

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN PACÍFICA DEL NORTE DE SURAMÉRICA: ROL DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS

Documento de Tesis presentado al programa de
Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
para optar por el título de Magister

por

Juan Sebastian Terranova Soto

Director, Carlos David Hoyos Ortíz

Codirector, Olga Lucía Baquero Montoya

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente

Facultad de Ingeniería

Universidad del Valle

Sede Cali

Agosto 2023

A Soraida, Silvana y Stephania

Por y para ustedes

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por apoyarme desde el inicio en este proceso y alentarme a seguir a pesar de las dificultades. A mi hermana y mi sobrina por su motivación constante.

A quienes en su momento hicieron parte de este camino apoyándome, compartiendo sus puntos de vista y motivándome a seguir.

Agradezco a los profesores Carlos David y Olga Lucía, por brindarme la confianza y apoyar esta investigación. Sin su acompañamiento no hubiese sido posible alcanzar esta meta.

A mis compañeros de la maestría GIRH, por todo lo vivido durante esta grandiosa etapa y la buena relación que construimos.

TABLA DE CONTENIDO

Pag.

ÍNDICE DE FIGURAS	5
RESUMEN.....	10
ABREVIATURAS	13
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Variabilidad Estacional	2
1.2 Variabilidad Intraestacional.....	4
1.3 Problema de investigación	6
1.4 Objetivos.....	8
2. BASES DE DATOS Y METODOLOGÍA	9
2.1 Bases de Datos	9
2.1.1 Precipitación	9
2.1.2 Temperatura Superficial del Mar (TSM)	9
2.1.3 Radiación de Onda Larga Saliente (ROL).....	10
2.1.4 Potencial de Velocidad (PV)	10
2.1.5 Índices de Actividad de la MJO	10
2.1.6 Variables Atmosféricas del Reanálisis ERA-Interim	11
2.2 Metodología	11
3. CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN	16
3.1 Variabilidad Estacional	16
3.2 Variabilidad Intraestacional.....	19
4. INCIDENCIA DE LA MJO EN LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN	21
4.1 Relación entre la Variabilidad Intraestacional de la Precipitación y la MJO	21
4.1.1 Correlación entre índices de actividad de la MJO y la Precipitación	21
4.1.2 Función de distribución de las series de tiempo de Precipitación durante fases de la MJO.....	24
4.2 Teleconexiones entre la MJO y la Precipitación.....	25
4.2.1 Verano Boreal (JJA)	25
4.2.2 Otoño Boreal (SON)	29
4.2.3 Invierno Boreal (DEF)	32

4.2.4	Primavera Boreal (MAM)	35
5.	ROL DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN OCÉANO - CONTINENTE- ATMÓSFERA (OLA) EN LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN	38
5.1	Estimación de la incidencia en la Precipitación	39
5.1.1	Verano Boreal.....	39
5.1.2	Otoño Boreal (SON)	44
5.1.3	Invierno Boreal	48
5.1.4	Primavera Boreal	53
6.	MECANISMO MONZÓNICO COMO MODULADOR DE LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN	57
6.1	Verano Boreal	57
6.2	Otoño Boreal	60
6.3	Invierno Boreal	63
6.4	Primavera Boreal	66
7.	CONCLUSIONES	69
8.	RECOMENDACIONES	71

Índice de figuras

1.1	Media anual de la Precipitación (Jun,2000 - May,2019). Tomado de IMERG Nasa https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-06/grand_average_climatology2_black_print.jpg	1
1.2	Media anual de la Temperatura Superficial del Mar (1971-2000). Tomado de CPC NOOA https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/realtime/clim/annual/sst/mean_pentad_sst.71_00.total.gif	2
1.3	Media trimestral de la precipitación en la región pacífica del norte de Suramérica (1998-2015).....	3
1.4	Media trimestral de la temperatura superficial del mar en la región pacífica del norte de Suramérica (1982-2015). Isoterma (línea negra) en 26°C y 29°C.....	4
1.5	Ilustración de la MJO. Tomado de https://www.climate.gov/sites/default/files/MJO_610_0.png	5
1.6	Series de tiempo, a escala diaria, de la precipitación en Colombia y Ecuador	7
2.1	Índices de actividad de la MJO: En la parte superior se encuentra el Índice de OLR Filtrada entre 25 - 80 días sobre el Océano Índico (10 °N - 10°S, 70°E - 90°E) durante 1991; las líneas verdes identifican las fechas de eventos con magnitudes mínimas de OLR mayores a una desviación estándar. En la parte inferior están los índices de actividad de la MJO basados en EOF: FMO (Azul), VPM (Naranja), RMM(Verde) y MK02 (Rojo). Si la fecha de un evento seleccionado corresponde a un evento de con magnitud mayor a una desviación estandar, durante los 10 días siguientes, en al menos dos de los cuatro índices, será considerado como un evento de MJO	13

2.2	Delimitación de zona para estimación de índice de precipitación a escala intraestacional para la Costa Pacífica de Colombia (3.125 °N - 7.125°N y 80.375°W - 76.75°W)	14
2.3	Índice de precipitación, filtrada entre 10 y 90 días, para la Costa Pacífica de Colombia, entre 3.125 °N - 7.125°N y 80.375°W - 76.75°W	15
3.1	Ciclo anual de la precipitación en la región Pacífica de Colombia y Ecuador	17
3.2	Media trimestral de la función másica de corriente meridional (1948-2020) entre 77.5°O y 85°O (Contornos) y la ubicación de la ZCIT (Líneas continuas - valores positivos- y discontinuas -valores negativos-)	18
3.3	Transformada de Onditas a series de tiempo de estaciones ubicadas en la costa pacífica de Colombia y Ecuador.....	19
4.1	Scatterplots entre índices de actividad de la MJO y series de tiempo de la precipitación en la zona de estudio.....	21
4.1	Scatterplots entre índices de actividad de la MJO y series de tiempo de la precipitación en la zona de estudio.....	22
4.2	Correlación de Spearman entre índices de actividad de la MJO y series de tiempo de la precipitación en la zona de trabajo	23
4.3	Función de Distribución de las Series de Tiempo	25
4.4	Evolución de compuestos de la OLR durante el verano boreal (JJA) de -30 a 25 días basado en 49 eventos.....	26
4.5	Similar a la Figura 4.4 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante verano boreal (JJA)	27
4.6	Similar a la Figura 4.4 pero para Presión a Nivel del Mar durante verano boreal (JJA)	28
4.7	Evolución de compuestos de la OLR durante el otoño boreal (SON) de -30 a 25 días basado en 38 eventos.....	29

4.8	Similar a la Figura 4.7 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante otoño boreal (SON)	30
4.9	Similar a la Figura 4.10 pero para Presión a Nivel del Mar durante otoño boreal (SON)	31
4.10	Evolución de compuestos de la OLR durante el invierno boreal (DEF) de -30 a 25 días basado en 38 eventos.....	32
4.11	Similar a la Figura 4.10 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante invierno boreal (DEF)	33
4.12	Similar a la Figura 4.10 pero para Presión a Nivel del Mar durante invierno boreal (DEF)	34
4.13	Evolución de compuestos de la OLR durante la primavera boreal (MAM) de -30 a 25 días basado en 42 eventos	35
4.14	Similar a la Figura 4.10 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante la primavera boreal (MAM)	36
4.15	Similar a la Figura 4.10 pero para Presión a Nivel del Mar durante la primavera boreal (MAM)	37
5.1	Amplitud media trimestral de la precipitación a escala intraestacional (1998 a 2015)	38
5.2	Evolución de compuestos de la Precipitación en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 64 eventos	40
5.3	Similar a la figura 5.2 pero para Temperatura del aire a 2m	41
5.4	Similar a la figura 5.2 pero para temperatura superficial del mar (SST).....	42
5.5	Similar a la figura 5.2 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa	43
5.6	Evolución de compuestos de la Precipitación en el Otoño Boreal (SON), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos	44
5.7	Similar a la figura 5.6 pero para Temperatura del aire a 2m	45
5.8	Similar a la figura 5.6 pero para temperatura superficial del mar (SST).....	46
5.9	Similar a la figura 5.6 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa	47

5.10 Evolución de compuestos de la Precipitación en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 46 eventos	48
5.11 Similar a la figura 5.10 pero para Temperatura del aire a 2m	49
5.12 Similar a la figura 5.10 pero para temperatura superficial del mar (SST)	50
5.13 Similar a la figura 5.10 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa	52
5.14 Evolución de compuestos de la Precipitación en la Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos	53
5.15 Similar a la figura 5.14 pero para Temperatura del aire a 2m	54
5.16 Similar a la figura 5.14 pero para temperatura superficial del mar (SST)	55
5.17 Similar a la figura 5.14 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa	56
6.1 Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 51 eventos	57
6.2 Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en X eventos	58
6.3 Evolución de compuestos de la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 51 eventos	59
6.4 Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Otoño Boreal (SON), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos	60
6.5 Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos	61
6.6 Evolución de compuestos de la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos	62
6.7 Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 58 eventos	63

6.8	Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 58 eventos	64
6.9	Evolución de compuestos de la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 58 eventos.....	65
6.10	Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos	66
6.11	Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos	67
6.12	Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos	68

RESUMEN

La precipitación es un componente importante del ciclo hidrológico y en la dinámica y composición atmosférica, por lo tanto es de vital importancia que a través de conocimiento y entendimiento de los procesos que conducen a su ocurrencia, se obtenga mayor capacidad para predecirlo y/o pronosticarlo de manera confiable y coherente; permitiendo una mejor toma de decisiones para realizar gestión del recurso hídrico.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar el comportamiento de la precipitación en la escala intraestacional para la región pacífica de Colombia y Ecuador; teniendo en cuenta que la Oscilación de Madden-Julian (OMJ) es un componente necesario pero no suficiente para modular la variabilidad de la precipitación en esta escala temporal. Se inició evaluando la existencia de variabilidad intraestacional a través de la implementación de análisis espectral, obteniendo evidencia de señales importantes y con significancia estadística asociadas a periodicidades menores o iguales a 64 días. Posteriormente se estimó la existencia de relación entre la ocurrencia de eventos de precipitación y la actividad de la OMJ; observando que no existe una relación lineal significativa entre el comportamiento de la precipitación y la actividad de la OMJ independientemente de la ubicación de su centro convectivo; sin embargo, existe mayor probabilidad de ocurrencia de eventos durante las fases neutrales y de supresión de la OMJ sobre el Océano Índico; sin embargo no se evidencia la existencia de interacción entre fenómenos, a excepción de un comportamiento acoplado de manera negativa para el Potencial de Velocidad a los 200 hPa.

Finalmente se evaluó el papel que tienen los procesos de interacción Océano – Continente – Atmósfera (OLA) en la modulación de las lluvias en la región de estudio a la escala de interés; proceso del cual se obtiene como resultado evidencia del acoplamiento entre las anomalías de precipitación, el gradiente de temperatura entre la superficie marina y continental, y los vientos superficiales durante las diferentes épocas del año; para lograr establecer al mecanismo de monzón como un posible modulador de la precipitación a escala intraestacional para la región pacífica de

Colombia y Ecuador.

Palabras Claves: Variabilidad Intraestacional, Monzón, Precipitación, MJO, Colombia, Caracterización

ABSTRACT

Precipitation is an important component of the hydrological cycle and atmospheric dynamics and composition. Therefore, it is crucial to gain knowledge and understanding of the processes that lead to its occurrence in order to enhance our ability to predict and forecast it reliably and coherently. This, in turn, allows for better decision-making in water resource management.

The objective of this research was to characterize the behavior of precipitation at the intra-seasonal scale for the Pacific region of Colombia and Ecuador, taking into account that the Madden - Julian Oscillation (MJO) is a necessary but not sufficient component to modulate precipitation variability at this temporal scale. It started by evaluating the existence of intra-seasonal variability through the implementation of spectral analysis, obtaining evidence of important signals with statistical significance associated with periodicities equal to or less than 64 days. Subsequently, the existence of a relationship between the occurrence of precipitation events and the activity of the MJO was estimated. It was observed that there is no significant linear relationship between the behavior of precipitation and the activity of the MJO, regardless of the location of its convective center. However, there is a higher probability of occurrence of events during the neutral and suppressed phases of the MJO over the Indian Ocean. However, there is no evidence of interaction between phenomena, except for a negatively coupled behavior for the 200 hPa Velocity Potential.

Finally, the role of Ocean-Land-Atmosphere (OLA) interaction processes in modulating rainfall in the study region at the desired scale was evaluated. This process resulted in evidence of coupling between precipitation anomalies, the temperature gradient between the ocean surface and the continent, and surface winds during different seasons of the year. This helps establish the monsoon mechanism as a potential modulator of intra-seasonal precipitation in the Pacific region.

Keywords: Intra-seasonal Variability, Monsoon, Precipitation, MJO, Colombia, Characterization

ABREVIATURAS

FMO Filtered OLR MJO Index.

HR Humedad Relativa.

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

INAMHI Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

IVDFM Integral Vertical de la Divergencia de Flujo de Humedad.

JAXA Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial.

NASA Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.

NOAA Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica.

OLA Océano – Continente – Atmósfera.

OMJ Oscilación de Madden-Julian.

OQQ Oscilación Quasiquincenal.

PNM Presión a Nivel del Mar.

PV200 Potencial de Velocidad a 200 hPa.

RMM Real-time Multivariate MJO.

ROL Radiación de Onda Larga.

T2m Temperatura del Aire a los 2m.

TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission.

TSM Temperatura Superficial del Mar.

VPM Velocity Potential MJO Index.

ZCIT Zona de Convergencia Intertropical.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación, aparte de ser un componente importante del ciclo hidrológico, cumple un rol determinante del sistema climático global, tanto en la dinámica como en la composición atmosférica. Una de sus principales características es que presenta una amplia variabilidad espacio – temporal, lo que dificulta la generalización de comportamientos típicos, aún sobre regiones no muy extensas [Mesa Sánchez and Peñaranda Vélez, 2015].

Caracterizar la variabilidad de la precipitación es importante en regiones dónde una de las principales fuentes del recurso hídrico es la lluvia. En temporadas secas los cambios en cantidad de lluvia afectan la disponibilidad de este recurso para consumo humano, agricultura y transporte fluvial a través de los ríos; y en temporadas de lluvias, para el manejo y prevención de desastres por inundaciones y/o deslizamientos. Así, para poder entender dicho fenómeno y tener la capacidad de predecirlo y/o pronosticarlo de manera confiable y coherente conllevando a realizar manejos y planificaciones óptimas del recurso hídrico, se debe tener conocimiento sobre los procesos que conducen a su ocurrencia y la dinámica envuelta en dichos procesos [Mesa Sánchez and Peñaranda Vélez, 2015].

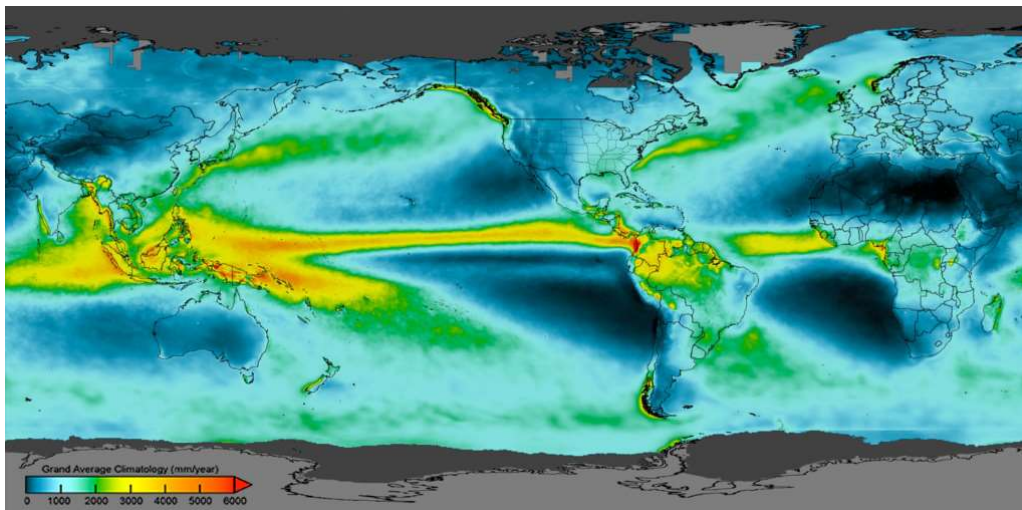


Figura 1.1: Media anual de la Precipitación (Jun 2000 - May 2019). Tomado de IMERG Nasa
https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-06/grand_average_climatology2_black_print.jpg

La distribución anual de la lluvia sobre la zona tropical de Suramérica es influenciada principalmente por la ZCIT como se observa en la figura 1.1; sumado a esto, la distribución espacial está determinada por otros factores, tales como la cordillera de los Andes, los océanos Pacífico y Atlántico y la vegetación [Poveda and Mesa, 1997].

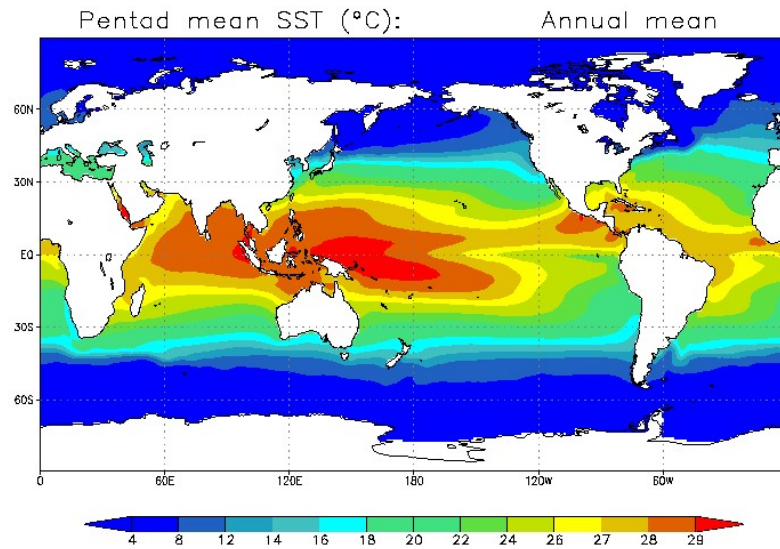


Figura 1.2: Media anual de la Temperatura Superficial del Mar (1971-2000). Tomado de CPC NOAA.https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/realtime/clim/annual/sst/mean_pentad_sst.71_00.total.gif

En la Figura 1.2, se evidencia que la concentración de los mayores valores de precipitación se da en las zonas donde los valores medios anuales de la TSM son iguales o superiores a 27°C; sugiriendo un acoplamiento entre estas dos variables [Sabin et al., 2013].

1.1 Variabilidad Estacional

La estacionalidad de la precipitación en la región de estudio está dominada por la migración latitudinal de la ZCIT y transporte de humedad por los vientos alisos del Este, el chorro del Chocó y sistemas convectivos de mesoescala [Mesa Sánchez and Peñaranda Vélez, 2015] .

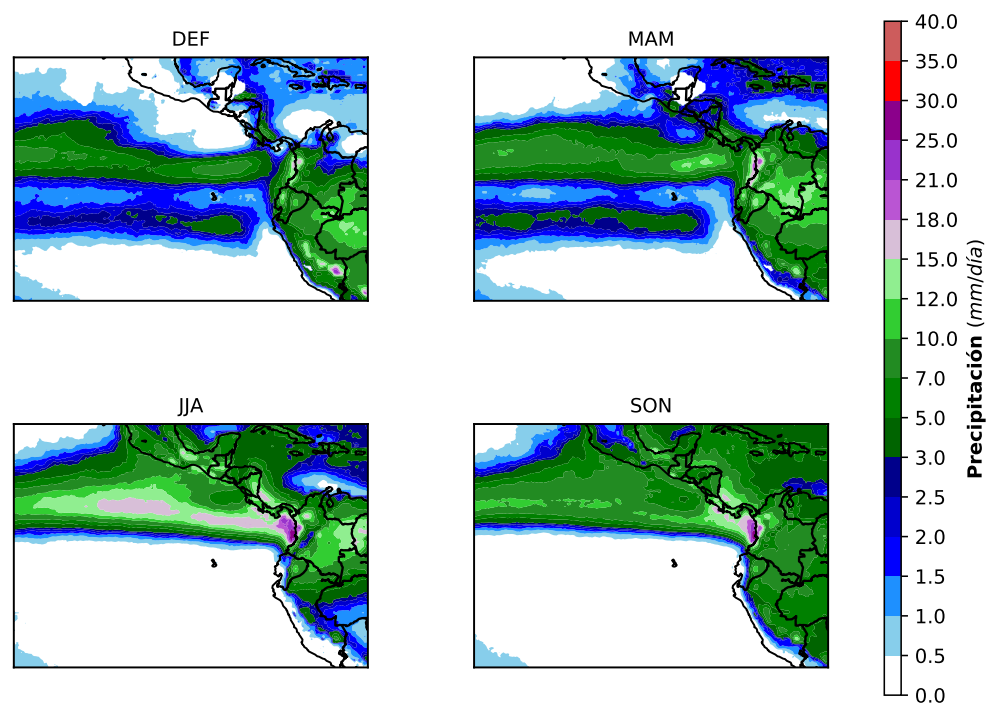


Figura 1.3: Media trimestral de la precipitación en la región pacífica del norte de Suramérica (1998-2015).

Los factores mencionados anteriormente inducen a que en Colombia se presenten dos periodos de lluvias intensas asociados al paso de la ZCIT sobre el territorio; no obstante, y como se aprecia en la figura 1.3, en la región pacífica se presentan lluvias durante todo el año [Mesa Sánchez and Peñaranda Vélez, 2015], permitiendo suponer la existencia e interacción de otros moduladores asociados a la variabilidad de la precipitación de esta zona.

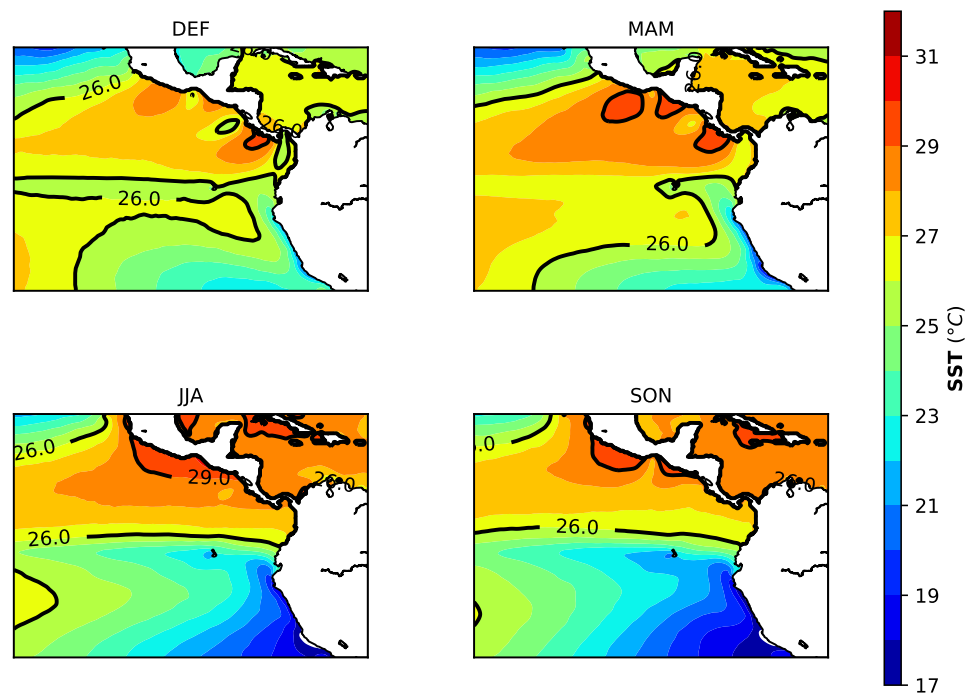


Figura 1.4: Media trimestral de la temperatura superficial del mar en la región pacífica del norte de Suramérica (1982-2015). Isotherma (línea negra) en 26°C y 29°C.

Al observar la media trimestral de TSM, se puede establecer que la concentración de las lluvias (Figura 1.3) coincide con las zonas que presentan valores de TSM entre los 26°C y 29°C (Figura 1.4), siendo este el rango de temperaturas óptimo para la activación en el océano Pacífico, evidenciando la posible existencia de acoplamiento entre estas dos variables a esta escala temporal [Sabin et al., 2013].

1.2 Variabilidad Intraestacional

La variabilidad intraestacional se define como el cambio coherente de variables de estado básicas, entre las cuales están la presión, los vientos, temperatura y humedad, y a su vez, los fenómenos asociados a estos, tales como la precipitación y la nubosidad; desde la escala sinóptica (≈ 1000 Km, 1-10 días) hasta la planetaria (≈ 10000 Km, 10-100 días). En la atmósfera tropical existen varios modos de variabilidad intraestacional, que dominan la convección profunda a distintas escalas espaciales y temporales; además, son mecanismos importantes de flujos entre trópicos y extratropi-

cos entre los que se encuentran la Oscilación de Madden-Julian (OMJ), Ondas del Este, Oscilación Quasiquincenal (OQQ) [Serra et al., 2014] .

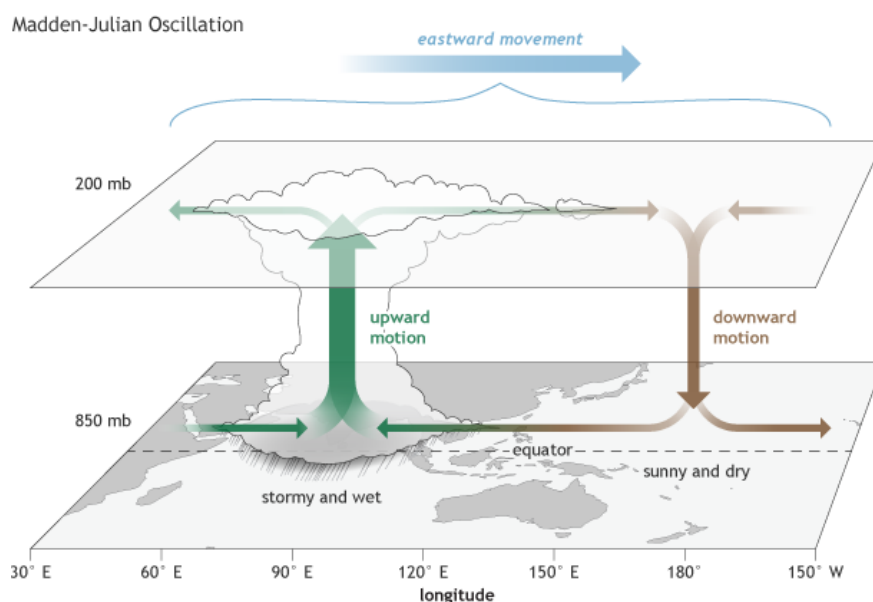


Figura 1.5: Ilustración de la MJO. Tomado de https://www.climate.gov/sites/default/files/MJO_610_0.png

El fenómeno que gobierna la dinámica global de la variabilidad intraestacional de la precipitación es la OMJ; siendo esta una célula de circulación a escala global que presenta periodicidades entre 30 – 60 días y se propaga hacia el este a velocidad media de 5 m/s [Zhang, 2005]. Las primeras evidencias de variabilidad intraestacional en el trópico fueron presentadas por Madden y Julian [1971a,1972] a partir de datos atmosféricos de estaciones en el Pacífico Oeste y Central, motivo por el cual a la oscilación a esta escala se le conoce como Oscilación de Madden-Julian (OMJ). La señal de la OMJ es muy fuerte en el Pacífico Occidental y Central; no obstante, para la zona del Pacífico Este, cerca al continente suramericano, se tienen señales muy débiles asociadas a diferentes factores, entre los cuales están: 1) El fuerte ciclo diario de la convección, debido al calentamiento de la superficie que compite por humedad y energía con la Oscilación, 2) La topografía interfiere con la convergencia de humedad desde niveles bajos y 3) la evaporación superficial es reducida severamente en el continente [Maloney and Sobel, 2004, Heldon and Salby, 1995].

En las regiones mencionadas anteriormente se ha sugerido un mecanismo de interacción Océano – Continente – Atmósfera capaz de representar la variabilidad de las lluvias en periodicidades me-

nores a 90 días de manera afín con la física de los procesos [Webster et al., 1998, Webster, 2002, Webster and Hoyos, 2004, Hoyos and Webster, 2006]. Una de éstas áreas se encuentra al Sur de Asia, dónde se ha logrado explicar la variabilidad intraestacional de la precipitación a través de la implementación del mecanismo de monzón, apoyados en la idea que procesos de flujos entre la superficie continental y la atmósfera, gradientes térmicos y de presión entre el océano y continente que fuerza la circulación atmosférica, y que en conjunto con la topografía de estas regiones, generarían escenarios ideales para inicialmente inestabilizar la atmósfera y posteriormente establecer convección en la alta tropósfera [Webster, 1983, Webster et al., 1998, Sobel et al., 2010]

1.3 Problema de investigación

Estudios previos indican que en la región Pacífica de Colombia y Ecuador existe una fuerte variabilidad intraestacional de la precipitación; sin embargo, difieren en la importancia de la MJO en esta variabilidad; Pabon y Dorado [2008] concluyen que la variabilidad no está relacionada directamente con la OMJ, debido a que se presenta en escalas menores a las establecidas para esta oscilación y además no existe una correlación significativa entre ellas; mientras que en la investigación realizada por Poveda y Yepes [2012] ,se estableció que la MJO incide de manera importante en la precipitación de Colombia, basándose en el uso de la técnica de probabilidad condicional de ocurrencia de lluvias y anomalías negativas de Potencial de Velocidad (convección), proxy de la OMJ, dónde se obtiene un resultado del 75 %-80 % de probabilidad de ocurrencia para los percentiles 75 y 95 de la muestra.

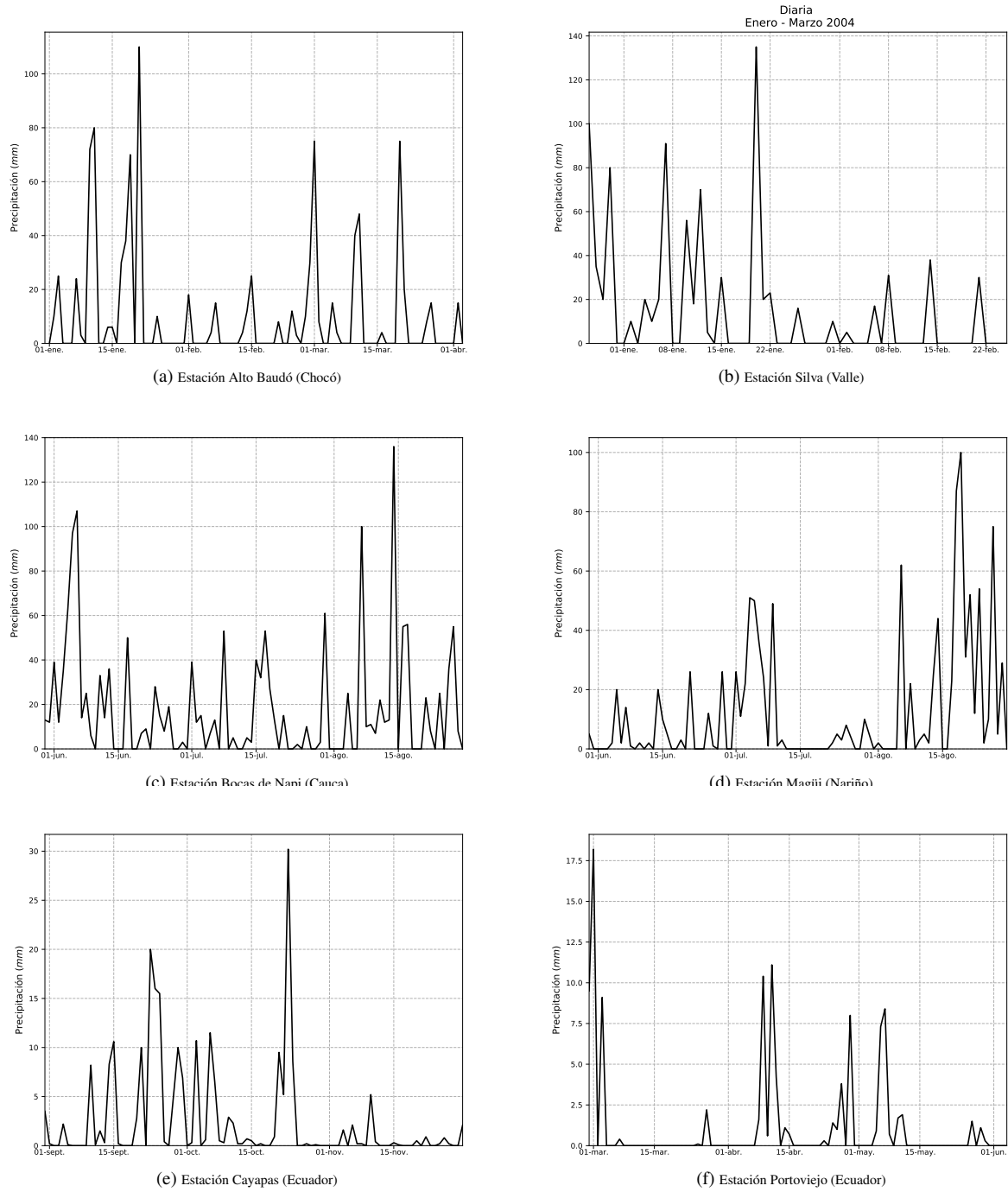


Figura 1.6: Series de tiempo, a escala diaria, de la precipitación en Colombia y Ecuador

En la Figura 1.6, usando las series diarias de precipitación de estaciones in-situ de la zona de estudio, se puede observar la ocurrencia de eventos de lluvia con periodicidades menores a 15 días; permitiendo sugerir la existencia de variabilidad intraestacional de la precipitación pero que dicho comportamiento no sería modulado directamente por la OMJ.

