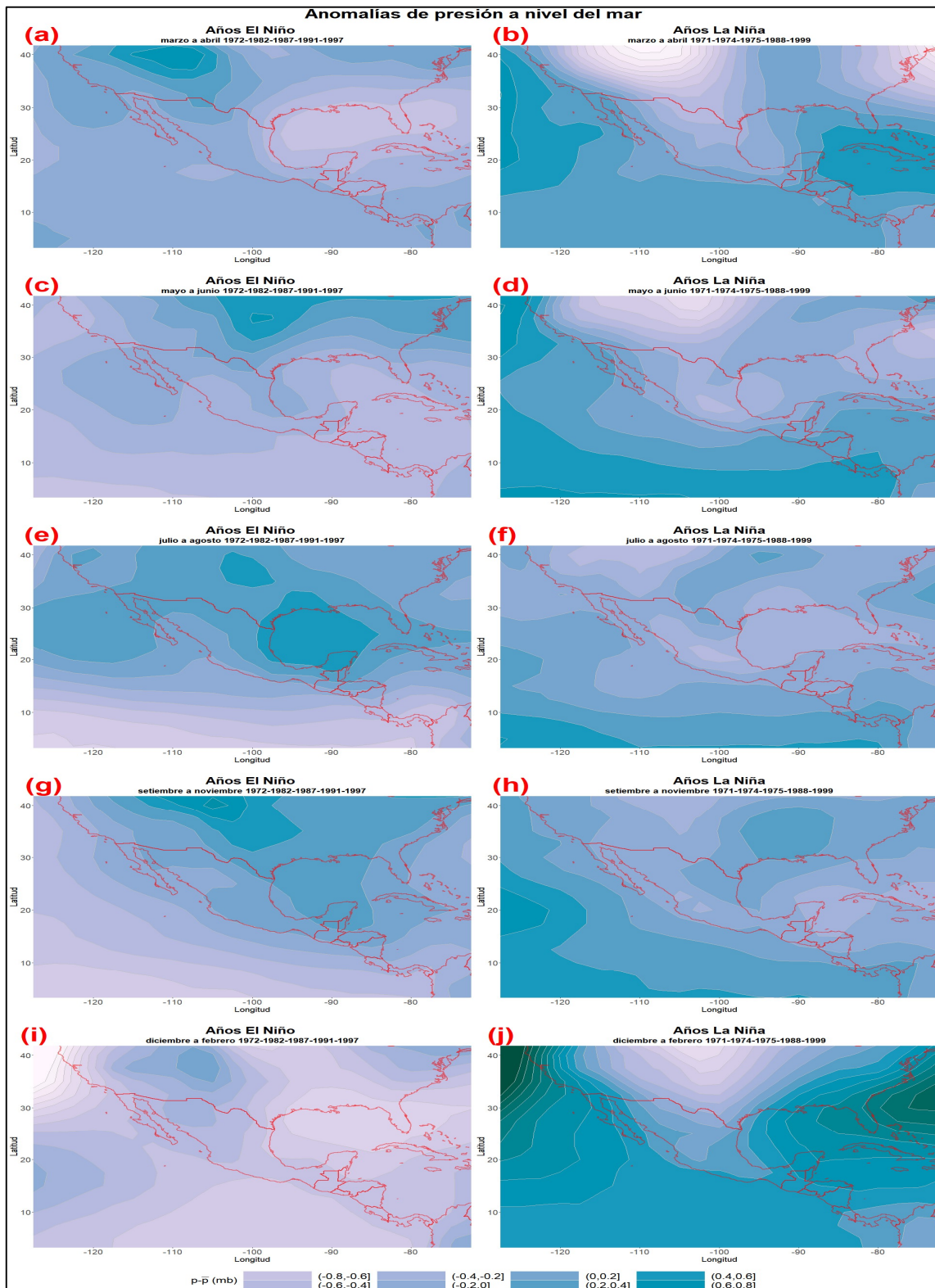


Figura C.1. Anomalías de presión de nivel de mar en MA, MJ, JA, SON y DEF de los primeros 5 años El Niño (a, c, e, g, i,) y La Niña (b, d, f, h, j), según ordenamiento descendente del valor medio anual de la señal del Niño 3.4.

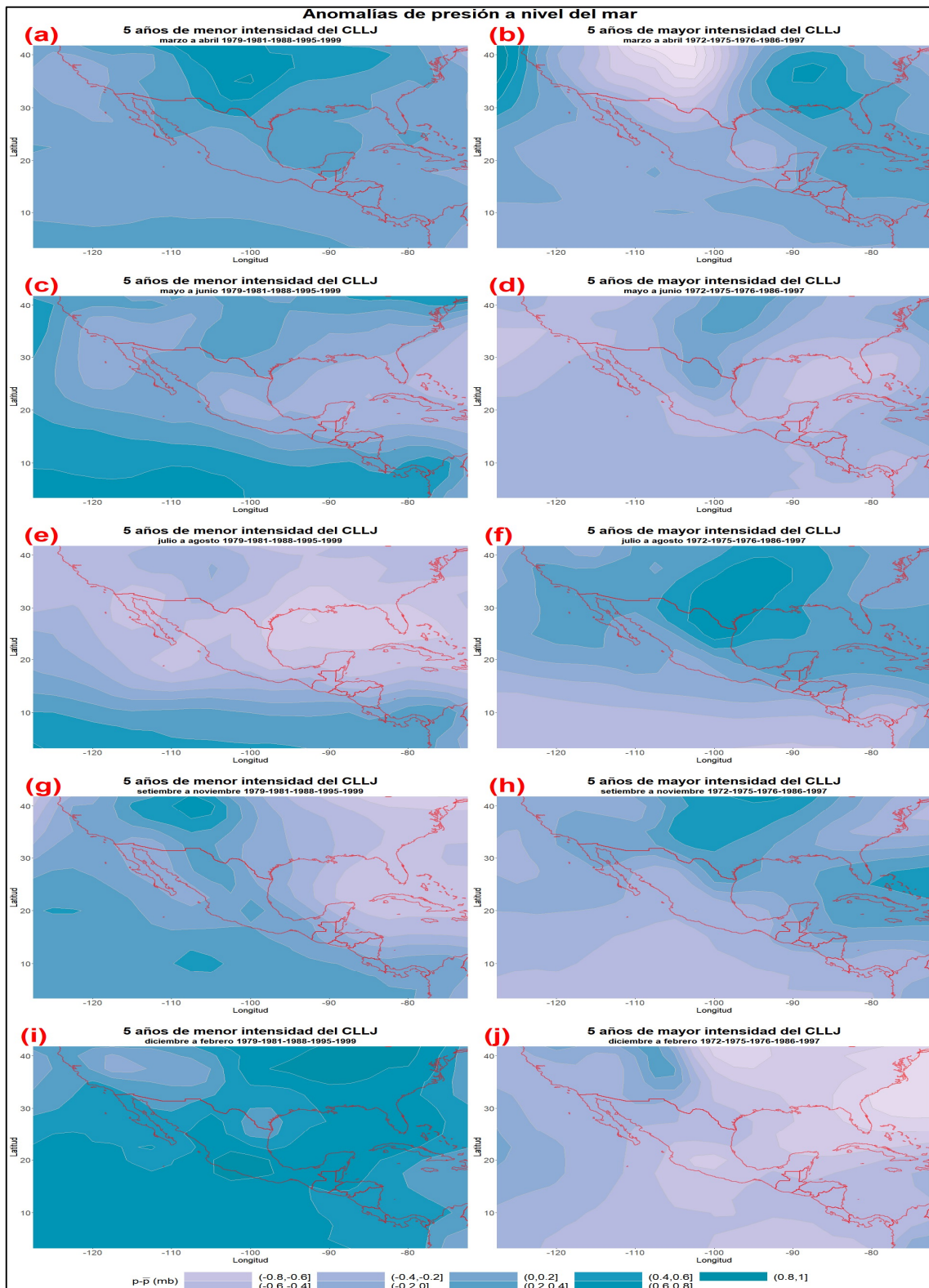


Figura C.2. Anomalías de presión de nivel de mar en MA, MJ, JA, SON y DEF de los años en los que el CLLJ es más intenso (a, c, e, g, i,) y menos intenso (b, d, f, h, j).

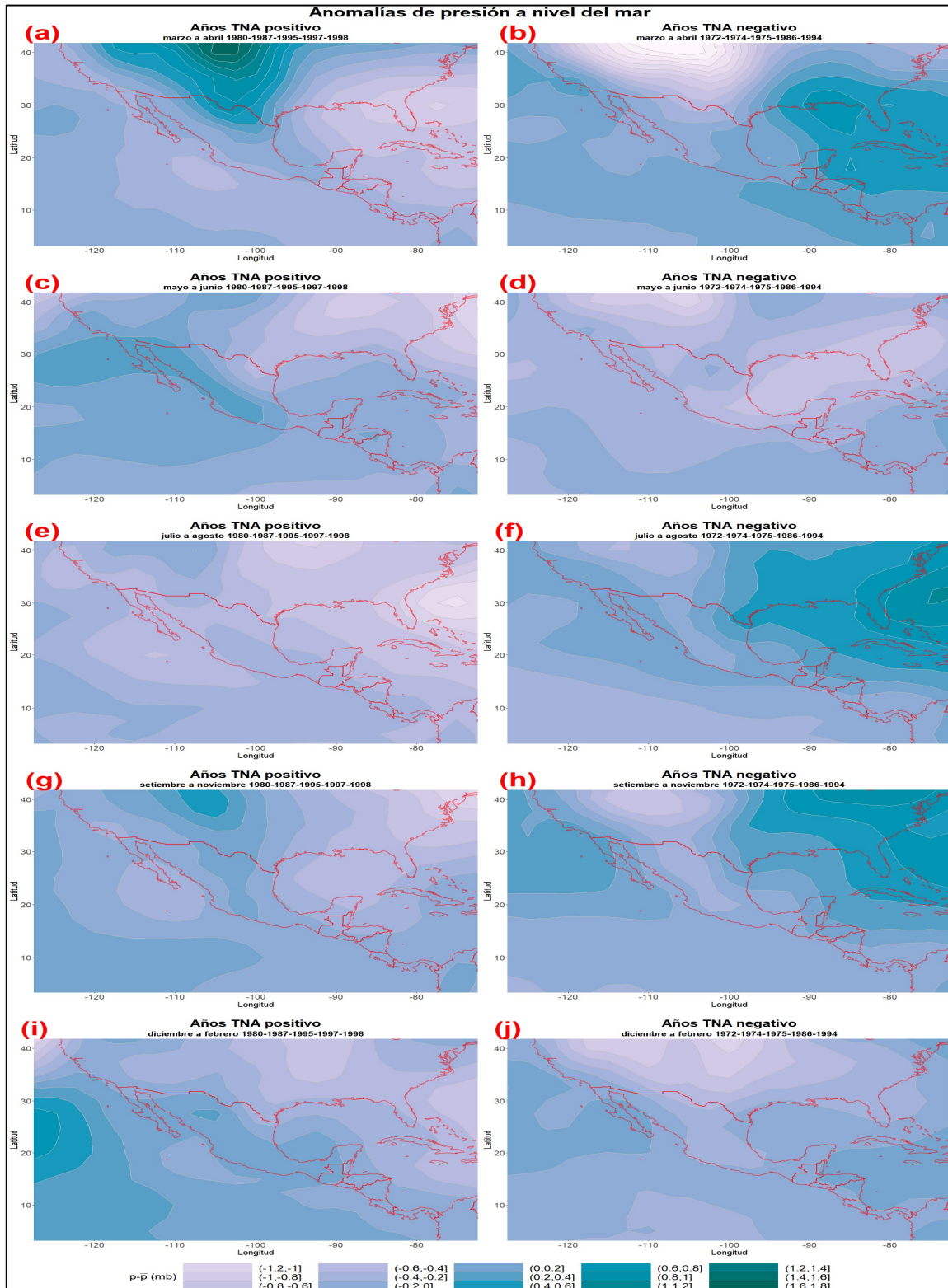


Figura C.3. Anomalías de presión de nivel de mar en MA, MJ, JA, SON y DEF de los años en los que el TNA es positivo (a, c, e, g, i) y negativo (b, d, f, h, j).

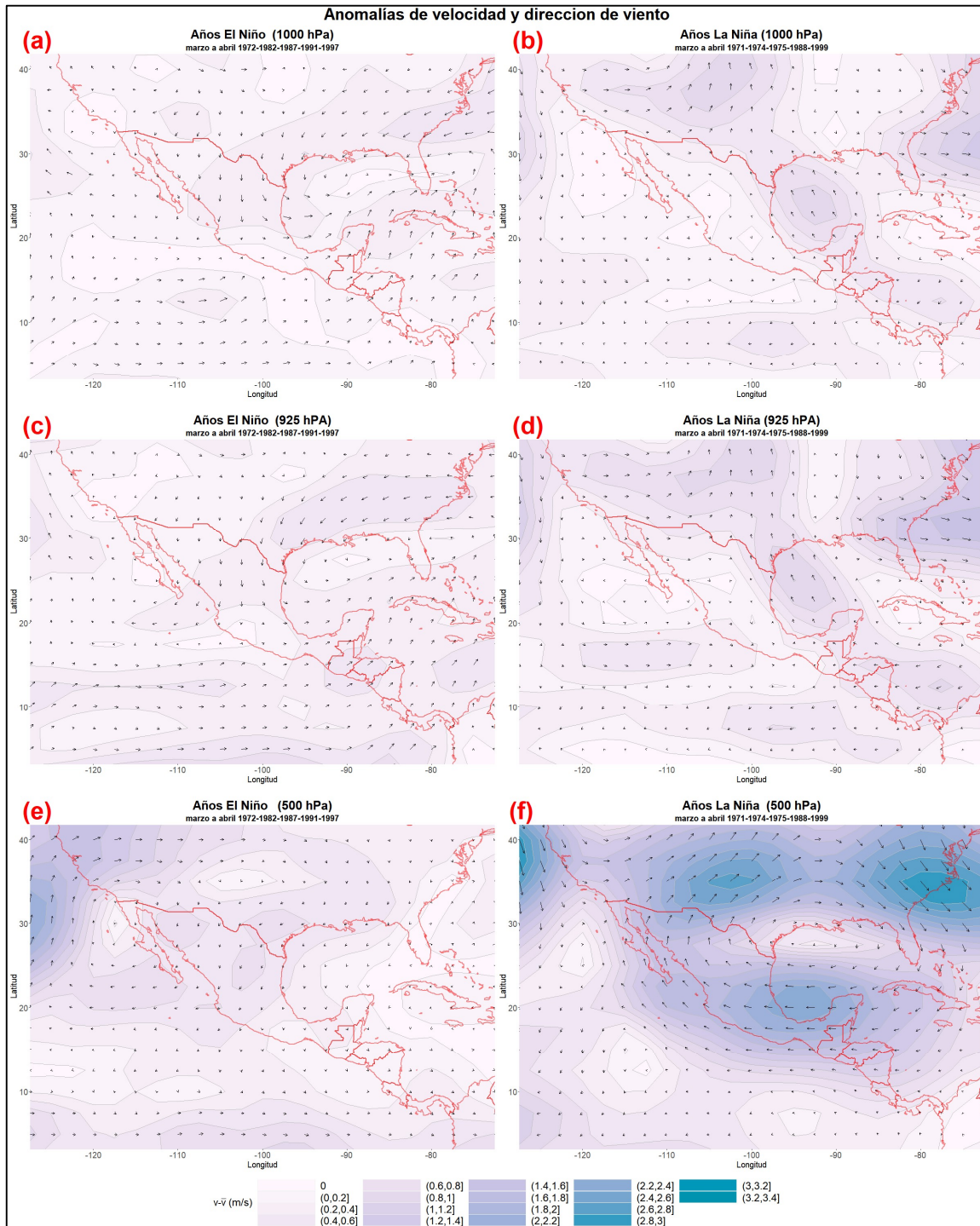


Figura C.4. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en MA, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los 5 primeros años El Niño (a, c y e, respectivamente) y La Niña (b, d y f, respectivamente), según el ordenamiento descendente del valor medio anual del señal del Niño 3.4

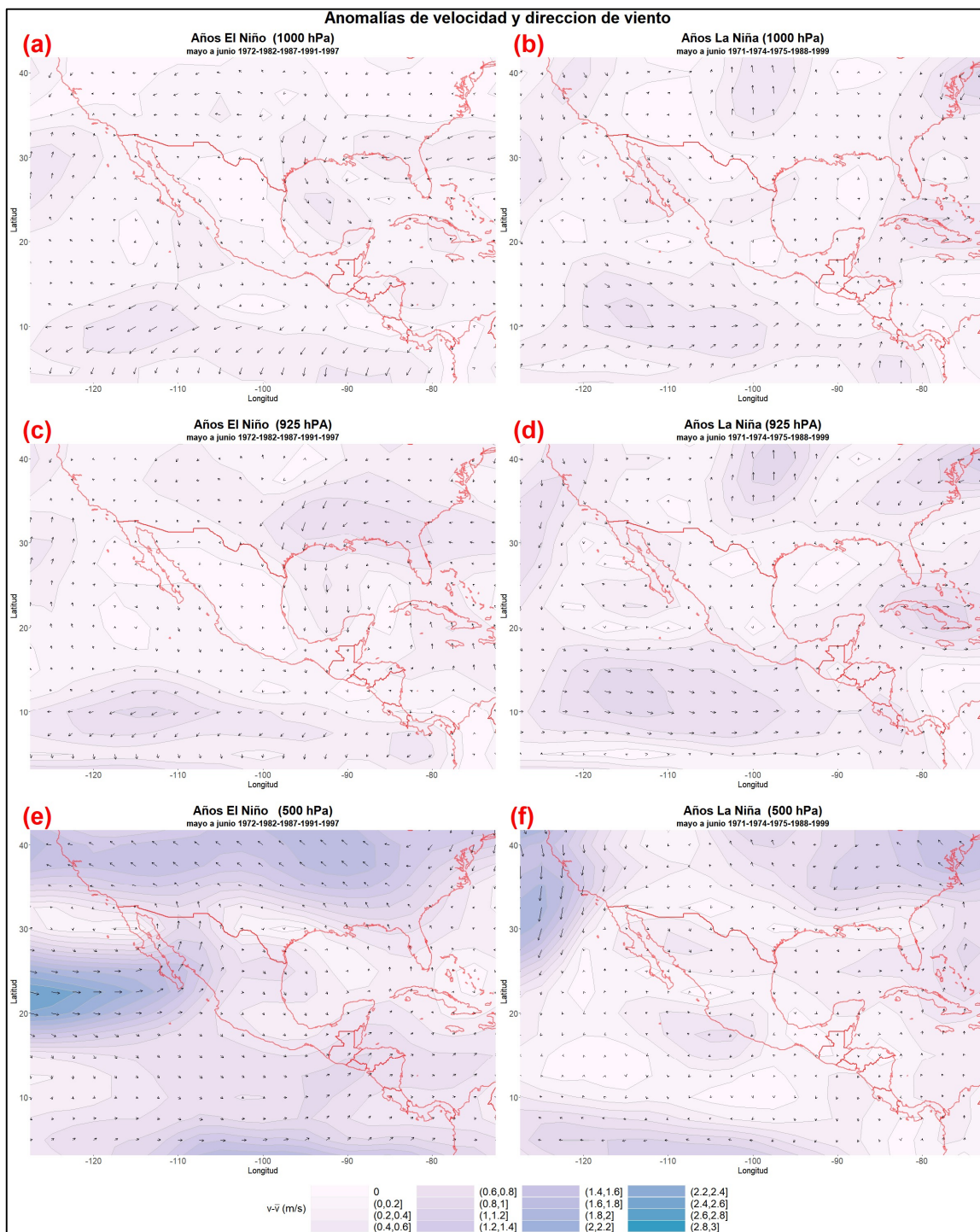


Figura C.5. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en MJ, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los 5 primeros años El Niño (a, c y e, respectivamente) y La Niña (b, d y f, respectivamente), según el ordenamiento descendente del valor medio anual del señal del Niño 3.4.

