

FACULTAD DE CIENCIAS – FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

# Anomalías de circulación atmosférica asociadas a la influencia de la Oscilación de Madden Julian en la pluviometría local

---

Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

**Estudiante: Paulina Tedesco**

**Docente: Rafael Terra**

**2018**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1	MOTIVACIÓN .....	3
1.2	ANTECEDENTES.....	6
1.3	OBJETIVOS.....	9
<b>2</b>	<b>DATOS Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
2.1	DATOS.....	10
2.1.1	Índices de MJO .....	10
2.1.2	Índice SOI .....	11
2.1.3	Precipitación in situ .....	13
2.1.4	Datos grillados .....	13
2.2	METODOLOGÍA.....	14
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>18</b>
3.1	SELECCIÓN DE TEMPORADA E ÍNDICE DE LA MJO.....	18
3.2	SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA DE LOS SESGOS EN LA PRECIPITACIÓN (MONTOS Y FRECUENCIA) EN TEMPORADAS SELECCIONADAS EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE MJO .....	21
3.2.1	Primavera – Index 9.....	21
3.2.2	Verano – Index 8.....	22
3.2.3	Otoño – Index 4.....	22
3.3	DISTRIBUCIONES CONDICIONADAS DE LAS ESTACIONES Y TEMPORADAS CON MAYOR SEÑAL.....	22
3.3.1	Primavera – Las Brujas .....	23
3.3.2	Verano - Artigas .....	24
3.3.3	Otoño – Las Brujas.....	25
3.4	CONDICIONAMIENTO ENTRE MJO, PRECIPITACIÓN Y SOI.....	26
3.4.1	Primavera.....	27
3.4.2	Verano .....	27
3.4.3	Otoño.....	28
3.5	ANOMALÍAS DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA .....	30
3.5.1	Primavera.....	30
3.5.2	Verano .....	32
3.5.3	Otoño.....	34
3.6	DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA SEÑAL DE PRECIPITACIÓN .....	37
3.6.1	Primavera.....	37
3.6.2	Verano .....	38
3.6.3	Otoño.....	39
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>ANEXO A: FUNCIONES ORTOGONALES EMPÍRICAS EXTENDIDAS (EEOF).....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>ANEXO B: TEST BINOMIAL .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>ANEXO C: TEST DE STUDENT.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO D: ÍNDICE DE ABREVIACIONES.....</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO E: TABLAS DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>51</b>
9.1	FIGURAS.....	51
9.2	TABLAS .....	52
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>53</b>



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 MOTIVACIÓN

En 1970 Roland A. Madden y Paul R. Julian detectaron una oscilación de 40-50 días del viento zonal en el Pacífico tropical. Usando aproximadamente diez años de datos diarios en la Isla Canton (3° S, 172° W) encontraron un pico muy pronunciado en los espectros de las componentes de viento zonal ( $u$ ) en 850 y 150 hPa comprendido en el rango de frecuencias de 0.0245 a 0.0190 día<sup>-1</sup> (equivalente a un período de 41 a 53 días). Análisis posteriores permitieron conocer la estructura de la oscilación, encontrándose que los picos en el espectro de varianza son fuertes en la baja tropósfera, débiles o inexistentes en la capa de 700 a 400 hPa, y fuertes en la alta tropósfera. Sin embargo, no detectaron ninguna evidencia ni por encima de 80 hPa ni en la componente meridional del viento. Al mismo tiempo, el espectro de la presión ( $p$ ) a nivel de la estación posee un pico en este rango de frecuencias y la oscilación está en fase con la del viento zonal en la baja tropósfera y fuera de fase con la del viento zonal en la alta tropósfera. Las temperaturas muestran un pico similar y son coherentes con la oscilación de la presión a nivel de la estación: anomalías positivas de la presión están asociadas a anomalías negativas de temperatura en toda la tropósfera. Dedujeron, entonces, que la tropósfera media-baja actúa como una superficie nodal con  $u$  y  $p$  oscilando en fase pero 180° fuera de fase por encima y por debajo de esta superficie.

Los mismos autores (Madden y Julian 1972) describieron las celdas de circulación de escala global en los trópicos, valiéndose de series de presión a nivel de la estación (de 5 a 10 años) y datos en altura de varias estaciones ubicadas en los trópicos. El análisis de estas series sugirió que la oscilación encontrada anteriormente es de escala global pero restringida a los trópicos, y que posee características de una onda con propagación hacia el este. Adicionalmente, la inspección de dos series temporales de presión de la década de 1890 indicó características estacionarias de la oscilación. En resumen, hallaron evidencias de que la oscilación es el resultado de una propagación hacia el este de celdas de circulación de gran escala orientadas según el plano ecuatorial zonal.

La Oscilación de Madden Julian (de aquí en adelante MJO por sus siglas en inglés) es una perturbación intraestacional global que ocurre en los trópicos y se propaga hacia el este con impactos, tanto en los trópicos como en los extratropicos, en los patrones de precipitación, en la circulación atmosférica y en la temperatura de superficie (Álvarez et al. 2016, Vera et al. 2017, Xue et al. 2002). Es una componente del sistema acoplado océano-atmósfera, generalmente muy variable, con períodos de actividad moderada a fuerte seguidos por períodos de muy poca actividad, cuyo ciclo tiene una duración de aproximadamente 30-60 días. La mayor actividad de la MJO se observa normalmente durante la primavera tardía, el verano, y principios del otoño australes, principalmente durante fases neutras y débiles del fenómeno de El Niño-Oscilación Sur (Xue et al. 2002).

La MJO se caracteriza por la propagación hacia el este de regiones, o fases, con aumento o disminución de precipitación tropical principalmente en los océanos Índico y Pacífico. Junto a estas variaciones de precipitación tropical existen distintos patrones de anomalías de circulación atmosférica en niveles altos y bajos de la atmósfera, en los trópicos y extratropicos, que proveen información relevante acerca de las regiones de movimientos de ascenso y descenso asociados a fases particulares de la oscilación.