Es necesario en tanto, aclarar que: 1. La OMJ en esta región puede ser un componente necesario, pero no suficiente como para modular la variabilidad de la precipitación a la escala temporal de interés; 2. Se precisa plantear un mecanismo capaz de simular la dinámica que compone el fenómeno en estudio, con el fin de ofrecer herramientas para comprender cómo es su comportamiento, y que brinden bases para una buena planificación y manejo de los recursos; además, encaminarse a la posibilidad de predecir y/o pronosticar de manera confiable y coherente. Teniendo en cuenta, surge como interrogante a investigar ¿Cómo es el comportamiento de la precipitación en la región pacífica de Colombia y Ecuador, a escala intraestacional, y qué rol cumple el mecanismo monzónico en la modulación de este fenómeno?.

1.4 Objetivos

Objetivo General

- Caracterizar la variabilidad intraestacional de la precipitación en la región Pacífica de Colombia y Ecuador

Objetivos Específicos

- Identificar la existencia de teleconexiones entre la OMJ y la precipitación en la zona de estudio a escala intraestacional.
- Determinar la incidencia de interacciones Océano – Continente – Atmósfera en la ocurrencia de lluvias en la región Pacífica de Colombia y Ecuador a escala intraestacional.
- Evaluar el mecanismo monzónico como modulador de la variabilidad de la precipitación en la escala temporal de interés.

2. BASES DE DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 Bases de Datos

2.1.1 Precipitación

- **TRMM 3B42 v7:** La base de datos hace parte de la misión Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), proyecto internacional de la NASA y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) diseñado para proporcionar estimaciones más precisas de la precipitación en los trópicos, cuya resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, su área de operación está comprendida entre las latitudes 50°S - 50°N y longitudes 180°W - 180°E , y con resolución temporal a escala mensual, pentadal, diaria, y cada 3 horas, desde 1998 hasta 2015; en unidades de mm (Huffman, Bolvin, 2014). Se opta por usar esta base de datos porque, a pesar de presentar errores en la estimación de la cantidad de lluvia, detecta de buena manera la ocurrencia y el comportamiento de las mismas [Poveda et al., 2017, Dinku et al., 2010].
- **Estaciones de Pluviometría:** Tanto la cantidad de estaciones de pluviometría distribuidas en la región Pacífica de Colombia y Ecuador, como la calidad de la información son bajas; sin embargo, con el fin de realizar análisis con información obtenida in-situ, se trabaja con las estaciones meteorológicas disponibles en ambos países. Información aportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para Colombia, y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para Ecuador.

2.1.2 Temperatura Superficial del Mar (TSM)

La base de datos usada es la NOAA OI SST V2 High Resolution, la cual obtiene su información de diferentes fuentes (Satelites, barcos, boyas) y la analiza a través de la interpolación óptima (IO). Este dataset tiene una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, y resoluciones temporales mensuales, semanales o diarias; además de disponibilidad de información para todo el planeta desde 1982

hasta la actualidad [Reynolds et al., 2007].

2.1.3 Radiación de Onda Larga Saliente (ROL)

La Radiación de Onda Larga (ROL) es una variable usada como proxy de la actividad convectiva; la información proviene del reanálisis NCEP/NCAR de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), contando con datos obtenidos a partir de la interpolación espacial de estimaciones de ROL del satélite de órbita polar de la NOAA, los cuales tienen una resolución temporal diaria y mensual, disponibles desde 1948 hasta la actualidad; a una grilla espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ distribuida a nivel global [Liebmann, 1996].

2.1.4 Potencial de Velocidad (PV)

Las anomalías (valores que exceden la media de los datos positiva o negativamente) de Potencial de Velocidad (VP) son muy útiles para distinguir entre zonas de convección profunda y zonas de supresión, además es una variable ampliamente usada como proxys de actividad de la OMJ [MetEd,]. Los datos usados son producto del Reanálisis 1 NCEP/NCAR, cuya información se presenta en una grilla espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, disponible para el globo; resoluciones temporal diaria y mensual; a diferentes niveles de la atmósfera [Kalnay et al., 1996].

2.1.5 Índices de Actividad de la MJO

Se implementan índices de actividad de la Oscilación de Madden-Julian (OMJ) con resolución temporal de 5 días, con base en anomalías de PV200 entre 30°N - 30°S , cuando su centro convectivo se encuentra en el Océano Índico (80°E), Pacífico Central (160°E) y Pacífico Este (120°W) [Zhang et al., 2023].

Índices de actividad diaria como Filtered OLR MJO Index (FMO), calculado a partir de funciones ortogonales empíricas (EOF) con datos de ROL filtrada entre 20-90 días y promediados entre los 15°N - 15°S [Kiladis et al., 2014]; el Velocity Potential MJO Index (VPM), estimado a través de análisis combinado de EOF del promedio meridional de PV200 y vientos zonales a los 200 y 850 hPa [Ventrice et al., 2013]; el Real-time Multivariate MJO (RMM), un índice es-

tacionalmente independiente que permite monitorear la actividad de la OMJ, estimado mediante el análisis combinado de EOF de viento zonal de 850 y 200 hPa, además de datos de ROL [Wheeler and Hendon, 2004]; y un índice (MK02) basado en la EOF de la media de los vientos zonales a los 850 hPa, entre 5°N- 5°S, filtrados entre 30 y 90 días [Maloney and Kiehl, 2002].

2.1.6 Variables Atmosféricas del Reanálisis ERA-Interim

El proyecto ERA-Interim es un reanálisis de la atmósfera global con datos disponibles desde 1979 a la actualidad, contiene información de 60 niveles en la vertical y con diferentes resoluciones espaciales, entre las que se encuentra 0.25° x 0.25° [Berrisford et al., 2009]. Se utiliza información de bases de datos de las siguientes variables:

- Presión a Nivel del Mar (PNM)
- Temperatura del Aire a los 2m (T2m)
- Vientos Zonales y Meridionales a los 925 y 850 hPa
- Humedad Relativa (HR) a los 925 y 850 hPa
- Integral Vertical de la Divergencia de Flujo de Humedad (IVDFM)

2.2 Metodología

El capítulo 3, usando la información de las estaciones pluviométricas disponibles en la zona, se observan los regímenes de lluvias que se presentan y se analiza la posible incidencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en dicho comportamiento; robusteciendo este análisis a través de implementación de las funciones másicas de corriente meridional para la estimación de la variación media trimestral en la intensidad de la circulación de la celda de Hadley y en la zona comprendida entre los 77.5°O y 85°. Las funciones másicas de corriente meridionales se estiman a partir de la siguiente ecuación [Oort and Yienger, 1996]:

$$\Psi = 2\pi\alpha \cos(\varphi) \int_0^P v \frac{d(P)}{g} \quad (2.1)$$

Donde α equivale al radio de la tierra, φ las longitudes, P hace referencia a los diferentes niveles de la atmósfera, v es la componente meridional del viento y g es la gravedad.

Posteriormente, se plantea verificar la posible existencia de variabilidad intraestacional en la precipitación sobre la zona de estudio a través de análisis espectral a los datos de cada una de las estaciones pluviométricas disponibles; dicho análisis se llevará a cabo aplicando la Transformada de Onditas (Wavelets), dado que a través de la descomposición de las series temporales en el espacio tiempo – frecuencias, permite determinar los principales periodos de oscilación y cómo varían en el tiempo [Torrence and Compo, 1998].

En el capítulo 4, con base en los resultados obtenidos del análisis espectral, se analiza la incidencia que tiene la MJO sobre la variabilidad de la precipitación a escala intraestacional en la zona de estudio. Inicialmente, estimando de la existencia de relación lineal entre las series de tiempo de precipitación de estaciones in-situ, filtradas entre 10 y 90 días, e índices de actividad de la MJO en el Océano Índico (80°E), Pacífico Central (160°E), Pacífico Este (120°W), y el índice FMO; mediante el cálculo del coeficiente correlación de Spearman; el cual mide el grado de relación que existe entre dos variables de manera lineal no paramétrica, calculándolo no por su valor sino por el rango de estos [Restrepo and Gonzáles, 2007].

Con el objetivo de evaluar la posible existencia de relación no lineal, se realiza la estimación de la función de distribución de probabilidad de las series de tiempo bajo condiciones de convección, neutras y supresión de la actividad de la MJO sobre el Océano Índico, con base en la información del índice VPM.

Implementando la técnica de análisis de compuestos (o composites), que hace referencia a la probabilidad condicional de que cierto evento ocurra dado que otro evento ocurrió u ocurrirá [MetEd, 2020] y es útil para determinar características de fenómenos climatológicos y el impacto a gran escala de teleconexiones [Vigh, 2017]; se evalúa la existencia de teleconexiones entre las fases activas e inactivas de la OMJ y la precipitación de la región pacífica de Colombia y Ecuador, a través del análisis del comportamiento de variables asociadas a la actividad convectiva de la OMJ, como lo son ROL, PV200 y PNM durante los diferentes trimestres del año.

Para la selección de eventos asociados a la actividad convectiva de la OMJ, cuando su centro está ubicado en el Océano Índico, se replica el procedimiento utilizado por Hoyos [2006]; partiendo de la estimación de un índice de ROL filtrada a escala intraestacional (25-80 días) sobre el Océano Índico (10 °N - 10°S, 70°E - 90°E). Con base en este índice, se identifican eventos cuyos valores mínimos de ROL sean de mayor magnitud a una desviación estándar; siendo estos, potencialmente, eventos de OMJ. Para robustecer la identificación de eventos, se asocian 3 índices de actividad de la OMJ estimados a partir de EOF, como lo son Velocity Potential MJO Index (VPM), Real-time Multivariate MJO (RMM), un índice basado en la EOF de la media de los vientos zonales a los 850 hPa, entre 5°N- 5°S, filtrados entre 30 y 90 días (MK02), y el FMO (ver 2.1.5). Si un evento seleccionado inicialmente cumple con un mínimo local (o máximo, dependiendo el índice) de magnitud mayor a una desviación estándar, en un intervalo 10 días posteriores al evento, en al menos 2 índices de los asociados, se considerará un evento de OMJ. Se descartan eventos cuyo desplazamiento espacial no sea coherente con el comportamiento asociado a la OMJ.

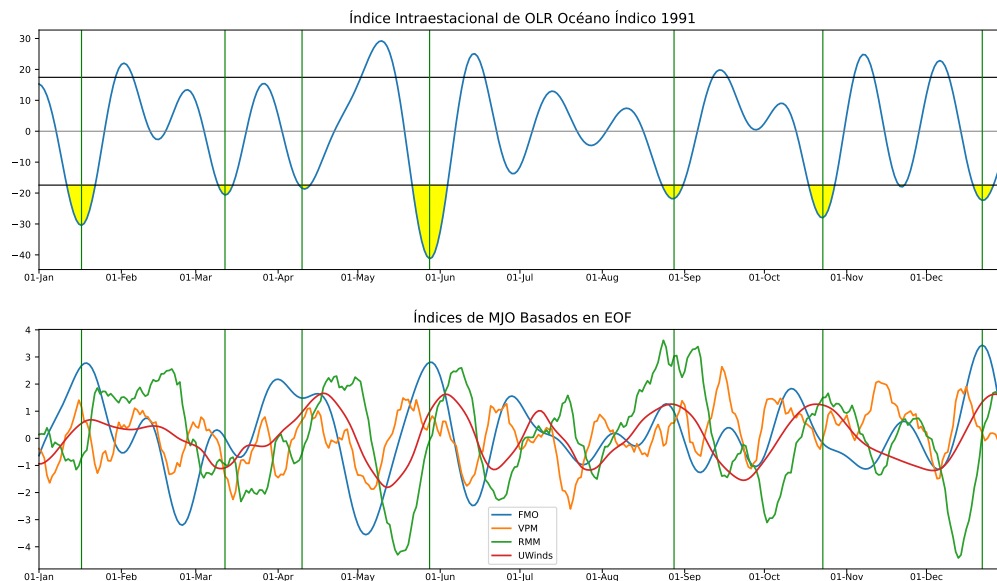


Figura 2.1: Índices de actividad de la MJO: En la parte superior se encuentra el Índice de OLR Filtrada entre 25 - 80 días sobre el Océano Índico (10 °N - 10°S, 70°E - 90°E) durante 1991; las líneas verdes identifican las fechas de eventos con magnitudes mínimas de OLR mayores a una desviación estándar. En la parte inferior están los índices de actividad de la MJO basados en EOF: FMO (Azul), VPM (Naranja), RMM(Verde) y MK02 (Rojo). Si la fecha de un evento seleccionado corresponde a un evento de con magnitud mayor a una desviación estándar, durante los 10 días siguientes, en al menos dos de los cuatro índices, será considerado como un evento de MJO

A través del proceso descrito anteriormente, se logra seleccionar 49 eventos durante el verano

boreal (JJA), 38 para el otoño (SON), 38 durante invierno (DEF) y 42 para la primavera (MAM). Implementando la técnica de análisis de compuestos, se analiza el comportamiento promedio, durante cada trimestre, de las variables asociadas a la actividad convectiva de la OMJ desde 30 días previos hasta 25 posteriores al evento convectivo.

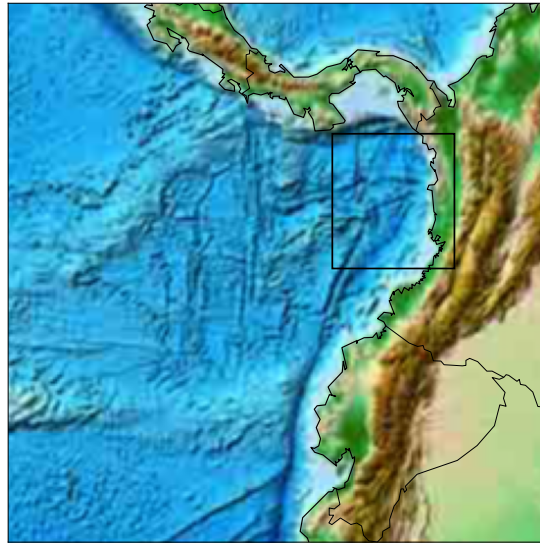


Figura 2.2: Delimitación de zona para estimación de índice de precipitación a escala intraestacional para la Costa Pacífica de Colombia (3.125 °N - 7.125°N y 80.375°W - 76.75°W)]

El capítulo 5, se evalúa qué rol cumplen las interacciones Océano – Continente – Atmósfera (OLA) en el desarrollo y modulación de los eventos de precipitación en la zona de estudio a escala intraestacional, a través del análisis del comportamiento de estas variables y algunas relacionadas a los procesos de interacción. Implementando la técnica de análisis de compuestos con base en información de precipitación, Temperatura Superficial del Mar (TSM), Temperatura del Aire a los 2m (T2m), PNM y vientos a los 925 hPa. Para la selección de eventos significativos de actividad convectiva, se realiza la estimación de un índice de precipitación, filtrada entre 10 y 90 días, para la zona comprendida entre 3.125 °N - 7.125°N y 80.375°W - 76.75°W (Figura 2.2), dado que en esta zona se concentran las mayores precipitaciones a la escala estacional (ver Figura 1.3).

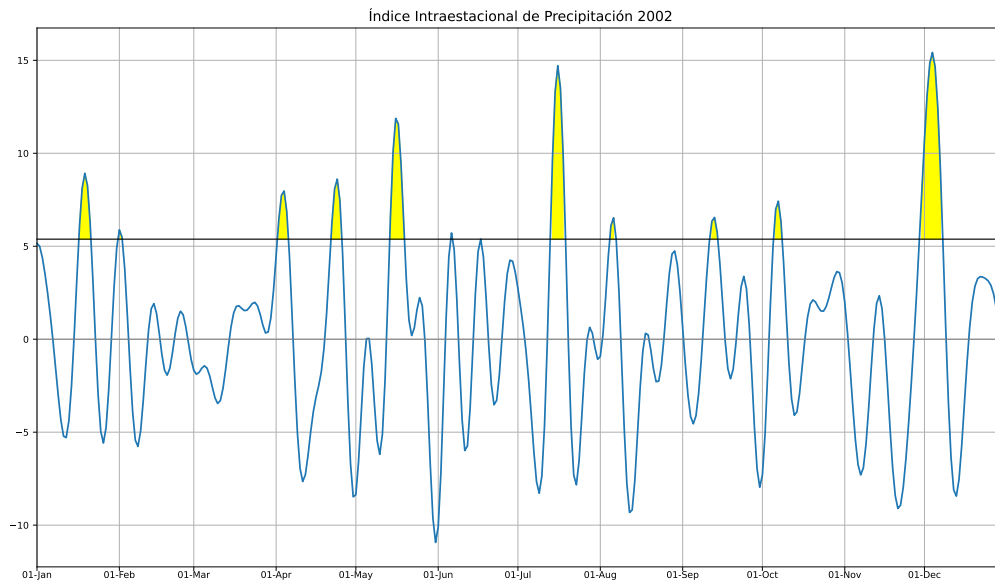


Figura 2.3: Índice de precipitación, filtrada entre 10 y 90 días, para la Costa Pacífica de Colombia, entre 3.125 °N - 7.125°N y 80.375°W - 76.75°W

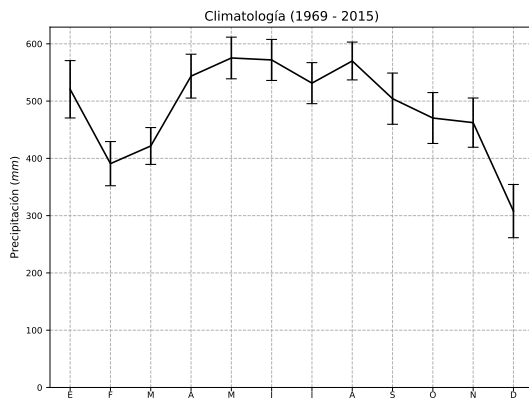
Se eligen eventos donde el valor de precipitación sea mayor en magnitud a la desviación estándar de los datos, durante los diferentes trimestres del año, y se analiza como es la evolución media de estos, desde 8 días previos a su establecimiento hasta 6 días posteriores. Posteriormente, se realiza el análisis del comportamiento medio de las variables asociadas a la interacción OLA en la misma ventana de tiempo mencionada anteriormente.

Para finalizar, en el capítulo 6, nuevamente se aplica análisis de compuestos para que, con base en los eventos seleccionados anteriormente; se pueda evaluar cómo el mecanismo monzónico podría modular el comportamiento, espacial y temporal, de la precipitación en la escala intraestacional en la región pacífica de Colombia y Ecuador. Mediante la observación de anomalías de vapor de agua, con base en datos de humedad relativa a 925 y 850 hPa, su interacción con los vientos en estos mismos niveles y la convergencia de humedad desde la parte superficial de la atmósfera hacia la alta atmósfera; se plantea analizar la relación entre la disponibilidad de humedad, gradientes de temperaturas y presiones superficiales, y la variabilidad de la precipitación en la escala de 10 a 90 días .

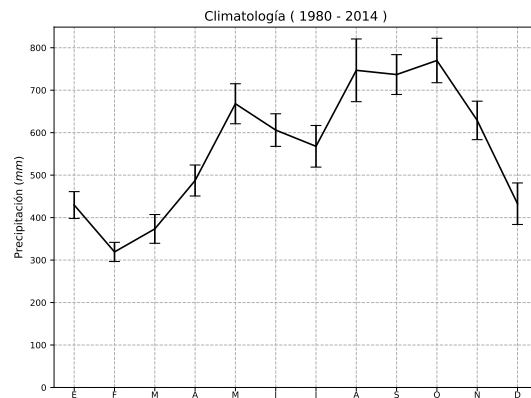
3. CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

Partiendo de lo observado en la figura 1.3, es relevante establecer los regímenes de lluvia que se presentan en la zona de estudio y la posible incidencia de la ZCIT en este comportamiento a través de información pluviométrica in-situ y de datos asociados a la circulación atmosférica.

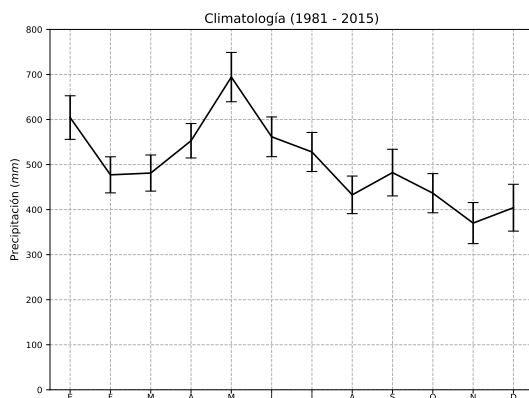
3.1 Variabilidad Estacional



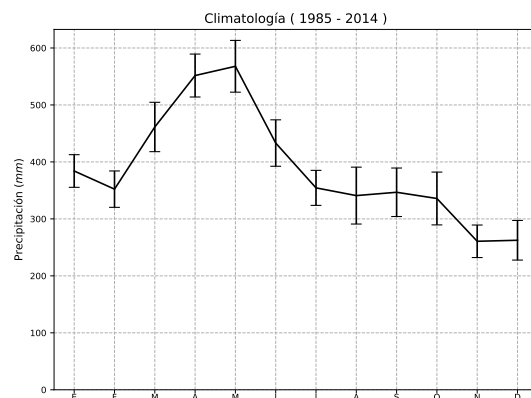
(a) Estación Alto Baudó (Chocó)



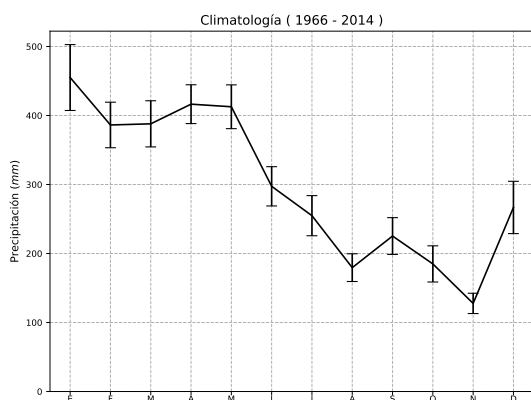
(b) Estación Silva (Valle)



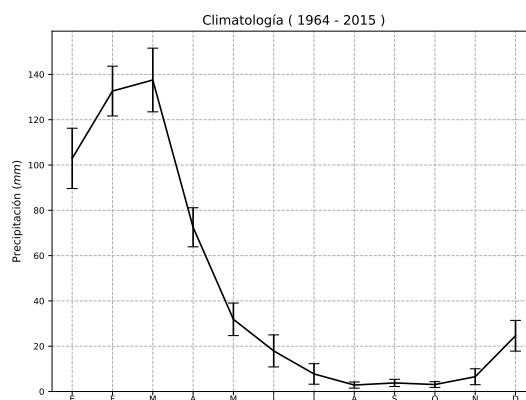
(c) Estación Bocas de Napi (Cauca)



(d) Estación Magüi (Nariño)



(e) Estación Cayapas (Ecuador)



(f) Estación Portoviejo (Ecuador)

Figura 3.1: Ciclo anual de la precipitación en la región pacífica de Colombia y Ecuador

A través del análisis de series temporales de precipitación obtenidas de estaciones in-situ en la región pacífica de Colombia (IDEAM) y Ecuador (INAMHI), se logra observar en la Figura 3.1 que el ciclo anual de la precipitación para la región pacífica en Colombia es unimodal, presentando mínimos, principalmente, entre diciembre y marzo, y máximos entre abril y mayo. A diferencia de Ecuador, donde los primeros meses del año presentan valores altos de precipitación asociados al paso de la ZCIT sobre el territorio, y valores bajos cuando ésta migra hacia el norte.

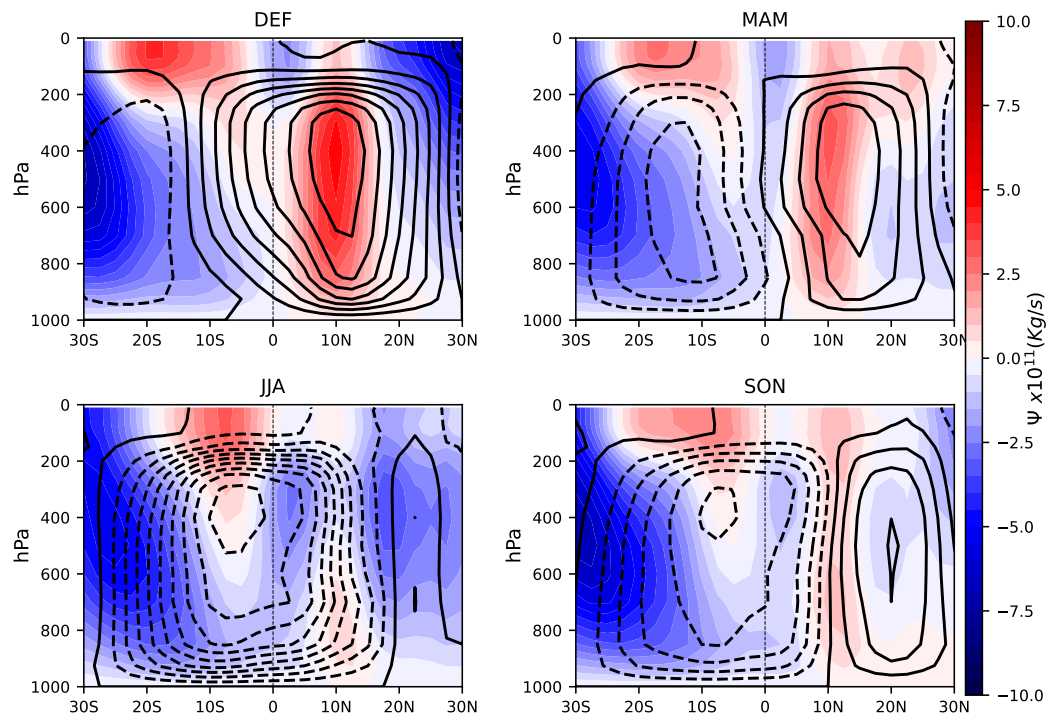


Figura 3.2: Media Trimestral de la función másica de corriente meridional (1948-2020) entre 77.5°O y 85°O.

Mediante la implementación de las funciones másicas de corrientes meridionales, se analiza el comportamiento de la advección de humedad entre los 77.5°O y 85°O y su relación con la ubicación de la ZCIT (Figura 3.2); observando que, cuando la ZCIT se encuentra más al sur (DEF), hay fortalecimiento de la advección de humedad hacia el ecuador en ambos hemisferios - valores positivos en el hemisferio norte y negativos en el hemisferio sur -, lo que induce condiciones favorables para la convergencia más cerca a la línea ecuatorial. Del mismo modo se observa un acoplamiento entre los procesos locales de advección y la ZCIT durante los demás trimestres; tanto su paso por la línea ecuatorial hacia el norte (MAM), favoreciendo la convergencia sobre el territorio Colombiano; cuando se ubica más norte (JJA), presentándose un debilitamiento de la rama del hemisferio norte a nivel local generando condiciones que desfavorecen la ocurrencia de la convección profunda; y cuando realiza su descenso hacia el sur (SON), donde se fortalece nuevamente la rama del hemisferio norte generando condiciones de convergencia, principalmente, hacia el norte de la región pacífica colombiana (entre los 4°N y 7°N).

3.2 Variabilidad Intraestacional

Partiendo de la presunta baja periodicidad en la ocurrencia de lluvias observada en la figura 1.6 y con el objetivo de determinar la existencia de variabilidad intratestacional en la precipitación en la zona de estudio; es pertinente realizar la estimación de la existencia de intraestacionalidad de manera robusta a través de la implementación de análisis espectral.

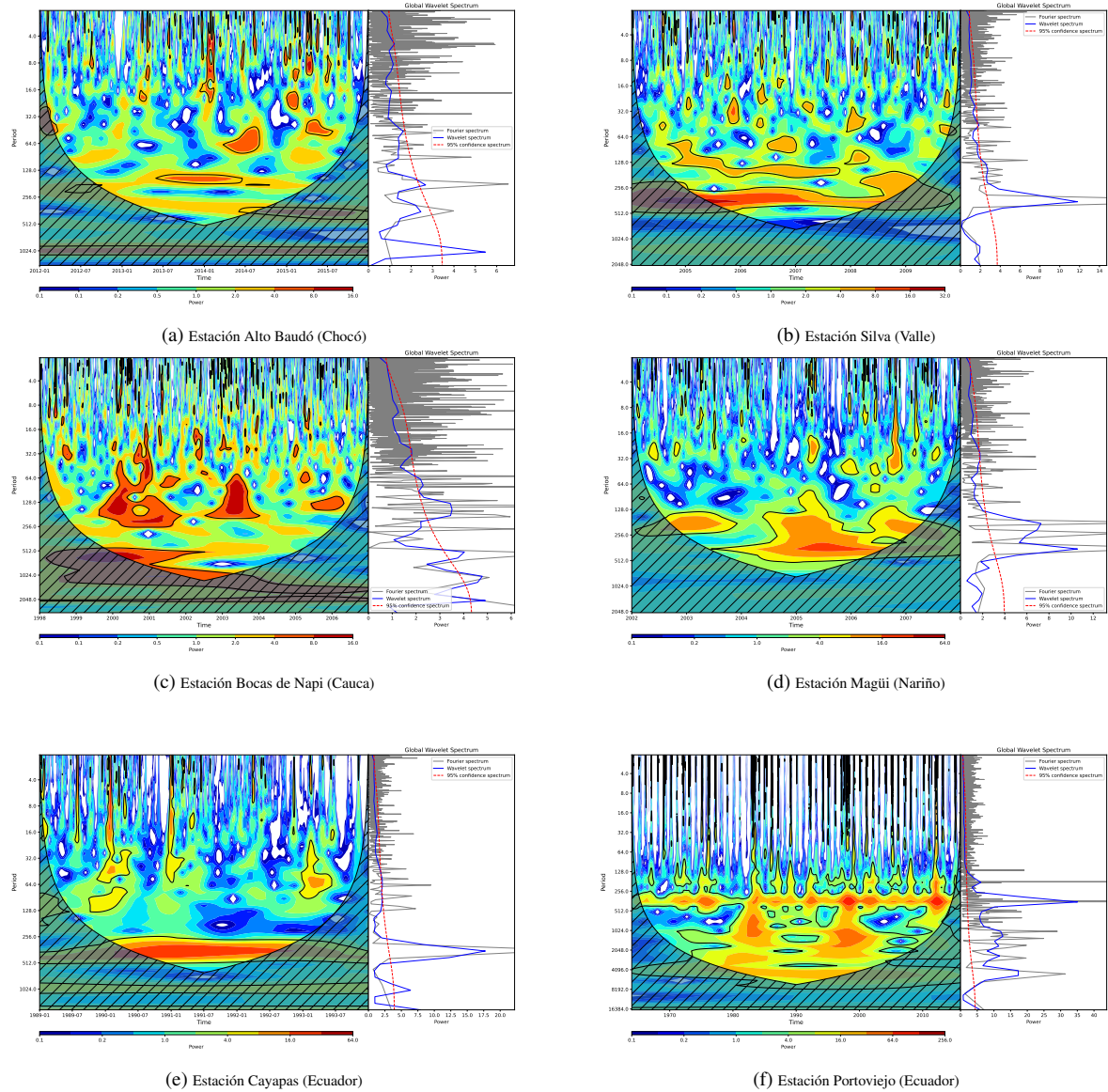


Figura 3.3: Transformada de Onditas a series de tiempo de estaciones ubicadas en la costa pacífica de Colombia y Ecuador

Las series de tiempo a escala diaria fueron sometidas a análisis espectral mediante la implementación de la transformada de Onditas (Wavelets), observando que, como lo muestra la Figura

3.3, se tiene señales importantes de variabilidad intraestacional con periodicidades menores a 90 días y significancia estadística del 5 % en todas las series de tiempo analizadas.

En el diagrama de contornos se observan señales importantes (paleta de colores de amarillo hacia rojo con contorno negro) para periodicidades menores o iguales 64 días durante el rango de tiempo evaluado (Eje x) para todas las estaciones; coincidiendo con lo mostrado en el espectro global de la Ondita donde se tienen picos asociados a periodicidades menores o iguales a 64 días.

4. INCIDENCIA DE LA MJO EN LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN

4.1 Relación entre la Variabilidad Intraestacional de la Precipitación y la MJO

Teniendo en cuenta que, a través de la implementación de la transformada de ondas, se logró determinar la existencia de señales de intraestacionalidad con periodicidades menores a 90 días (Figura 3.3); es importante establecer la relevancia que tiene la OMJ en esta dinámica de manera directa e indirecta.