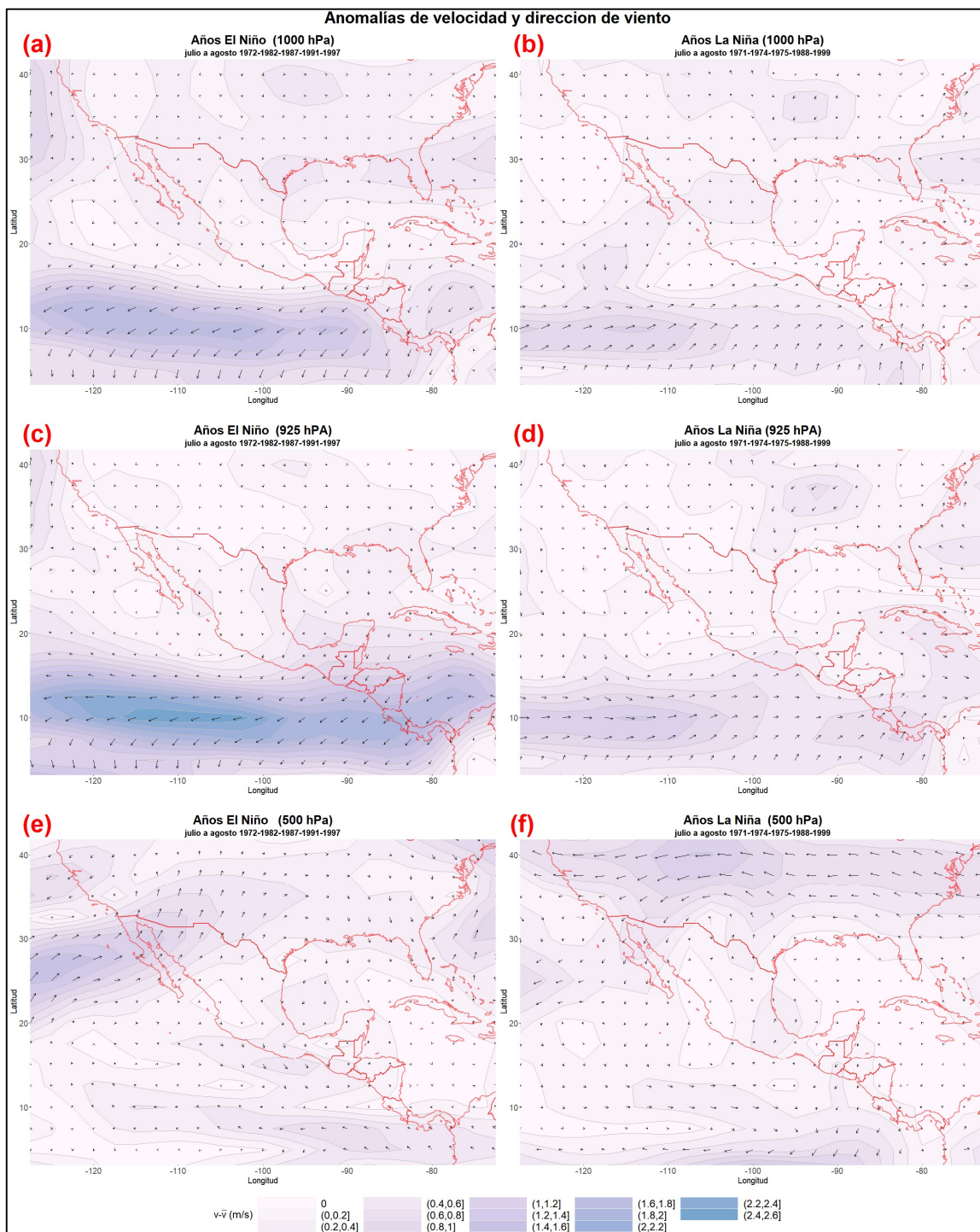


Figura C.6. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en JA, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los 5 primeros años El Niño (a, c y e, respectivamente) y La Niña (b, d y f, respectivamente), según el ordenamiento descendente del valor medio anual del señal del Niño 3.4.

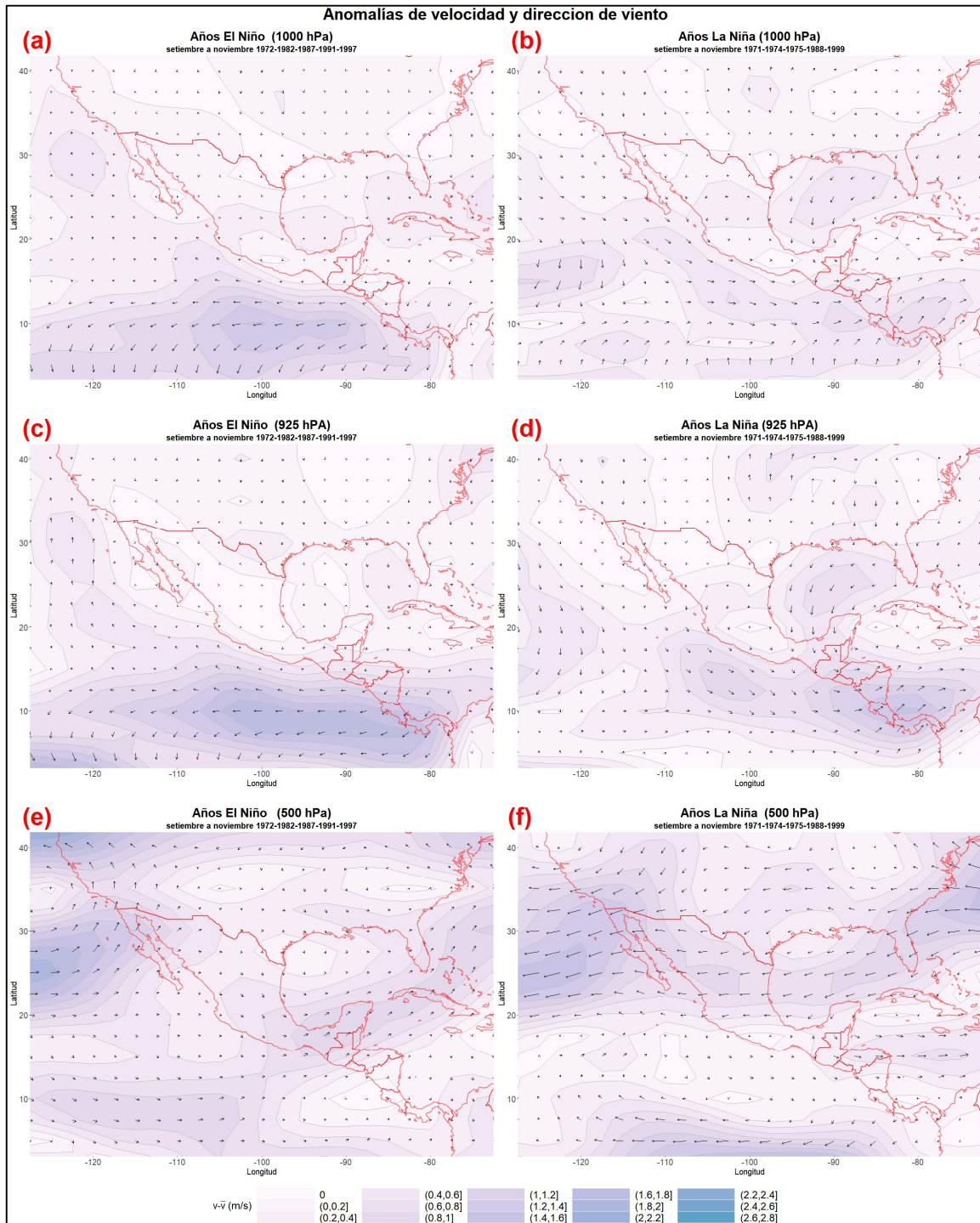


Figura C.7. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en SON, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los 5 primeros años El Niño (a, c y e, respectivamente) y La Niña (b, d y f, respectivamente), según el ordenamiento descendente del valor medio anual del señal del Niño 3.4.

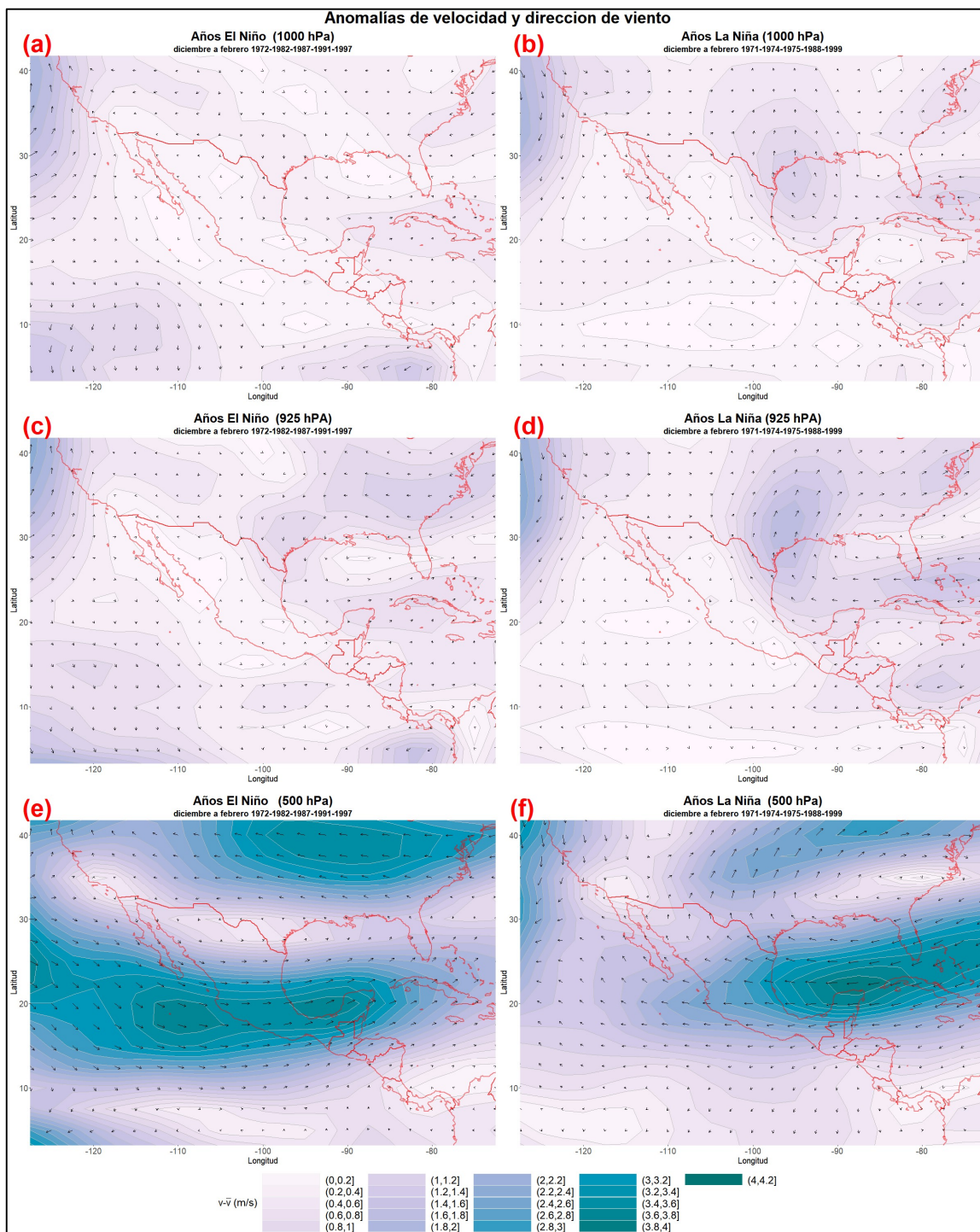


Figura C.8. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en DEF, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los 5 primeros años El Niño (a, c y e, respectivamente) y La Niña (b,d y f, respectivamente), según el ordenamiento descendente del valor medio anual del señal del Niño 3.4.

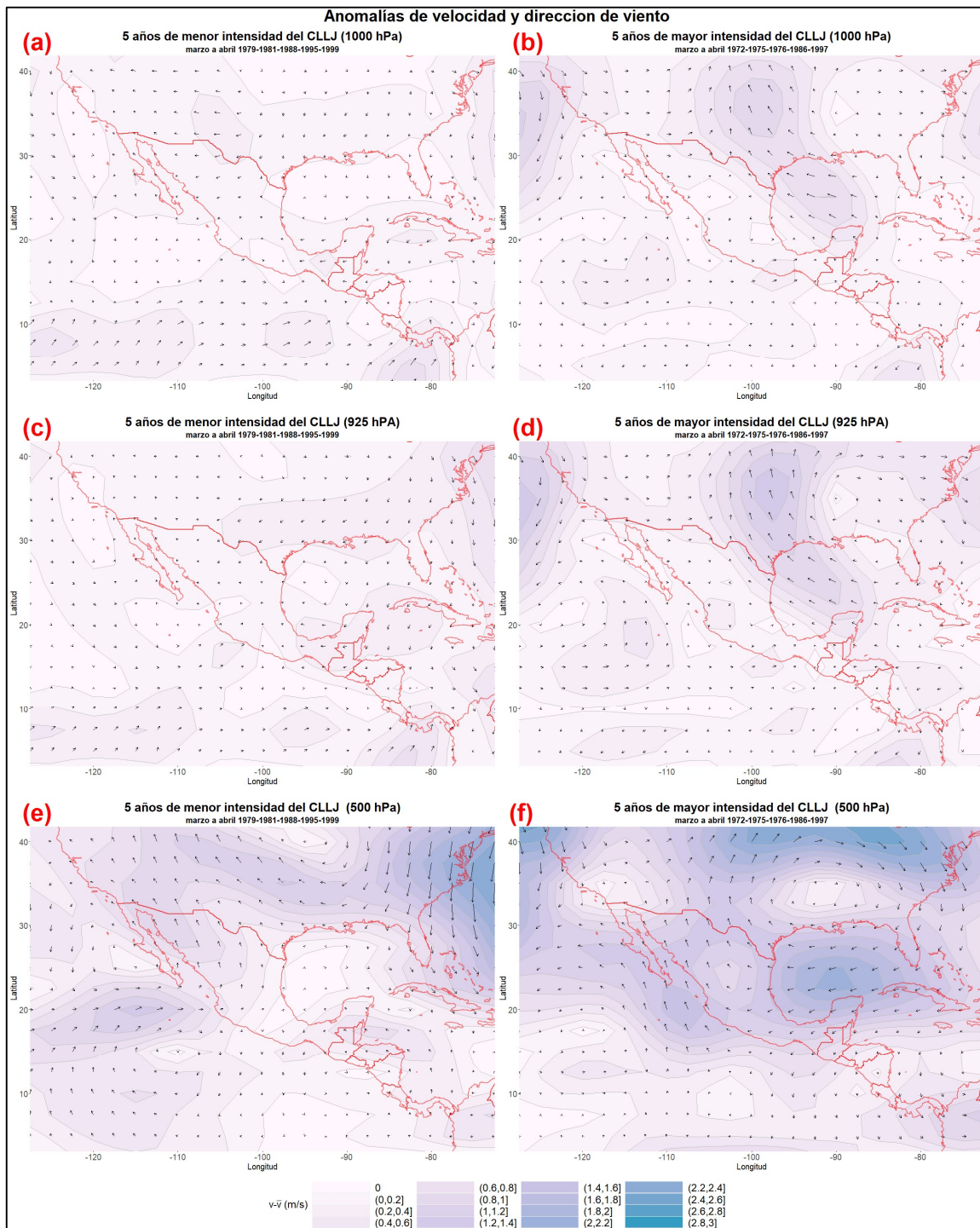


Figura C.9. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en MA, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el CLLJ es mayor (a, c y e, respectivamente) y menor (b,d,f, respectivamente).