Generalmente, la actividad fuerte de la MJO está asociada a un dipolo con fases de signo opuesto en nubosidad y precipitación, que se propaga en conjunto hacia el este. La ubicación de las fases convectivas se agrupan y asignan a posiciones geográficas fijas que se han numerado de 1 a 8, como se aprecia en la siguiente figura. En ella está representado, para las 8 fases, el apartamiento de la precipitación media de todos los eventos MJO desde 1979 hasta 2012 entre noviembre y marzo. Con sombreado verde se muestra la precipitación por encima de lo normal, y con sombreado marrón la precipitación por debajo de lo normal. Por lo tanto, las áreas sombreadas en verde se corresponden con la fase MJO de aumento de convección, mientras que las áreas sombreadas en marrón pertenecen a la fase de disminución de convección. En la figura también se puede observar que, al incrementar el número de fase, las regiones sombreadas se trasladan en dirección este.

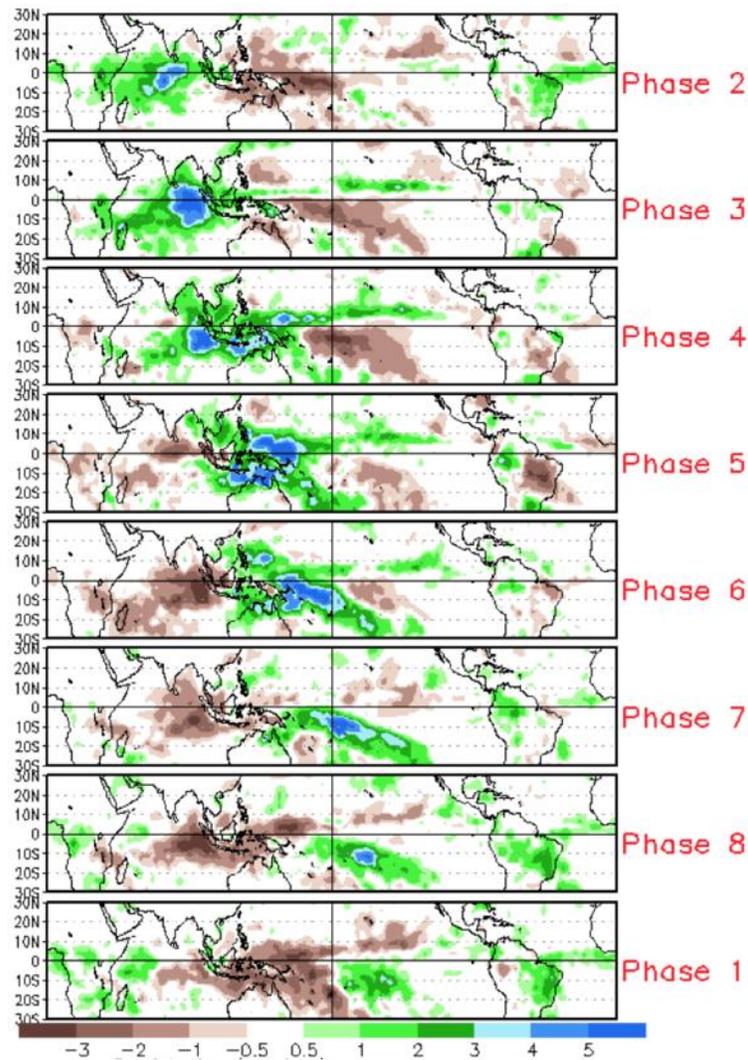


Figura 1: Fases de la MJO. Fuente: NOAA.

La figura 2 es un esquema de un plano vertical ecuatorial en el que se representa la estructura de las fases de la figura 1, en una situación en la que el aumento de convección (representado con una nube de tormenta) está centrado en el océano Índico, y la disminución de convección está centrada en el océano

Pacífico central-oeste. Las flechas horizontales representan anomalías de viento zonal. Todo el sistema se traslada hacia el este, retornando, eventualmente, al punto de partida. Ya que ocurren varios eventos en una estación, se dice que la MJO contribuye a la variabilidad climática intraestacional.