4.1.1 Correlación entre índices de actividad de la MJO y la Precipitación

Se realiza un análisis de correlación entre índices de actividad de la OMJ en el Océano Índico, Océano Pacífico Oeste, Pacífico Central (escala pentadiaria) y el Filtered OLR MJO Index (FMO) (escala diaria) y las series temporales de precipitación de las estaciones ubicadas en la región de estudio, con el fin de determinar la existencia de relación lineal en sus comportamientos.

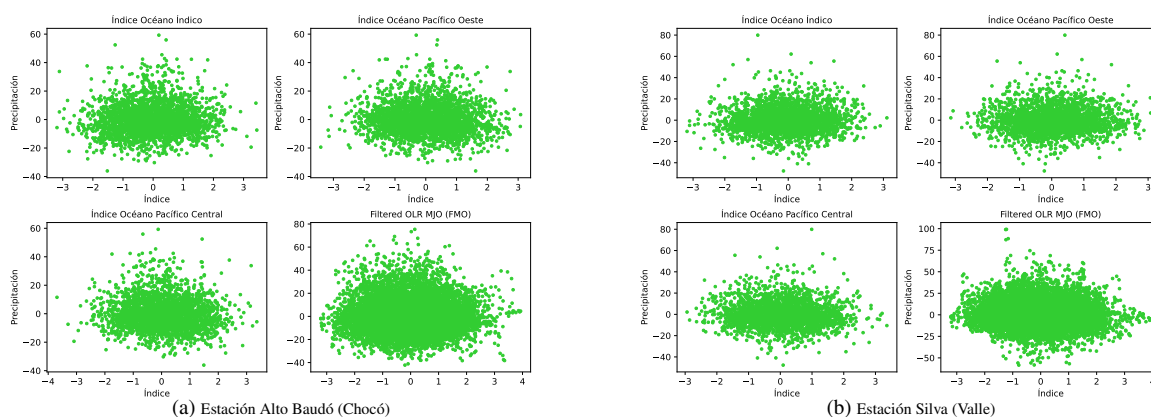


Figura 4.1: Scatterplots entre índices de actividad de la MJO y series de tiempo de precipitación en la zona de estudio

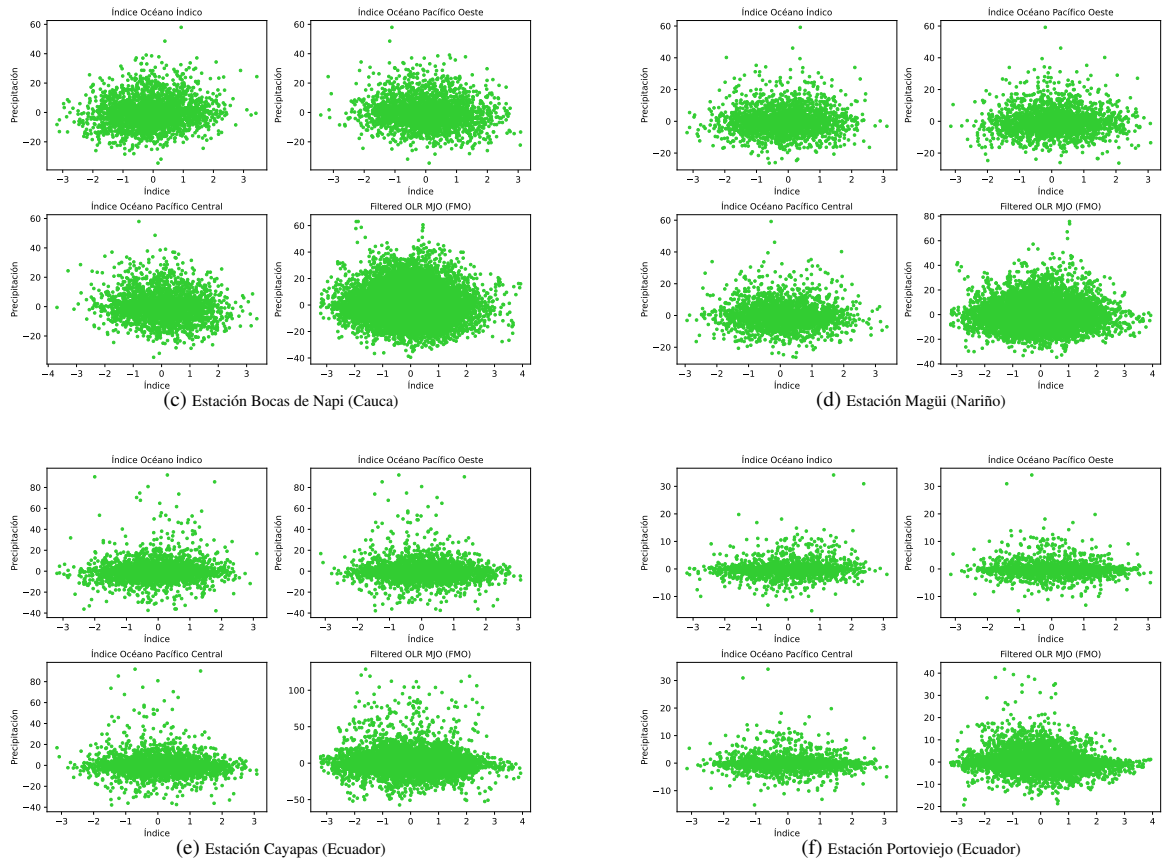


Figura 4.1: Scatterplots entre índices de actividad de la MJO y series de tiempo de precipitación en la zona de estudio

Mediante el uso de Scatterplots (Figura 4.1), de manera cualitativa, se puede sugerir que no existe correlación lineal alguna entre la actividad de la OMJ y la precipitación de cada estación; dado que la dispersión de puntos no presenta una distribución que se asocie a dependencia entre las variables.

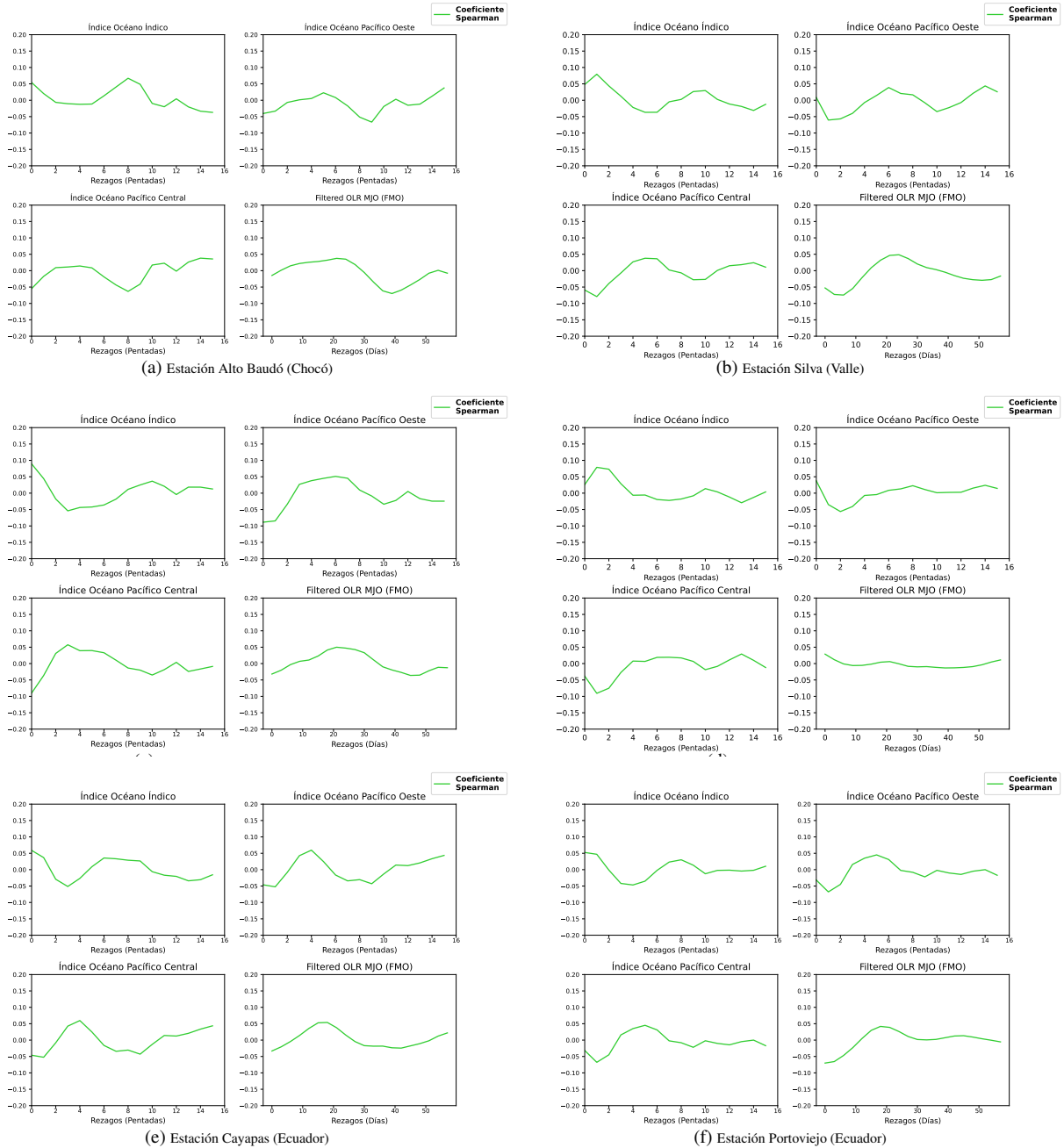
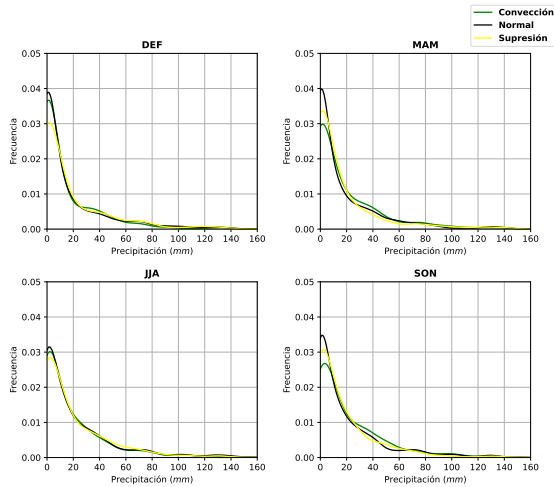


Figura 4.2: Correlación de Spearman entre índices de actividad de la MJO y series de tiempo de la precipitación en la zona de trabajo

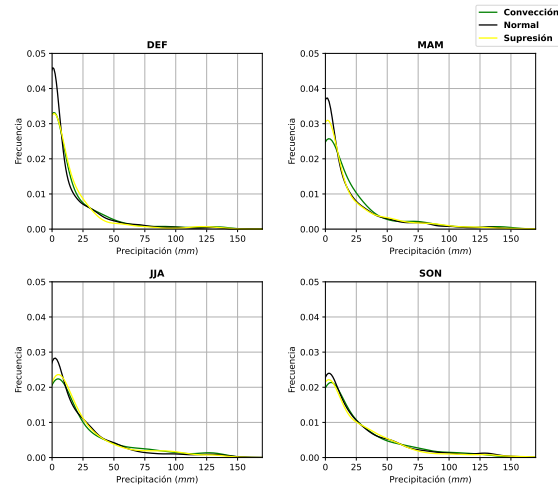
Estimando el coeficiente de correlación de Spearman, incluyendo rezagos de tiempo, se determina que no existe relación lineal significativa entre los índices asociados a la actividad del fenómeno planetario y las lluvias de la región; dado que el coeficiente de correlación no supera los 0.1 en ninguno de los casos (Figura 4.2).

4.1.2 Función de distribución de las series de tiempo de Precipitación durante fases de la MJO

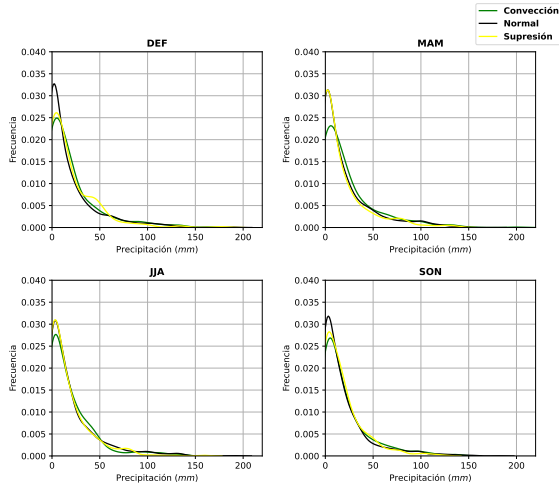
Se realiza la estimación de la función de distribución de probabilidad (PDF, siglas en inglés) de las series de tiempo de precipitación de estaciones; bajo condiciones positivas, neutras y negativas de actividad convectiva de la MJO, con base en la información del Índice de Potencial de Velocidad de la MJO (VPM, por sus siglas en inglés).



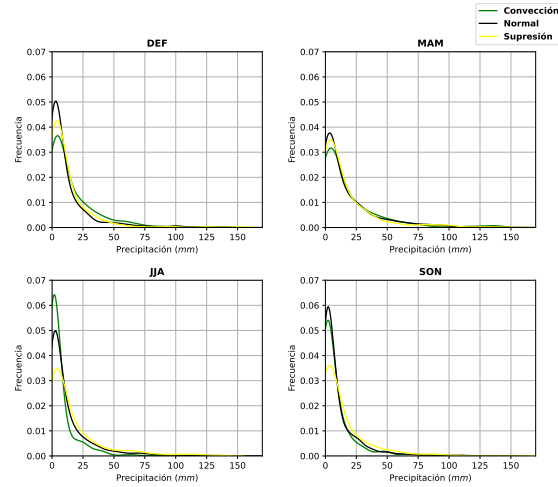
(a) Estación Alto Baudó (Chocó)



(b) Estación Silva (Valle)



(c) Estación Bocas de Napi (Cauca)



(d) Estación Magüi (Nariño)

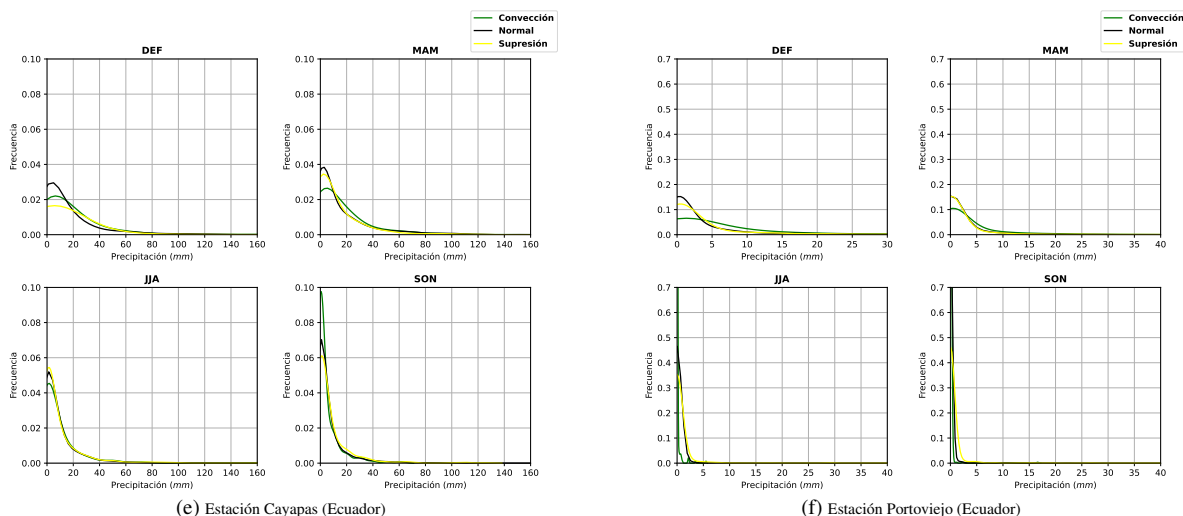


Figura 4.3: Transformada de Onditas a series de tiempo de estaciones ubicadas en la costa pacífica de Colombia y Ecuador

Al realizar dicho procedimiento, se puede observar que, para todas las series de tiempo, se obtiene una distribución asimétrica positiva (hacia la derecha) independientemente de las condiciones de actividad convectiva de la OMJ. Sin embargo; se presume mayor ocurrencia durante las fases neutras o de supresión de la OMJ a lo largo de los diferentes trimestres del año; teniendo algunas excepciones durante SON en las estaciones pluviométricas que están ubicadas en Nariño y Ecuador.

4.2 Teleconexiones entre la MJO y la Precipitación

A través de la técnica de análisis de compuestos se estudia la existencia de teleconexiones entre las fases activas e inactivas de la OMJ. Se analizaron variables asociadas a la actividad de la OMJ, tales como, Radiación de Onda Larga (ROL), Potencial de Velocidad a 200 hPa (PV200) y Presión a Nivel del Mar (PNM); y la precipitación de la región pacífica del norte de suramérica tanto en la época de verano (JJA), otoño (SON), invierno (DEF) y primavera (MAM) en el hemisferio norte.

4.2.1 Verano Boreal (JJA)

Basado en 49 eventos de precipitación en la escala intraestacional durante JJA, se analizó el comportamiento de las variables asociadas a la actividad de la OMJ en la zona de estudio, cuando la fase activa de este fenómeno planetario se establece sobre el Océano Índico (día 0).

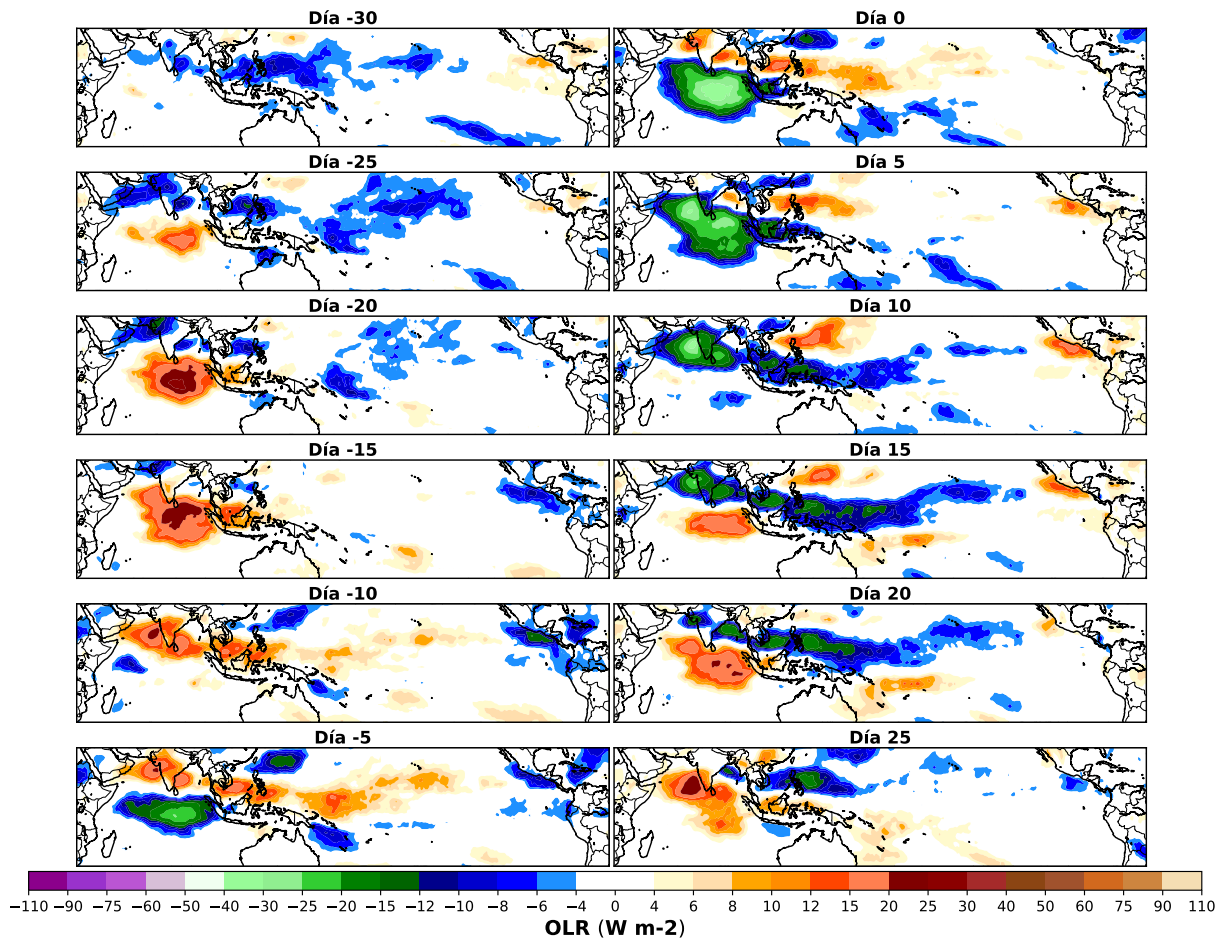


Figura 4.4: Evolución de compuestos de la OLR durante el verano boreal (JJA) de -30 a 25 días basado en 49 eventos

Como se puede observar en la Figura 4.4, 15 días antes del inicio de la convección, sobre el Océano Índico se presentan anomalías asociadas a baja nubosidad, mientras que en el Pacífico del norte de Suramérica se presentan anomalías asociadas a convección. A su vez, desde el día 0 y hasta los 15 días posteriores, cuando las condiciones factibles para alta nubosidad asociada a la convección se establecen en el Océano Índico, sobre el norte de la región Pacífica suramericana las condiciones son contrarias y se asocian a baja nubosidad.

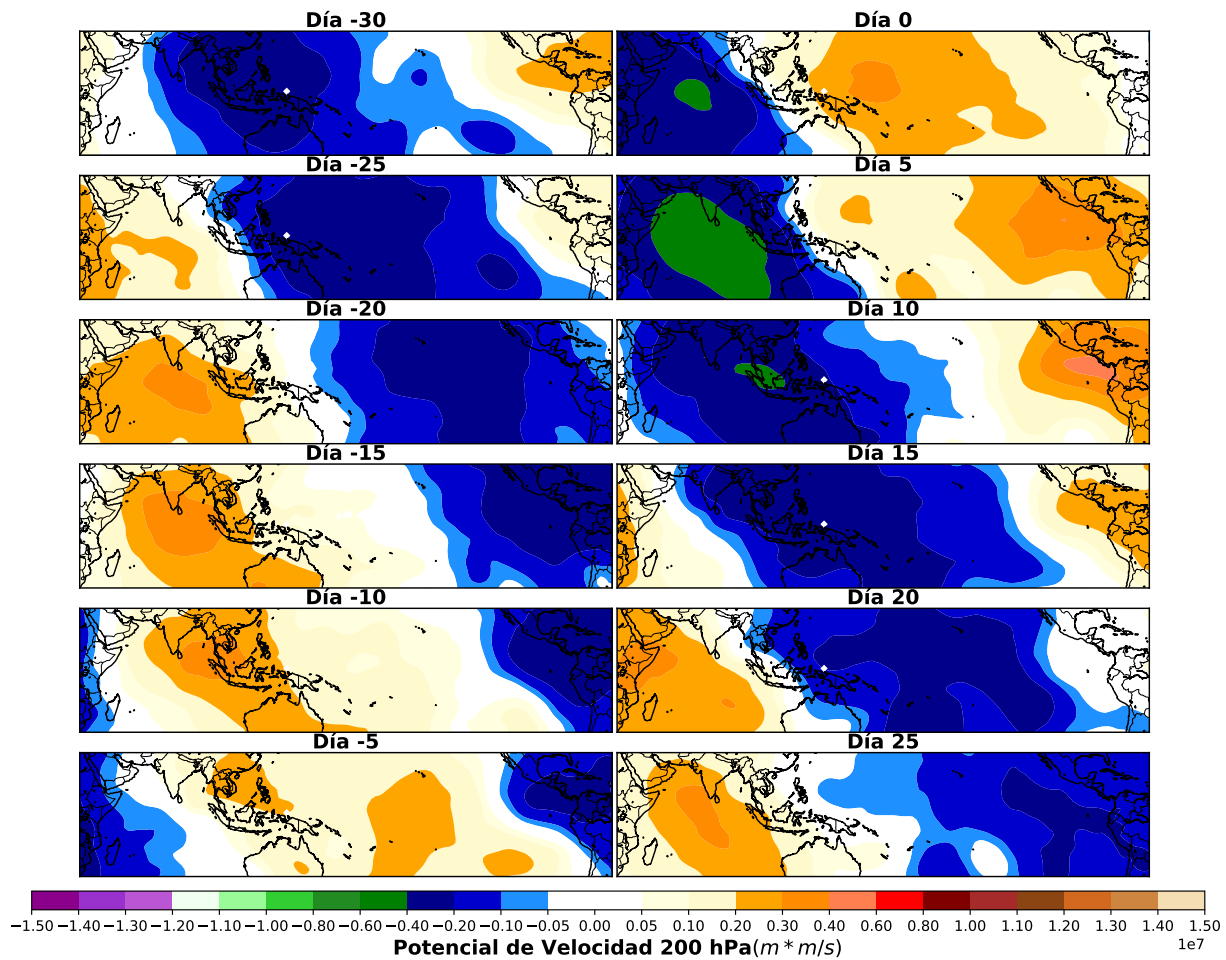


Figura 4.5: Similar a la Figura 4.4 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante verano boreal (JJA)

Al analizar el comportamiento de PV200 se logra determinar que, cuando la fase activa de la OMJ se establece en el Índico, se presentan anomalías negativas asociadas al fortalecimiento de la convección en esta zona, mientras que sobre pacífico al norte de suramérica se establecen anomalías positivas asociadas a supresión (Figura 4.5); siendo coherentes con el comportamiento de la ROL observado en la figura 4.4.

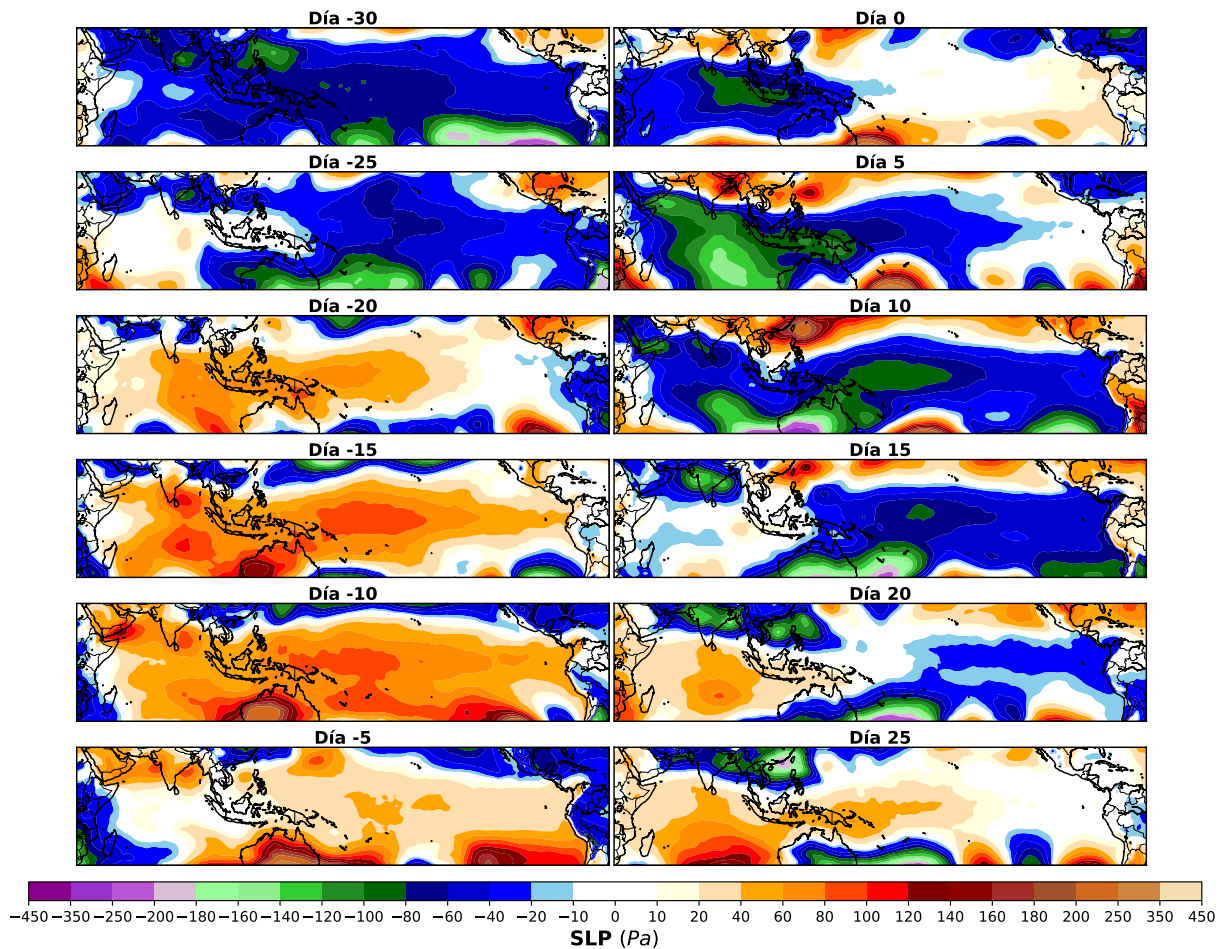


Figura 4.6: Similar a la Figura 4.4 pero para Presión a Nivel del Mar durante verano boreal (JJA)

Al observar el PNM, es evidente el desfase que existe entre la variable en el Océano Índico y el Pacífico Este; presentando condiciones favorables para la convección (anomalías negativas asociadas a zonas de baja presión) en el día 0 sobre el océano Índico, propiciado por la poca nubosidad que antecedió al evento 15 días (4.4, generando posibles anomalías positivas de temperatura del océano y posterior inestabilización de la atmósfera.

Se puede establecer la posible existencia de una teleconexión entre la actividad de la OMJ sobre el océano Índico y la actividad convectiva de la zona de estudio; presentado una correlación negativa entre los comportamientos de dichos fenómenos, dado que siempre que hay condiciones favorables para la convección en una región, en la otra prevalecen condiciones asociadas a

supresión.

4.2.2 Otoño Boreal (SON)

Basado en 38 eventos de precipitación en la escala intraestacion durante SON, se realiza el procedimiento implementado anteriormente.

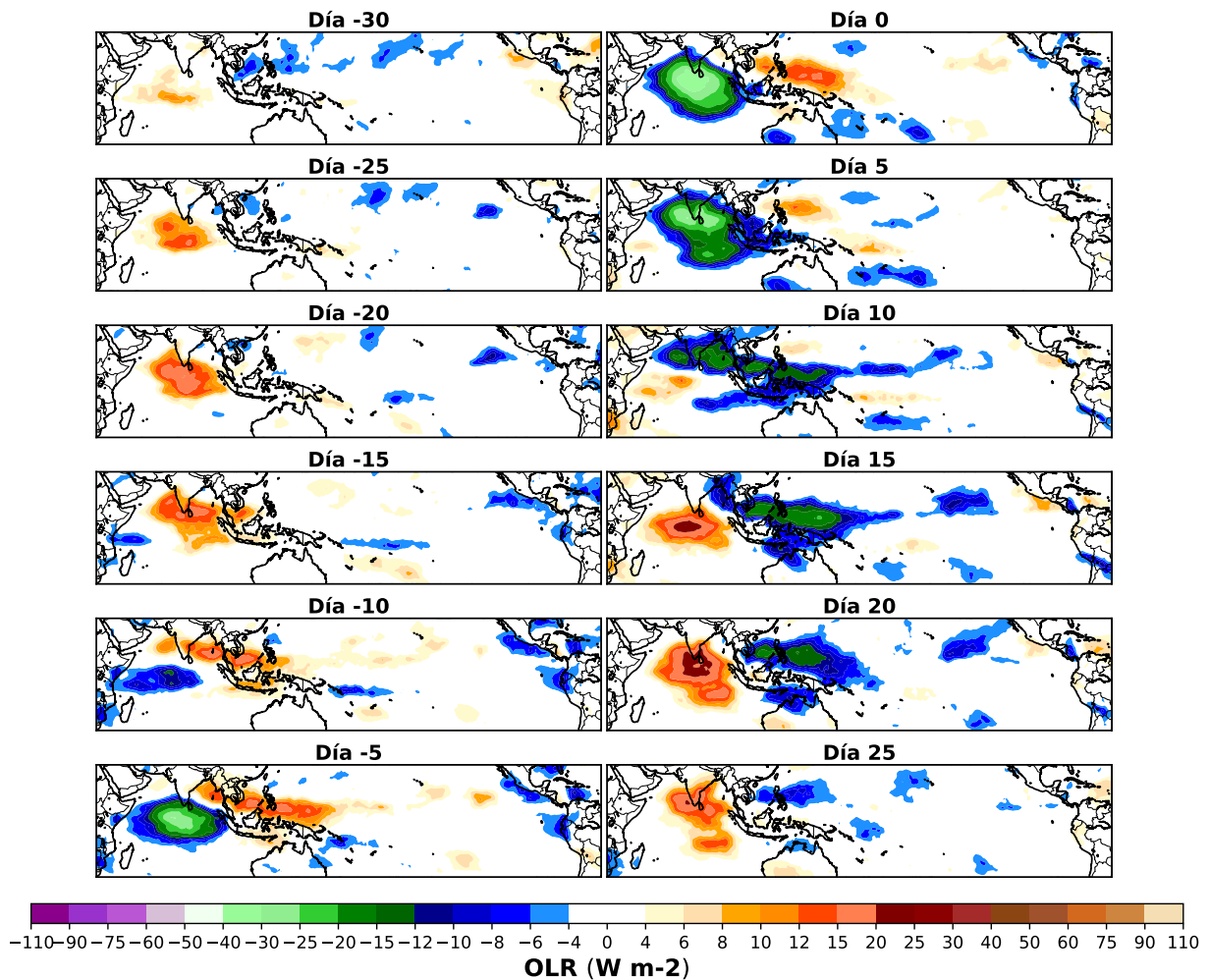


Figura 4.7: Evolución de compuestos de la OLR durante el otoño boreal (SON) de -30 a 25 días basado en 38 eventos

Como se puede ver en la Figura 4.7, 15 días antes del inicio de la convección, sobre el Océano Índico, se presentan anomalías positivas de ROL, asociadas a poca presencia de nubes; sin embargo, a diferencia de lo ocurrido en JJA, en la región pacífica del norte de Suramérica, no se generan

anomalías importantes asociadas a actividad convectiva . A su vez, en el día 0, cuando se establecen en el Océano Índico condiciones factibles para alta nubosidad asociada a la convección, sobre el norte de la región pacífica suramericana prevalece la ausencia de nubes.