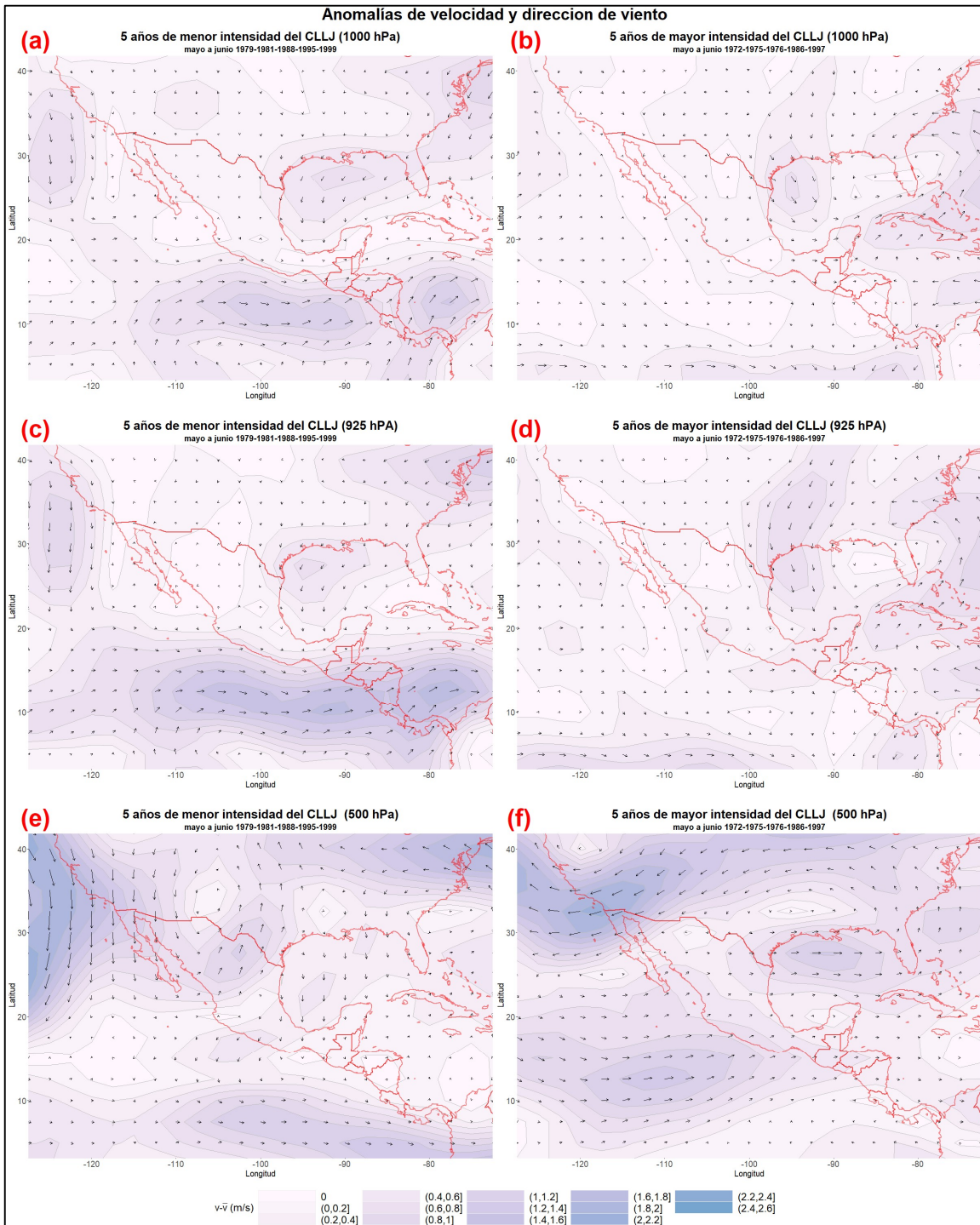


Figura C.10. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en MJ, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el CLLJ es mayor (a, c y e, respectivamente) y menor (b,d,f, respectivamente).

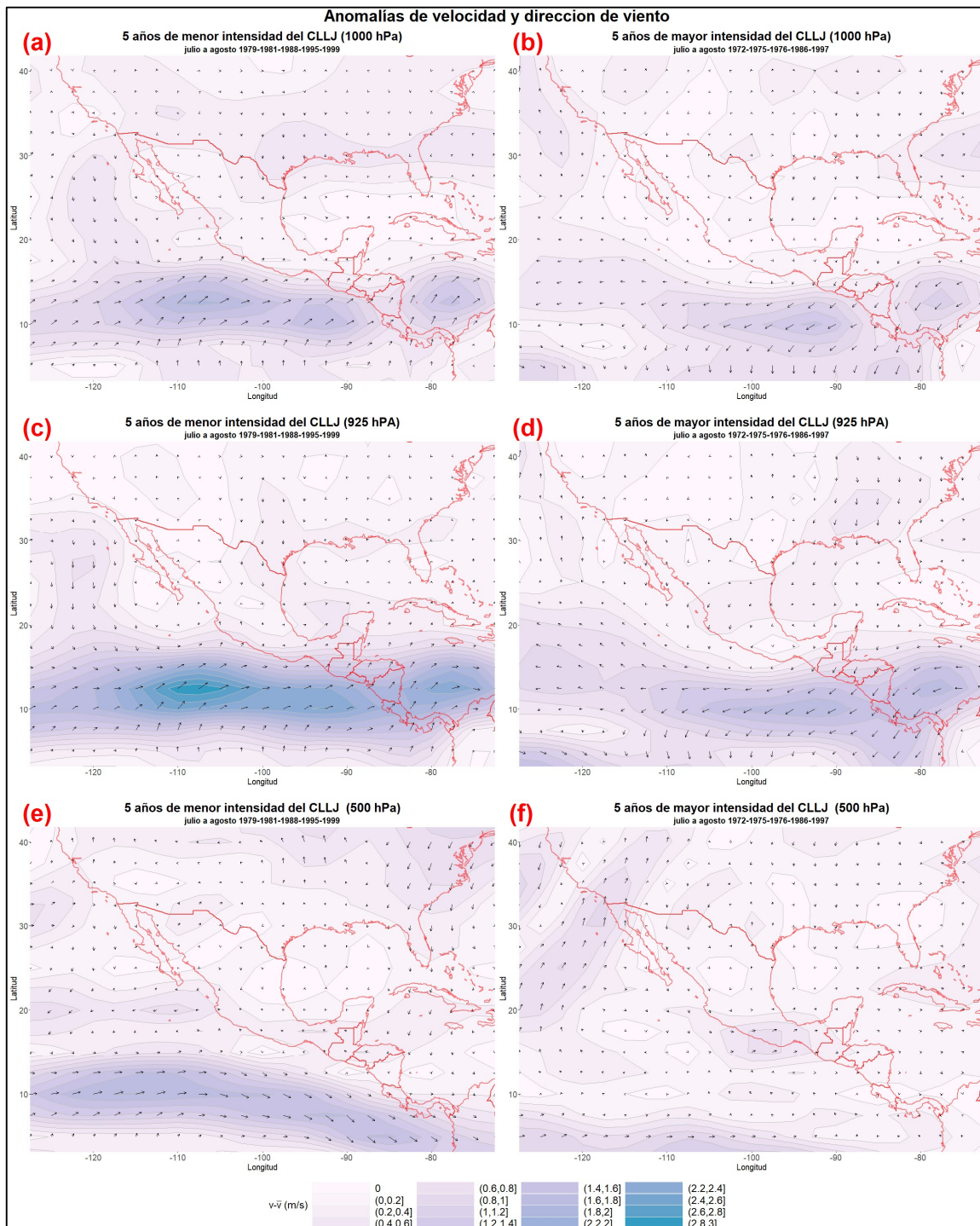


Figura C.11. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en JA, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el CLLJ es mayor (a, c y e, respectivamente) y menor (b, d, f, respectivamente).

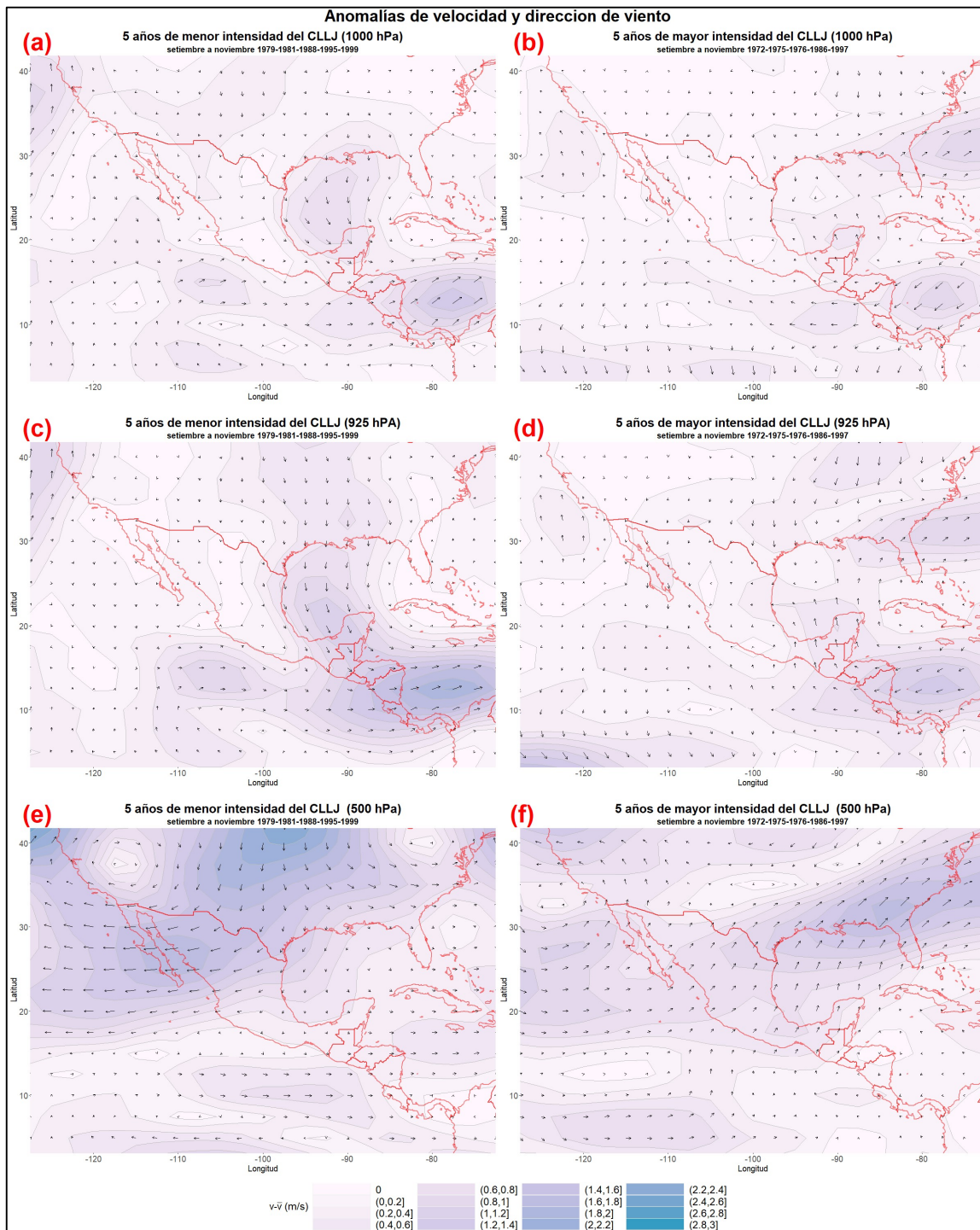


Figura C.12. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en SON, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el CLLJ es mayor (a, c y e, respectivamente) y menor (b, d, f, respectivamente).

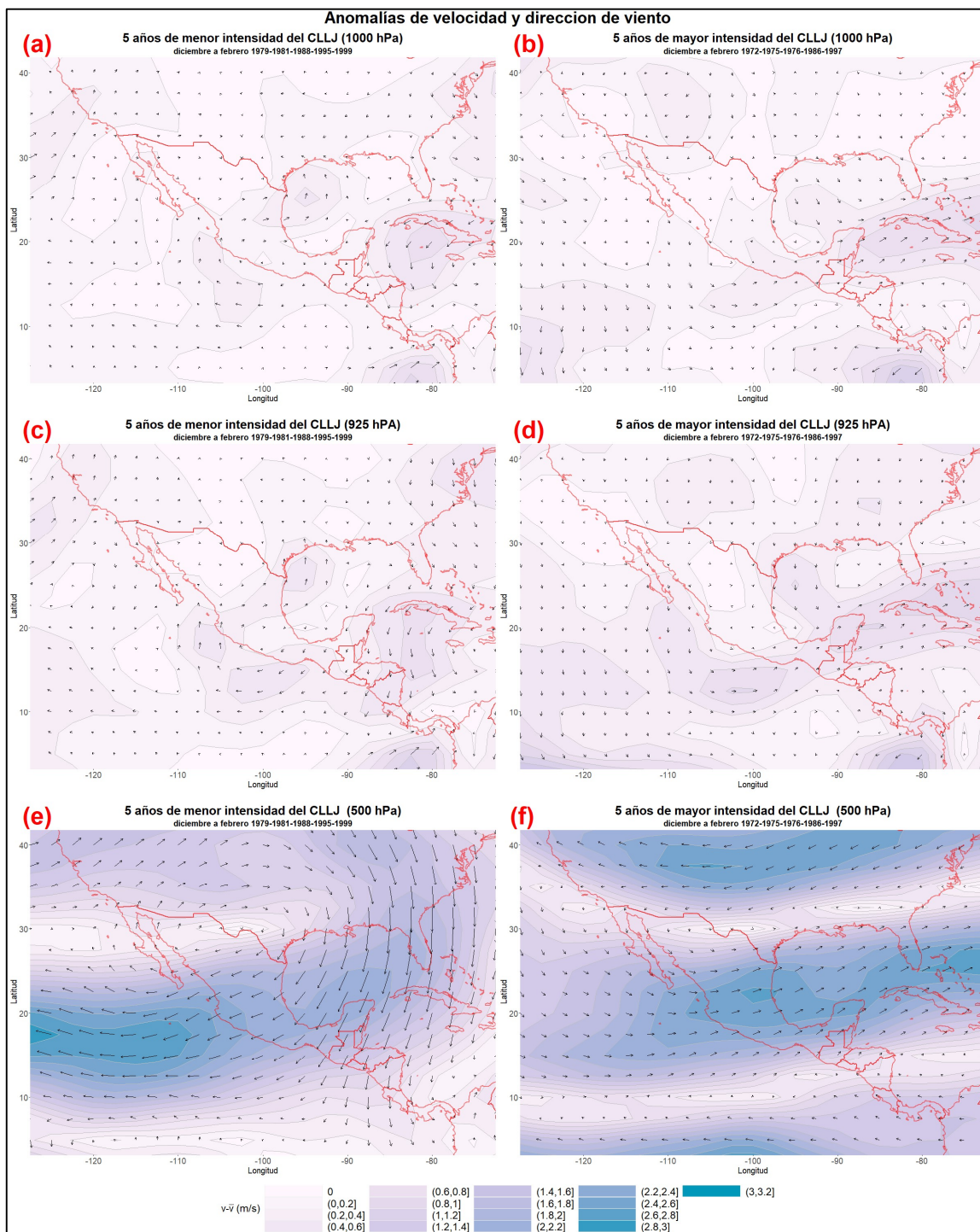


Figura C.13. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en DEF, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el CLLJ es mayor (a, c y e, respectivamente) y menor (b,d,f, respectivamente).

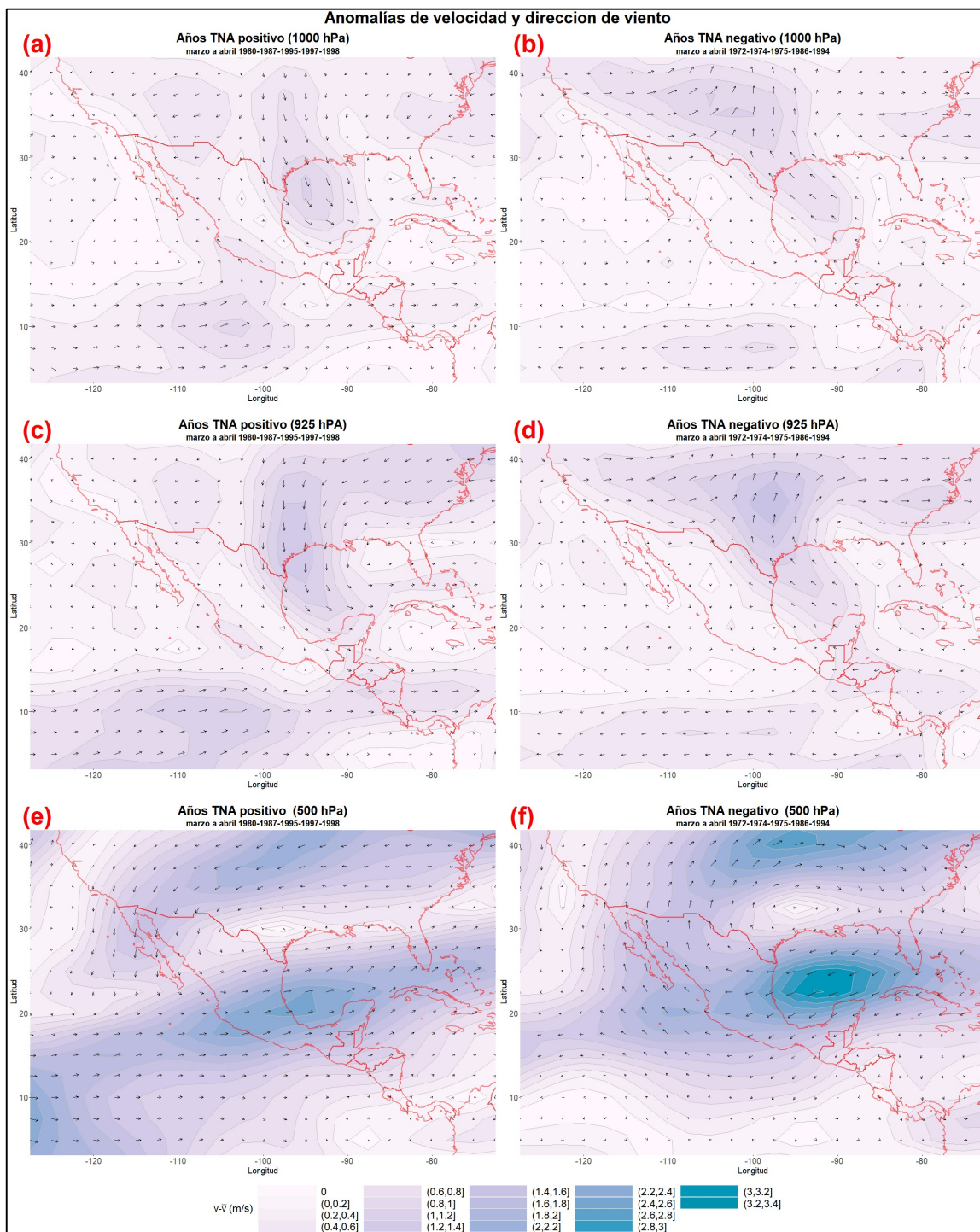


Figura C.14. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en MA, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el TNA es positivo (a, c e, respectivamente) y negativo (b,d,f, respectivamente), seleccionados con base en el ordenamiento descendente del valor medio anual de la señal del TNA en el periodo de análisis (1970-2000).