#### Madden-Julian Oscillation

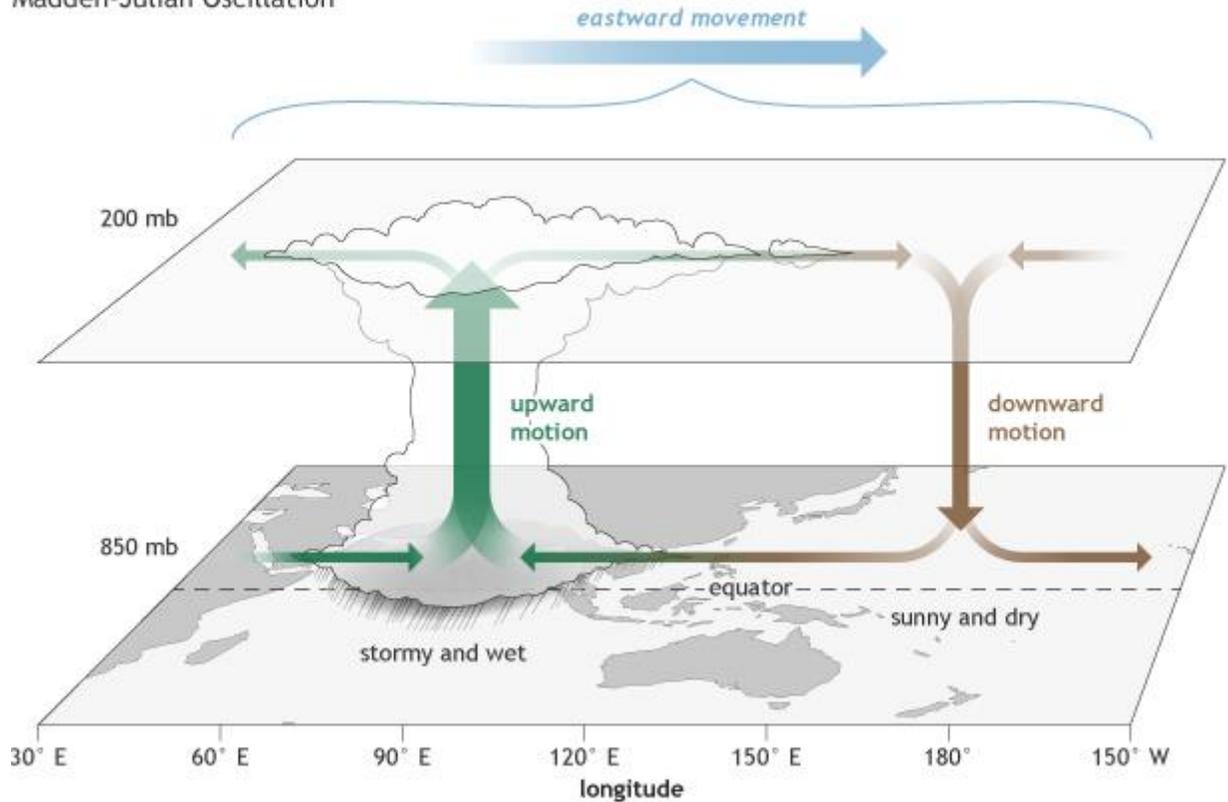


Figura 2: Estructura de la MJO en superficie y en niveles altos de la atmósfera. Fuente: NOAA.

En la figura anterior, se observa que en la fase de aumento de convección los vientos convergen cerca de la superficie, por continuidad se produce un movimiento ascensional anómalo, y divergencia en altura. Este tipo de movimiento tiende a aumentar la lluvia. En la fase de disminución de convección sucede lo opuesto, los vientos convergen en altura, forzando al aire a descender, y divergen cerca de la superficie. El movimiento anómalo de descenso desde gran altura provoca que el aire se caliente y se seque, inhibiendo la precipitación.

Estudios realizados para la región, presentados en la siguiente sección, revelan que la variación intraestacional explica parte significativa de la varianza de la precipitación durante el verano y el invierno (3 meses). Sin embargo, no se ha estudiado la influencia de la MJO en períodos subestacionales en el clima de nuestro país.

Alejandra De Vera y Rafael Terra encontraron períodos de tiempo subestacionales en los que la precipitación presenta una señal asociada a la MJO. Observaron que los cuartiles superior e inferior del ciclo medio anual de precipitación acumulada y de frecuencia media de lluvia en péntadas condicionados por la MJO son significativos al 5% y al 95% en temporadas subestacionales. Para realizar este trabajo utilizaron datos diarios de precipitación entre 1978 y 2008 en las estaciones Artigas, Paysandú, Las Brujas y Melo; y los índices de MJO Index 4, Index 8, Index 9, disponibles desde 1978. Estos índices se explican

más adelante, en la sección Datos. Los ciclos anuales de precipitación acumulada y frecuencia media de lluvia en péntadas se calcularon considerando una ventana móvil centrada de  $\pm 5$  péntadas, y los umbrales de significancia estadística se hallaron mediante el Método de Monte Carlo con mil muestreos al azar de ocho años. A modo de ejemplo, se muestra la figura 3, que en parte ha motivado el presente trabajo.

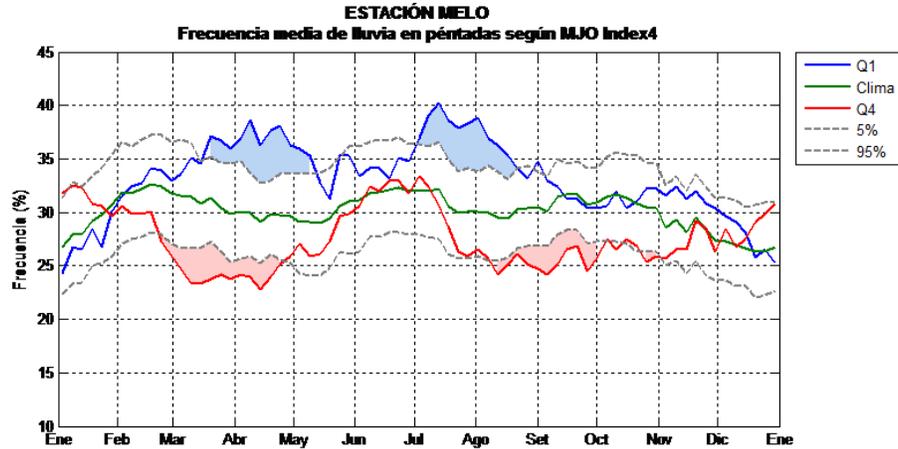


Figura 3: Frecuencia media de lluvia en péntadas según MJO Index 4 en estación Melo (De Vera y Terra).

Durante décadas, los modelos climáticos dinámicos y estadísticos se han enfocado en el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) como principal, y a menudo único, predictor a escala estacional, y poco se ha estudiado el rol simultáneo de forzantes climáticos en diferentes escalas de tiempo (Cazes-Boezio et al. 2003; Muñoz et al. 2016). No obstante, sería de gran importancia para los tomadores de decisión de varios sectores socioeconómicos contar con información climática con anticipación de semanas (Álvarez et al. 2016). Esta información depende del monitoreo y la predicción de la variabilidad intraestacional (IS), en particular de la MJO (Álvarez et al. 2016; González et al. 2008; Muñoz et al. 2015; Vera et al. 2017).

Debido a su lenta naturaleza evolutiva, la predicción precisa de la MJO está relacionada fundamentalmente con nuestra habilidad de monitorear las características y determinar su posición relativa y su intensidad (Xue et al. 2002). Los impactos se han estudiado global y regionalmente, y actualmente los modelos están empezando a tener habilidad, por lo que sería aprovechable encontrar vinculación con el clima local (Álvarez et al. 2016; Muñoz et al. 2015; Muñoz et al. 2016; Vera et al. 2017). Este objetivo motiva futuras investigaciones sobre la respuesta a la MJO en la circulación, así como describir con más detalles la influencia de la MJO en la precipitación, la temperatura y la circulación.