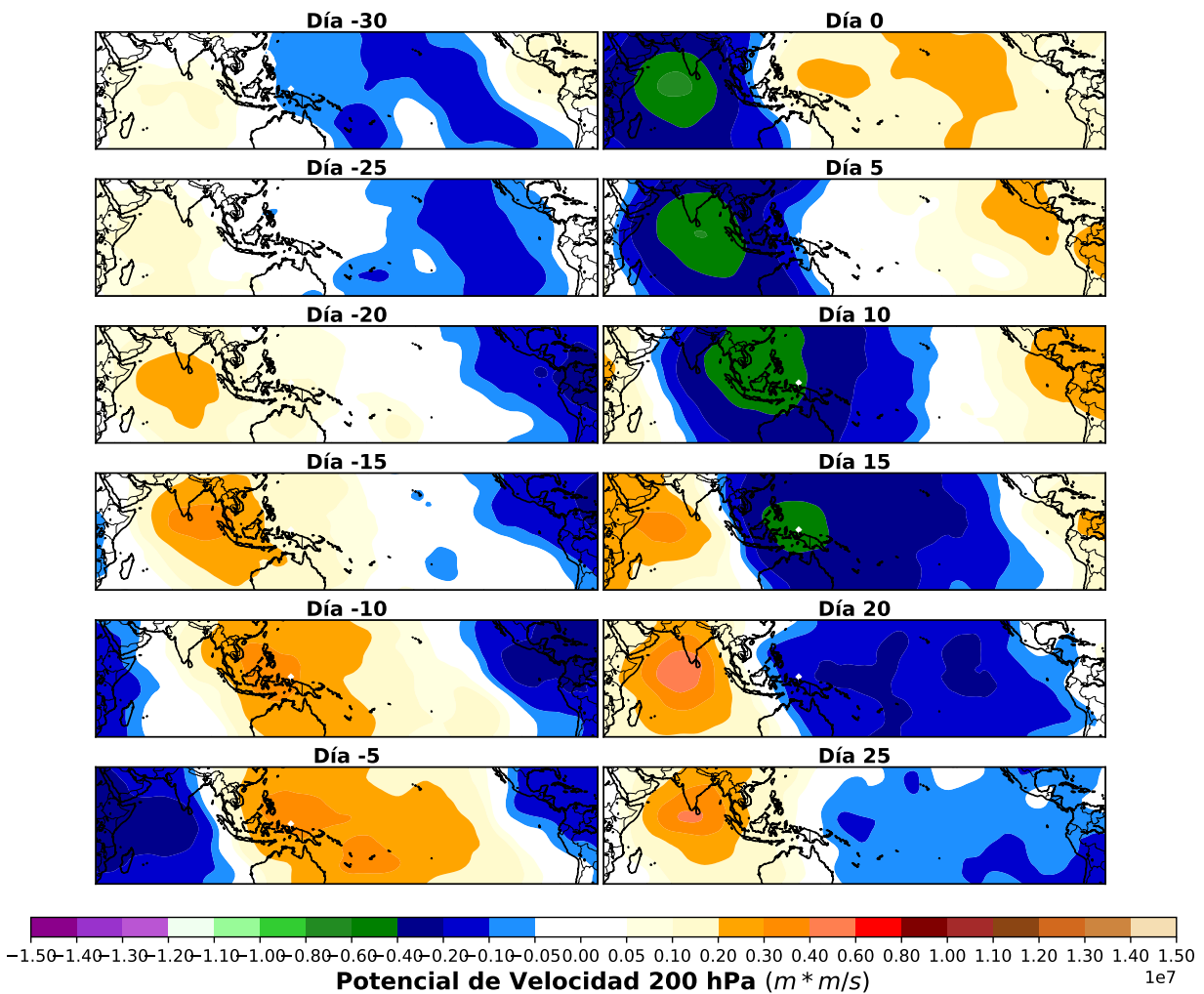


Figura 4.8: Similar a la Figura 4.7 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante otoño boreal (SON)

Al analizar el comportamiento de PV200 se logra determinar que cuando la fase activa de la OMJ se establece en el Índico, presentando anomalías negativas, en el pacífico este se establecen anomalías positivas fuerte, conllevando a condiciones de supresión (Figura 4.8); sin embargo, durante la condiciones de subsidencia en el Índico, el pacífico norte de suramérica las anomalías negativas no son tan significativas.

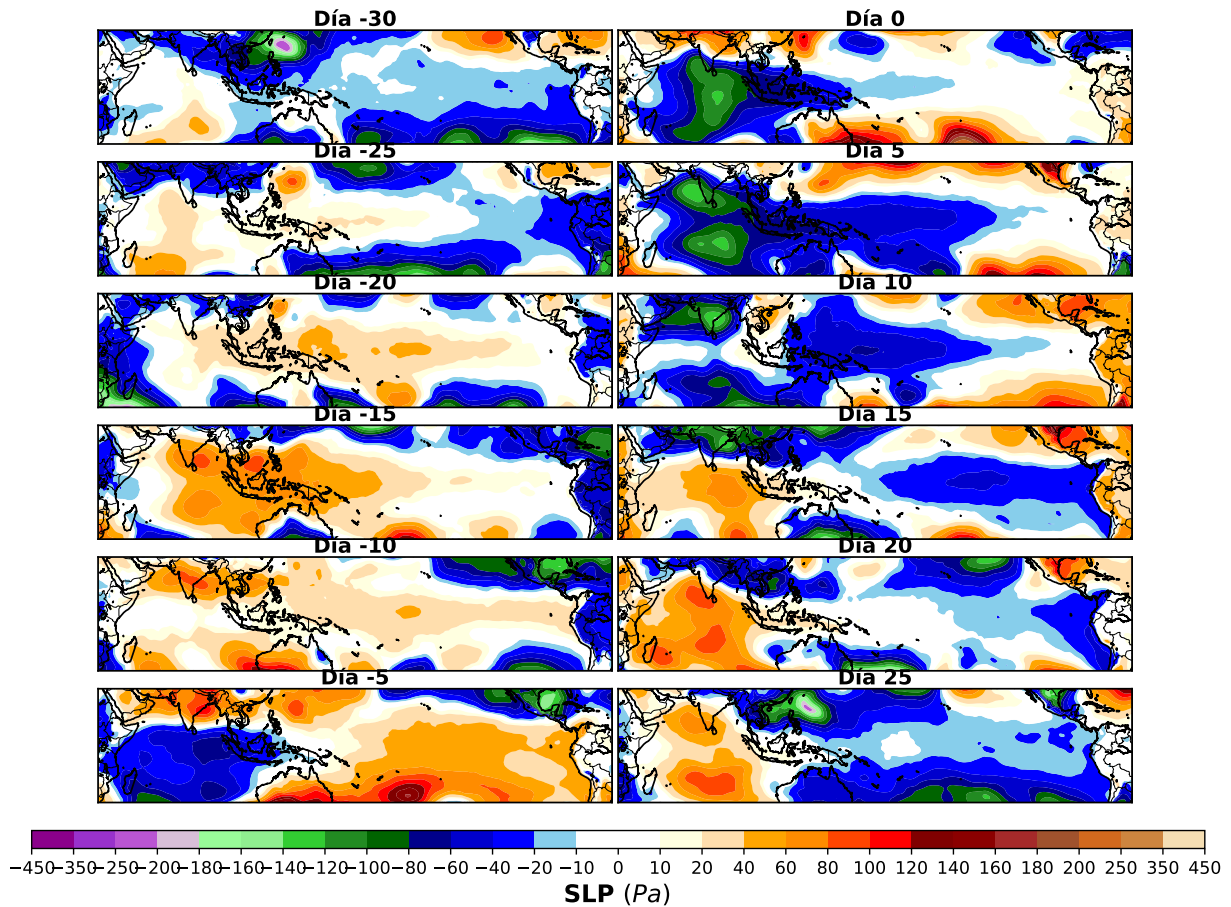


Figura 4.9: Similar a la Figura 4.7 pero para Presión a Nivel del Mar durante otoño boreal (SON)

Al observar la variable PNM, se observa la presencia de anomalías negativas en el Índico, asociadas a convección, desde el día -5; las cuales se desplazan hacia el Pacífico Central y Este en los días posteriores sin asociarse a comportamiento convectivo, de acuerdo a lo observado en la figura 4.7

Durante este trimestre, a diferencia de JJA, se puede observar que no existe una teleconexión clara entre la actividad de la OMJ y la actividad convectiva en la zona de estudio; puesto que los comportamientos de las variables estudiadas no presentan relación alguna.

4.2.3 Invierno Boreal (DEF)

Basado en 38 eventos de precipitación en la escala intraestacion durante DEF, se lleva a cabo el análisis de existencia de teleconexiones.

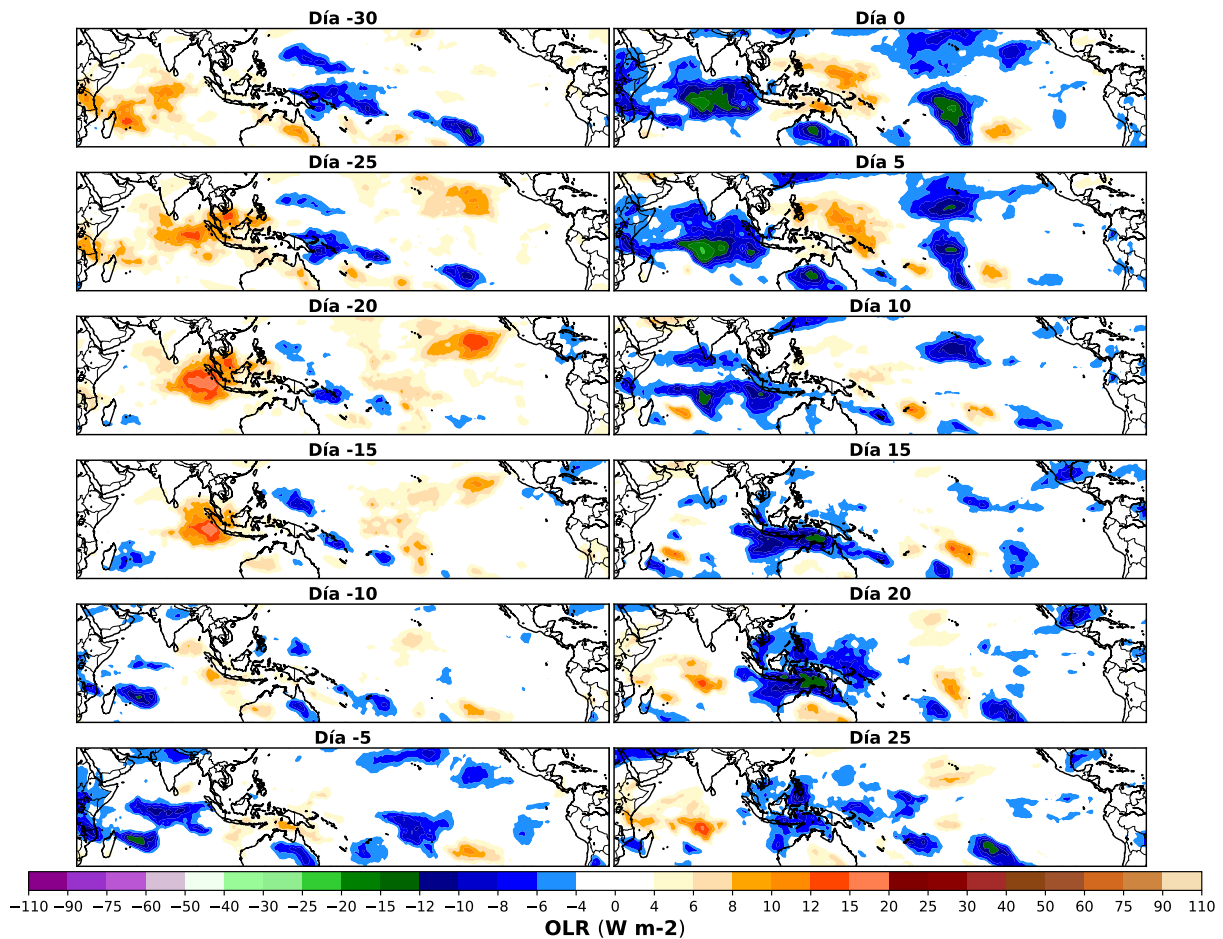


Figura 4.10: Evolución de compuestos de la OLR durante el invierno boreal (DEF) de -30 a 25 días basado en 38 eventos

Como se puede ver en la Figura 4.10, 15 días antes del inicio de la convección, sobre el Océano Índico y Pacífico Central, se presentan anomalías positivas de ROL, asociadas a poca presencia de nubes; sin embargo, a diferencia de lo ocurrido en JJA, en la región pacífica del norte de Suramérica, no se generan anomalías importantes que signifiquen actividad convectiva. A su vez, en el día 0, cuando las condiciones factibles para alta nubosidad asociada a la convección se establecen en el Océano Índico, sobre el norte de la región pacífica suramericana prevalece la ausencia de nubes.

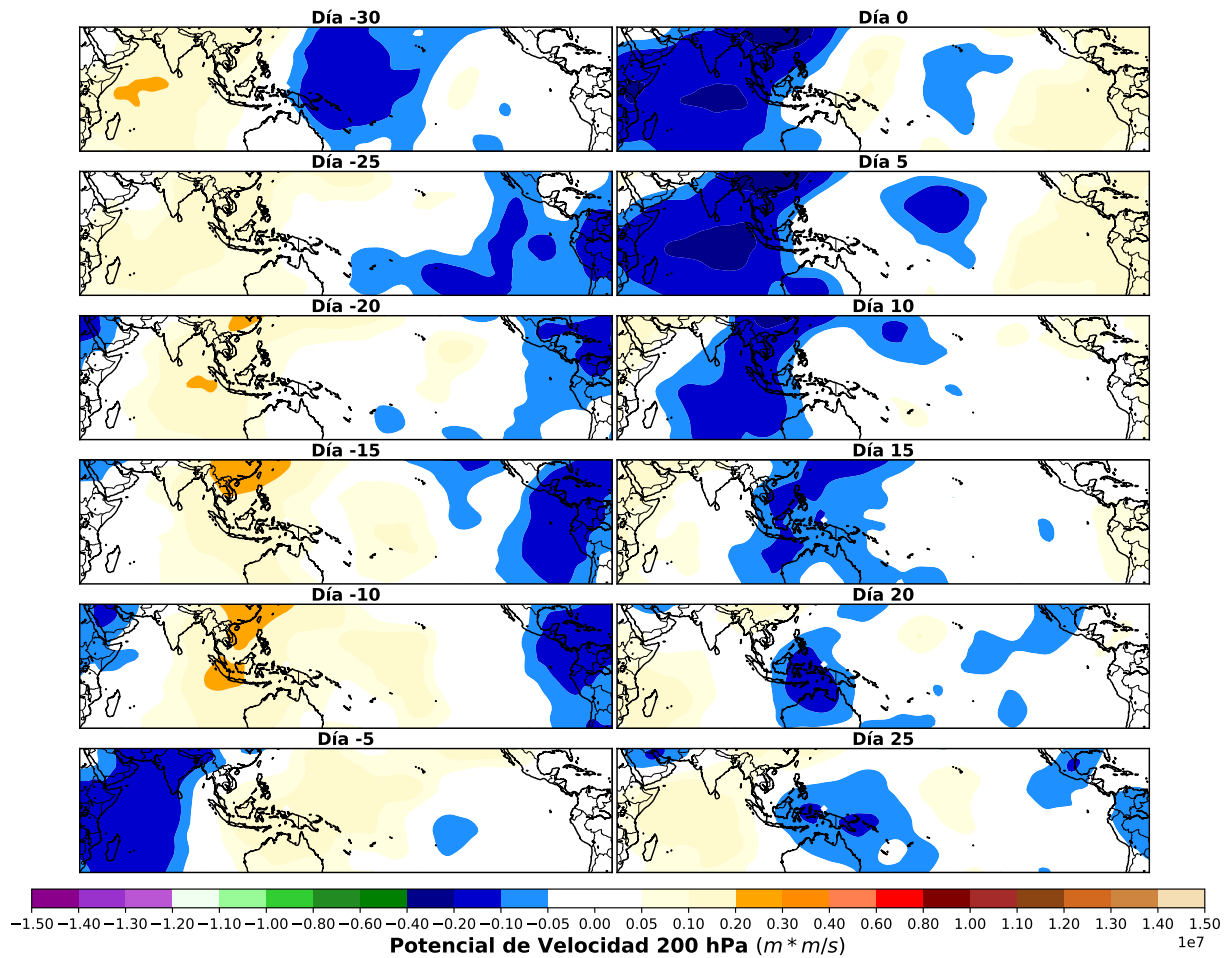


Figura 4.11: Similar a la Figura 4.10 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa durante invierno boreal (DEF)

Al analizar el comportamiento de PV200 se logra determinar que cuando la fase activa de la OMJ se establece en el Índico y Pacífico Central, presentando anomalías negativas, en el pacífico este se establecen anomalías positivas, que sugieren la presencia de condiciones de supresión (Figura 4.11).

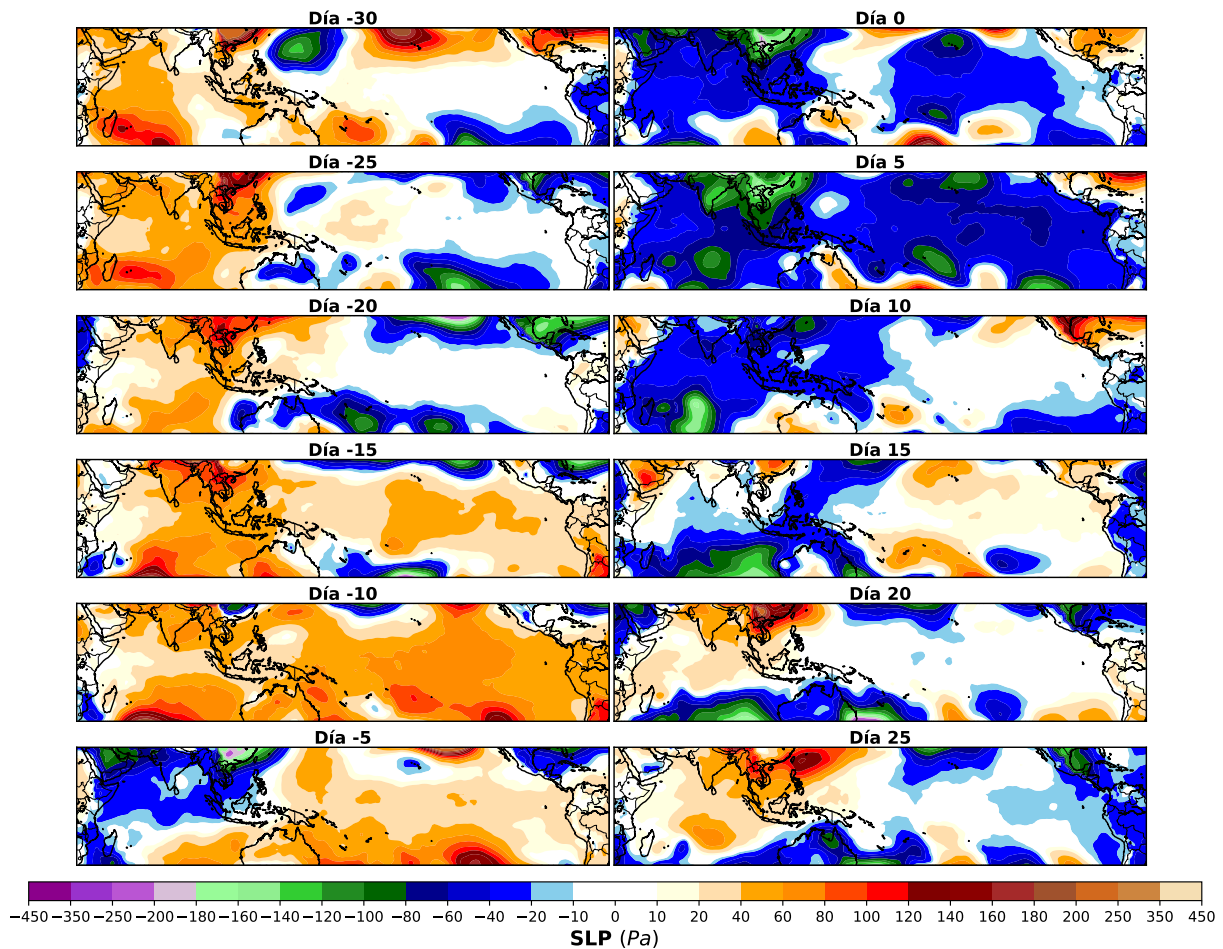


Figura 4.12: Similar a la Figura 4.10 pero para Presión a Nivel del Mar durante invierno boreal (DEF)

Al observar el comportamiento de la PNM, se evidencia que se establecen condiciones favorables para la convección en el día 0 en el Índico y Pacífico Central, que se desplazan en los días posteriores hacia el este, pero que no logran ser asociadas a actividad convectiva, con respecto a lo observado en la figura 4.10.

Durante este trimestre, no se obtiene evidencia que pueda sugerir la existencia de alguna teleconexión entre la actividad de la OMJ y la convección en la zona de estudio.

4.2.4 Primavera Boreal (MAM)

Basado en 42 eventos de precipitación en la escala intraestacion durante MAM, se realiza el procedimiento descrito inicialmente.

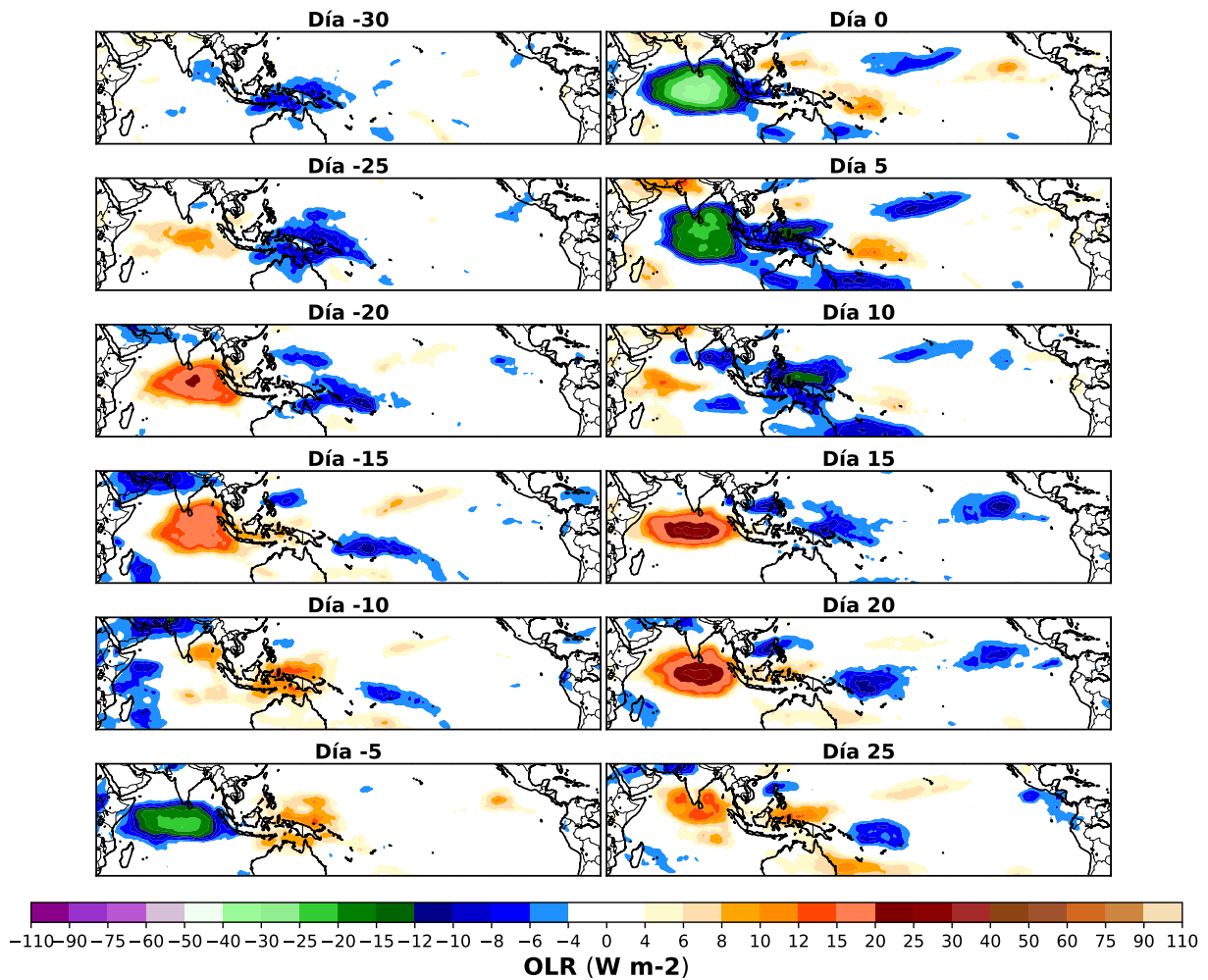


Figura 4.13: Evolución de compuestos de la OLR durante la primavera boreal (MAM) de -30 a 25 días basado en 42 eventos

Durante las fases activas e inactivas de la OMJ sobre el océano Índico, en el Pacífico Este no se evidencian señales asociadas a convección o supresión (Figura 4.13)

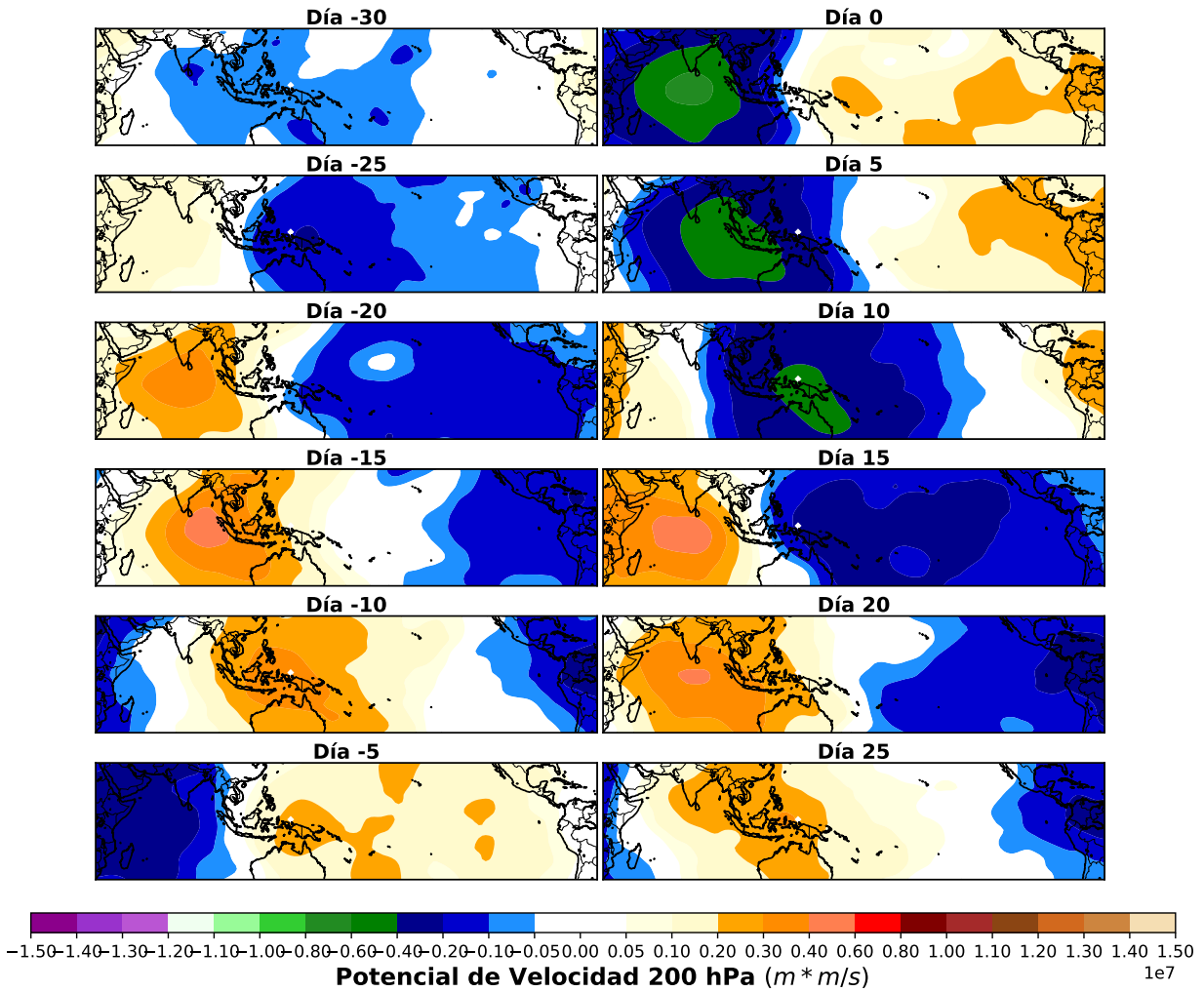


Figura 4.14: Similar a la Figura 4.13 pero para Potencial de Velocidad a los 200 hPa la primavera boreal (MAM)

Al analizar el comportamiento de PV200 se logra determinar que cuando la fase activa de la OMJ se establece en el Índico, se presentan condiciones de supresión en el Pacífico Este (anomalías positivas); y del mismo modo, cuando hay anomalías negativas sobre el Pacífico Este, se establecen anomalías positivas sobre el Océano Índico (Figura 4.14).