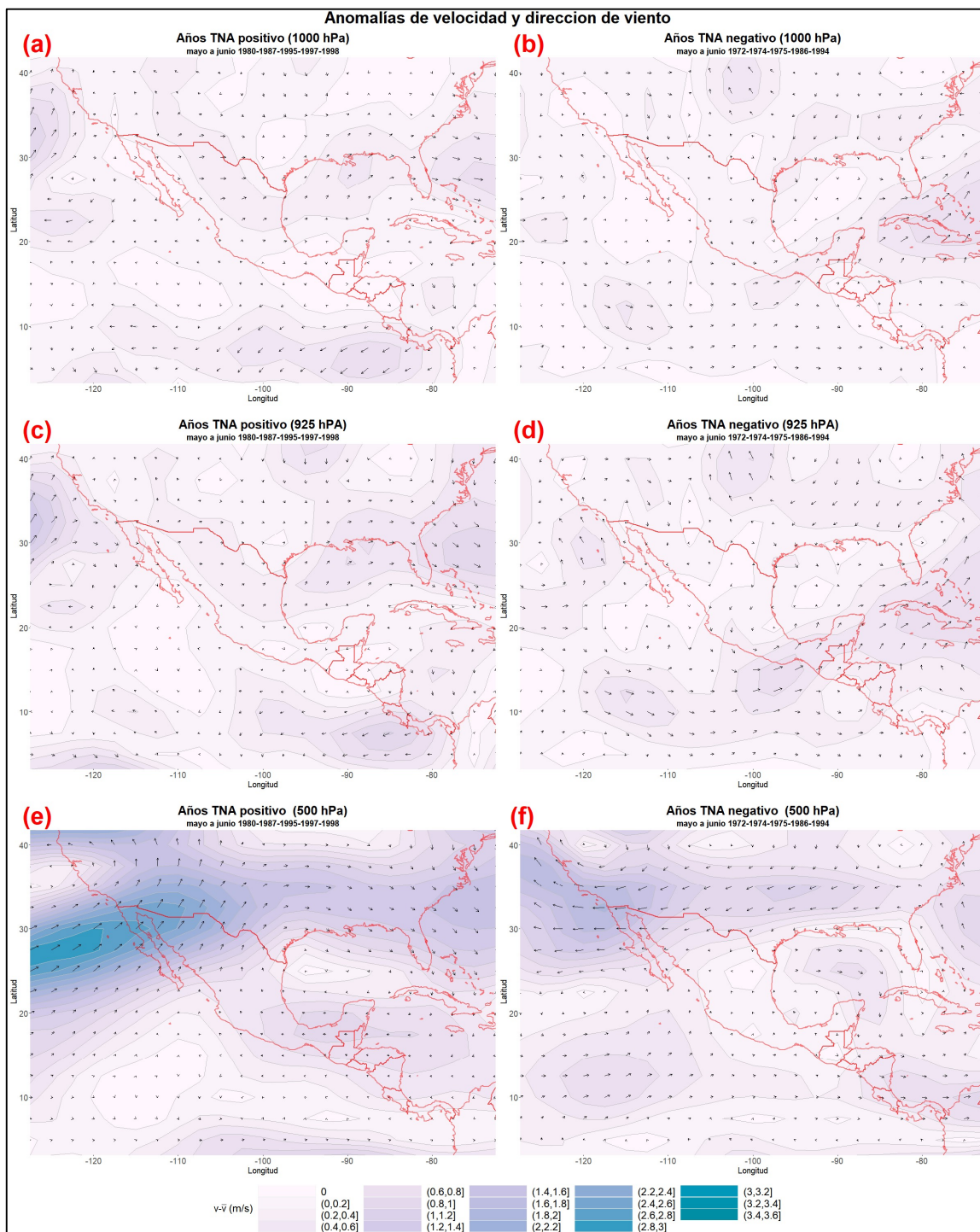


Figura C.15. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en MJ, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el TNA es positivo (a, c e e, respectivamente) y negativo (b,d,f, respectivamente), seleccionados con base en el ordenamiento descendente del valor medio anual de la señal del TNA en el periodo de análisis (1970-2000).

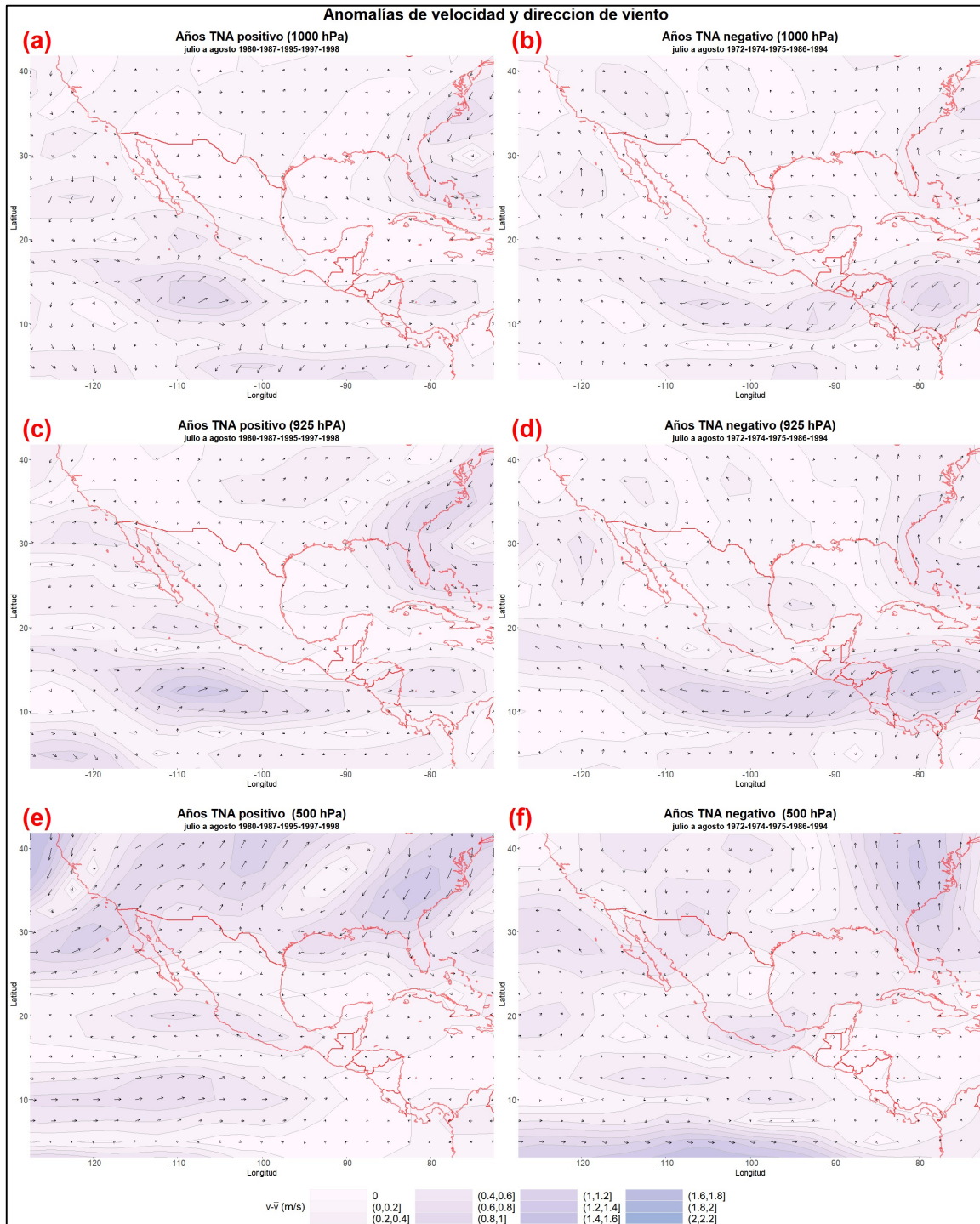


Figura C.16. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en JA, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el TNA es positivo (a, c e, respectivamente) y negativo (b,d,f, respectivamente), seleccionados con base en el ordenamiento descendente del valor medio anual de la señal del TNA en el periodo de análisis (1970-2000).

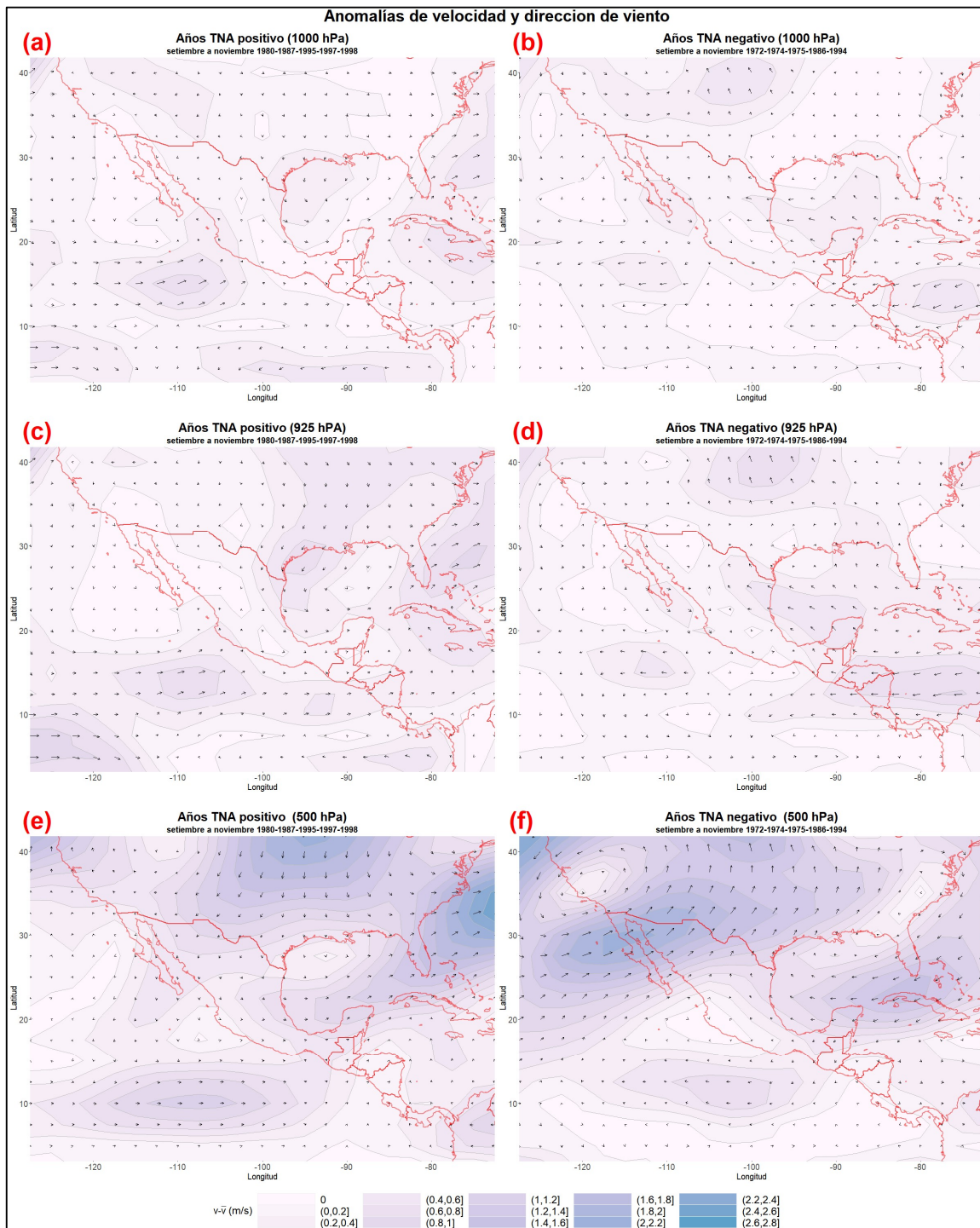


Figura C.17. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en SON, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el TNA es positivo (a, c y e, respectivamente) y negativo (b, d, f, respectivamente), seleccionados con base en el ordenamiento descendente del valor medio anual de la señal del TNA en el periodo de análisis (1970-2000).

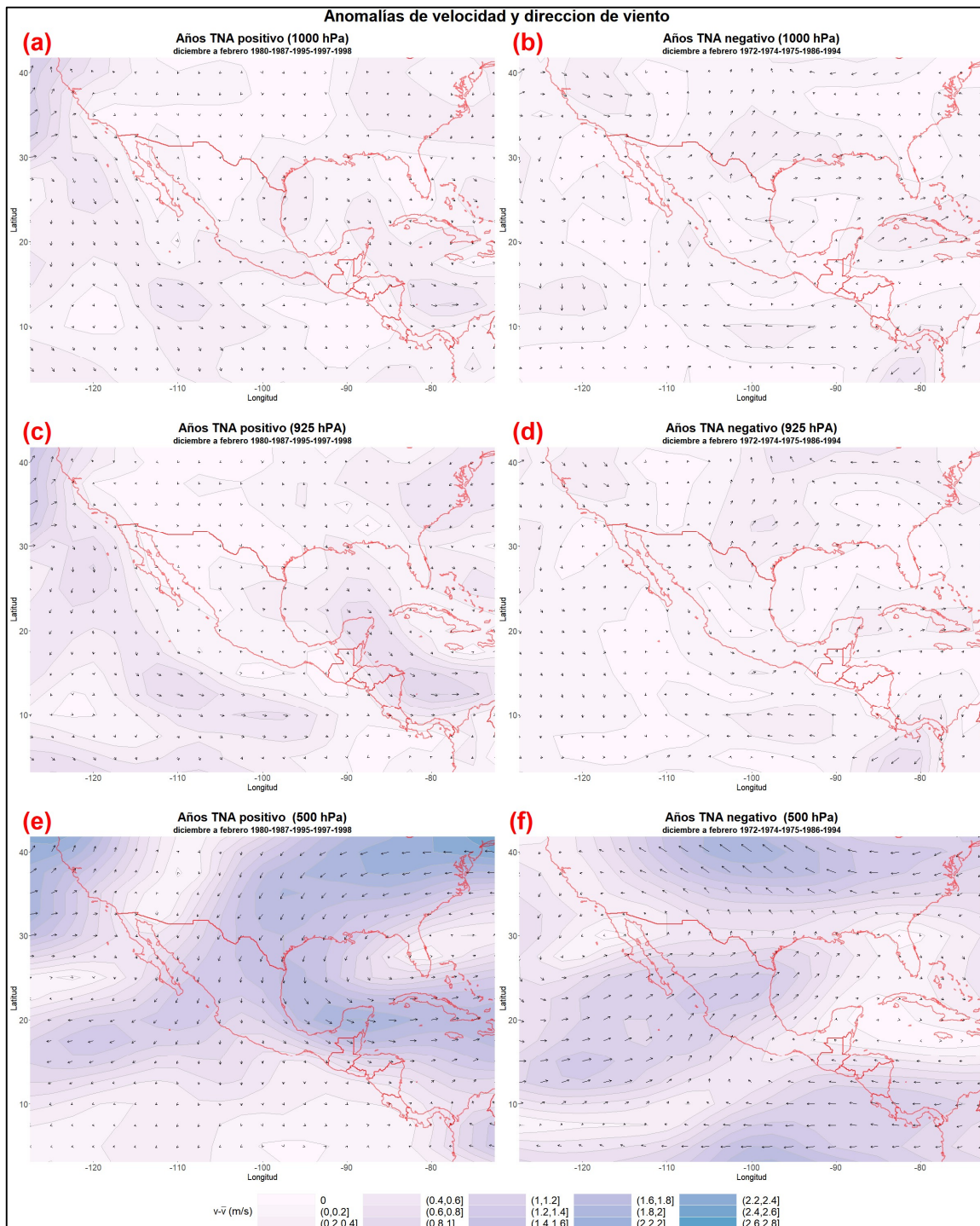


Figura C.18. Anomalías de velocidad y dirección de vientos en DEF, a 1000 hPa, 925 hPa y 500 hPa en los años en los que el TNA es positivo (a, c y e, respectivamente) y negativo (b, d, f, respectivamente), seleccionados con base en el ordenamiento descendente del valor medio anual de la señal del TNA en el periodo de análisis (1970-2000).

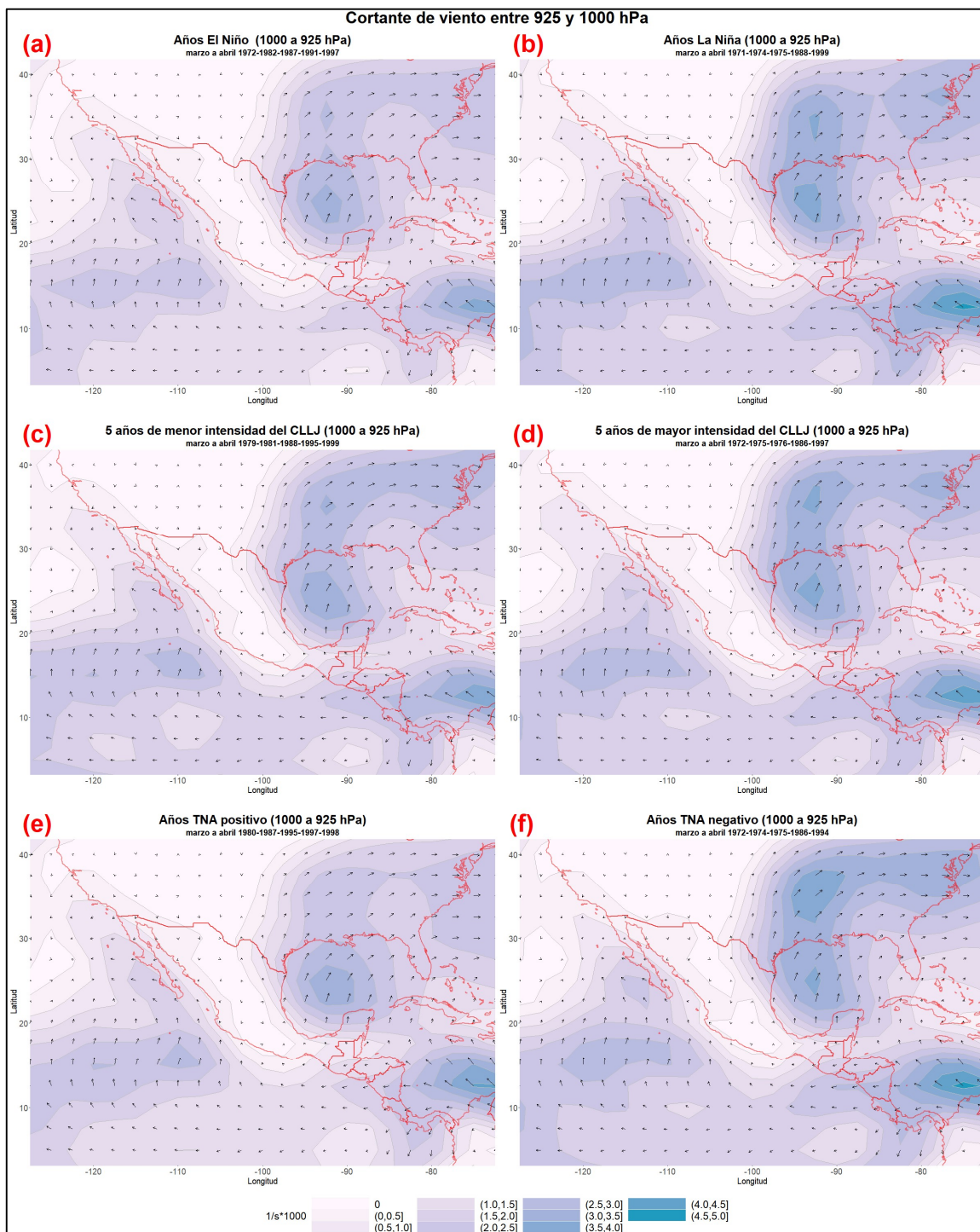


Figura C.19. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa en MA en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