## 1.2 ANTECEDENTES

Innumerables trabajos se han realizado desde la detección de la MJO, profundizando en su descripción y examinando sus impactos, puesto que, además de tener cierto grado de predictibilidad, explica parte de la varianza IS de la temperatura (Álvarez et al. 2016), la convección, la precipitación y el viento zonal en regiones tropicales y subtropicales (Álvarez et al. 2016; González y Vera 2013; Vera et al. 2017). Según Álvarez et al. (2016), en las proximidades de América del Sur, la influencia de la MJO en las anomalías de circulación pueden manifestarse de dos formas: como cambios en la circulación tropical asociados al pasaje hacia el este de las anomalías de calentamiento diabático a lo largo del ecuador; y como cambios

en las anomalías de circulación extratropical por medio de trenes de ondas de Rossby que se extienden entre el océano Pacífico-Índico oeste y América del Sur.

Se ha encontrado un patrón de dipolo en la convección entre la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ) y el sector sudeste de Sudamérica (SESA), también conocido como SASS (*South American Seesaw*), que caracteriza la variabilidad intraestacional en verano en la región (Álvarez et al. 2016; Díaz y Aceituno 2003; González y Vera 2013; Vera et al. 2017). El patrón presenta dos bandas principales de variabilidad temporal, una con períodos entre 10 y 30 días, que parece no estar asociada a anomalías de convección tropical pero sí a actividad frontal, especialmente en verano (Vera et al. 2017); y otra de períodos entre 30 y 90 días relacionada a una propagación hacia el este de una estructura de número de onda 1 tanto de anomalías de circulación como de OLR. La actividad en esta última banda está fuertemente influenciada por la MJO a través de excitaciones de trenes de ondas de Rossby en los trópicos (Álvarez et al. 2014; González y Vera 2013; Vera et al. 2017). Esta interacción entre trópicos y extratropicos se relaciona frecuentemente con el desarrollo de teleconexiones que se extienden por el Pacífico Sur entre Australia y América del Sur (González y Vera 2013; Vera et al. 2017). Investigaciones recientes llevadas a cabo por Vera et al. (2017) afirman que en la estación húmeda (octubre-abril), en la banda de 30 a 90 días, el centro de anomalías de FOLR (radiación de onda larga emergente filtrada) sobre la región de la SACZ es más intenso que el de signo opuesto hallado sobre SESA; por el contrario, en la banda de 10 a 30 días, el centro ubicado sobre SESA es más intenso que el de la SACZ.

La influencia de la MJO en América del Sur se ha identificado, en la ocurrencia de eventos extremos húmedos y secos. También se ha encontrado que la MJO modula la precipitación en el área de la SACZ (Álvarez et al. 2016). La variabilidad del patrón SASS tiene una fuerte influencia sobre la ocurrencia y la intensidad de eventos extremos de precipitación diaria y temperatura de superficie diaria (Álvarez et al. 2014; González et al. 2008), y parte de la variabilidad IS de las anomalías de temperatura de superficie en SESA está influenciada por la actividad de la MJO (Álvarez et al. 2016).

Con motivo de describir la variación intraestacional durante el verano austral, González et al. (2008) usaron datos diarios de tres estaciones de Argentina subtropical, que luego compararon con datos de radiación de onda larga emergente (OLR) para evaluar su desempeño como *proxy* de la convección en esta región. Los resultados muestran que la variación intraestacional explica una parte significativa de la varianza de la precipitación durante el verano, con un notorio máximo en las proximidades del centro subtropical del dipolo en SESA. Por otra parte, análisis de correlación indican que la OLR explica una parte muy pequeña de la variabilidad de precipitación diaria, aunque en escalas intraestacionales puede reproducir las principales características de la variabilidad de la precipitación. Las estaciones asociadas con señales intraestacionales fuertes en la variabilidad de la precipitación se relacionan con períodos húmedos/secos y están asociadas a patrones espaciales de SASS de convección bien definidos.

A diferencia de lo que ocurre durante el verano austral, los hallazgos de Álvarez et al. (2014), confirmados por Vera et al. (2017), indican que en la estación fría el patrón intraestacional consta de un monopolio centrado sobre SESA con orientación noroeste. Este patrón induce una gran modulación en las anomalías de precipitación diarias. Las anomalías de OLR de gran escala sobre los océanos Índico tropical y Pacífico oeste asociadas a este patrón exhiben una propagación hacia el este a lo largo de latitudes tropicales. Además, las anomalías de circulación en el hemisferio sur muestran la presencia de una anomalía

anticiclónica sobre la Antártida y anomalías de signo opuesto en latitudes medias 10 días antes del máximo del monopolo, así como también evidencias de patrones tipo onda de Rossby. Sin embargo, en esta estación no es discernible la estructura tropical zonal de número de onda 1. Las anomalías positivas de precipitación se ven favorecidas por fases húmedas del patrón intraestacional de estación fría debido a la intensificación de la anomalía ciclónica ubicada más al sur. Los resultados obtenidos por Álvarez et al. (2016) confirman que el calentamiento vinculado con la MJO inicia la propagación de energía de ondas de Rossby al sector Pacífico Sur, parte de la cual se refracta hacia el ecuador sobre el sector de América del Sur. Esta energía varía notoriamente en función de la estación del año. Al mismo tiempo, la parte tropical de la señal dinámica de la MJO induce anomalías de circulación sobre América del Sur que pueden favorecer o no la actividad convectiva. También encontraron que la actividad del Sistema Monzónico de América del Sur (SAMS) modula la influencia de la MJO en la variabilidad climática en América del Sur.