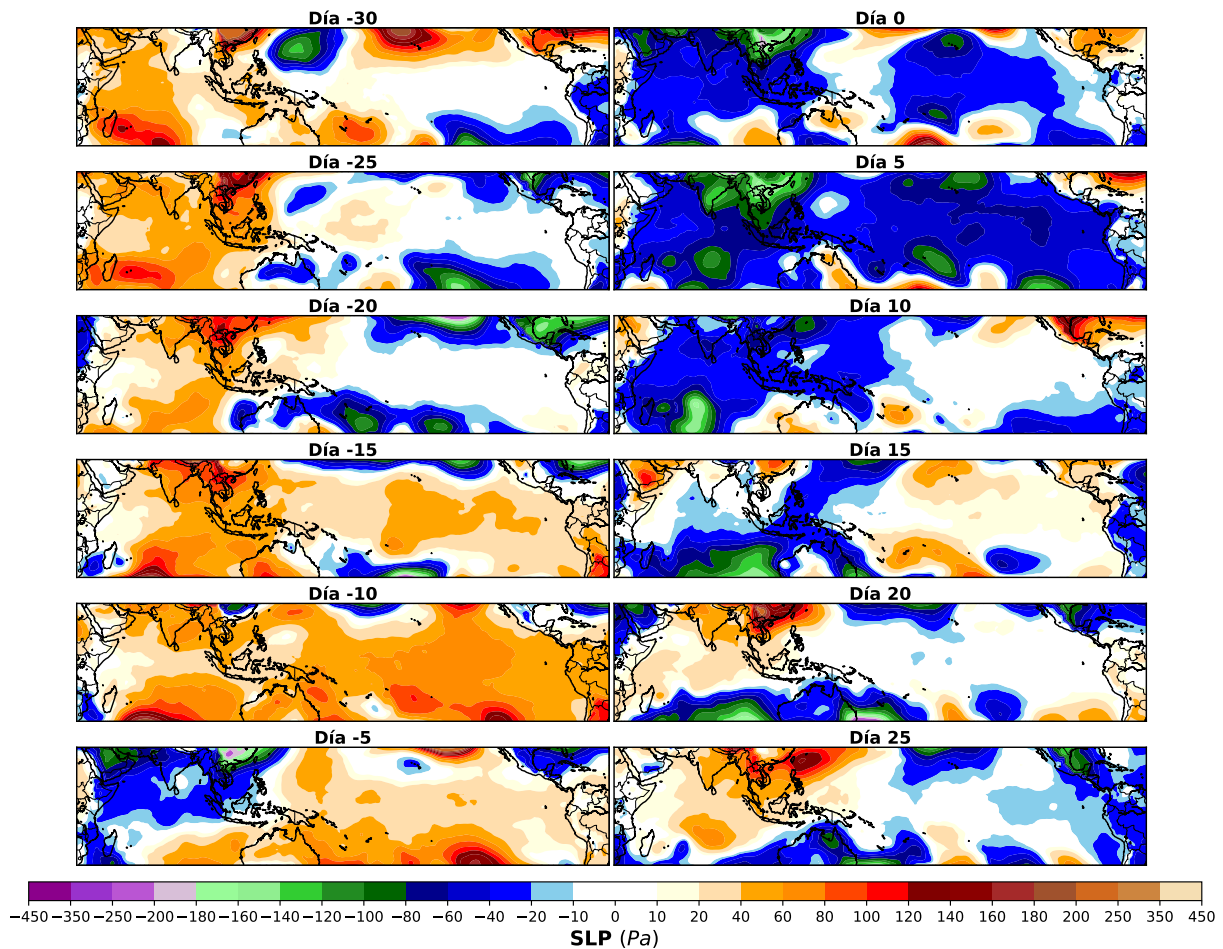


Figura 4.15: Similar a la Figura 4.13 pero para Presión a Nivel del Mar durante la primavera boreal (MAM)

Al observar el comportamiento de la PNM, no se observa una variabilidad sobre las zonas de interés que permita establecer una coincidencia entre sus comportamientos durante la fase activa e inactiva de la OMJ.

Durante MAM tampoco se obtiene evidencia de la existencia de una teleconexión entre la actividad convectiva de la OMJ y de la zona de estudio.

5. ROL DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN OCÉANO-CONTINENTE-ATMÓSFERA (OLA) EN LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN

En la región se presenta amplia variabilidad intraestacional, como se evidencia en la Figura 3.3, la cual trae consigo beneficios en diferentes aspectos, tal como la agricultura, transporte y abastecimiento de agua en épocas secas; no obstante el conocimiento que se tiene acerca de la dinámica que condiciona este comportamiento aún es deficiente.

Para estudiar la precipitación en la escala intraestacional se filtran las series de tiempo en la escala temporal entre 10-90 días; con el fin de anular señales asociadas a otros moduladores como el ciclo anual o el fenómeno ENSO.

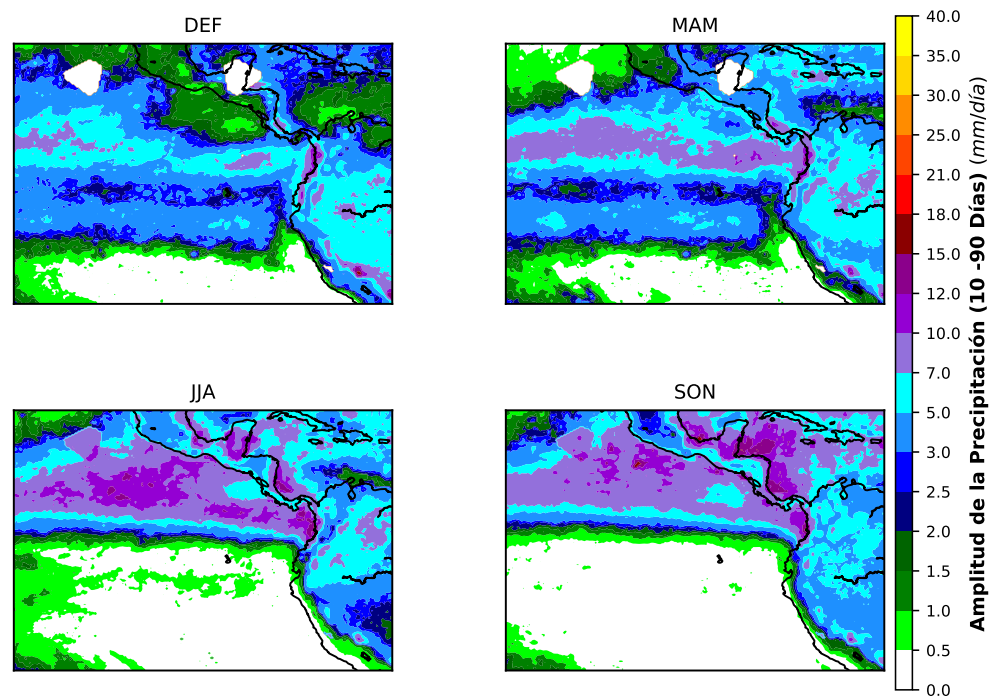


Figura 5.1: Amplitud media trimestral de la precipitación a escala intraestacional (1998 a 2015)

Se puede observar que las regiones de mayor amplitud (mayor varianza) en esta zona del pa-

cífico (Figura 5.1) coinciden con las zonas donde se presenta mayor pluviosidad al analizar su comportamiento medio anual (Figura 1.3); evidenciando la importancia de esta oscilación para el fenómeno en nuestra área de estudio. A su vez, es importante destacar que las zonas de amplia variabilidad de la precipitación intraestacional en la región de estudio corresponden a las áreas donde la media de la medía multianual de la TSM es mayor a 26 °C (Figura 1.4), permitiendo sugerir que el acoplamiento entre variables puede existir aún en la escala intraestacional.

5.1 Estimación de la incidencia en la Precipitación

A través de la técnica de análisis de compuestos, se analiza el comportamiento de diferentes variables proxys asociadas a la interacción Oceano - Continente - Atmósfera, con el objetivo de analizar la incidencia de esta interacción en la ocurrencia de lluvias en la región pacífica del norte de suramérica durante verano (JJA), otoño (SON), invierno (DEF) y primavera (MAM) en el hemisferio norte.

Se estima un índice de precipitación para la zona comprendida entre las latitudes 3.125 N y 9.125 N y las longitudes 80.375 W y 76.875 W; a partir de éste se estiman eventos significativos de precipitación que presentan anomalías positivas superiores a 1 desviación estándar (Ver Capítulo 2). A continuación, se analiza el comportamiento de la Precipitación y variables asociadas a la interacción OLA, como lo son la presión a nivel del mar (PNM) y vientos a los 925 hPa, temperatura superficial del mar (TSM) y temperatura del aire a los 2 m (T2m).

5.1.1 Verano Boreal

Se toman 64 eventos de precipitación durante JJA, y se evalúa el comportamiento medio de las variables mencionadas anteriormente, desde 8 días antes de la ocurrencia del evento hasta los 6 días posteriores al mismo, con el fin de establecer la existencia de alguna interacción y la incidencia sobre la propiciación de condiciones óptimas para la convección de humedad y posteriores precipitaciones.

■ Precipitación

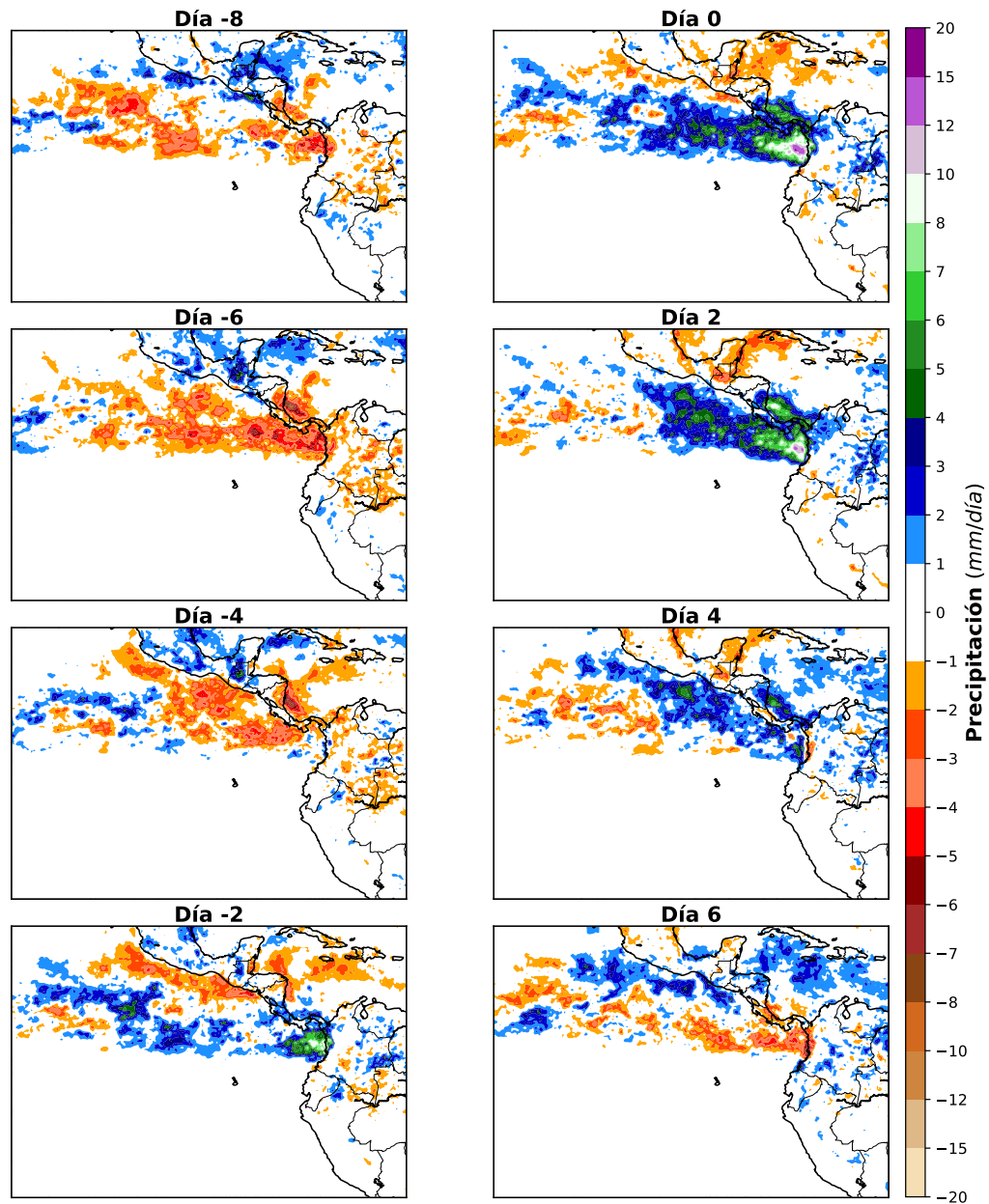


Figura 5.2: Evolución de compuestos de la Precipitación en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 64 eventos

Se evidencia la presencia de anomalías negativas de precipitación hasta 4 días previos al evento, asociadas a condiciones de baja nubosidad; y a partir del día -2 se establece un sistema convectivo que se mantiene hasta por dos días posteriores al evento máximo de anomalías positivas; ocurriendo además que, desde el día +4, el sistema convectivo comienza a inhibirse y desaparece por completo para el día +6.

- Temperatura del Aire a 2m

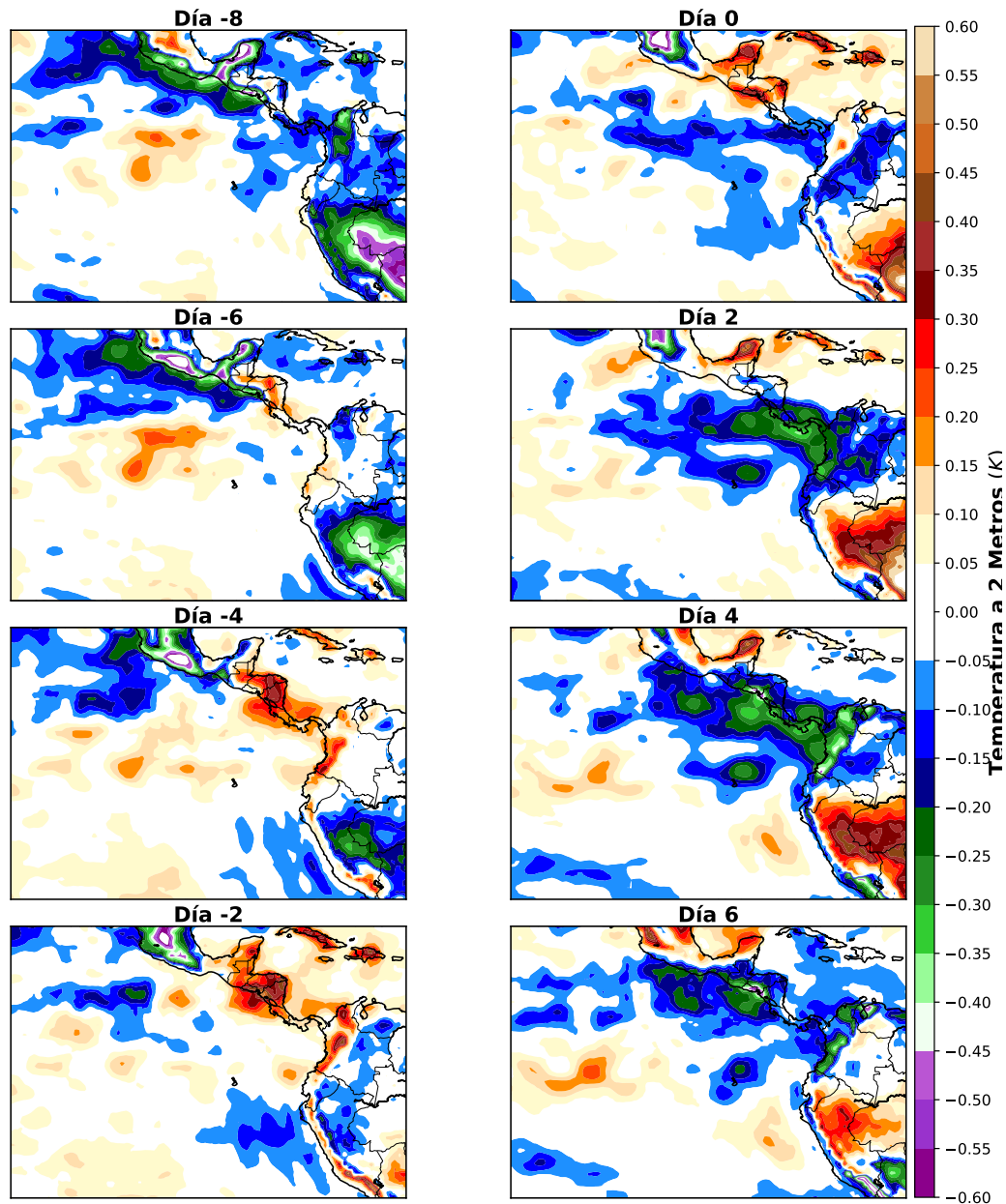


Figura 5.3: Similar a la figura 5.2 pero para Temperatura del aire a 2m

Se presentan anomalías positivas en las costas pacíficas de Colombia y Ecuador desde los 4 días previos al evento convectivo, asociadas a baja nubosidad, y dichas zonas se enfrían (anomalías negativas) durante el evento de lluvia y hasta los 6 días posteriores al mismo, cuando las anomalías de precipitación se asocian a baja nubosidad permitiendo nuevamente la incidencia del sol sobre la superficie continental y oceánica.

- Temperatura Superficial del Mar

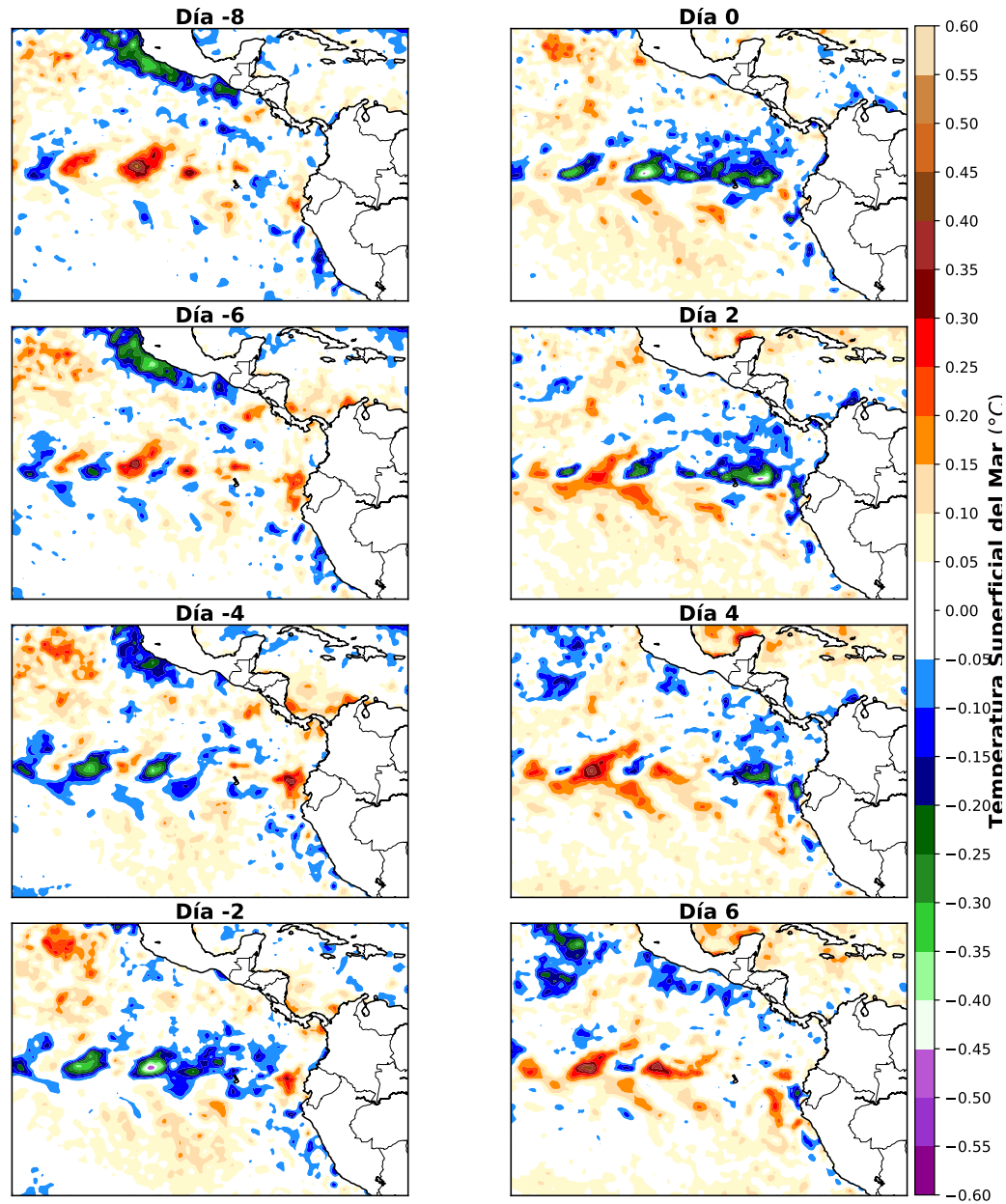


Figura 5.4: Similar a la figura 5.2 pero para temperatura superficial del mar (SST)

En concordancia con lo observado en la Figura 5.2, los días previos al evento, se presentan anomalías positivas de TSM (Figura 5.4), las cuales pueden propiciar disponibilidad de vapor de agua y, a su vez, el posible establecimiento de zonas de baja presión que propician condiciones ideales para la ocurrencia de eventos de lluvia. Del mismo modo, las anomalías pasan a ser negativas desde que el sistema convectivo se establece y se mantiene hasta por 4 días posteriores al

evento, cuando las condiciones de nubosidad bajan nuevamente.

■ Presión a Nivel del Mar

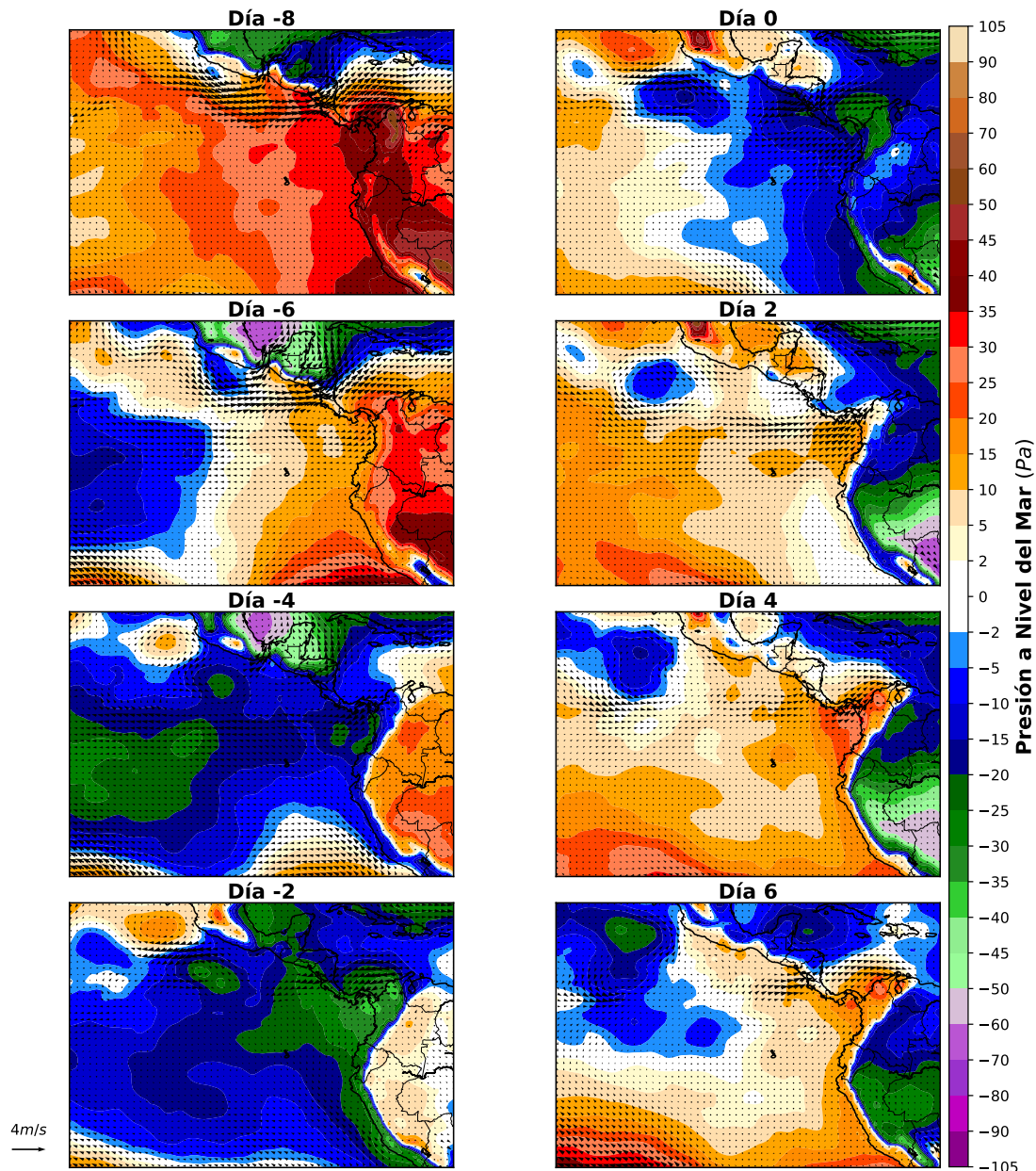


Figura 5.5: Similar a la figura 5.2 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa

Se evidencia el establecimiento de zonas de baja presión en sitios donde hubo predominio de anomalías positivas tanto en la variable TSM y T2m; presentando un curvamiento de los vientos hacia el continente desde el día -4, propiciando así el posible ingreso de humedad hacia estas zonas y conllevando a la generación del sistema convectivo desde el día -2.

5.1.2 Otoño Boreal (SON)

Se toman 57 eventos de precipitación entre SON, y se realiza el mismo procedimiento de la sección anterior.

■ Precipitación

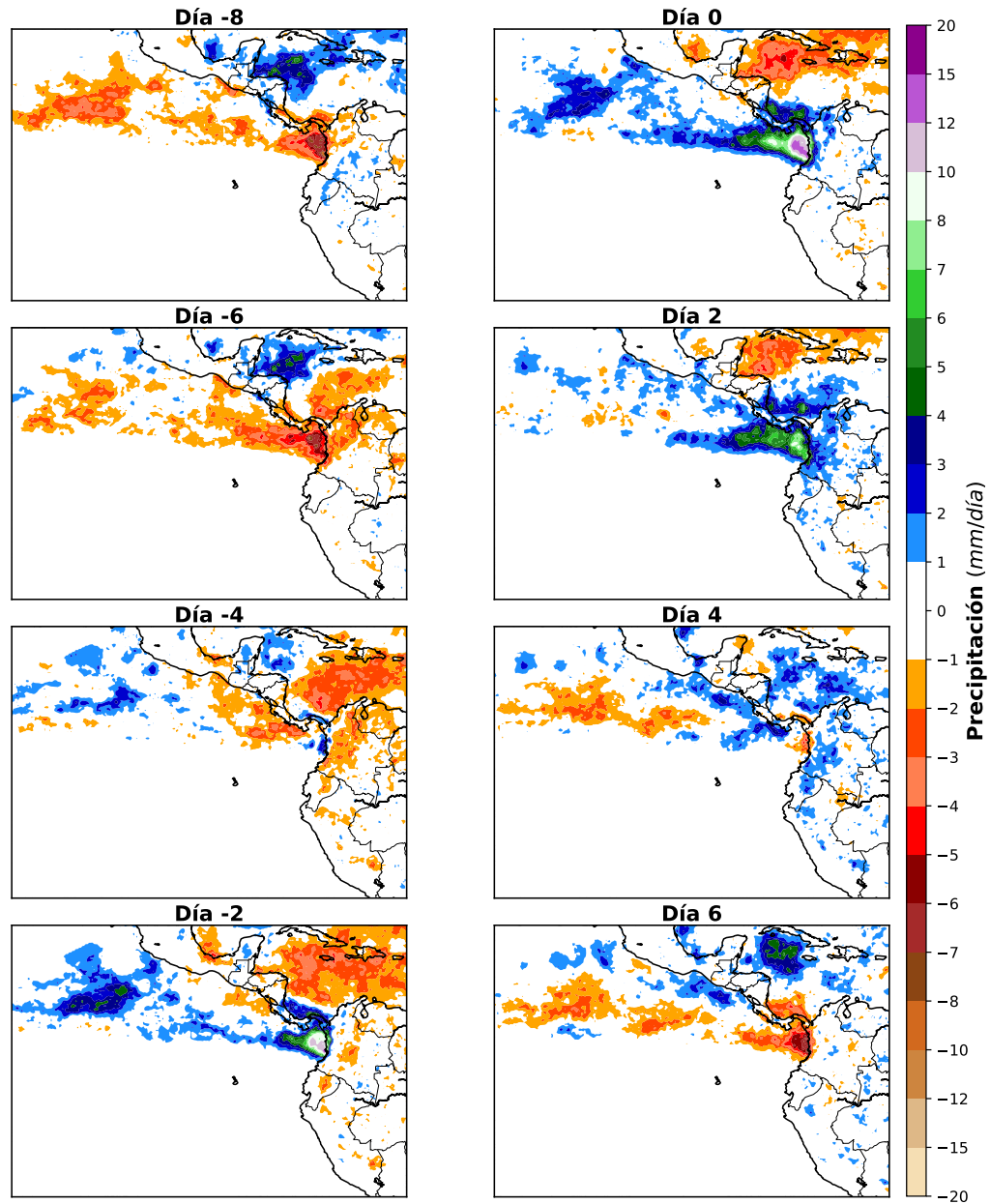


Figura 5.6: Evolución de compuestos de la Precipitación en el Otoño Boreal (SON), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos

Del mismo modo que durante JJA (Figura 5.2), las anomalías negativas de precipitación se pre-

sentan desde 8 días hasta 4 días previos al evento convectivo, a partir de 2 días antes se establecen las anomalías positivas que se mantienen hasta los 4 días posteriores al evento.

- Temperatura del Aire a 2m

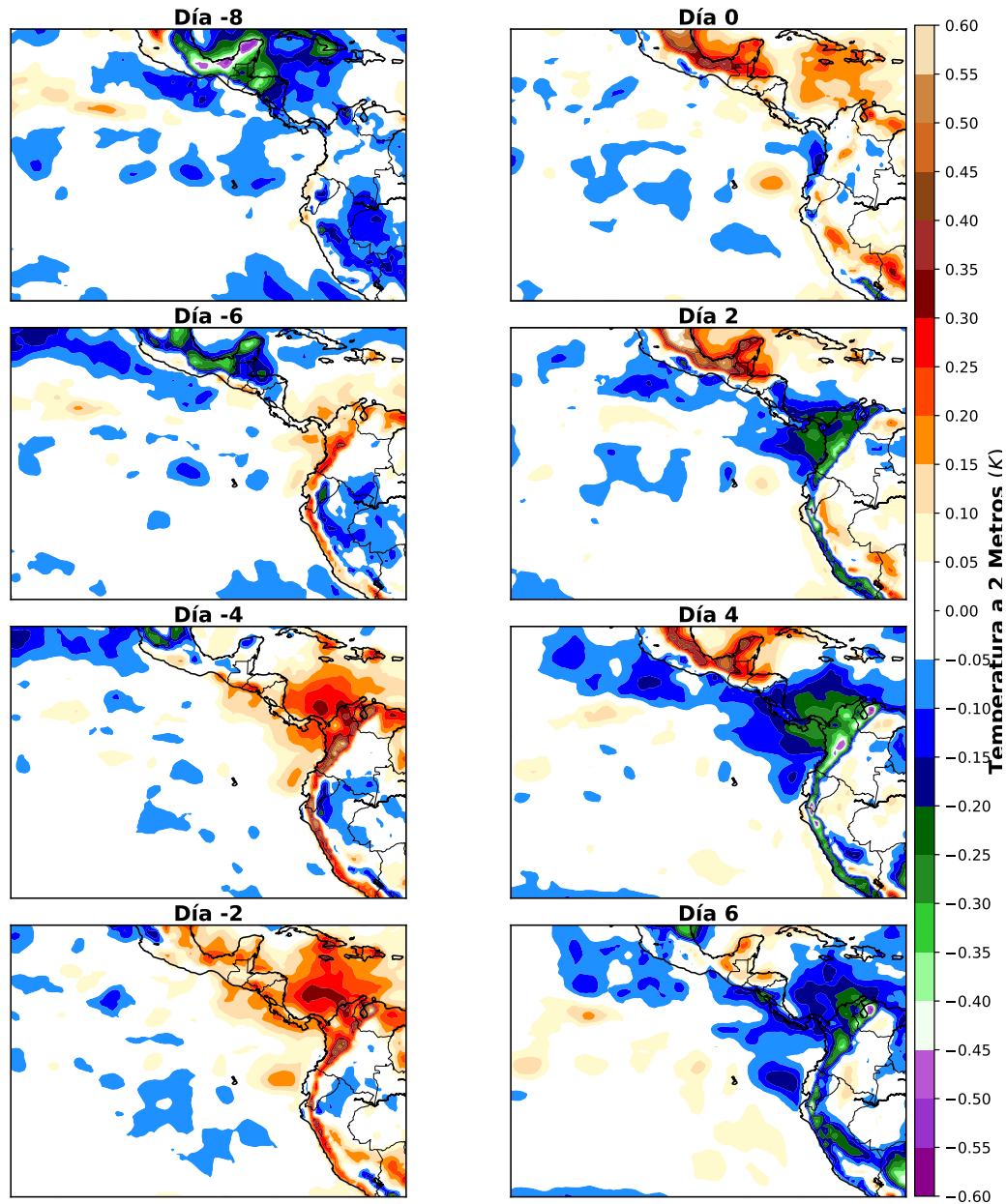


Figura 5.7: Similar a la figura 5.6 pero para Temperatura del aire a 2m

A su vez, las anomalías positivas de T2m se presentan significativamente desde los 4 días previos al evento, hasta el establecimiento del mismo donde, asociado a la presencia de nubes y la

dificultad para la incidencia del sol en la superficie, desde 2 días posteriores al evento se inicia el enfriamiento de la zona.