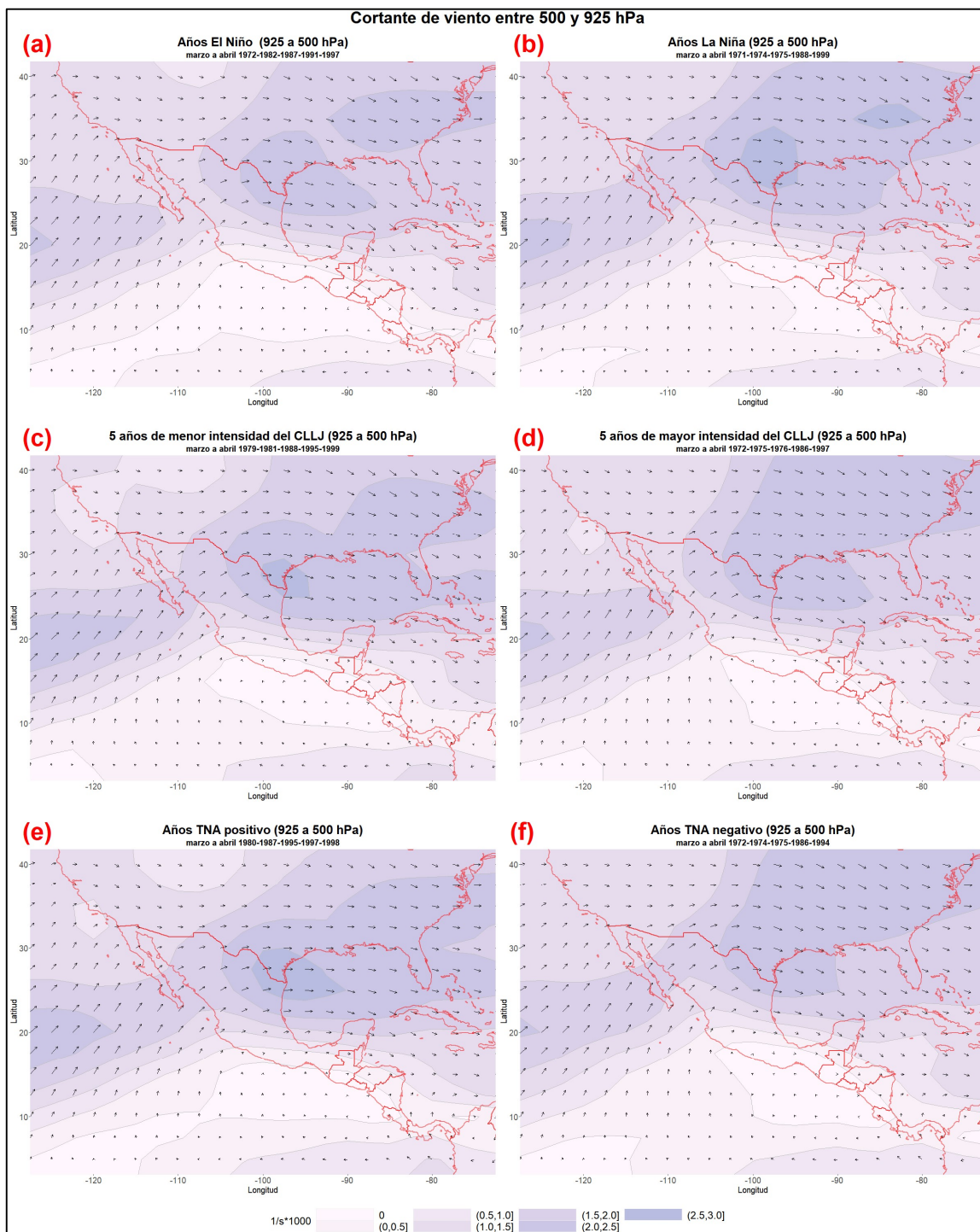


Figura C.20. Cortante de viento entre 925 y 500 hPa en MA en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

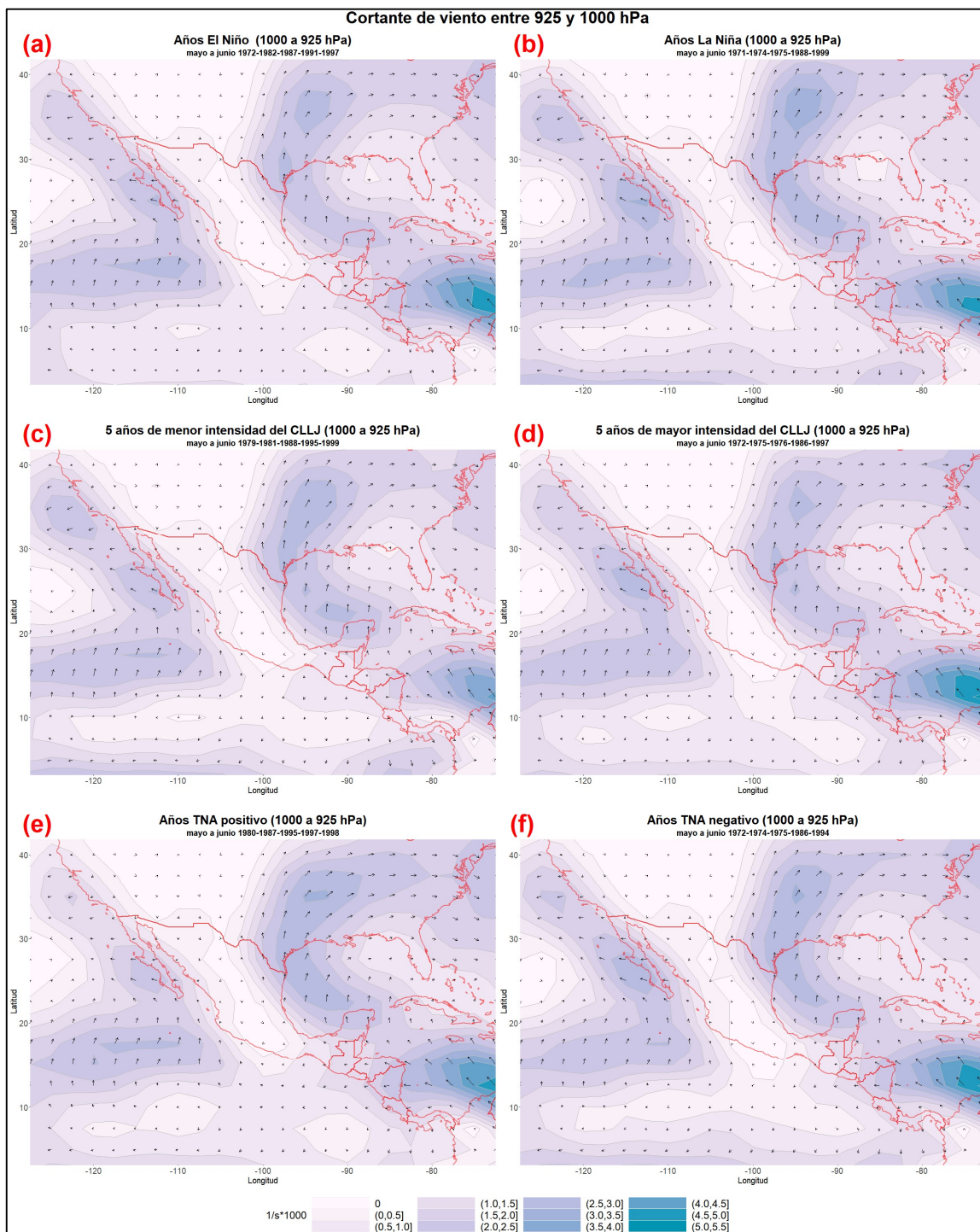


Figura C.21. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa en MJ en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

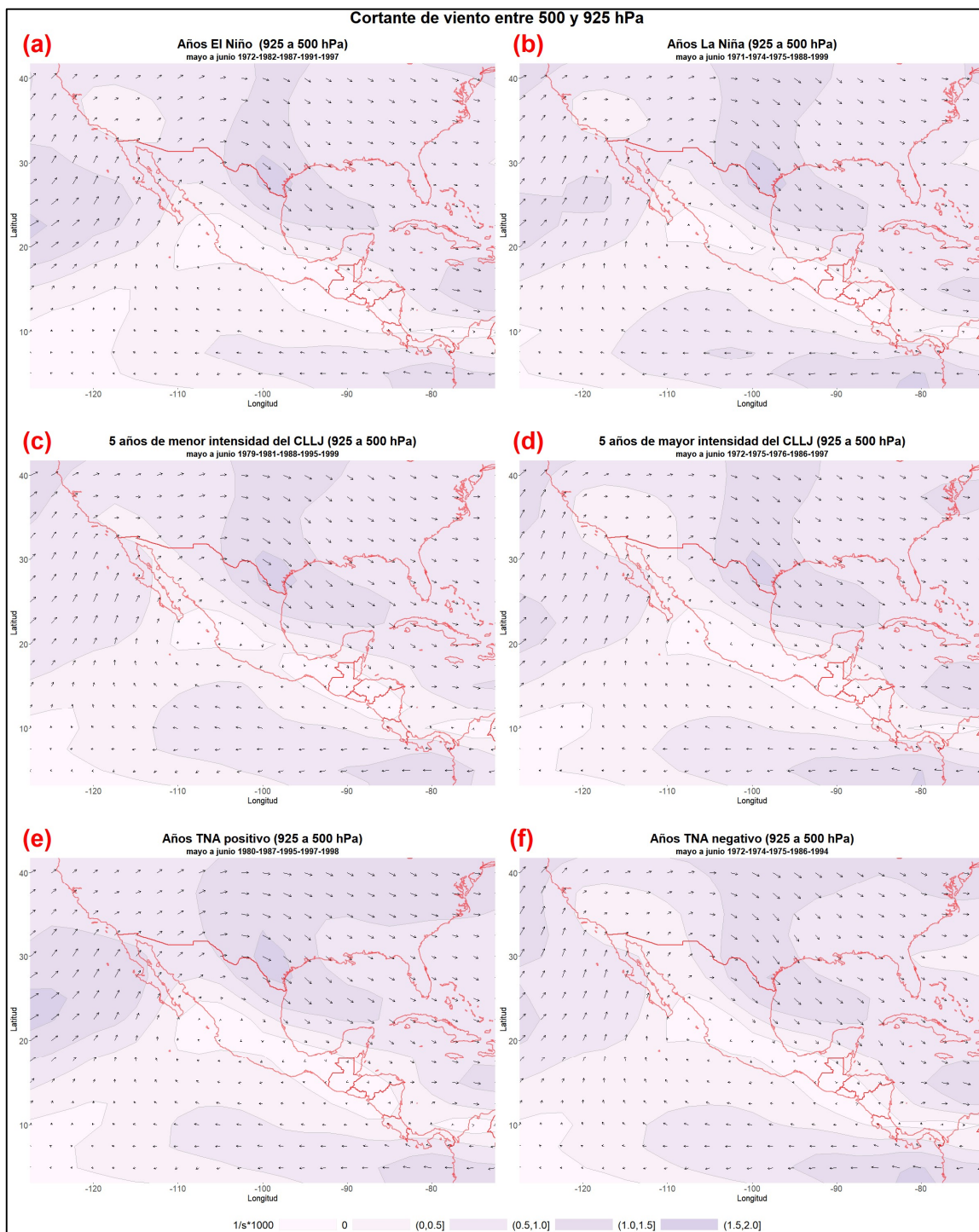


Figura C.22. Cortante de viento entre 925 y 500 hPa en MJ en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

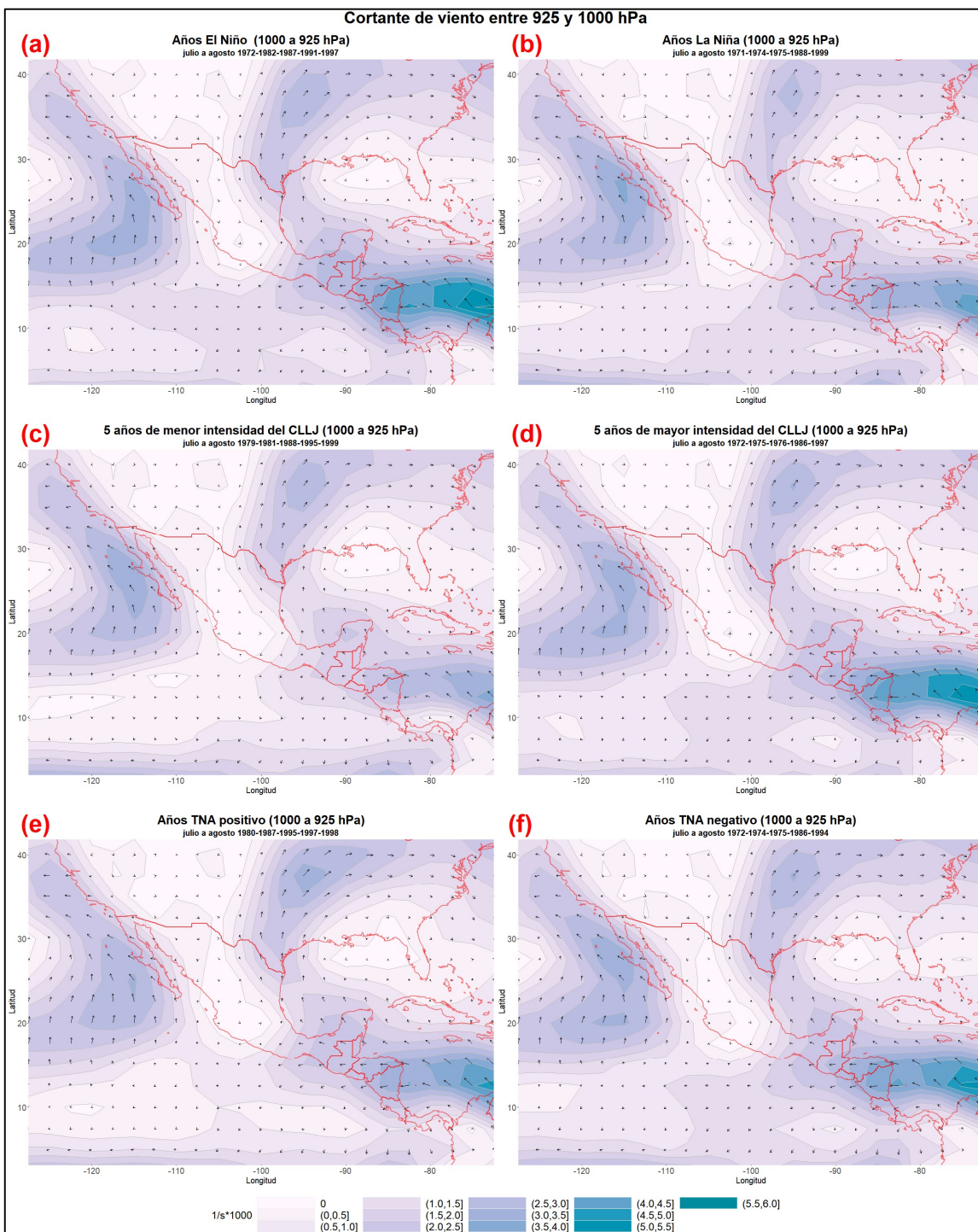


Figura C.23. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa en JA en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

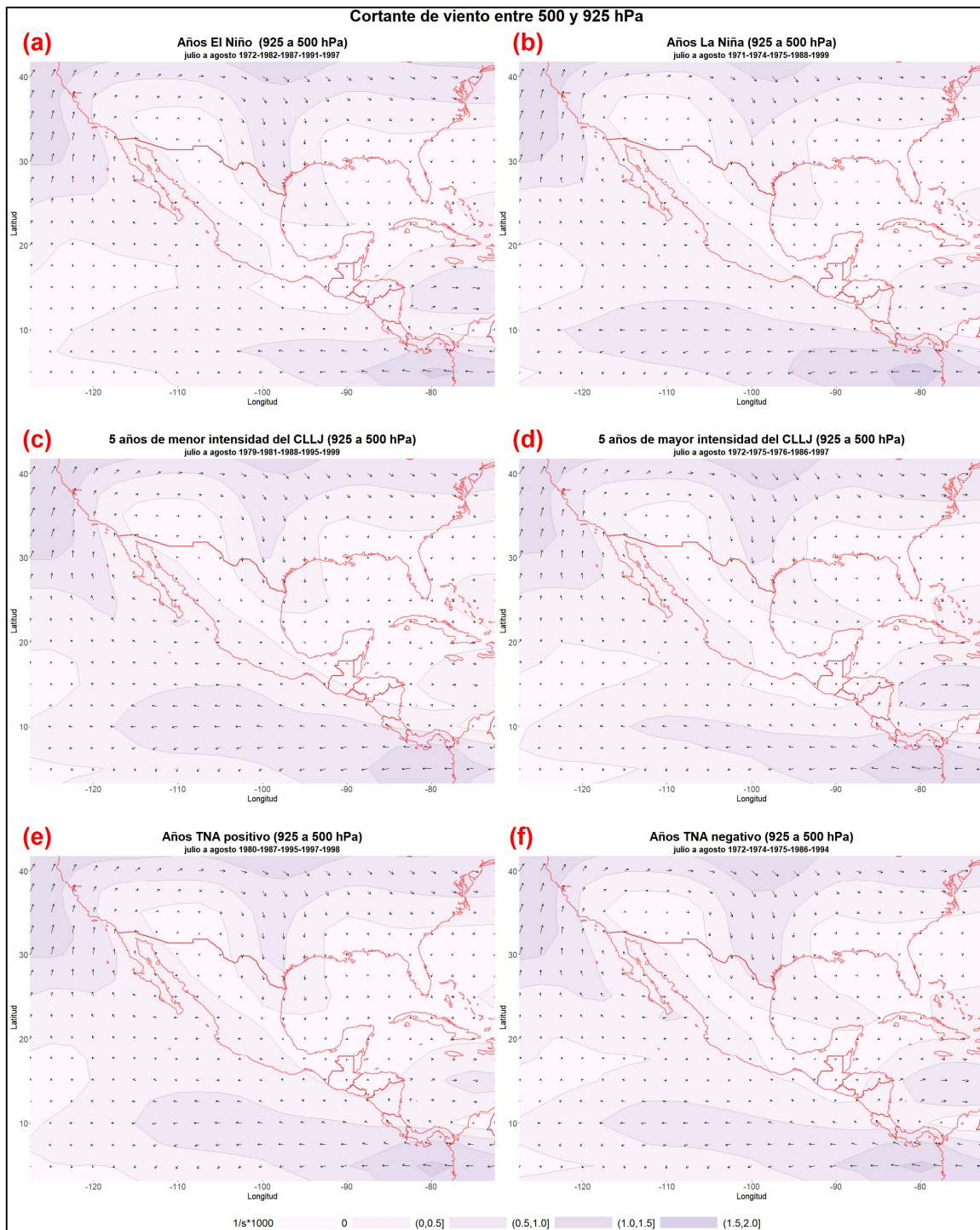


Figura C.24. Cortante de viento entre 925 y 500 hPa en JA en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