La influencia de la MJO sobre América del Sur ha sido detectada en todas las estaciones del año (Álvarez et al. 2016; Vera et al. 2017). Por esta razón, Vera et al. (2017) describen y analizan el patrón principal de variabilidad IS en las estaciones de transición, primavera y otoño, que no se habían estudiado antes. Concluyen que el patrón de dipolo sobre la SACZ y SESA encontrado en la estación húmeda (octubre-abril) también está presente en las estaciones SON, DJF, y MAM, aunque con algunas diferencias en la inclinación del centro positivo (sobre la SACZ) en la banda de 30 a 90 días. En el trimestre JJA se distingue un patrón similar al de la estación seca (mayo-septiembre). Los autores no encontraron correlación entre los patrones de las estaciones seca y húmeda, confirmando que en cada estación la precipitación está modulada por un modo de variabilidad IS diferente. La varianza IS de FOLR explicada por el EOF1 en la estación húmeda alcanza un 21.5%, similar a la explicada por el trimestre DJF, y algo menor (mayor) a la explicada por SON (MAM). Por otra parte, la varianza IS explicada por el EOF1 en la estación seca alcanza un 21.8%, que es menor a la explicada solamente por JJA. En la banda de 10 a 30 días, el EOF1 construido para todo el año, que representa bien el ciclo estacional, muestra un centro de anomalías más intenso sobre SESA que sobre la SACZ. En cuanto a la estacionalidad de los centros del dipolo, el que se encuentra sobre SESA tiene intensidad y posición similares en todas las estaciones, mientras que el ubicado sobre la SACZ tiene mayores variaciones, siendo más intenso sobre DJF y ausente en JJA. La varianza IS explicada por el EOF1 para el año entero es de 15.5%, como la cantidad explicada por los patrones de DJF y MAM, y alrededor de un 5% menos que la explicada por los patrones de SON y JJA.

Muñoz et al. (2015) explican que múltiples escalas temporales están involucradas en la ocurrencia de precipitación extrema en SESA, y que a escalas subestacionales, fenómenos tropicales y extratropicales tales como la MJO y la SACZ tienen gran importancia en la modulación de la precipitación extrema a través de anomalías de circulación y actividad de Complejos Convectivos de Mesoescala (MCC). Estos fenómenos interactúan entre sí y con forzantes estacionales de mayor escala. En su trabajo identifican varios forzantes climáticos “estacionales a subestacionales” vinculados con regímenes de circulación diarios, que conducen a eventos extremos de precipitación en SESA, a través de su control sinóptico impuesto sobre mecanismos físicos de mesoescala. Las frecuencias y las secuencias de los regímenes son sensibles a interferencias en distintas escalas de tiempo entre los diferentes regímenes, y por eso son candidatos a predictores de precipitación extrema.

En un siguiente trabajo, Muñoz et al. (2016) concluyen que los modelos que consideran interferencias en distintas escalas de tiempo, exhiben mayor habilidad para el pronóstico de ocurrencia de eventos

extremos de precipitación en SESA durante el verano austral. Esto se atribuye a que los mecanismos de variabilidad climática que actúan en una escala de tiempo determinada contribuyen a la predictibilidad en otras escalas de tiempo. En consonancia con el trabajo de Muñoz et al., se encuentran los resultados de Cazes-Boezio et al. (2003) que sugieren que cambios en la frecuencia de ocurrencia y amplitud de los regímenes de circulación intraestacionales pueden relacionarse con patrones de teleconexiones interanuales sobre el Pacífico Sur en la primavera y el otoño-invierno australes.

Trabajos previos detallan la relación entre ENOS y la precipitación en Uruguay. De acuerdo con Pisciotano et al. (1994), durante eventos El Niño la precipitación tiende a encontrarse por encima de la mediana climatológica entre noviembre y enero, y entre marzo y julio, decayendo únicamente sobre finales del verano austral. Durante La Niña, la relación es prácticamente inversa, con una tendencia a menores montos de precipitación entre octubre y diciembre, y entre marzo y julio, siendo más pronunciada la interrupción en la relación entre ENOS y la precipitación en enero y febrero. Trabajos posteriores son consistentes con estos resultados.

Cazes-Boezio et al. (2003) establecen, partiendo del análisis de EOF, que las anomalías interanuales de precipitación sobre Uruguay están asociadas a los modos más importantes de variabilidad de circulación sobre SESA, y que estos modos exhiben pronunciadas teleconexiones en escala planetaria. El EOF1 de promedios zonales de vientos en 200 hPa sobre América del Sur está asociado a ENOS en octubre-diciembre, enero-febrero, y marzo-julio, a través de una pronunciada componente de la celda de Walker. Sin embargo, únicamente durante octubre-diciembre se percibe en este patrón un vínculo entre la circulación sobre SESA y ENOS gracias a una teleconexión extratropical. En este trabajo, también se encuentran evidencias de que los patrones de teleconexión interanual observados sobre el Pacífico Sur en primavera y otoño-invierno australes se deben a cambios en la frecuencia de ocurrencia y amplitud de los regímenes de circulación IS.

### 1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es diagnosticar anomalías de circulación atmosférica asociadas a las temporadas del año en que el clima de precipitación en Uruguay muestra estar condicionado significativamente por la MJO. En contraposición a los estudios de variabilidad intraestacional en América del Sur mencionados anteriormente, que consideraban períodos trimestrales o mayores, este trabajo se centra en la escala subestacional, con períodos obtenidos a partir de la pluviometría local. Para alcanzar este objetivo, es necesario confirmar y ahondar en el análisis previo realizado por Alejandra De Vera y Rafael Terra para seleccionar el período y el índice de la MJO a utilizar, a partir de su influencia en la precipitación diaria. Posteriormente, se evaluarán los impactos a nivel regional, utilizando un campo grillado de precipitación. La interpretación de los resultados obtenidos es un objetivo central de este trabajo.

## 2 DATOS Y METODOLOGÍA

---

### 2.1 DATOS

#### 2.1.1 Índices de MJO

Se usan los índices de la MJO elaborados por el Climate Prediction Center (CPC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).<sup>1</sup> Para calcular los índices se aplicó un análisis de Funciones Ortogonales Empíricas Extendidas (EEOF, ver anexo A) a las péntadas de potencial de velocidad en 200 hPa (CHI200 de aquí en adelante) en veranos (noviembre-abril) de ENOS débil o neutro durante el período comprendido entre 1979 y 2000. Este período (noviembre-abril) sólo se tuvo en cuenta para el cálculo del índice, y no tiene relación con la selección de la temporada sobre la que se centra este trabajo. El primer EEOF se compone de diez patrones separados cinco días en el tiempo, y describe una propagación hacia el este de la MJO con una escala de tiempo de aproximadamente 45 días, como se puede observar en la figura 4. Los diez índices (Index 1, Index 2, ..., Index 10) se construyeron a partir de una regresión entre las péntadas filtradas de CHI200 y los diez patrones del primer EEOF (Xue et al. 2002). Los veranos de ENOS neutro o débil comprendidos entre 1979 y 2000 fueron seleccionados de acuerdo a la clasificación de ENOS de CPC, obteniéndose 15 de ellos para el cálculo de EEOF de CHI200. Se interpreta que los índices positivos corresponden a fases convectivamente activas de la MJO en las diferentes longitudes.