- Temperatura Superficial del Mar

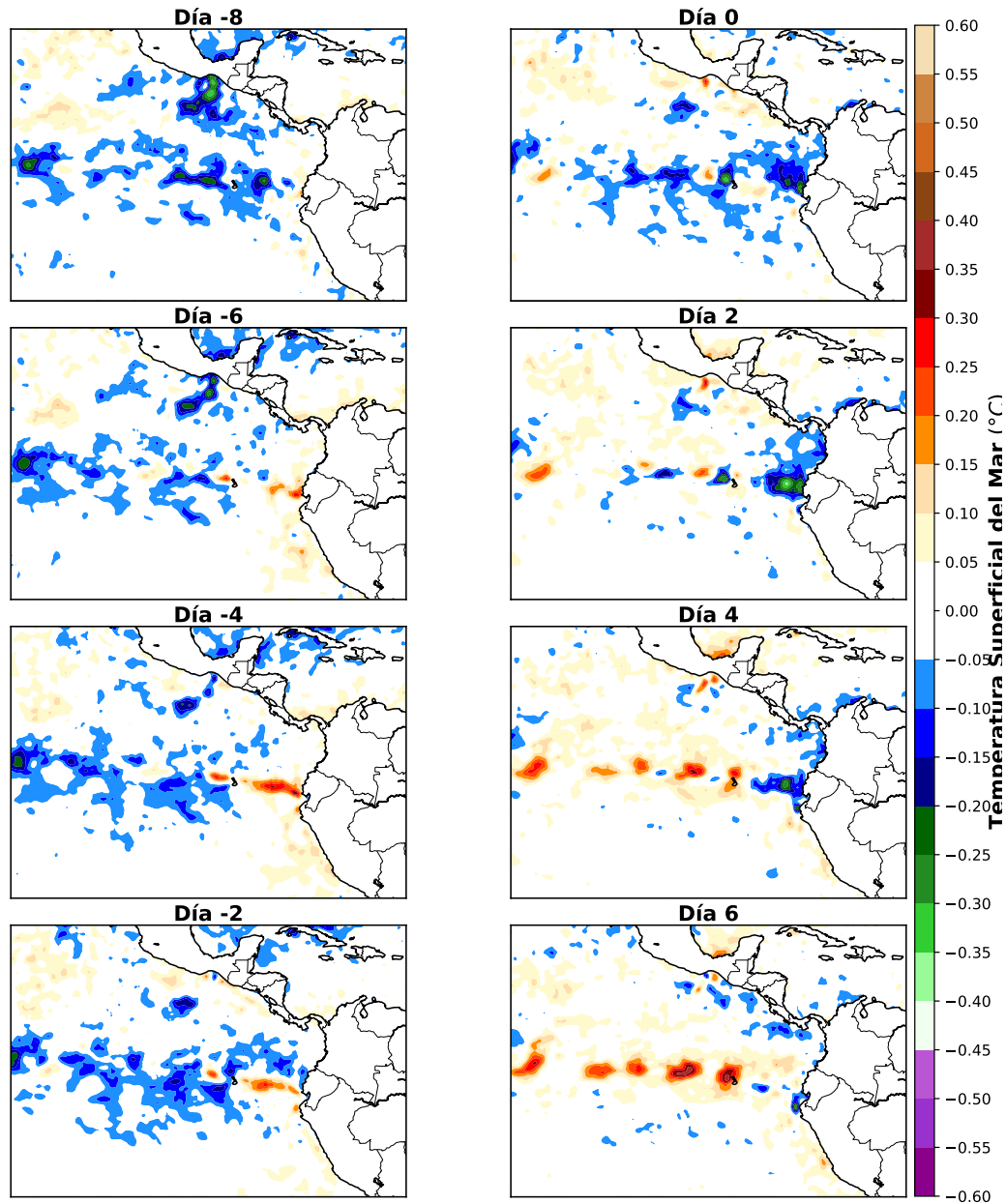


Figura 5.8: Similar a la figura 5.6 pero para temperatura superficial del mar (SST)

Las anomalías positivas de TSM se establecen desde 6 días previos al evento convectivo, propiciado, posiblemente, condiciones de disponibilidad de humedad cerca de la superficie del mar e

induciendo la formación de zonas de baja presión. El calentamiento se sostiene hasta la ocurrencia del evento y presenta anomalías negativas importantes hasta por 4 días posteriores.

■ Presión a Nivel del Mar

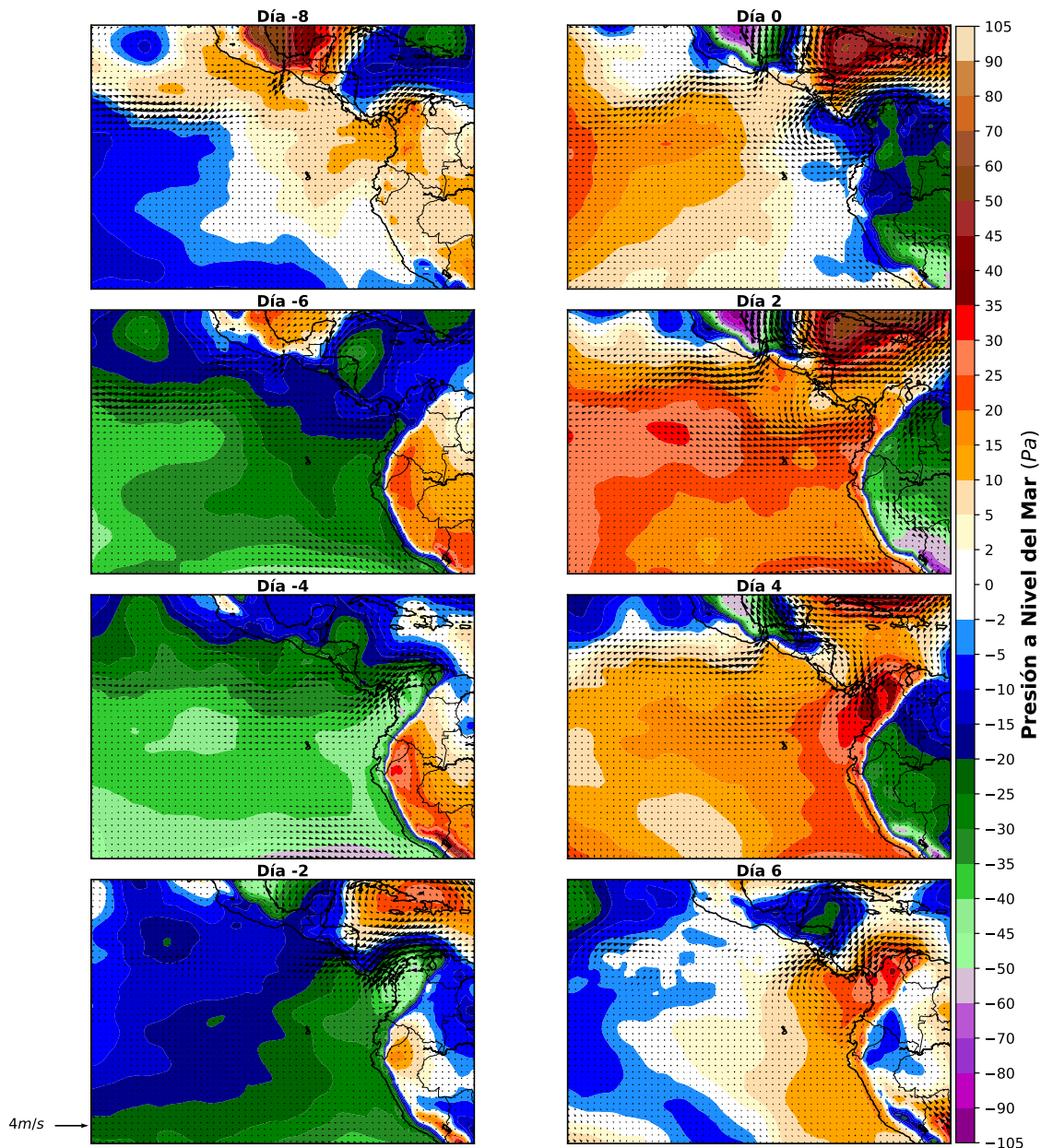


Figura 5.9: Similar a la figura 5.6 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa

Al igual que en 5.5, se presentan zonas de baja presión asociadas al calentamiento en la zona costera del pacífico colombiano y ecuatoriano; propiciando el curvamiento de los vientos hacia el

continente desde 4 días previos al evento convectivo, conduciendo al posible ingreso de humedad hacia estas zonas y la generación del sistema convectivo desde el día -2.

5.1.3 Invierno Boreal

Se toman 46 eventos de precipitación entre los meses DEF; y se realiza el mismo procedimiento de la sección anterior.

■ Precipitación

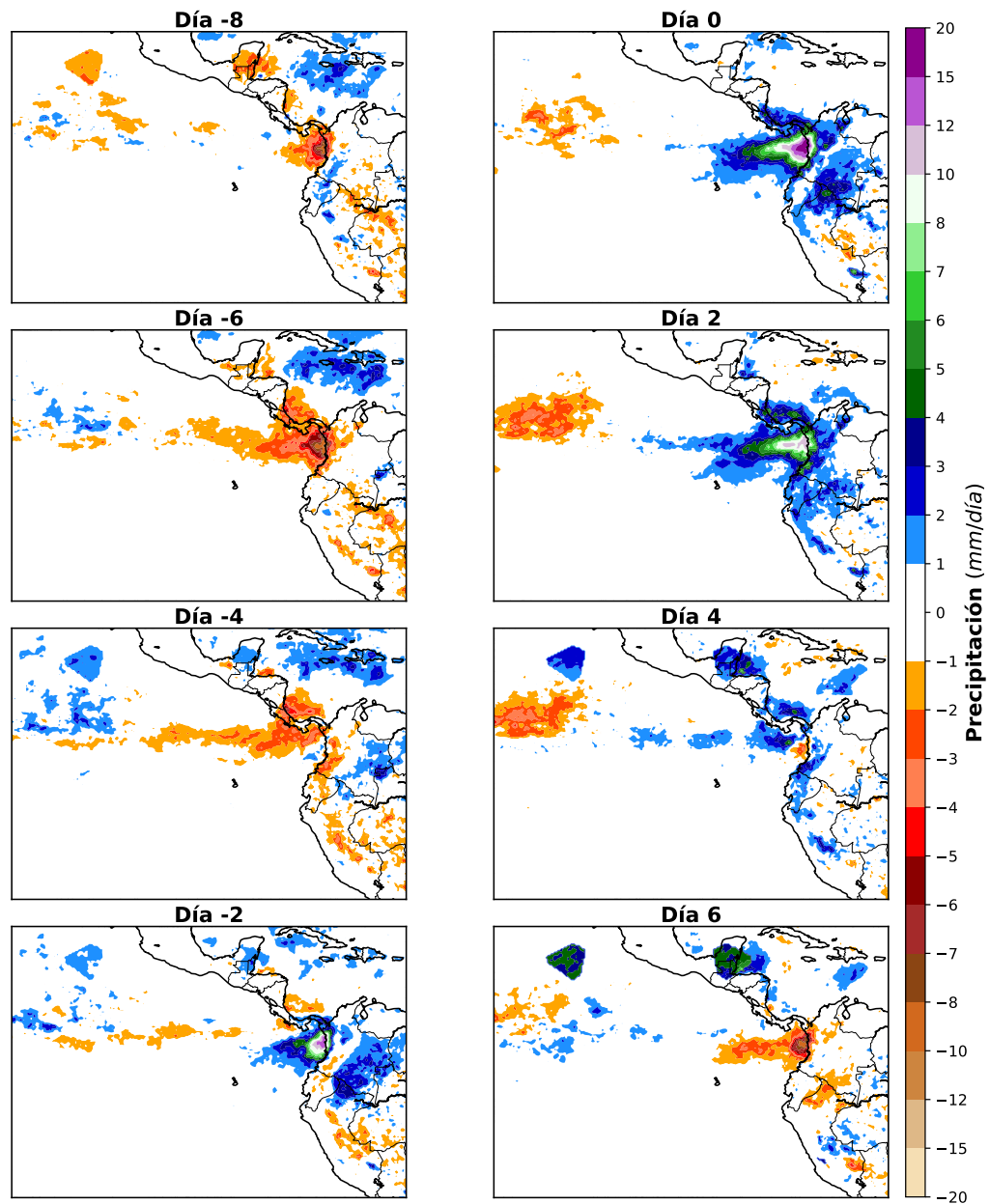


Figura 5.10: Evolución de compuestos de la Precipitación en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 46 eventos

Del mismo modo que durante JJA y SON (Figuras 5.2, 5.6), las anomalías negativas de precipitación se presentan desde los 8 hasta 4 días previos al evento convectivo, y desde los 2 días previo al evento se establecen las anomalías positivas; hasta que al día 6 posterior al evento, se presentan nuevamente las anomalías negativas en la zona asociadas a baja nubosidad.

■ Temperatura del Aire a 2m

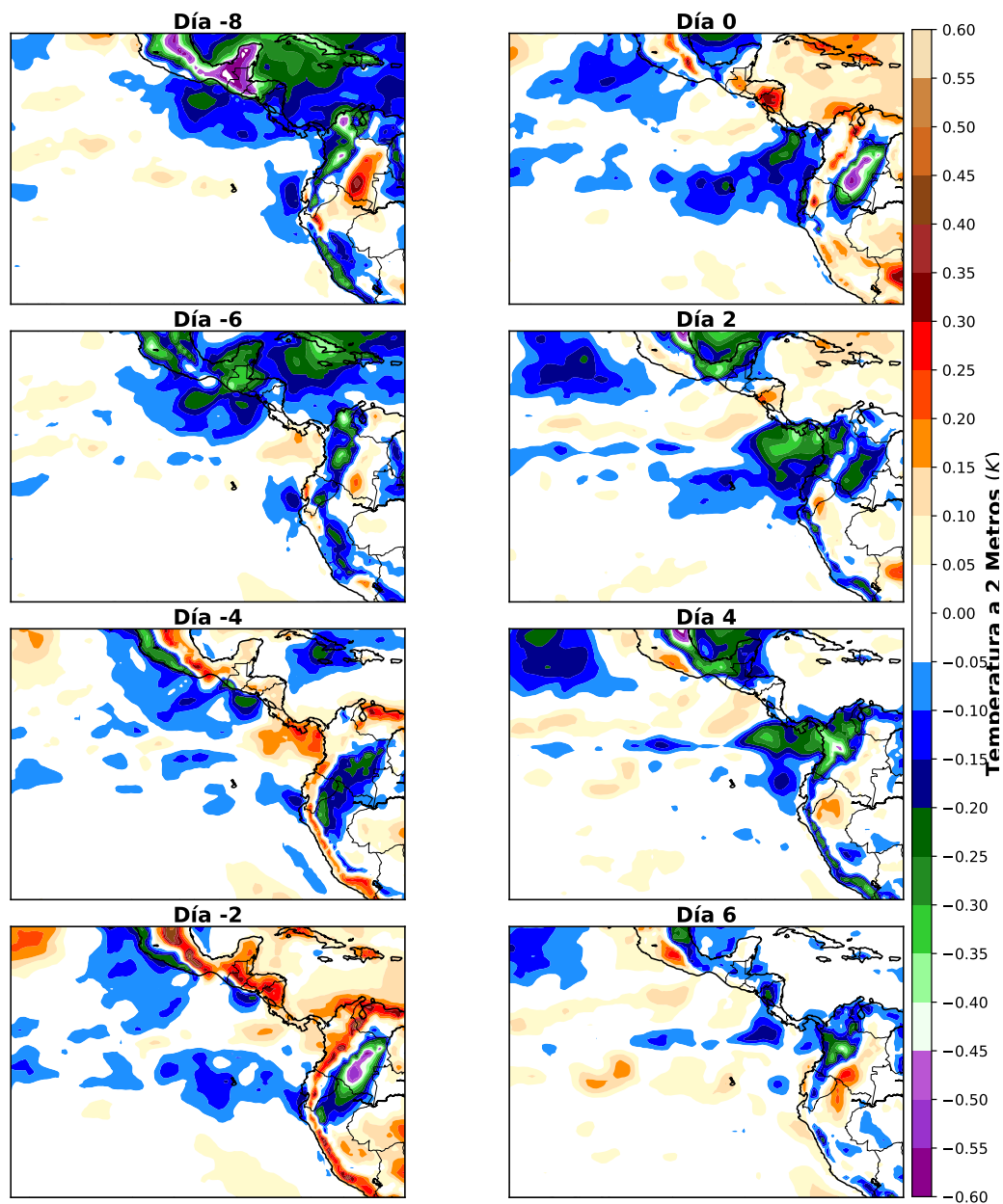


Figura 5.11: Similar a la figura 5.10 pero para Temperatura del aire a 2m

En concordancia con lo observado para los trimestres anteriores, se presenta el mismo comportamiento de las anomalías de T2m, estableciéndose con valores positivos asociadas a baja nubosidad y valores negativos asociados a alta presencia de nubes, respectivamente, estas últimas formando parte del evento convectivo.

■ Temperatura Superficial del Mar

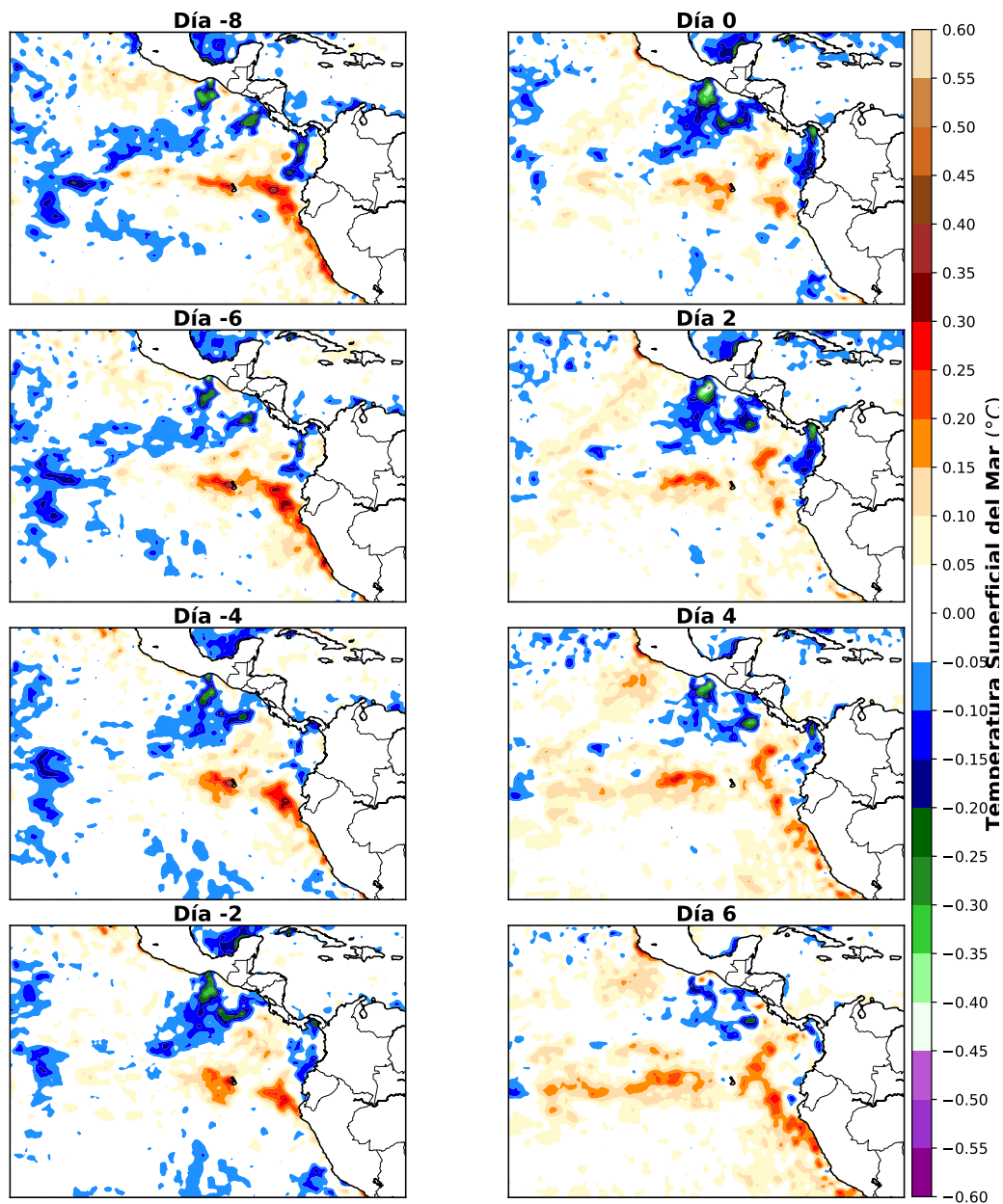


Figura 5.12: Similar a la figura 5.10 pero para temperatura superficial del mar (SST)

Las anomalías positivas de TSM se establecen de manera particular durante los días previos al evento convectivo; distribuyéndose a lo largo del océano pacífico frente Ecuador y Perú, y "encapsulándose" entre el continente y una anomalía negativa en Colombia. Este último comportamiento es coherente con lo evidenciado en la figura 5.1, donde se encuentran dos zonas con valores de amplitud importantes, ubicadas sobre la zona continental del pacífico colombiano y sobre la zona oceánica frente a la misma, separadas por una zona de menor varianza.

- Presión a Nivel del Mar

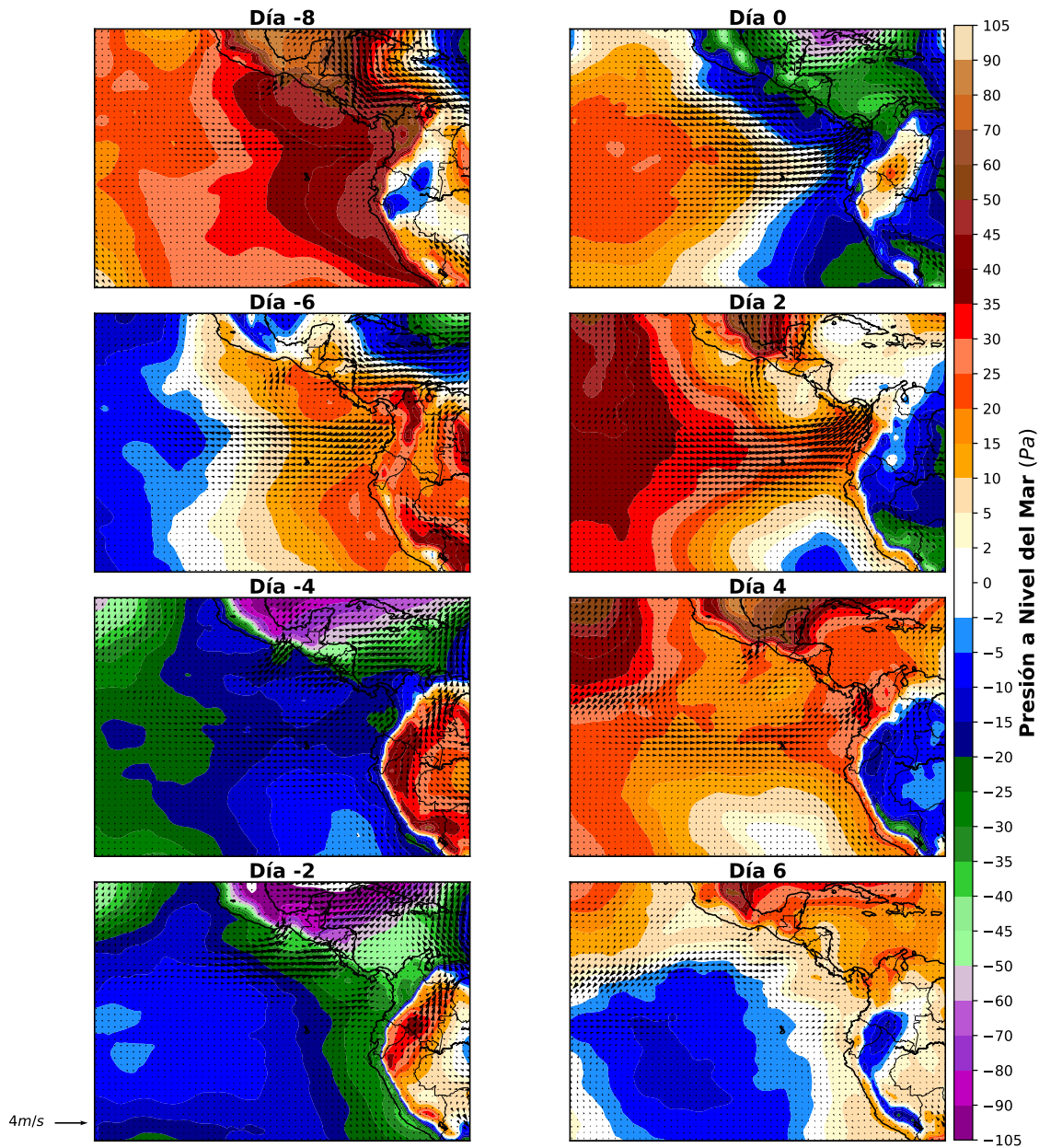


Figura 5.13: Similar a la figura 5.10 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa

En consonancia con lo analizado anteriormente, las zonas de baja presión se concentran en los sitios donde la anomalías de temperatura, tanto del océano como del aire, presentaron valores positivos previo al evento convectivo; comportamiento asociado, posiblemente, al ascenso de masas de aire caliente inducido, las cuales al llegar a niveles altos de la atmósfera se transforman en precipitación.

5.1.4 Primavera Boreal

Se toman 49 eventos de precipitación entre los meses de Diciembre, Enero y Febrero desde 1998 hasta 2015; y se realiza el mismo procedimiento de la sección anterior.

■ Precipitación

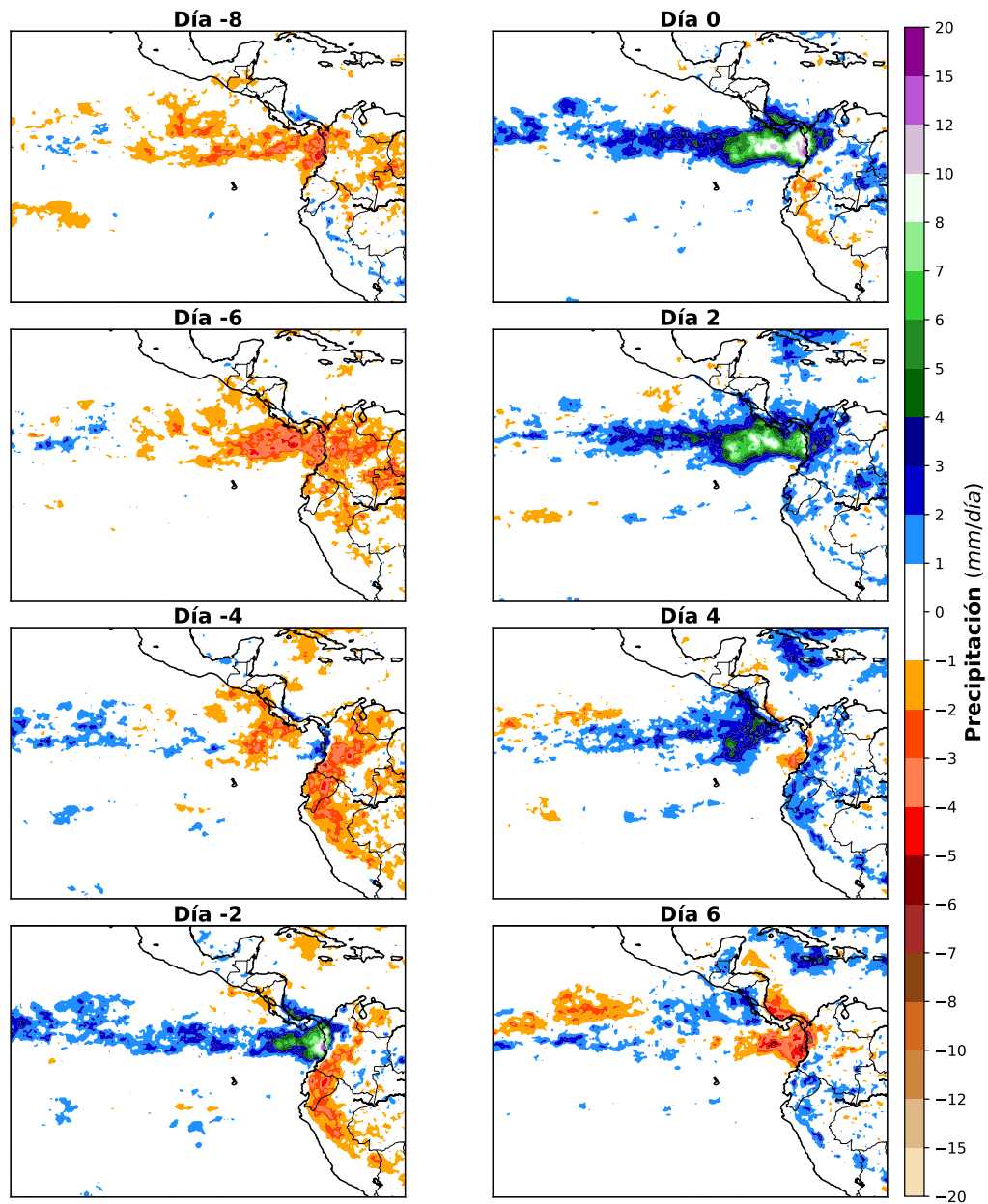


Figura 5.14: Evolución de compuestos de la Precipitación en la Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos

Las anomalías positivas de precipitación se establecen, del mismo modo que en trimestres

anteriores, desde 4 días previos al máximo de convección e inhibiéndose a los 6 días siguientes al evento.

■ Temperatura del Aire a 2m

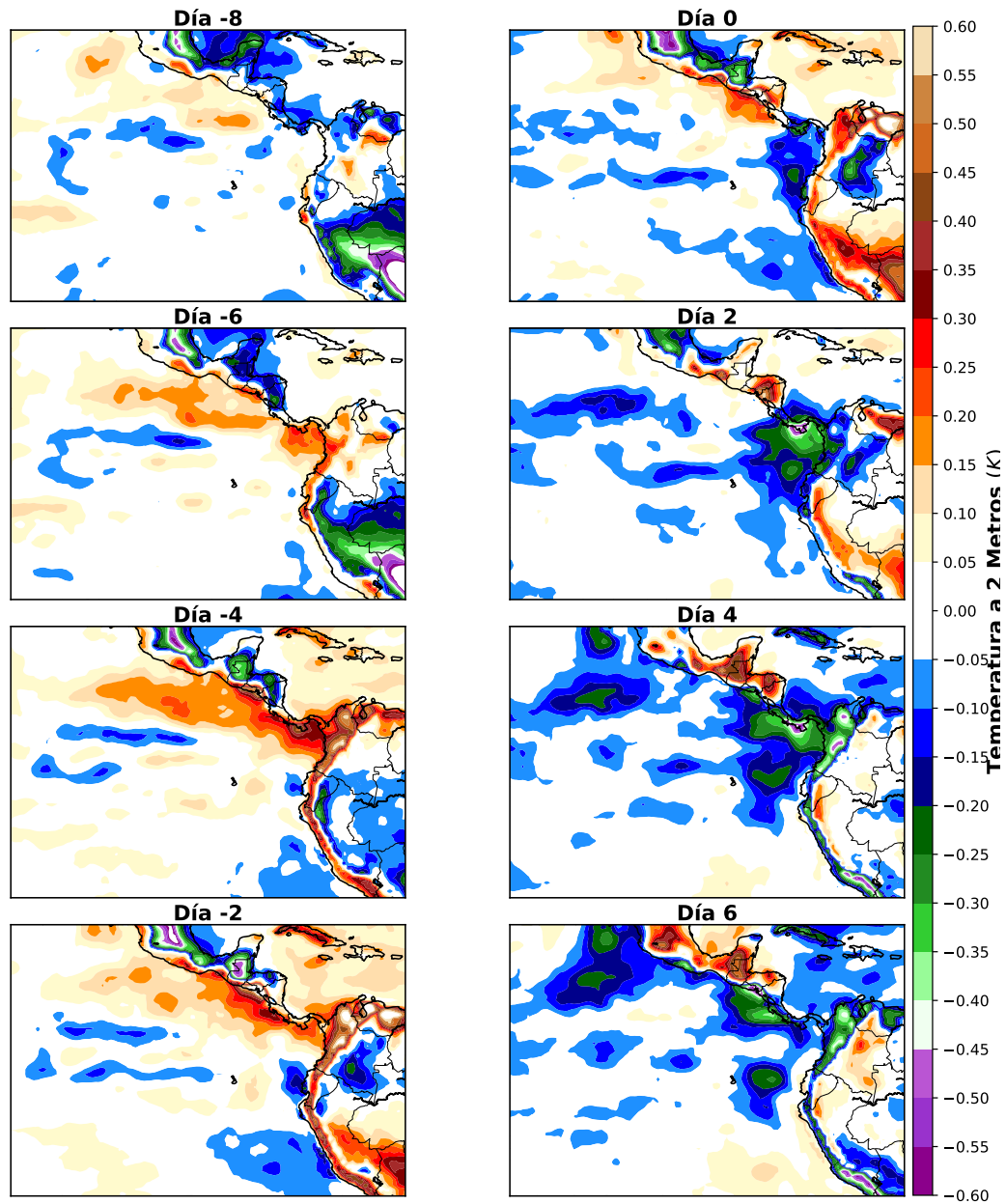


Figura 5.15: Similar a la figura 5.14 pero para Temperatura del aire a 2m

Las anomalías positivas se ubican, durante los días previos, en las zonas donde se registra mayor varianza (Figura 5.1) y coinciden con las anomalías positivas de precipitación (Figura 5.14),

sugiriendo una interacción entre el calentamiento de la superficie y la precipitación en la escala temporal y espacial de estudio.