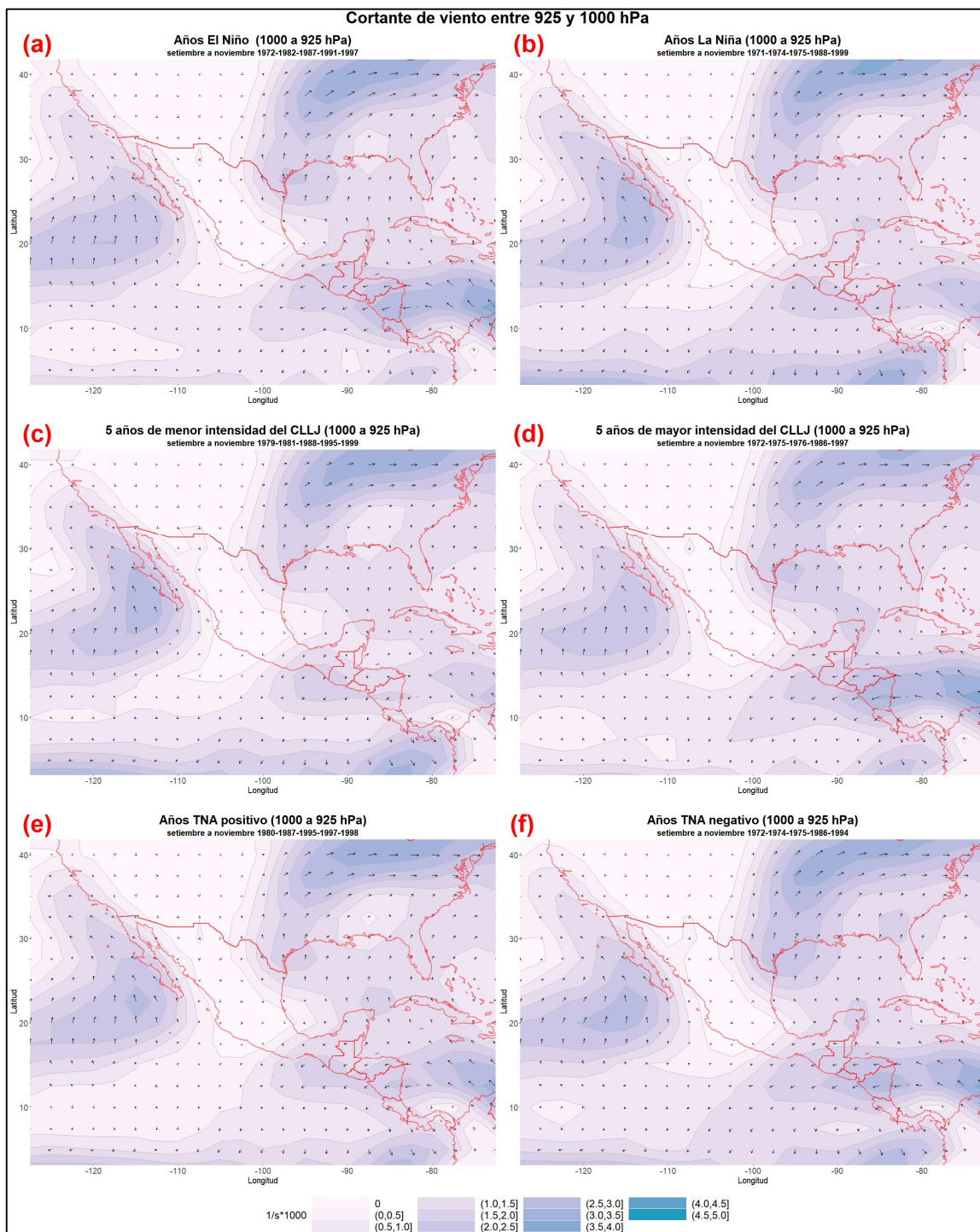


Figura C.25. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa en SON en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

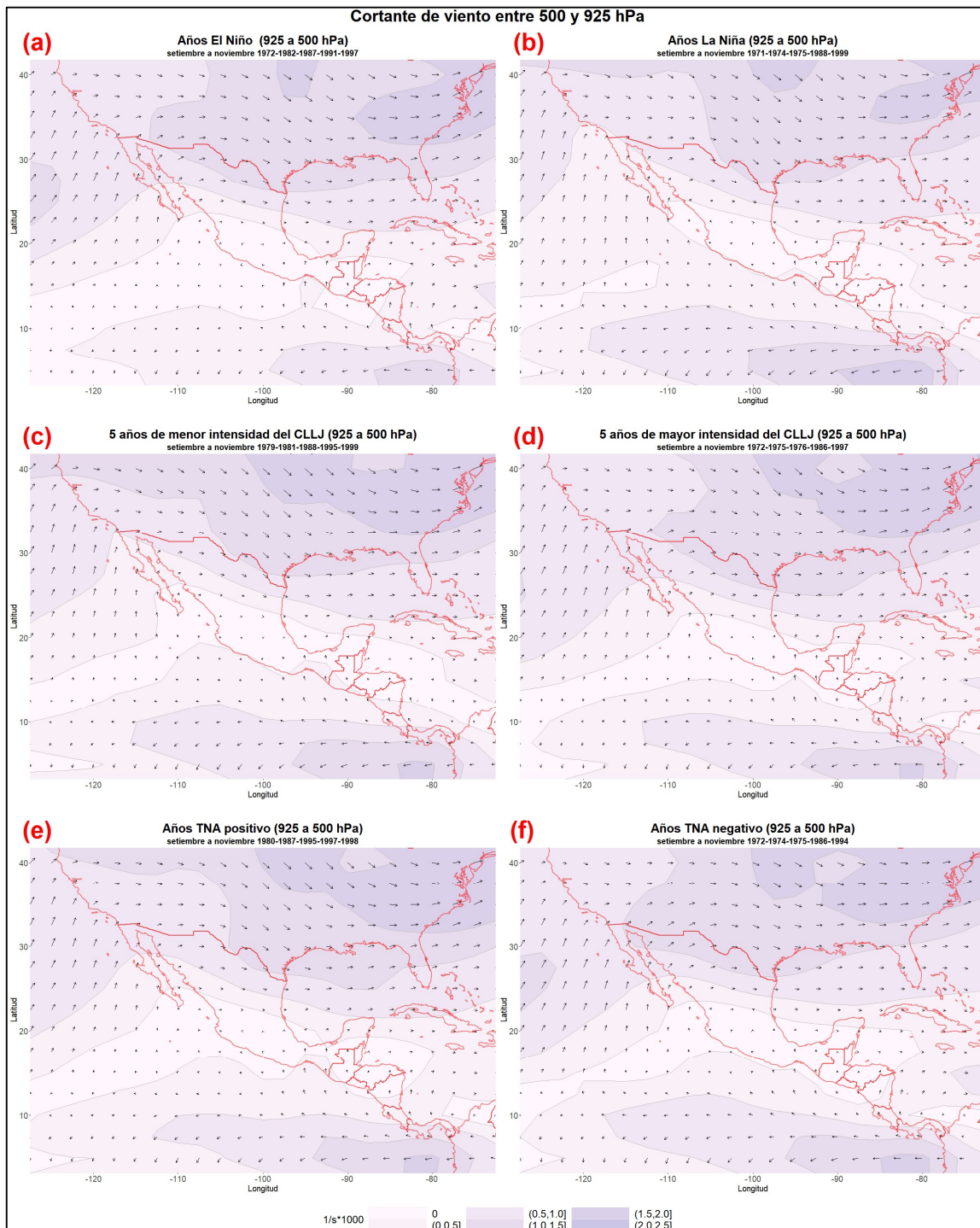


Figura C.26. Cortante de viento entre 925 y 500 hPa en SON en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

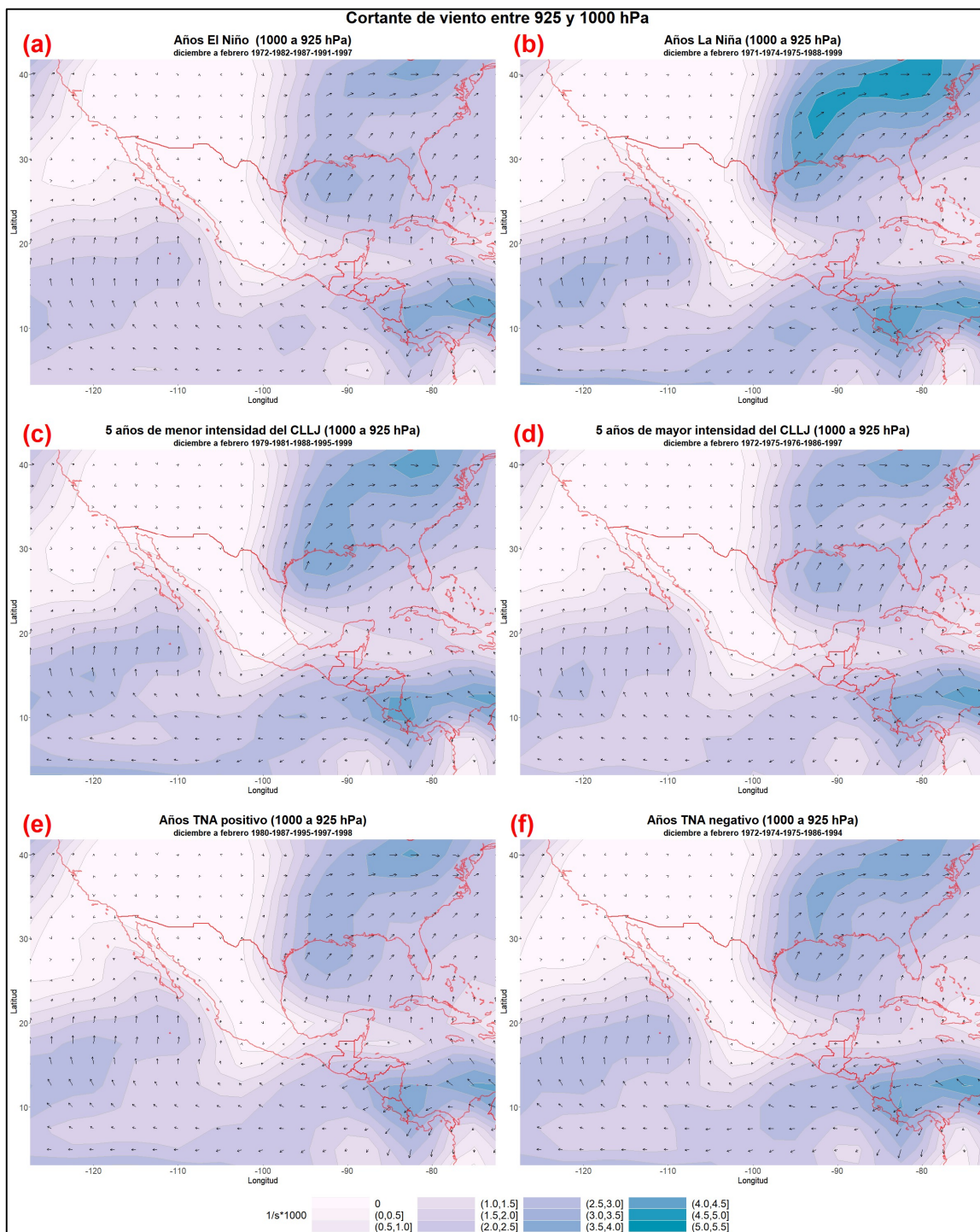


Figura C.27. Cortante de viento entre 1000 y 925 hPa en DEF en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

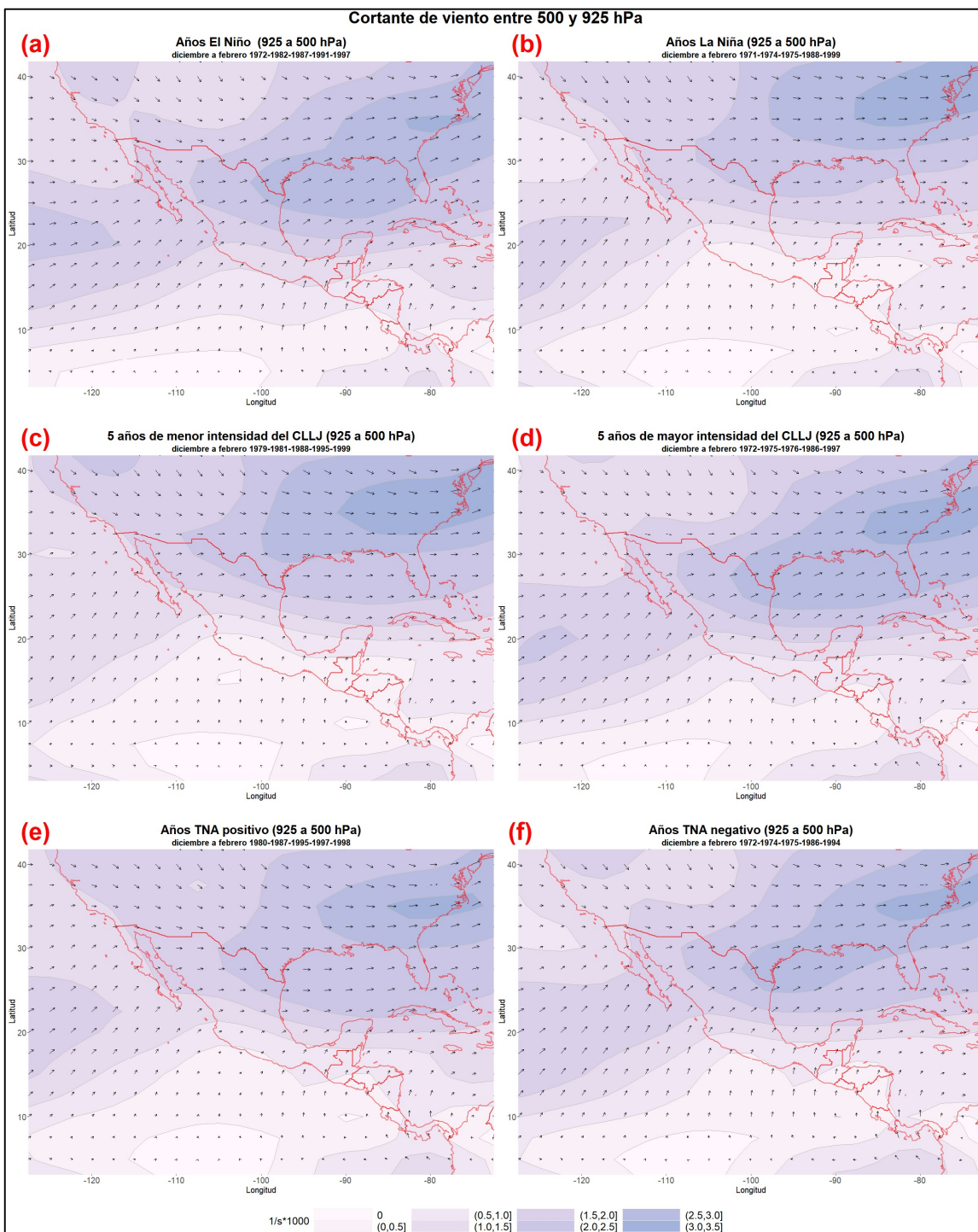


Figura C.28. Cortante de viento entre 925 y 500 hPa en DEF en los años El Niño (a) y La Niña (b); el CLLJ es mayor (c) y menor (d); el TNA es positivo (e) y negativo (f), con base en el ordenamiento descendente la señales medias anuales del Niño 3.4, CLLJ y TNA.

Anexo D:
Gráficos de onduletas de índices de precipitación

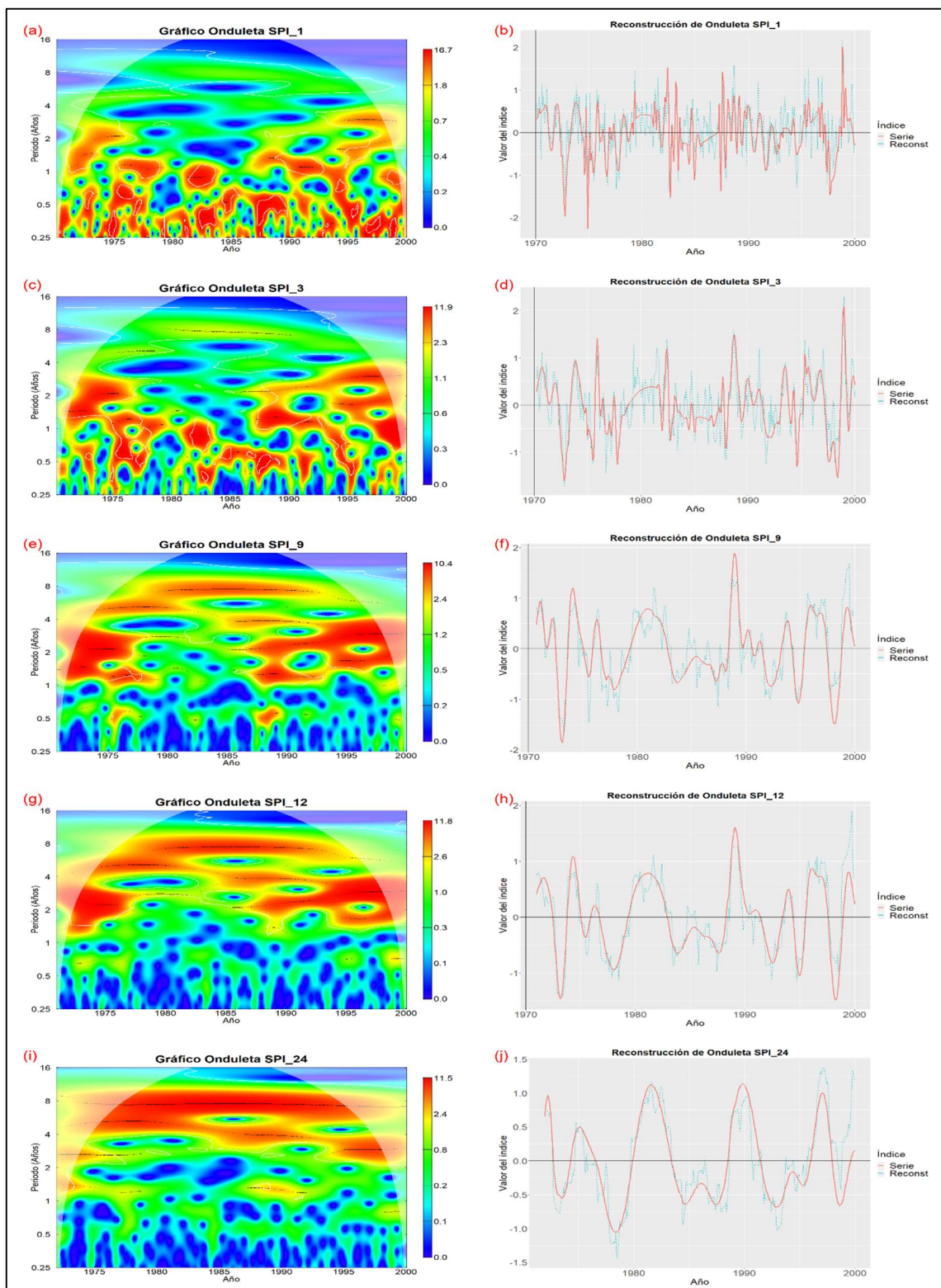


Figura D1. Gráficos de onduletas de los índices SPI 1, 3, 9, 12 y 24 (a, c, e, g, i) y de la reconstrucción de las series (b, d, f, h, j), en el periodo de análisis (1970 – 2000).