---

<sup>1</sup>[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_mjo\\_index/pentad.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/pentad.shtml)

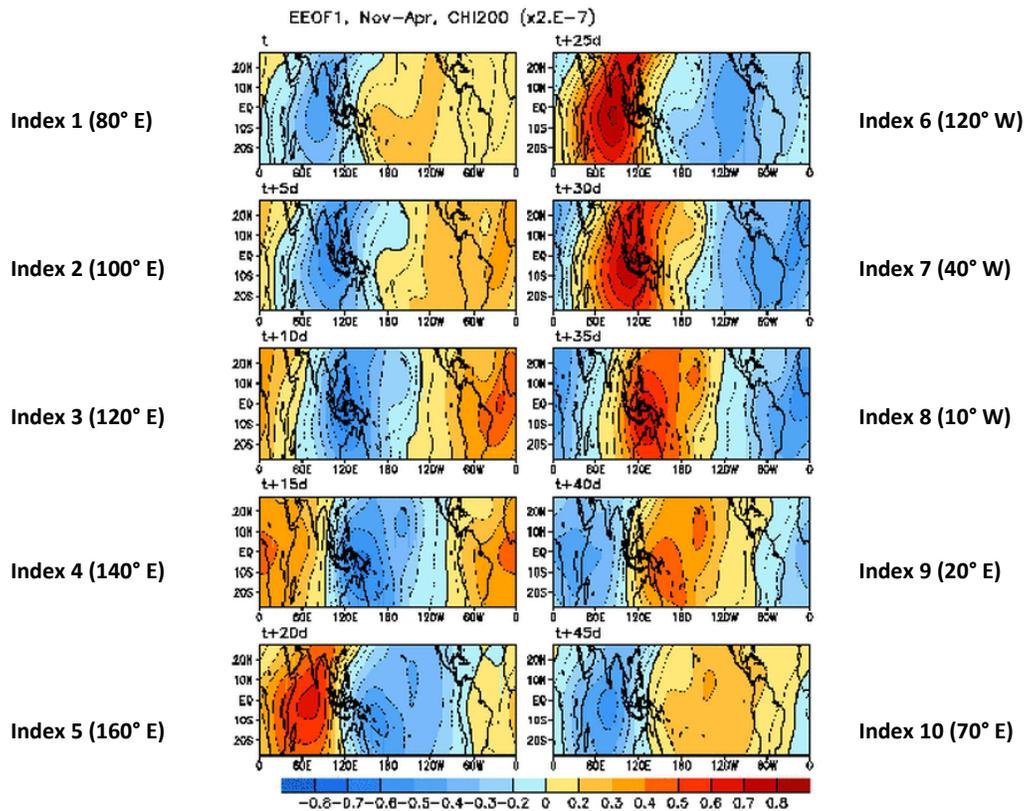


Figura 4: Primer EEOF de péntadas de CHI2 en veranos de ENSO neutro o débil durante 1979-2000. Fuente: CPC/NOAA.

Se obtuvieron, entonces, 10 índices diarios de la MJO proyectando las anomalías de CHI200 diarias (00Z) sobre los 10 patrones con *lag* temporal del primer EEOF de péntadas de anomalías de CHI200, que se muestran en la figura 4. Los índices están desfasados cinco d as del siguiente y el anterior, en particular, los índices Index 4 e Index 9 (estudiados por De Vera y Terra) están fuertemente anticorrelacionados. Notar también que el *lag* temporal empleado en la construcción de los índices refleja la propagación hacia el este de los centros de aumento de convección (azul) y los de disminución de convección (rojo). Las longitudes de los centros de aumento de convección se muestran entre paréntesis en la figura (80  E, 100  E, 120  E, 140  E, 160  E, 120  W, 40  W, 10  W, 20  E, 70  E).

### 2.1.2  ndice SOI

Con la finalidad de determinar si existe algún condicionamiento de ENOS sobre la precipitación superpuesta a la señal de MJO que se desea analizar, se utilizó el índice estandarizado SOI (*Southern Oscillation Index*) calculado por el CPC.<sup>2</sup> Este  ndice es una medida de las fluctuaciones de gran escala de la presión atmosférica que ocurren entre el Pacífico ecuatorial este y oeste -Oscilación Sur- durante episodios El Niño y La Niña del fenómeno ENOS. Tradicionalmente, el índice se ha calculado como una función de la diferencia de anomalías de presión atmosférica entre Tahití y Darwin (Australia).

<sup>2</sup> <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>

Las series suavizadas de SOI se corresponden, generalmente, con cambios en las temperaturas del mar en el Pacífico tropical este. La fase negativa del SOI representa anomalías negativas de presión en Tahití y anomalías positivas de presión en Darwin. Por lo tanto, períodos prolongados de valores negativos del SOI coinciden con temperaturas anómalas cálidas en el Pacífico ecuatorial este, típicas durante eventos El Niño. En cambio, períodos prolongados de valores positivos del SOI coinciden con anomalías negativas de temperatura en el Pacífico tropical este, que normalmente se observan durante eventos La Niña. Esta relación entre la temperatura del mar en el Pacífico central (región Niño 3.4) y la diferencia de presión entre Tahití y Darwin se ve representada en la siguiente figura.