- Temperatura Superficial del Mar

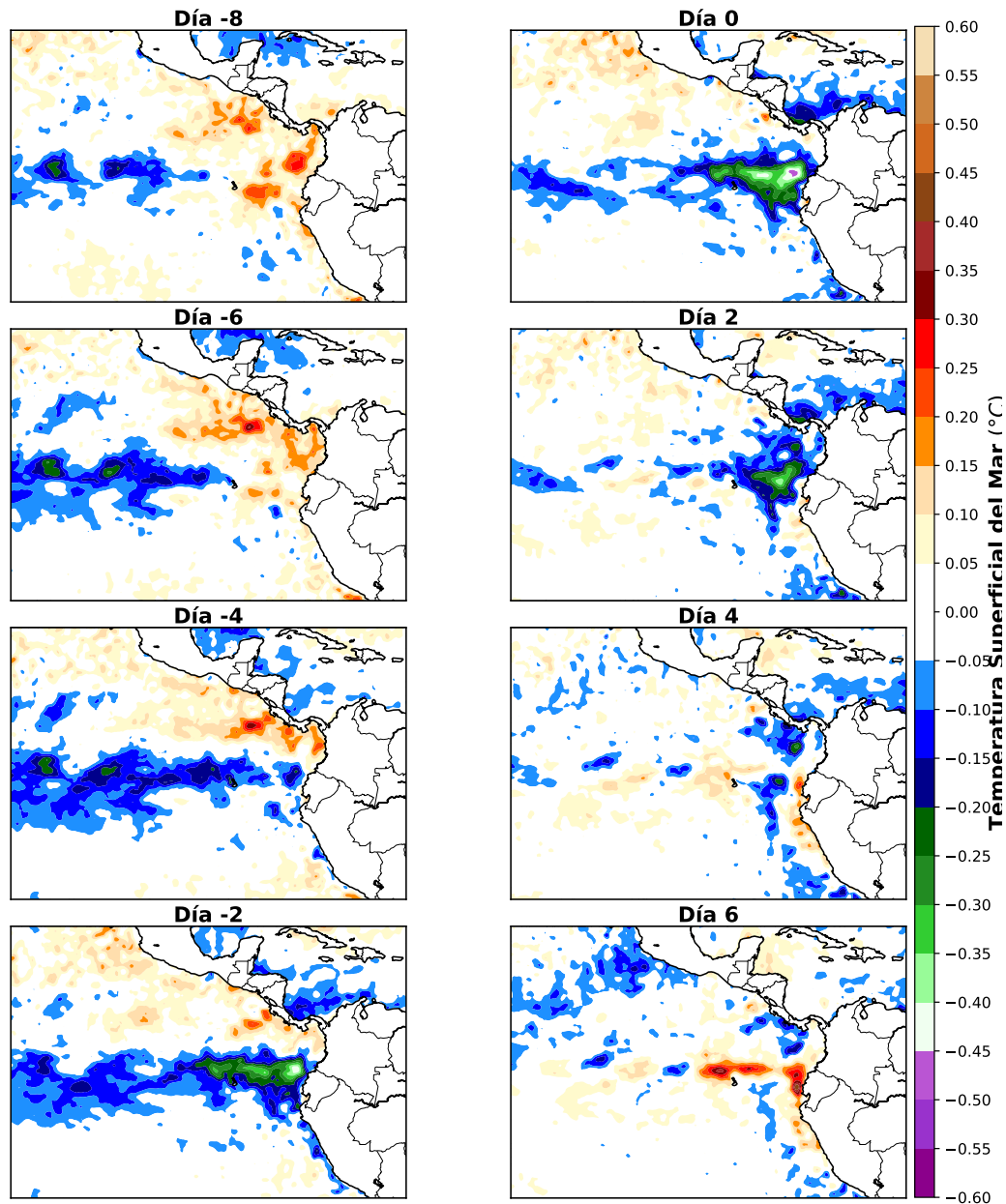


Figura 5.16: Similar a la figura 5.14 pero para temperatura superficial del mar (SST)

Las anomalías positivas de TSM son coincidentes con las zonas donde se ubican las anomalías de precipitación, situándose con antelación al evento de precipitación; y pasando a ser negativas cuando el evento convectivo ya se encuentra establecido y hasta la inhibición del mismo.

■ Presión a Nivel del Mar

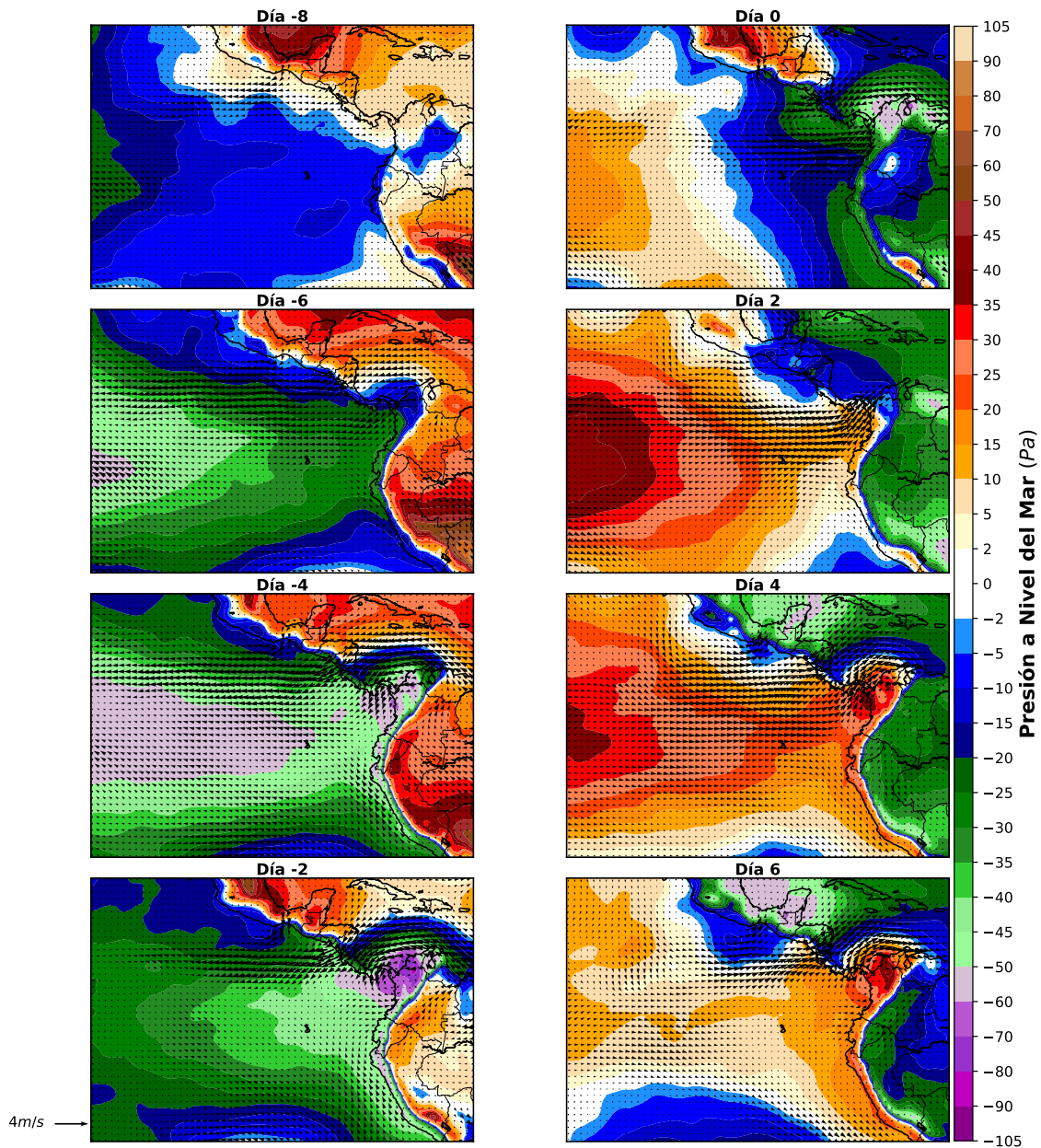


Figura 5.17: Similar a la figura 5.14 pero para Presión a nivel del mar (SLP) y vientos a los 925 hPa

Las zonas de baja presión y el curvamiento de los vientos hacia el continente son congruentes con las zonas donde se presentaron anomalías positivas de temperatura superficial; propiciando así condiciones para el ingreso de humedad hacia el continente que posibiliten la formación de lluvias.

6. MECANISMO MONZÓNICO COMO MODULADOR DE LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA PRECIPITACIÓN

A través de la técnica de análisis de compuestos, se analiza el comportamiento de diferentes variables asociadas a la disponibilidad de humedad en la zona de estudio y la el rol del mecanismo monzónico en la modulación de la ocurrencia de lluvias en la región pacífica del norte de Suramérica durante verano (JJA), otoño (SON), invierno (DEF) y primavera (MAM) en el hemisferio norte.

6.1 Verano Boreal

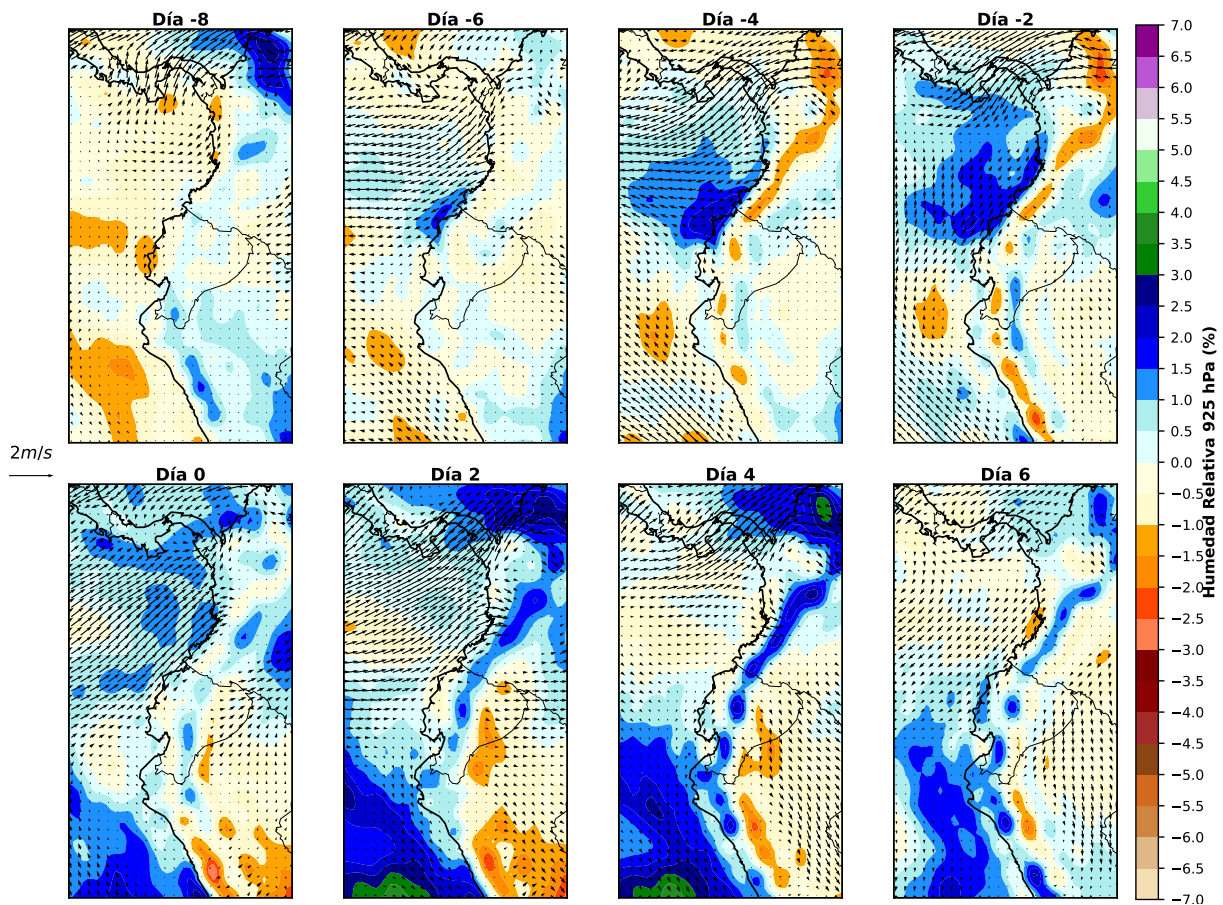


Figura 6.1: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 11 eventos

Se observa como inician anomalías positivas importantes de humedad relativa (se relaciona con disponibilidad de vapor de agua) 6 días antes al evento convectivo, en la zona costera del norte de Ecuador y como, desde el día -4, los vientos a 925 hPa se curvan hacia el interior de la costa colombiana transportando vapor de agua hacia esta zona y conllevando a que las anomalías positivas se establezcan sobre toda la zona costera de Colombia (Figura 6.1).

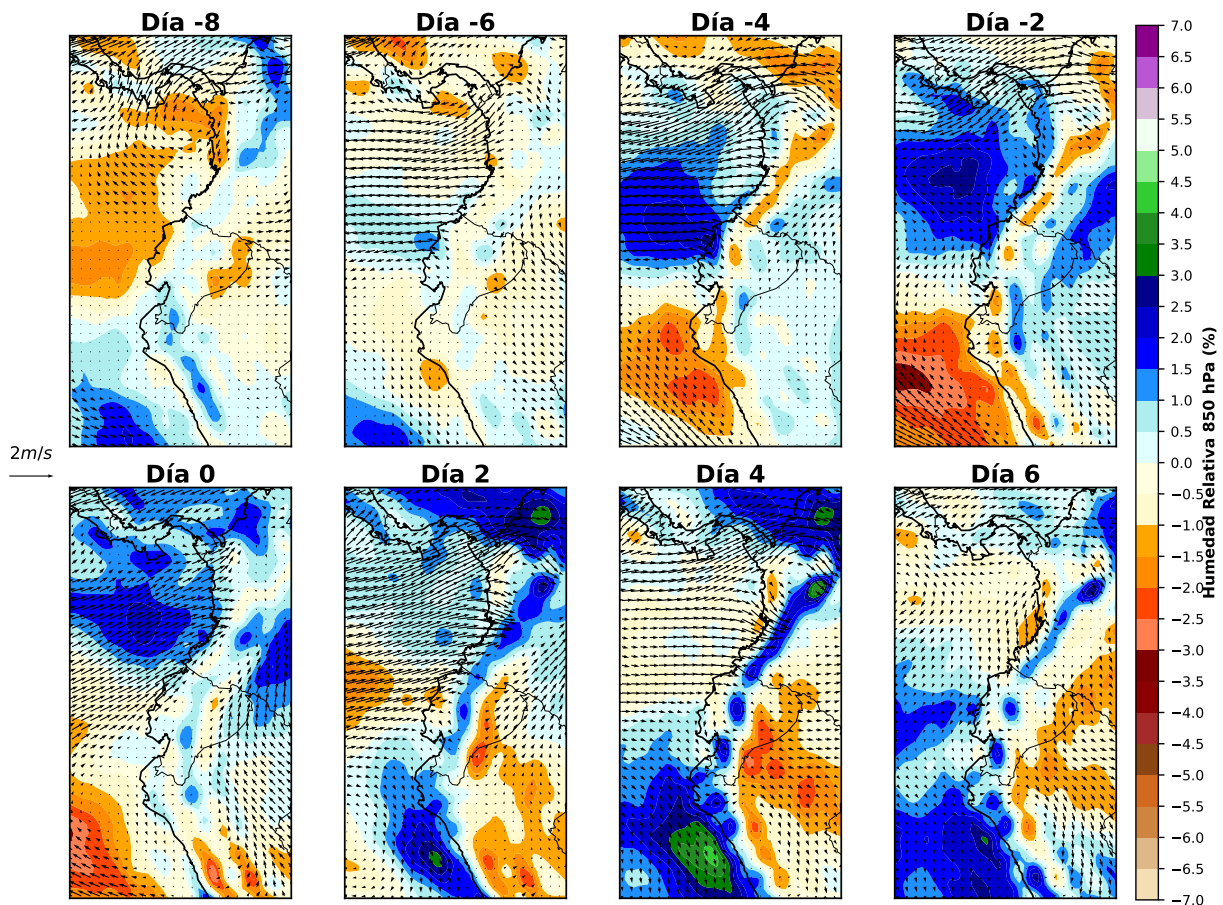


Figura 6.2: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 51 eventos

En concordancia con lo observado en la figura 6.1; las anomalías positivas se establecen desde el día -4 de manera importante sobre la costa norte de Ecuador y posteriormente se establecen en la zona marino-costera de Colombia; posibilitando así la disponibilidad de vapor de agua (Figura 6.2)

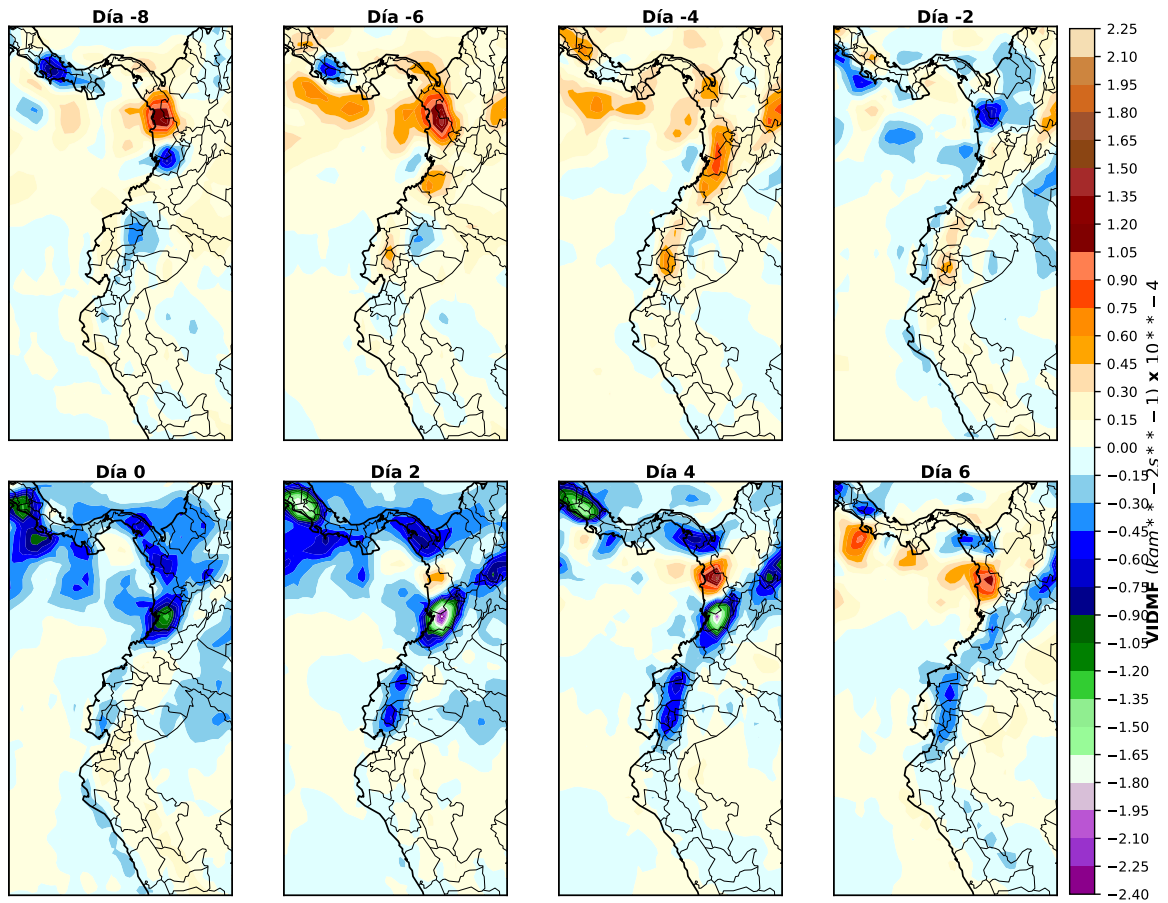


Figura 6.3: Evolución de compuestos de la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad en el Verano Boreal (JJA), de de -8 a 6 días, basado en 51 eventos

Al analizar la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad (6.3) se evidencia como a partir del día -2 se establecen anomalías negativas importantes a nivel continental de Colombia, asociadas a convergencia de humedad desde la superficie hacia niveles altos de la atmósfera, y el desplazamiento de las mismas en días posteriores hacia el sur, asociadas condiciones de subsidencia (valores positivos de las anomalías) que inhibe los procesos convectivos; comportamientos que son coherentes con lo observados en la figura 5.2 donde a partir del día +4 el evento convectivo se empieza a disipar.

6.2 Otoño Boreal

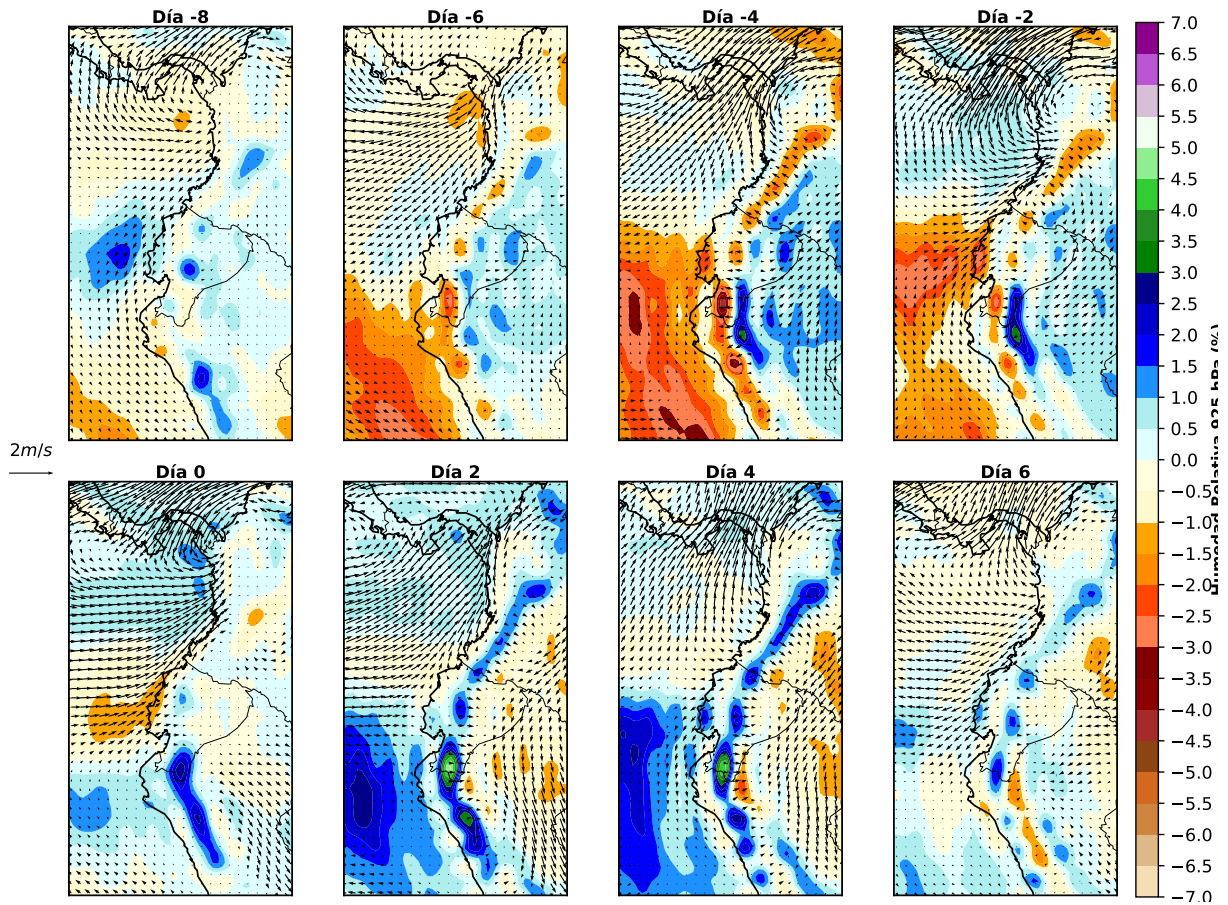


Figura 6.4: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Otoño Boreal (SON), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos

Se observa como durante SON también se establecen anomalías positivas importantes de humedad relativa a los 925 hPa 6 días antes al evento convectivo en la zona costera del norte de Ecuador, sin embargo, los vientos que se curvan hacia el interior de la costa colombiana provienen del zona norte, lo que no induce al desplazamiento de dichas anomalías hacia la zona marino-costera(Figura 6.4).

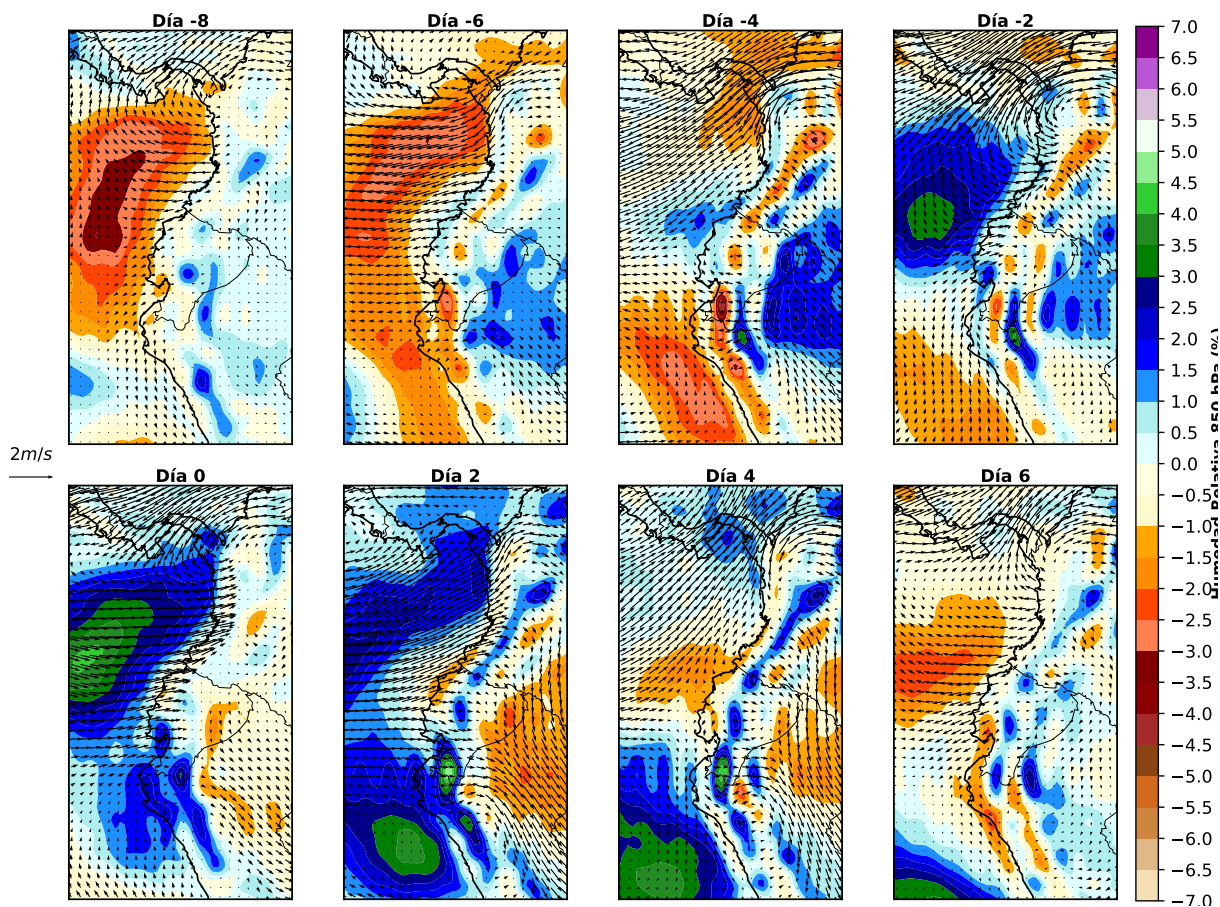


Figura 6.5: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos

Se observan como se establecen anomalías positivas de humedad relativa a los 850 hPa importantes en la zona marina-costera de Colombia, comportamiento congruente con la ubicación de anomalías positivas de T2m observado para SON (Figura 5.7); a su vez el curvamiento de los vientos hacia el interior del continente, desde 4 días previos al evento convectivo, situación que posibilita la disponibilidad de vapor de agua en la zona

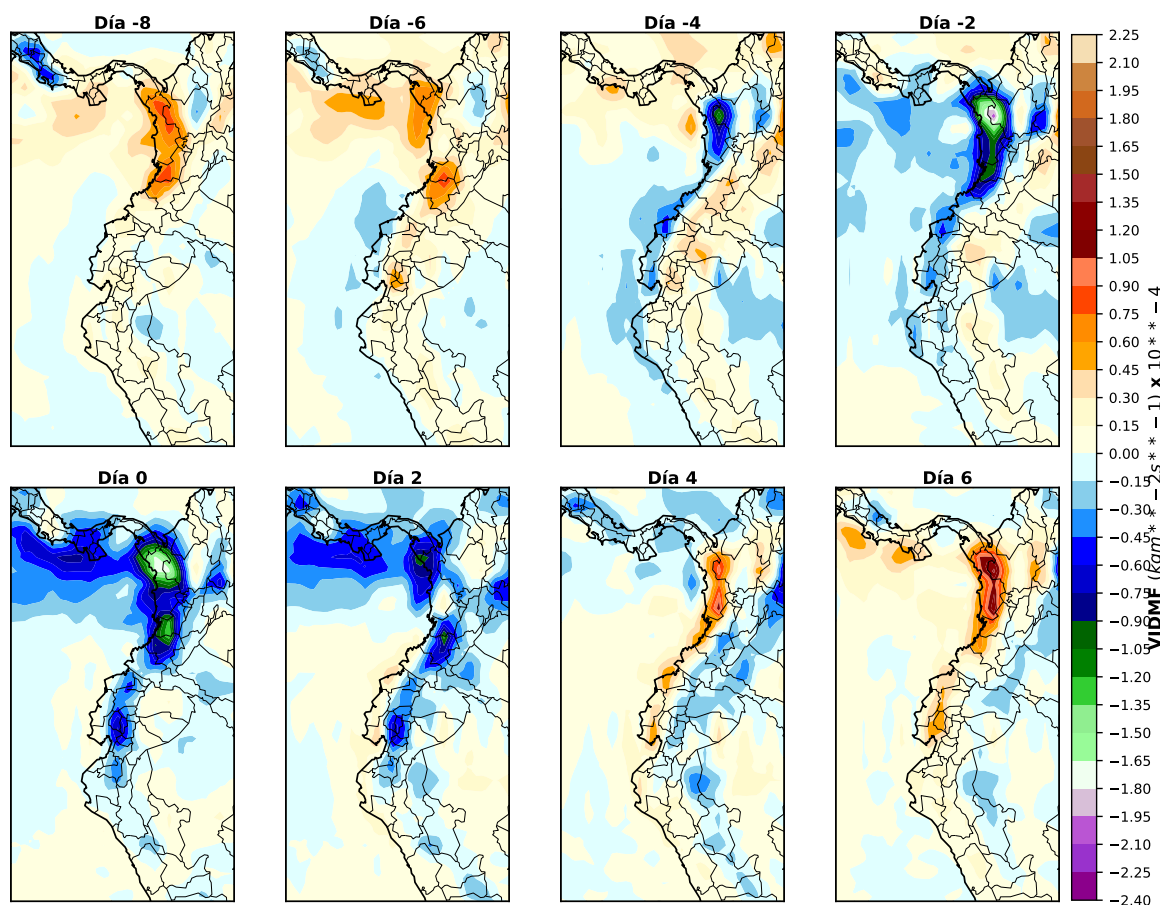


Figura 6.6: Evolución de compuestos de la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad en el Verano Boreal en el Verano Boreal (JJA), de -8 a 6 días, basado en 57 eventos

En la figura (6.6) se puede observar como, a partir del día -4, se establecen anomalías negativas importantes a nivel continental de Colombia, mas precisamente en el departamento del Chocó, y el desplazamiento de las mismas hacia los departamentos del Valle y Cauca en días posteriores; guardando relación con la dispersión de las lluvias observada en la figura 5.6 donde se observa la concentración de las mismas en la zona marino-costera de Colombia.