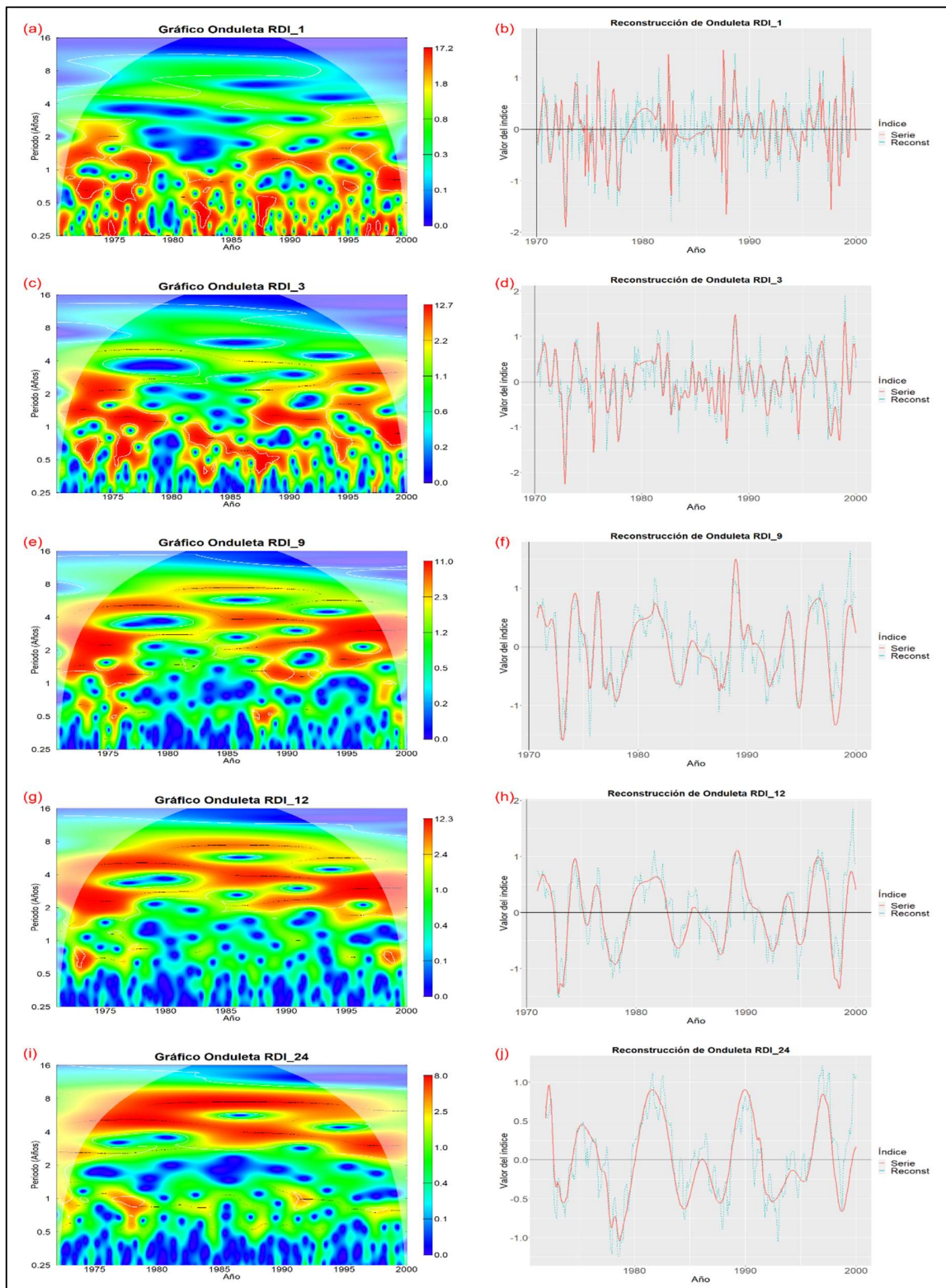


Figura D2. Gráficos de onduletas de los índices RDI 1, 3, 9, 12 y 24 (a, c, e, g, i) y de la reconstrucción de las series (b, d, f, h, j), en el periodo de análisis (1970 – 2000).

Anexo E:
ACF y PACF de las funciones de ponderación de correlaciones espaciales

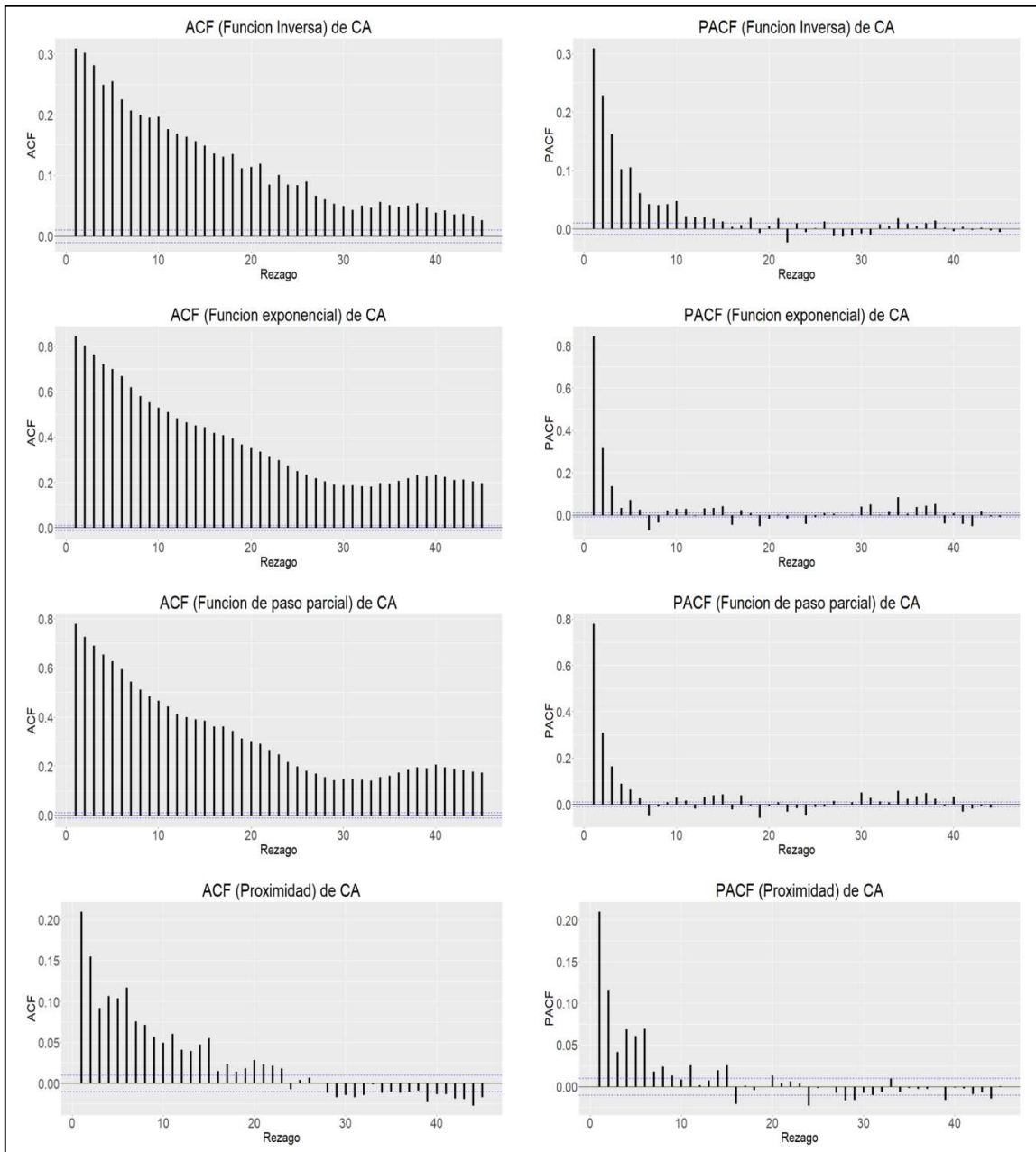


Figura E.1. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de AC en para las funciones de inversa, exponencial, de paso parcial y de proximidad.

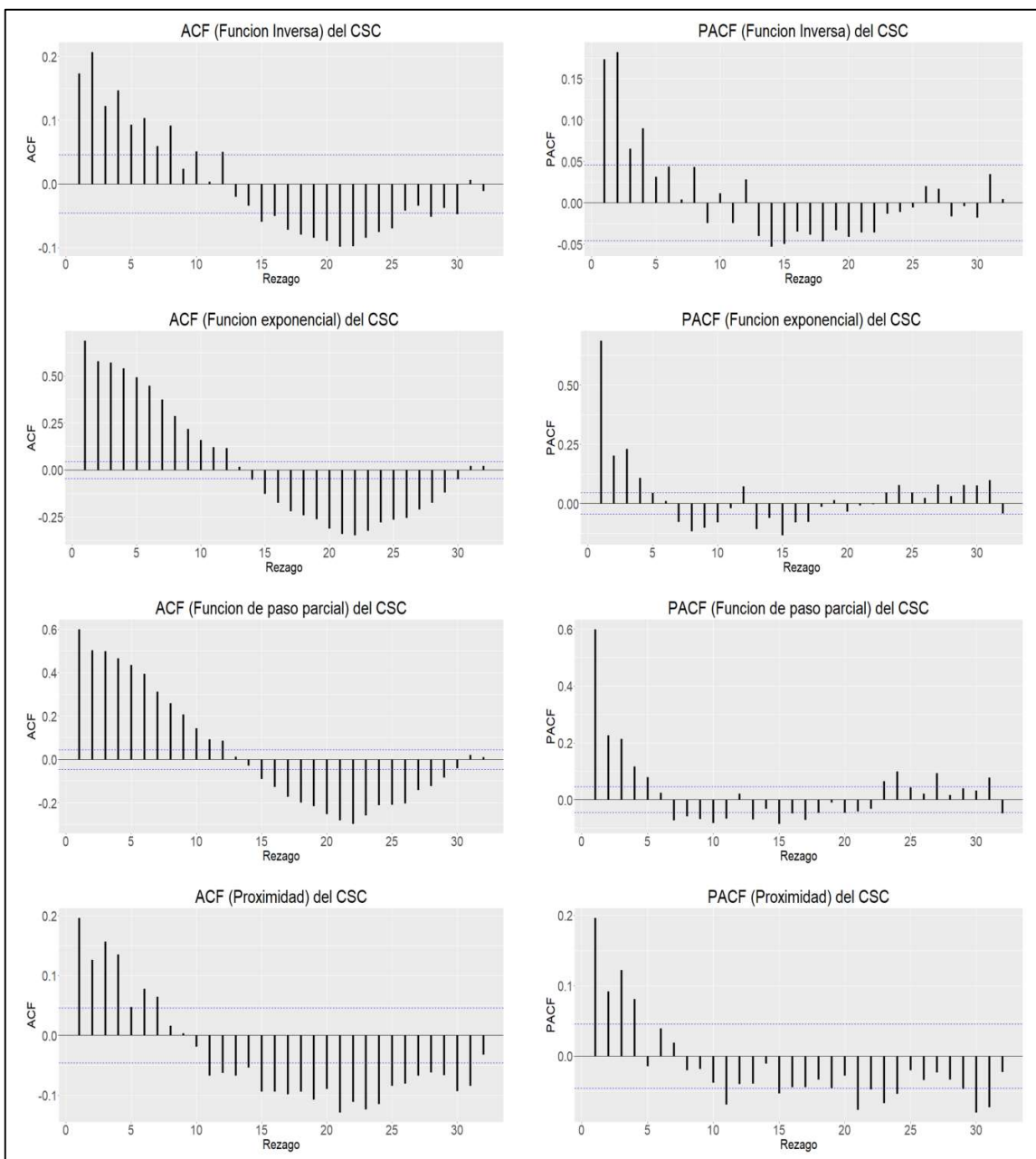


Figura E.2. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial del CSC en para las funciones de inversa, exponencial, de paso parcial y de proximidad.

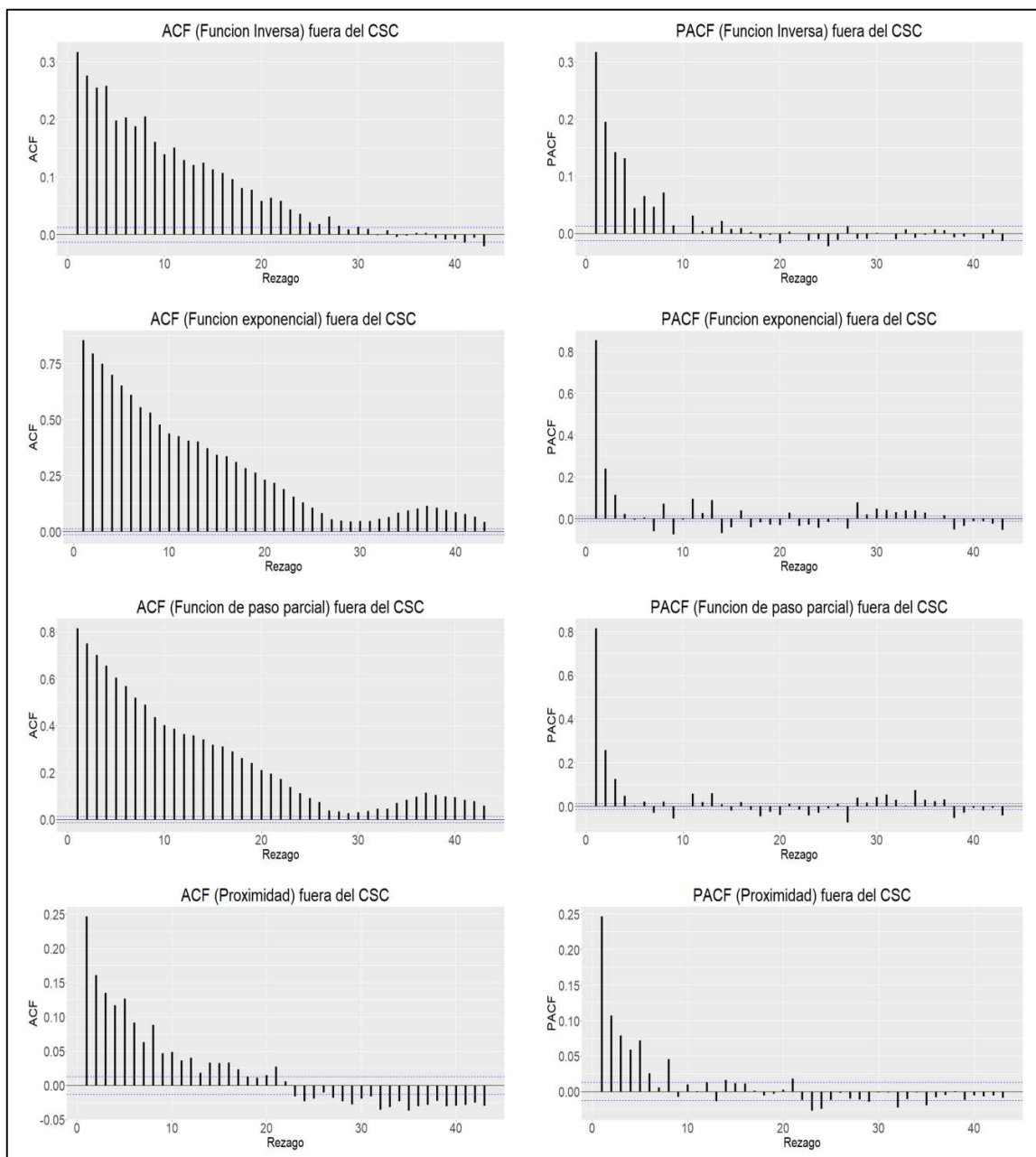


Figura E.3. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial fuera del CSC en para las funciones de inversa, exponencial, de paso parcial y de proximidad.