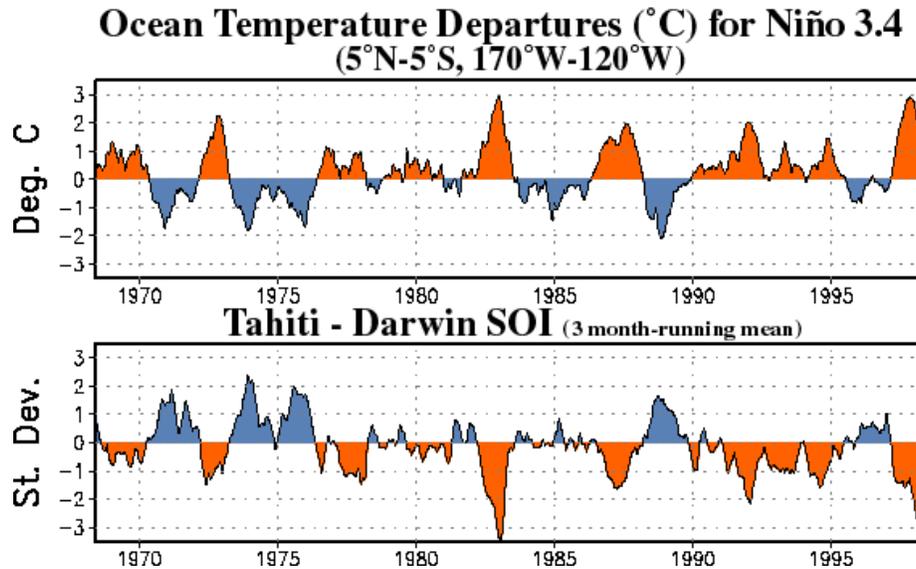


Figura 5: En el panel superior se muestran las anomalías de temperatura del mar (°C) en la región Niño 3.4. En el panel inferior se muestra la media móvil trimestral del índice estandarizado SOI. Fuente: CPC, NOAA.

El SOI se calcula tomando 1981-2010 como período de referencia, de la siguiente forma.<sup>3</sup>

La desviación estándar en Tahití se puede expresar como

$$Std Ta = \sqrt{\frac{\sum_N (SLP_{Ta} - media(SLP_{Ta}))^2}{N}}$$

donde  $SLP_{Ta}$  es la presión a nivel del mar en Tahití y N es la cantidad de meses. Entonces

$$Ta \text{ estandarizado} = \frac{SLP_{Ta} - media(SLP_{Ta})}{Std Ta}$$

Análogamente, tenemos que en Darwin

$$Da \text{ estandarizado} = \frac{SLP_{Da} - media(SLP_{Da})}{Std Da}$$

Luego, la desviación estándar mensual (MSD) es

<sup>3</sup> <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/Readme.index.shtml#SOICALC>

$$MSD = \sqrt{\frac{\sum_N ((Ta \text{ estandarizado}) - (Da \text{ estandarizado}))^2}{N}}$$

Finalmente,

$$SOI = \frac{(Ta \text{ estandarizado}) - (Da \text{ estandarizado})}{MSD}$$

### 2.1.3 Precipitación *in situ*

Se cuenta con datos diarios de precipitación en cinco puntos de Uruguay con fines únicamente de selección del índice y de la temporada en los que se basa el posterior análisis de anomalías de circulación. Estos datos provienen de las estaciones meteorológicas situadas en Artigas (56.51° W, 30.40° S), Paysandú (58.03° W, 32.35° S), Melo (54.19° W, 32.35° S), Rocha (54.31° W, 34.49° S), y Las Brujas (56.34° W, 34.67° S), cuyas ubicaciones se ilustran la figura 6. Los datos de las primeras cuatro estaciones son proporcionados por el Instituto Uruguayo de Meteorología (InUMet), mientras que los de la última se obtienen de la página web del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)<sup>4</sup>. El control de calidad de los datos de precipitación queda fuera del alcance de este trabajo.



Figura 6: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas sobre el territorio uruguayo.

### 2.1.4 Datos grillados

Para realizar los *composites*, se consideran los campos de viento zonal en 200 hPa (u200) y viento meridional en 200 hPa (v200) NCEP-DOE Reanalysis 2 proveídos por NOAA/OAR/ESRL PSD<sup>5</sup> en formato NetCDF. Es una versión mejorada de NCEP Reanalysis 1, con corrección de errores y nuevas parametrizaciones de los procesos físicos, que emplea un sistema de análisis/pronóstico actual para realizar la asimilación de datos, recurriendo a datos de 1979 hasta 2016. La cobertura espacial es de 2.5 grados de latitud por 2.5 grados de longitud, resultando en una grilla global de 144x73 puntos que se extiende de 90° N a 90° S y de 0° E a 357.5° E.

<sup>4</sup> <http://www.inia.org.uy/online/site/69264611.php>

<sup>5</sup> <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>

La caracterización de la distribución espacial de la señal se realiza en base al conjunto de datos del CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) proveídos por NOAA/OAR/ESRL PSD.<sup>6</sup> Los datos de la versión usada están disponibles en una grilla global a partir de enero de 1979, en forma de promedios de cinco días de montos de precipitación. La grilla cubre la región que se extiende de 88.75° N a 88.75° S y de 1.25° E a 358.5° W; y la resolución espacial es de 2.5 grados de latitud por 2.5 grados de longitud (144x72 puntos). Los valores se obtienen de datos de superficie y cinco tipos de estimaciones satelitales (GPI, OPI, SSM/I scattering, SSM/I emissions y MSU). Cada año está compuesto por 73 péntadas, siendo la péntada número 12 la que abarca los días 25 de febrero a 1º de marzo, aunque se trate de un año bisiesto.

## 2.2 METODOLOGÍA

Se comienza por estudiar la influencia de la MJO en el campo de precipitación e identificar los períodos e índices con sesgo más pronunciado, que luego se emplean en la obtención de los *composites* de circulación. Para ello, se halla el ciclo anual de precipitación acumulada y de frecuencia de lluvia en péntadas condicionados por los cuartiles superior e inferior de la MJO, confirmando y profundizando en los resultados obtenidos por De Vera y Terra. A partir de dicho análisis, se obtienen períodos mayores que la escala sinóptica pero menores que la escala estacional, como aquellos sombreados en la figura 3, donde se encuentra una señal de MJO en el registro pluviométrico. No se pretende que estos períodos pertenezcan a ninguna estación del año en particular. Se documenta cómo es la distribución de lluvias en las temporadas seleccionadas y el sesgo inducido por MJO.