6.3 Invierno Boreal

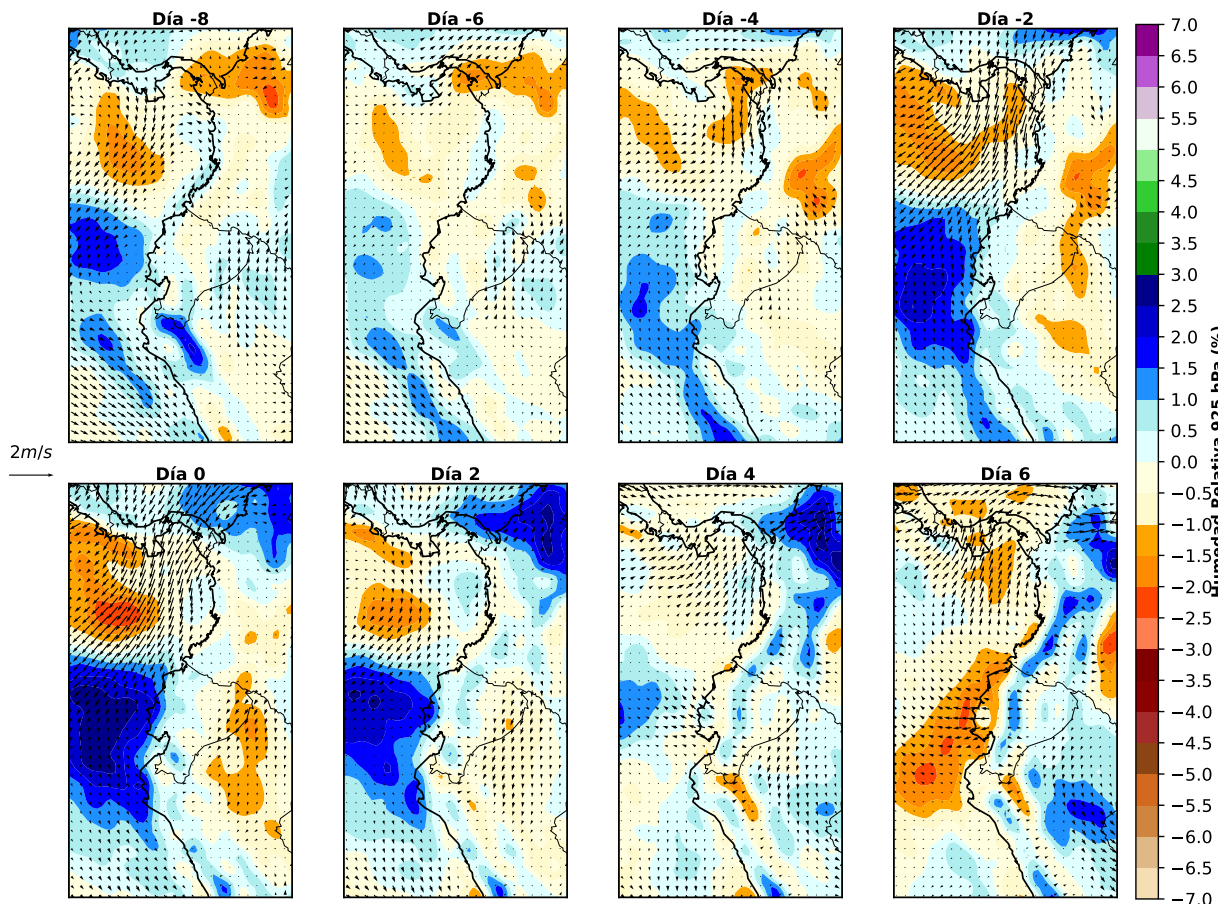


Figura 6.7: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 58 eventos

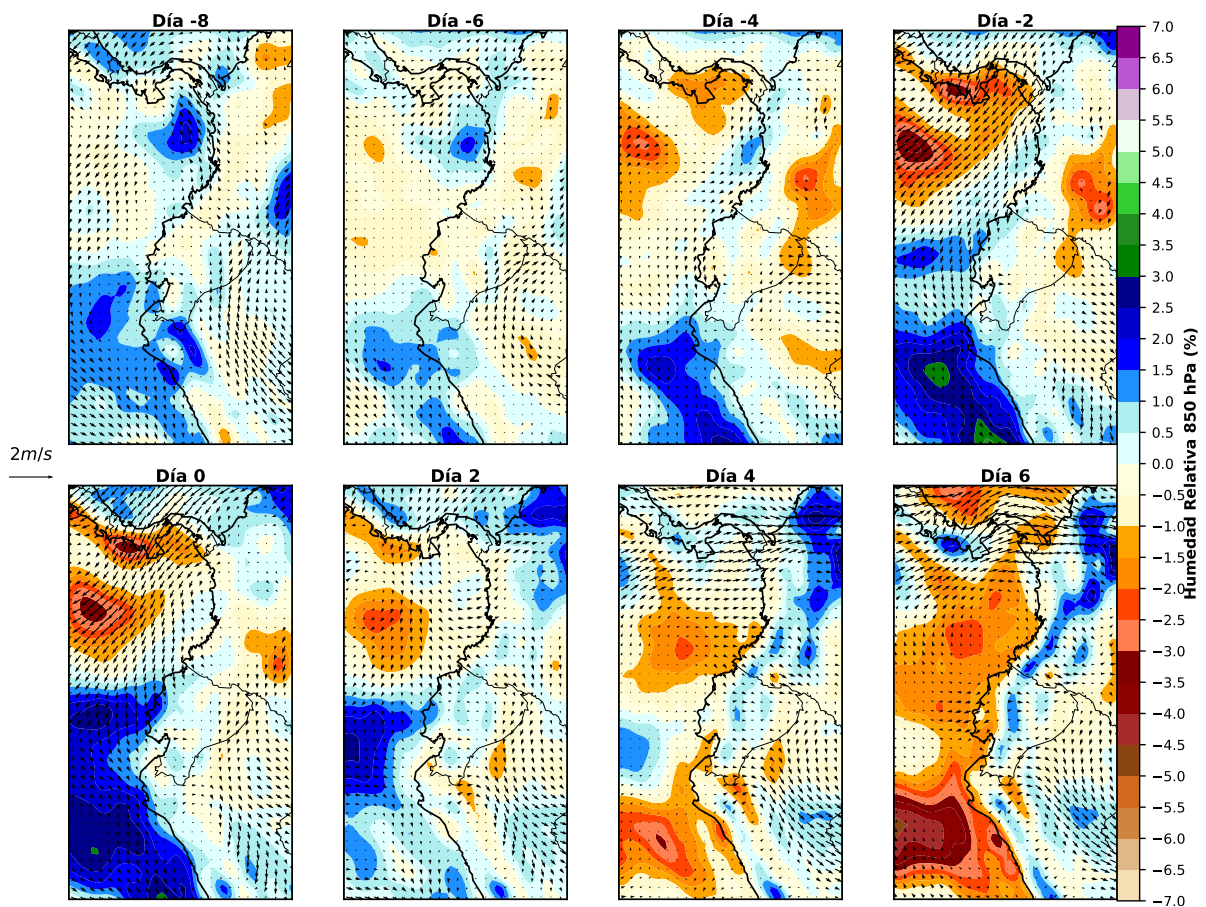


Figura 6.8: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 58 eventos

A diferencia de los trimestres anteriores, durante DEF, las anomalías de humedad relativa fuertes se concentran en la zona costera de Ecuador y con valores bajos en la zona continental de Colombia. A su vez, los vientos se curvan hacia la zona continental pero con mayor incidencia hacia el Ecuador; dichas anomalías se correlacionan, a simple vista, con valores de anomalías positivas de T2m (Figura 5.11)

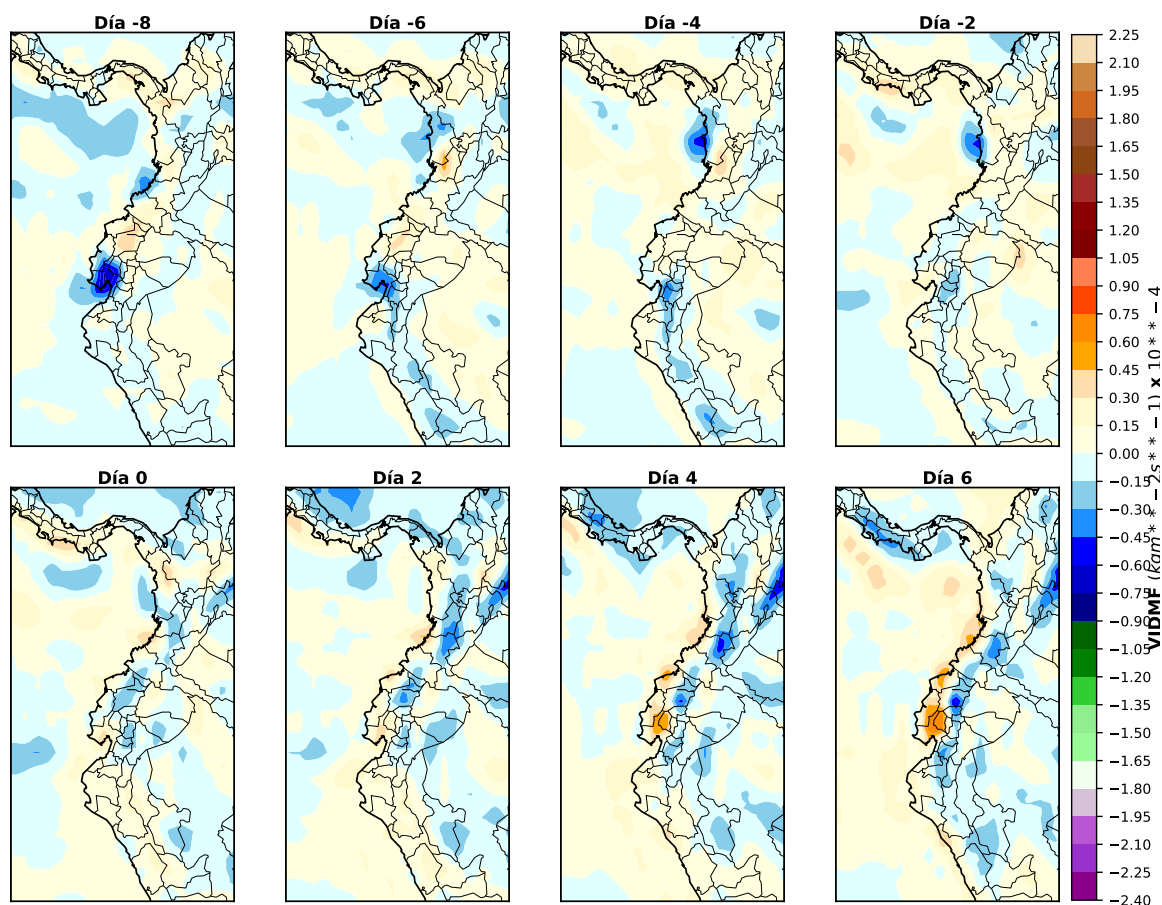


Figura 6.9: Evolución de compuestos de la Integral Vertical de la Divergencia del Flujo de Humedad en el Invierno Boreal (DEF), de -8 a 6 días, basado en 58 eventos

Al observar el comportamiento del flujo de humedad desde la superficie hacia la alta atmósfera se puede observar la presencia de anomalías negativas, asociadas a convergencia, concentradas en la zona marino-costera del Chocó y, con valores relativamente bajos, en la zona costera de Ecuador; siendo coherentes con la dispersión de las lluvias para DEF (Figura 5.10)

6.4 Primavera Boreal

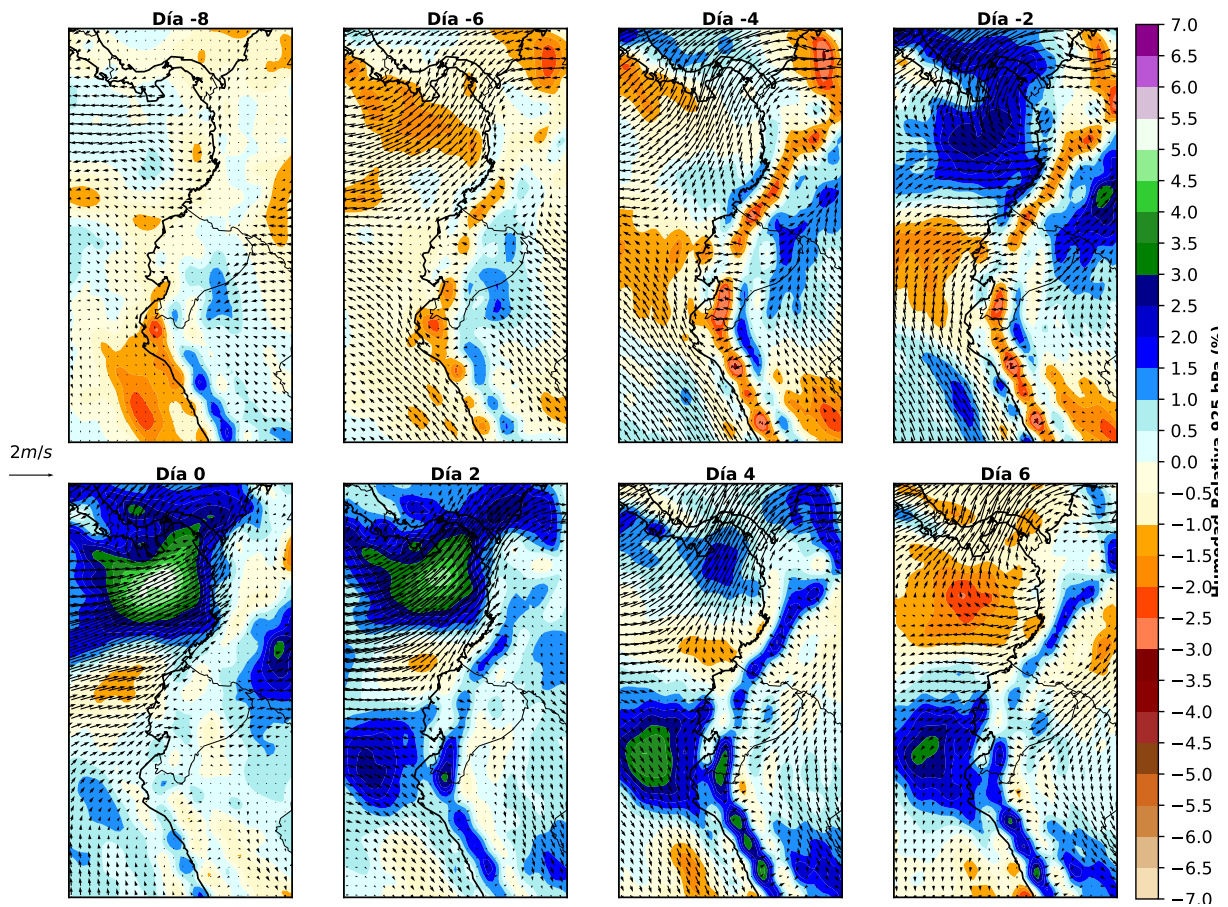


Figura 6.10: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 925 hPa en el Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos

Las anomalías positivas de humedad relativas a los 925 hPa establecen en la zona costera tanto de Colombia 4 días antes del evento convectivo; presentando un comportamiento particular en los vientos a los 925 hPa, los cuales convergen en esta zona curvándose desde el norte y sur durante los días previos al evento convectivo. (Figura 6.10)

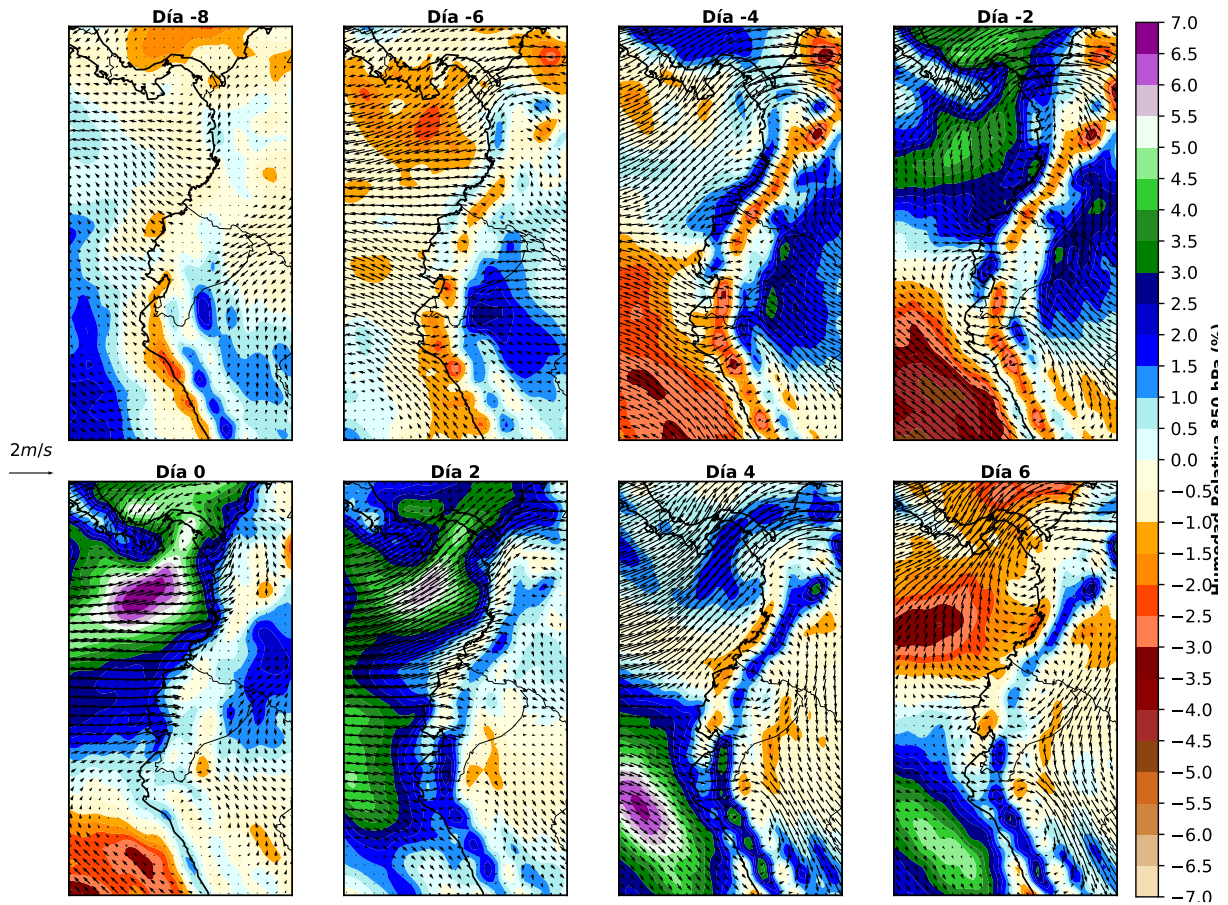


Figura 6.11: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos

Las anomalías de humedad relativa a los 850 hPa presentan un comportamiento particular, dado que en este caso se establecen de manera simultánea en las costas de Ecuador y Colombia; presentando una bifurcación en su desplazamiento hacia el norte (hacia la piscina caliente del Pacífico) y al sur (costa de Perú) al momento de disiparse el evento convectivo.

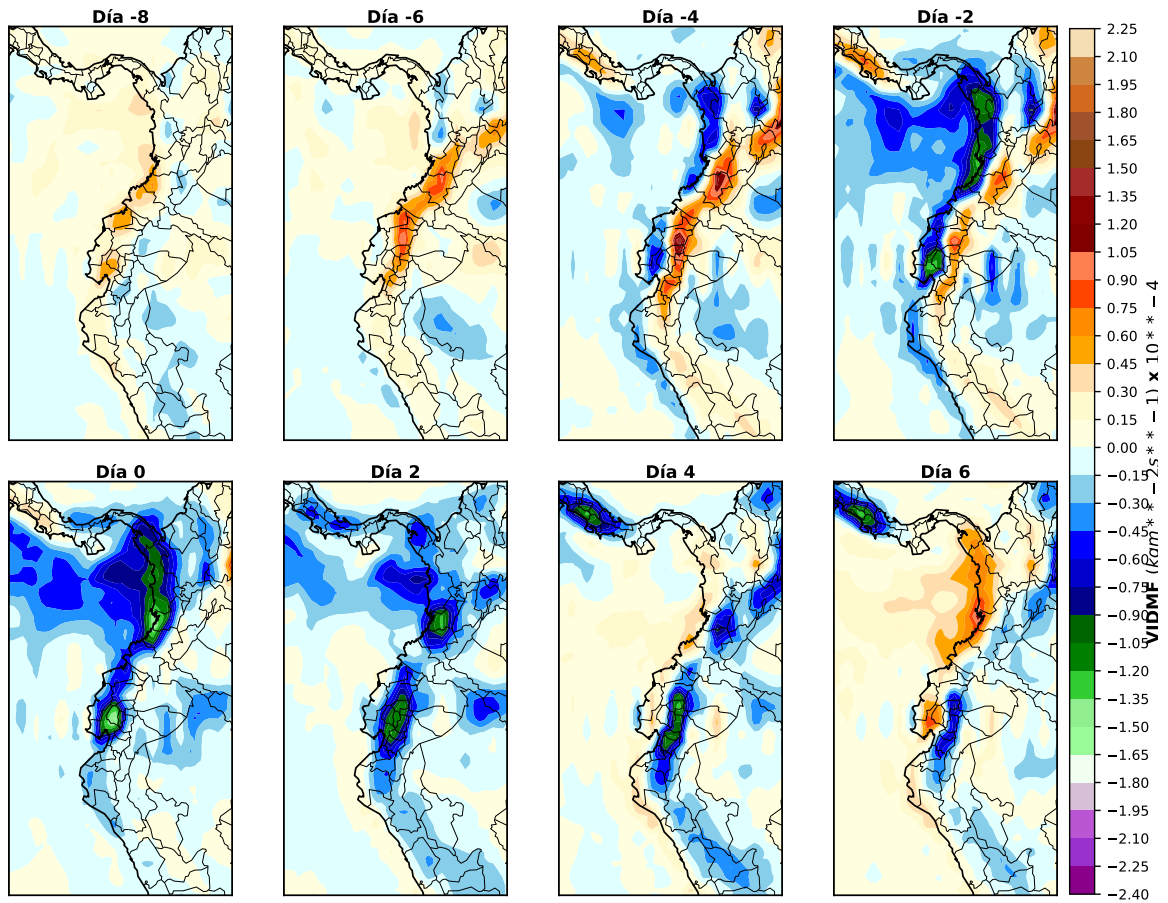


Figura 6.12: Evolución de compuestos de Humedad Relativa y los vientos a los 850 hPa en el Primavera Boreal (MAM), de -8 a 6 días, basado en 49 eventos

El flujo de humedad desde la superficie hacia la parte alta de la atmósfera se inicia 4 días antes del evento convectivo, ocurriendo en la zona costera de Colombia y Ecuador de manera simultánea y, como ocurre con la humedad relativa, se bifurca al desplazarse hacia el norte (piscina caliente del pacífico) y sur (hacia Perú), siendo coherentes con la distribución geográfica de las lluvias y la T2m. (Figura 5.14 y 5.15 respectivamente)

7. CONCLUSIONES

La distribución media anual y estacional de la precipitación en la zona tropical de Suramérica coincide con regiones donde los valores de TSM entre 26°C y 29°; sugiriendo un acoplamiento es la distribución espacial entre dichas variables en estas escalas temporales.

Del análisis de series temporales de precipitación de estaciones pluviométricas se logra establecer la existencia de variabilidad intraestacional, tanto de manera cualitativa como a través de las wavelets; obteniendo señales significativas, entre otras, asociadas a frecuencias menores a las de la actividad de la OMJ. Del mismo modo, se halla que no existe una relación lineal entre la actividad del fenómeno planetario y el comportamiento de la precipitación en la zona de estudio; sin embargo, se presenta una posible teleconexión en el comportamiento del Potencial de Velocidad a los 200 hPa y 850 hPa (no incluida en el documento), puesto que en presencia de condiciones favorables para convección en el Océano Índico, sobre la región pacífica de Colombia y Ecuador se presentan condiciones desfavorables y viceversa; tal como lo indica Poveda y Yepes [2012] quienes, basándose en el uso de la técnica de probabilidad condicional de ocurrencia de lluvias y anomalías negativas de Potencial de Velocidad (convección), determinan que 75 %-80 % de probabilidad de ocurrencia para los percentiles 75 y 95 de la muestra utilizada.

En la escala temporal de 10 a 90 días, la varianza de la precipitación en la zona de estudio es alta durante los diferentes trimestres del año, siendo el verano y la primavera boreal las épocas donde se presenta en mayor magnitud. Además, la distribución de la varianza es coincidente con las zonas de mayor precipitación y con valores de TSM en 26°C y 29° en la escala estacional, evidenciando la posible existencia de acoplamiento entre estas dos variables a esta escala temporal, de acuerdo a lo hallado por Sabin [2013] . Del análisis del rol que tienen los procesos de interacción OLA se puede establecer que existe una relación entre la distribución de la precipitación, el calentamiento superficial, de la zona continental y del mar además de la presión a nivel del mar; teniendo que, en promedio, 4 días antes del evento máximo de precipitación se comienzan a presentar condiciones

que favorecen la convección, y 4 días después del mismo se establecen condiciones que inducen a la supresión del evento.

La disponibilidad de humedad, analizada a través de la humedad relativa a los 925 y 850 hPa, es alta y se concentra principalmente en la zona marino-costera de la región de estudio, asociada a un aumento del vapor de agua proveniente del calentamiento superficial del mar y, posiblemente, a la evapotranspiración de la cobertura vegetal; vapor que es conducido por los vientos superficiales que se curvan hacia el interior del continente y, bajo condiciones favorables para la convección y apoyados en la presencia de la cordillera, ascienden a la alta tropósfera para propiciar eventos de precipitación. Permitiendo así, establecer que el mecanismo monzónico jugaría un papel determinante en la dinámica y variabilidad de la precipitación en la región pacífica de Colombia y Ecuador en la escala intraestacional, inducido por un gradiente de temperatura superficial y aprovechando la disponibilidad de vapor de agua que se convierte en lluvia al ascender hacia la parte alta de la atmósfera; asociándose este comportamiento al evidenciado en los estudios realizados del comportamiento monzónico en Asia [Webster et al., 1998, Webster, 2002, Webster and Hoyos, 2004, Hoyos and Webster, 2006].

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar análisis de simulación que permitan establecer de manera más detallada y robusta la relación que existe entre el mecanismo monzónico y la variabilidad de la precipitación en la escala de interés; dado que de ésta manera se pueden establecer diferentes condiciones a las variables involucradas y así determinar el rol que tiene en la ocurrencia de estos procesos.

Además, es importante promover la investigación de la ocurrencia de fenómenos con variabilidades de baja frecuencia dado que inciden de manera directa en diferentes aspectos del ciclo hidrológico, siendo importantes para la toma de decisiones y gestión de los recursos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

- [Berrisford et al., 2009] Berrisford, P., Dee, D., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., and Uppala, S. S. (2009). *The ERA-Interim archive. ERA report series 1, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.*
- [Dinku et al., 2010] Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., and Ceccato, P. (2010). Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5):1004 – 1014.
- [Heldon and Salby, 1995] Heldon, H. H. and Salby, M. L. (1995). The Life Cycle of the Maden–Julian Oscillation.pdf. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51:2225–2237.
- [Hoyos and Webster, 2006] Hoyos, C. D. and Webster, P. J. (2006). ESTRUCTURA ESPACIO TEMPORAL DE LA VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL EN EL TRÓPICO.
- [Kalnay et al., 1996] Kalnay, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., Collins, W., DEAVEN, D., LS, G., IREDELL, M., Saha, S., White, G., WOOLLEN, J., Zhu, Y., Chelliah, M., EBISUZAKI, W., Higgins, W., Janowiak, J., C, K., ROPELEWSKI, C., Wang, J., and LEETMAA, A. (1996). The nmc/ncar 40-year reanalysis project. bull am meteorol soc. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77.
- [Kiladis et al., 2014] Kiladis, G., Dias, J., Straub, K., Wheeler, M., Tulich, S., Kikuchi, K., Weickmann, K., and Ventrice, M. (2014). A comparison of olr and circulation-based indices for tracking the mjo. *Monthly Weather Review*, 142:1697–1715.
- [Liebmann, 1996] Liebmann, B. (1996). Description of a complete (interpolated) outgoing long-wave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:1275–1277.
- [Madden and Julian, 1971] Madden, R. A. and Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific.

- [Madden and Julian, 1972] Madden, R. A. and Julian, P. R. (1972). Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period.
- [Maloney and Kiehl, 2002] Maloney, E. and Kiehl, J. (2002). Mjo-related sst variations over the tropical eastern pacific during northern hemisphere summer. *Journal of Climate - J CLIMATE*, 15:675–689.
- [Maloney and Sobel, 2004] Maloney, E. D. and Sobel, A. H. (2004). Surface Fluxes and Ocean Coupling in the Tropical Intraseasonal Oscillation. *Journal of Climate*, 17(2004):4368–4386.
- [Mesa Sánchez and Peñaranda Vélez, 2015] Mesa Sánchez, Ó. J. and Peñaranda Vélez, V. M. (2015). Complejidad de la estructura espacio-temporal de la precipitación. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(152):304.
- [MetEd,] MetEd. Introduction to tropical meteorology 2nd edition. https://ftp.comet.ucar.edu/memory-stick/tropical/textbook_2nd_edition/navmenu.php_tab_10_page_3.1.0.htm. Accessed: 2023-03-07.
- [MetEd, 2020] MetEd (2020). Creating a local climate product using composite analysis. <https://www.meted.ucar.edu/climate/composite/print.htm>. Accessed: 2023-03-08.
- [Oort and Yienger, 1996] Oort, A. H. and Yienger, J. J. (1996). Observed Interannual Variability in the Hadley Circulation and Its Connection to ENSO. *Journal of Climate*, 9(11):2751–2767.
- [Pabón and Dorado, 2008] Pabón, J. D. and Dorado, J. (2008). Intraseasonal variability of rainfall over Northern South America and Caribbean region. *Earth Sciences Research Journal*, 12(2):194–212.
- [Poveda et al., 2017] Poveda, G., Bedoya-Soto, J., Vallejo Bernal, S., Olarte, A., Urrea, V., Posada, D., Cárdenas-Posso, Y., Ruiz, F., Martínez, M., Petersen, W., and Huffman, G. (2017).

Validation of trmm data with in-situ measurements over colombia at diurnal, seasonal, annual and interannual time scales.

- [Poveda and Mesa, 1997] Poveda, G. and Mesa, O. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical south america and large-scale ocean–atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10:2690–2702.
- [Restrepo and Gonzáles, 2007] Restrepo, L. and Gonzáles, J. (2007). From Pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2):183–192.
- [Reynolds et al., 2007] Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., and Schlax, M. G. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20(22):5473 – 5496.
- [Sabin et al., 2013] Sabin, T. P., Babu, C. A., and Joseph, P. V. (2013). Sst–convection relation over tropical oceans. *International Journal of Climatology*, 33(6):1424–1435.
- [Serra et al., 2014] Serra, Y. L., Jiang, X., Tian, B., Amador-Astua, J., Maloney, E. D., and Kiladis, G. N. (2014). Tropical Intraseasonal Modes of the Atmosphere. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 39:189–215.
- [Sobel et al., 2010] Sobel, A. H., Maloney, E. D., Bellon, G., and Frierson, D. M. (2010). Surface fluxes and tropical intraseasonal variability: A reassessment. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2:36.
- [Torrence and Compo, 1998] Torrence, C. and Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1):61–78.
- [Ventrice et al., 2013] Ventrice, M., Wheeler, M., Hendon, H., Iii, S., Thorncroft, C., and Kiladis, G. (2013). A modified multivariate madden-julian oscillation index using velocity potential. *Monthly Weather Review*, 141:4197–4210.

- [Vigh, 2017] Vigh, J. (2017). What is composite analysis in meteorology and what are its importance? https://www.researchgate.net/post/What_is_composite_analysis_in_meteorology_and_what_are_its_importance/5911f98593553b4f8c0fb727/citation/download. Accessed: 2023-03-08.
- [Webster, 1983] Webster, P. J. (1983). Mechanisms of Monsoon Low-Frequency Variability: Surface Hydrological Effects. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(9):2110–2124.
- [Webster, 2002] Webster, P. J. (2002). Mechanisms of Monsoon Low-Frequency Variability: Surface Hydrological Effects. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(9):2110–2124.
- [Webster and Hoyos, 2004] Webster, P. J. and Hoyos, C. (2004). Prediction of Monsoon Rainfall and River Discharge on 15–30-Day Time Scales. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11):1745–1766.
- [Webster et al., 1998] Webster, P. J., Magaña, V. O., Palmer, T. N., Shukla, J., Tomas, R. a., Yanai, M., and Yasunari, T. (1998). Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research*, 103(C7):14451.
- [Wheeler and Hendon, 2004] Wheeler, M. and Hendon, H. (2004). An all-season real-time multivariate mjo index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review - MON WEATHER REV*, 132:1917–1932.
- [Yepes and Poveda, 2012] Yepes, J. and Poveda, G. (2012). Diagnóstico y predictibilidad de la lluvia en Colombia a escala infraestacional. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, (December):11 p.
- [Zhang, 2005] Zhang, C. (2005). Madden Julian Oscillation Impacts. *Reviews of Geophysics*, 43(2005):1–36.
- [Zhang et al., 2023] Zhang, Q., Gottschalck, J., and Xue, Y. (2023). Extension of the cpc mjo index to forecast mode.