Anexo F:
**Correlación entre series de procesos atmosféricos y series de índices de
correlación espacial con rezagos 1 a 6 meses**

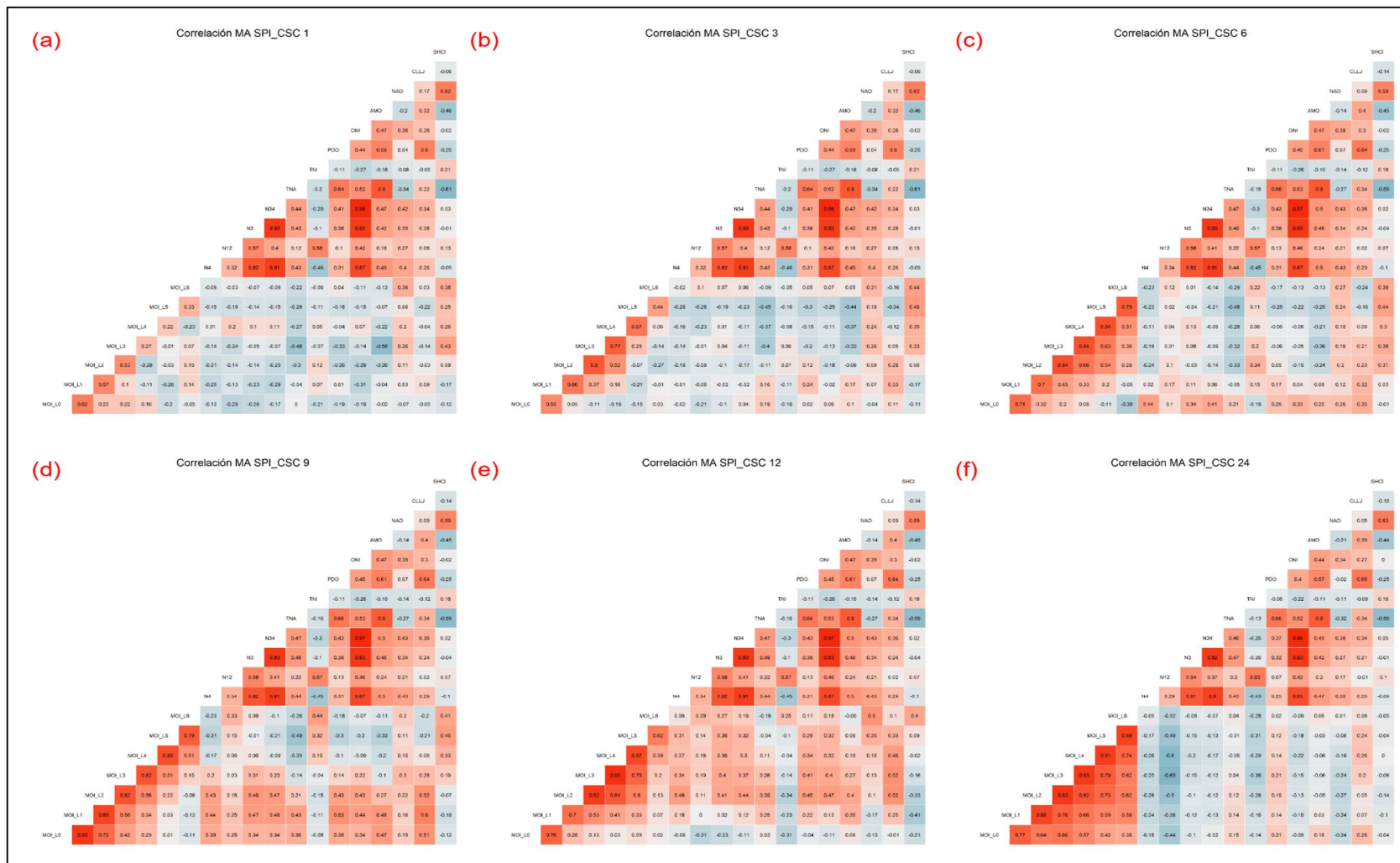


Figura F.1 Correlaciones espaciales entre las estaciones del CSC y los diversos procesos atmosféricos en los índices SPI considerados en MA

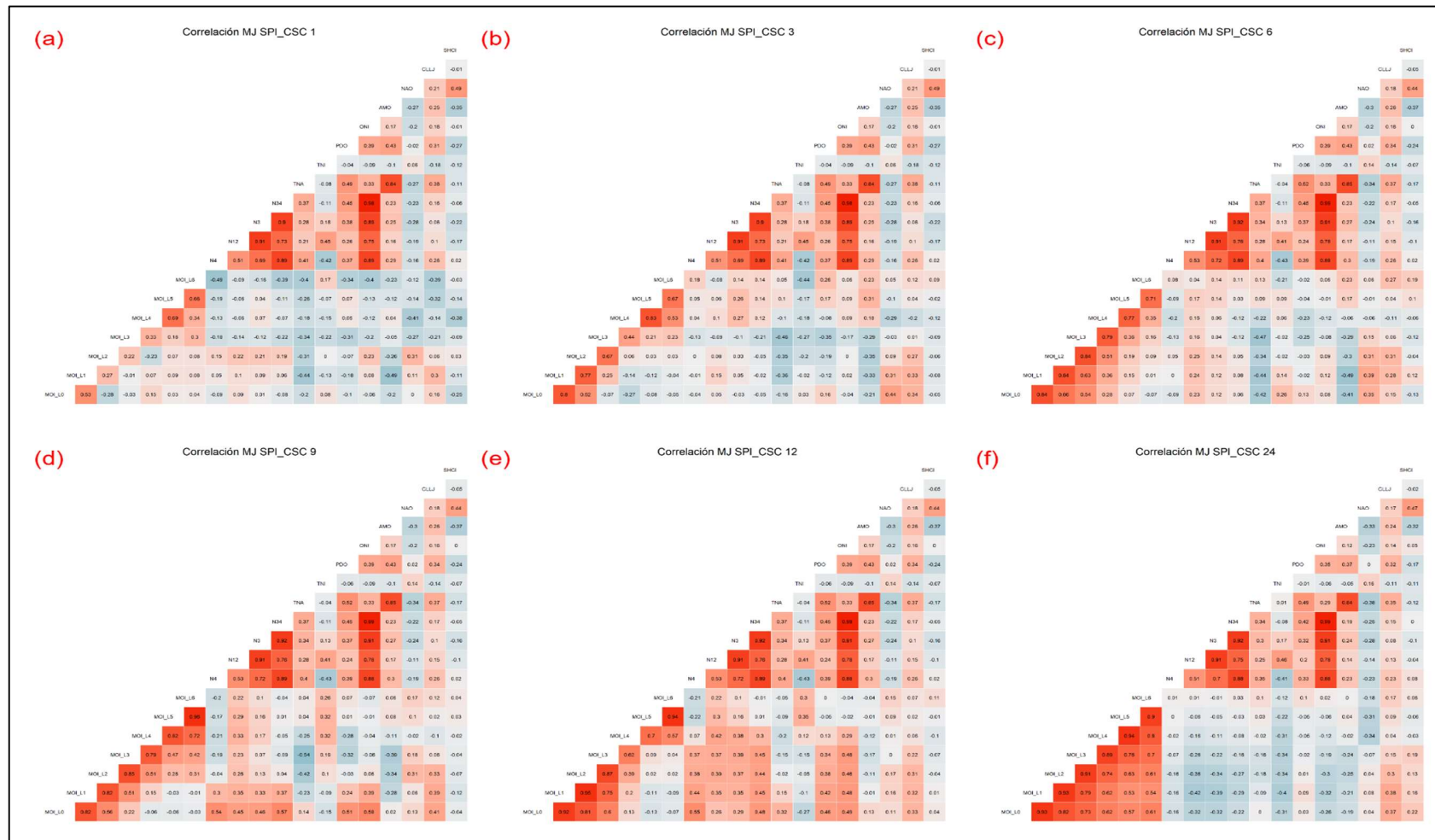


Figura F.2. Correlaciones espaciales entre las estaciones de CSC y los diversos procesos atmosféricos en los índices SPI considerados en MJ.

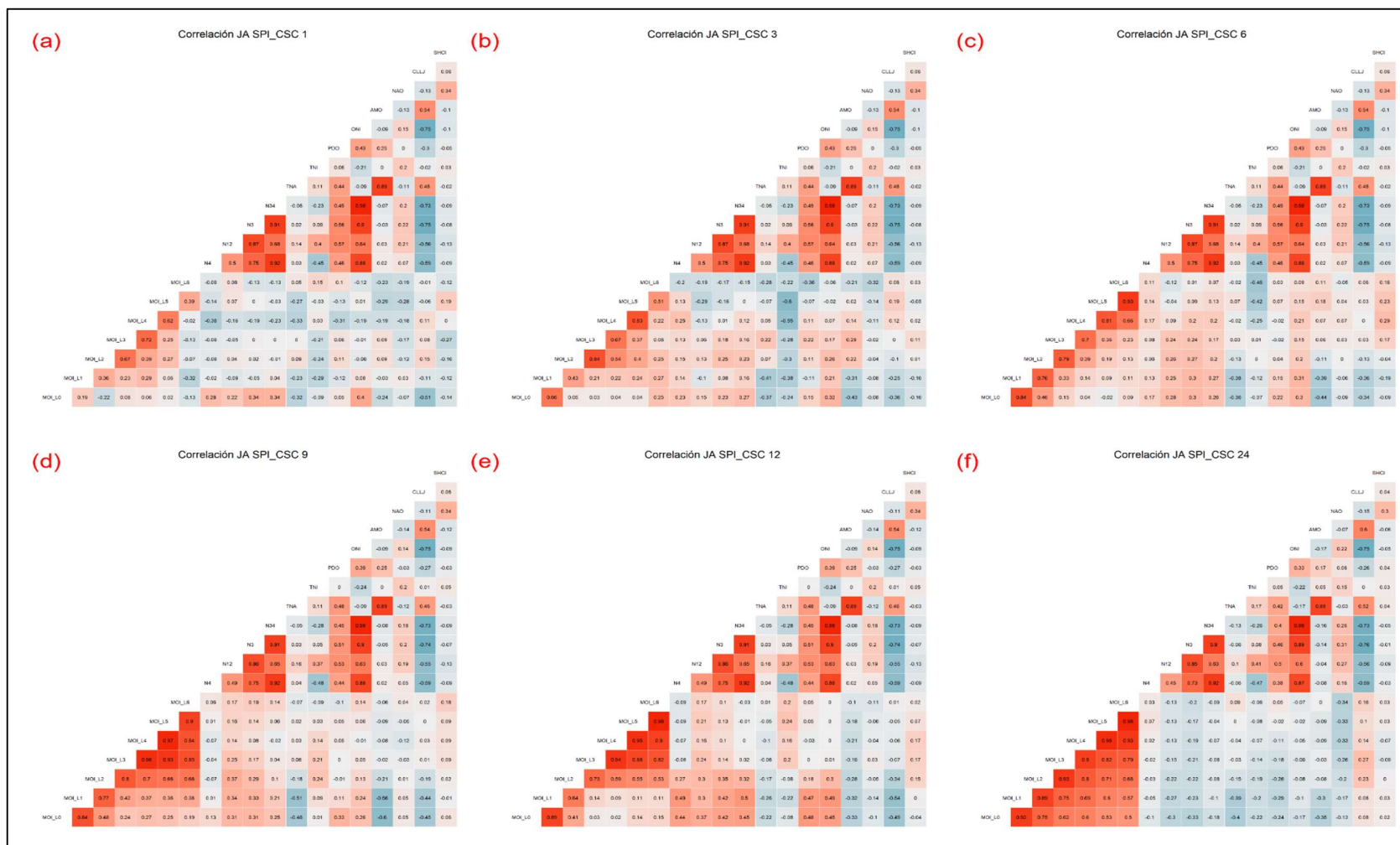


Figura F.3. Correlaciones espaciales entre las estaciones del CSC y los diversos procesos atmosféricos en los índices SPI considerados en JA.

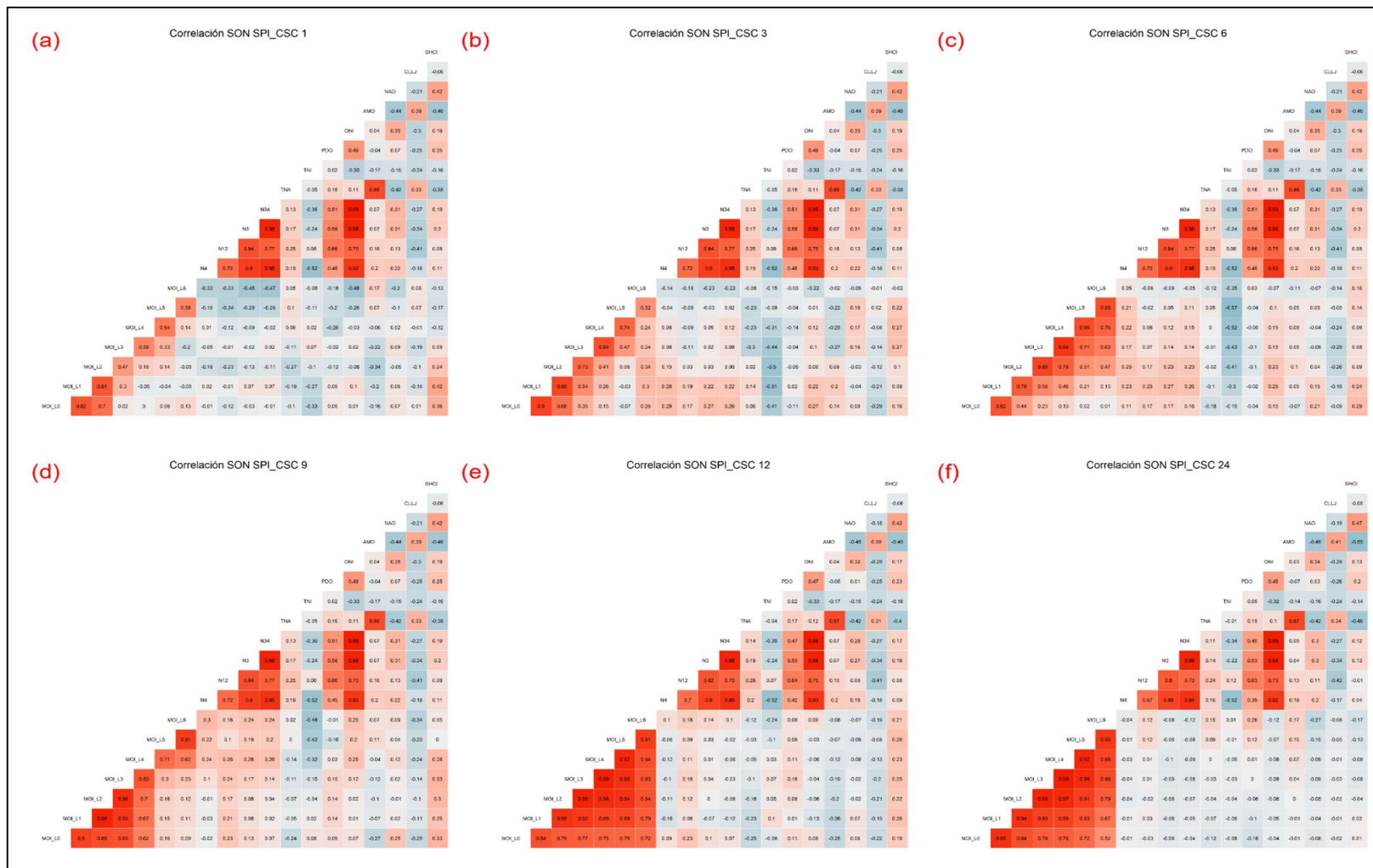


Figura F.4. Correlaciones espaciales entre las estaciones del CSC y los diversos procesos atmosféricos en los índices SPI considerados en SON.

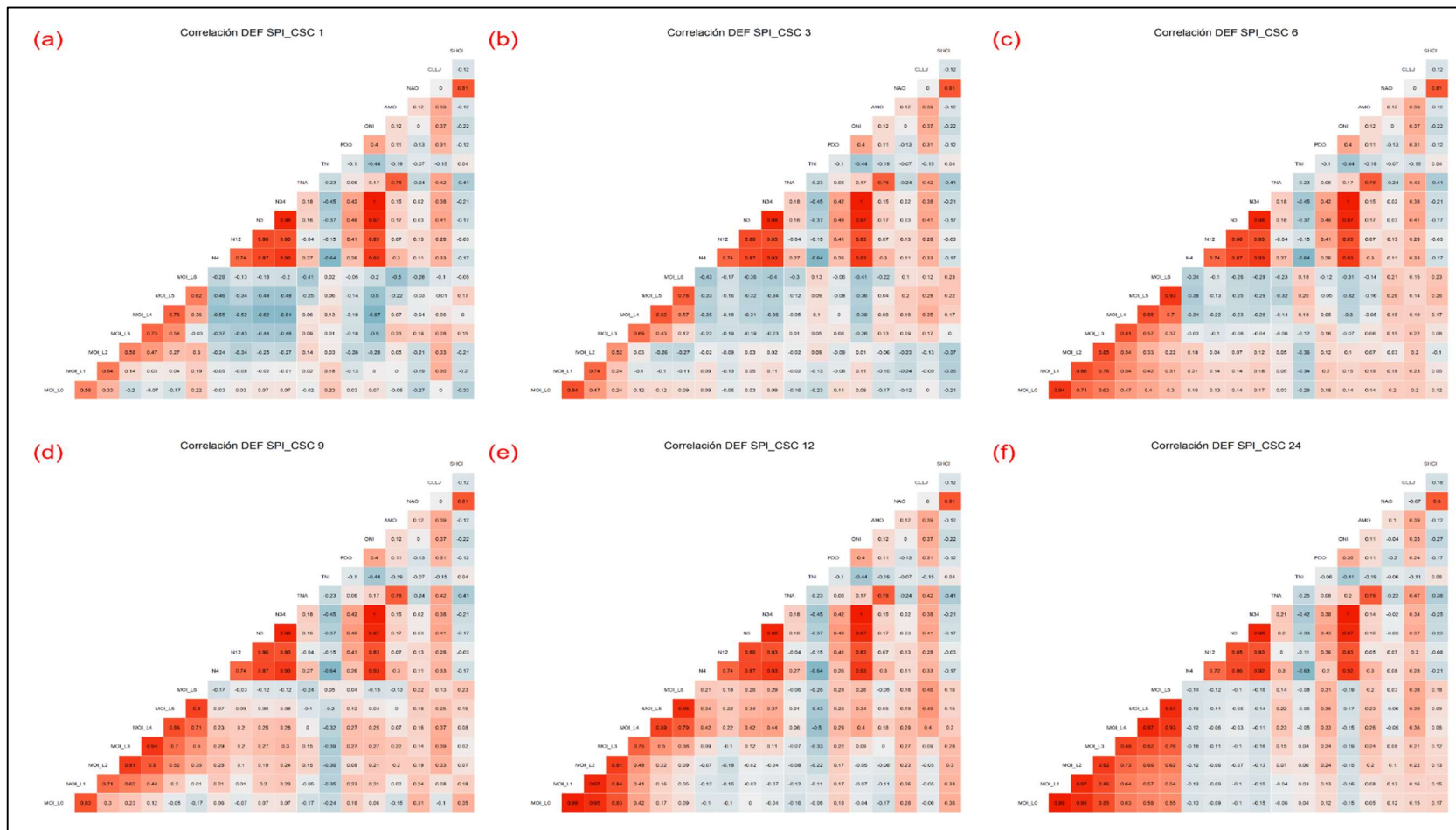


Figura F.5. Correlaciones espaciales entre las estaciones del CSC y los diversos procesos atmosféricos en los índices SPI considerados en MA