Habiéndose seleccionado los eventos, se realizan *composites* de circulación atmosférica que muestran la conexión entre la MJO y la circulación local. En particular, se propone usar los campos de viento zonal y meridional en 200 hPa, siguiendo parcialmente la metodología planteada por Xue et al. (2002). La significancia estadística de los *composites* en cada punto de grilla se evalúa comparando las péntadas de MJO seleccionadas con las restantes por medio del test de Student (t test) de dos extremos (ver anexo C).

Para aquellos resultados más significativos se busca la señal de MJO en el campo regional de precipitación a partir del conjunto de datos CMAP.

La metodología general se puede resumir de la siguiente manera:

- 1) seleccionar las temporadas e índices de la MJO en función de la influencia de la MJO en el campo de precipitación local;
- 2) realizar *composites* de circulación a partir de los reanálisis;
- 3) determinar el impacto en la precipitación regional.

Dado que el set de datos es limitado, 37 años, la estratificación de la serie se hace por medio de ventanas de  $\pm 5$  péntadas centradas en el día en cuestión, alcanzando de esta forma un muestreo suficiente. El ancho de las ventanas, de 11 péntadas, se eligió en base a resultados de pruebas en problemas similares realizados por De Vera y Terra. En concreto, para cada día, se toma la péntada a la que pertenece y las 5 previas y posteriores en todos los años.

---

<sup>6</sup> <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cmap.html#detail>

Por tanto, para cada una de las 73 péntadas del año, se cuenta con  $11 \times 37 = 407$  péntadas asociadas. Se considera el cuartil inferior (superior) como las 102 péntadas en las que el índice de la MJO es menor (mayor). Finalmente, se promedia el parámetro de interés, precipitación acumulada o frecuencia de lluvia, en los días comprendidos dentro del primer (cuarto) cuartil, y se calcula su ciclo anual, que llamaremos Q1 (Q4). Este procedimiento se repite para los índices de la MJO Index 4, Index 8 e Index 9, para los que de Vera y Terra encontraron mayor sesgo en la precipitación local.

Los niveles de significancia estadística al 5% y 95% se calculan mediante el método de Monte Carlo, haciendo mil muestreos al azar de 102 péntadas a partir del universo de 407. Para cada estación meteorológica y para cada uno de los tres índices de la MJO se grafican la media climatológica, Q1, Q4, y los umbrales de 5% y 95%. En base a estos resultados se establecen los períodos en que la señal de MJO en la pluviometría es significativa. Los resultados permiten visualizar las temporadas e índices en las que la señal puede ser de interés, y confirmar los resultados obtenidos por De Vera y Terra.

La influencia de ENOS en el clima regional es conocida y ya fue mencionada. Es de interés determinar si los sesgos en la pluviometría asociados a la MJO en las temporadas seleccionadas se superponen (refuerzan o cancelan) o son independientes a aquellos asociados a ENOS. Para ello se realizó exactamente el mismo procedimiento de estratificación recién descrito también para el índice SOI. Se hizo solamente en las temporadas seleccionadas en función de la señal de MJO, este estudio no pretende realizar análisis exhaustivos de la influencia de ENOS en otras temporadas. A los efectos de identificar el conjunto de péntadas de interés de cada índice, en este trabajo se adoptará la siguiente notación: el conjunto  $X_{Qj}$  está compuesto por las péntadas del cuartil  $Qj$  del índice  $X$  (por ejemplo, índice SOI). Se usará también la notación  $PP_{Q4}$  que refiere simplemente al cuartil superior de péntadas con mayor precipitación.

Además, la dependencia entre el fenómeno ENOS y la MJO se analiza en cada temporada elegida por medio de tablas de contingencia en las que cada casillero contiene la frecuencia de ocurrencia de péntadas en cada par de cuartiles de los índices empleados (SOI y el índice MJO seleccionado para la temporada en cuestión). La relación con la precipitación se describe a partir de tablas de contingencia de  $PP_{Q4}$  condicionado por los cuartiles de MJO y SOI. Para evaluar la significancia, se realizó el test binomial (ver apéndice B), y se buscaron los valores de CDF menores (mayores) a 5% (95%) y 1% (99%). El mismo test se repitió dividiendo los conjuntos de índices SOI y MJO respecto a la mediana en lugar de cuartiles. Estas tablas, aparte de describir la relación entre MJO y ENOS con la precipitación, permiten elegir una combinación de índices que condicionan bien a  $PP_{Q4}$ .

Una vez obtenidas las temporadas en función de la influencia de la MJO en la pluviometría local y analizadas las relaciones entre los índices, se procede a la realización de *ensembles* de anomalías de circulación atmosférica (u200, v200). El procedimiento de cálculo se explica en la figura 7.

La construcción de *composites* es esencial para alcanzar los objetivos del trabajo, ya que el método provee una mejor comprensión de la influencia de una señal sobre otras variables. Consiste en clasificar los datos en categorías  $\theta$  (en este caso Q1 o Q4) según el índice  $z$  (por ejemplo MJO, SOI o PP), y estimar el valor esperado de una variable  $V$  (anomalías de u200, v200 o precipitación), condicionado a que  $z \in \theta$  (Storch, H. v., & Zwiers, F. W. (1999)). Formalmente, el *composite*  $V_\theta$  está dado por

$$V_\theta = E(V_t | z_t \in \theta),$$

donde  $t$  representa el tiempo. En la práctica se obtiene una estimación del *composite* sustituyendo la expresión anterior por la suma

$$\hat{V}_\theta = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k V_{t_j},$$

donde la suma se hace en los tiempos  $t_1, \dots, t_k$  para los cuales  $z_{t_j} \in \theta$ .

Vale destacar que no se hace ninguna suposición sobre la relación entre  $z$  y  $V$ , que podría ser lineal o no. Además, es posible determinar si los aspectos de la señal capturados por  $z$  se expresan en  $V$  con una prueba de hipótesis, donde la hipótesis nula es

$$H_0: V_{\theta_1} = V_{\theta_2},$$

siendo  $\theta_1$  y  $\theta_2$  conjuntos disjuntos. Esta prueba se hace con el test de Student de diferencia de medias (ver anexo C).

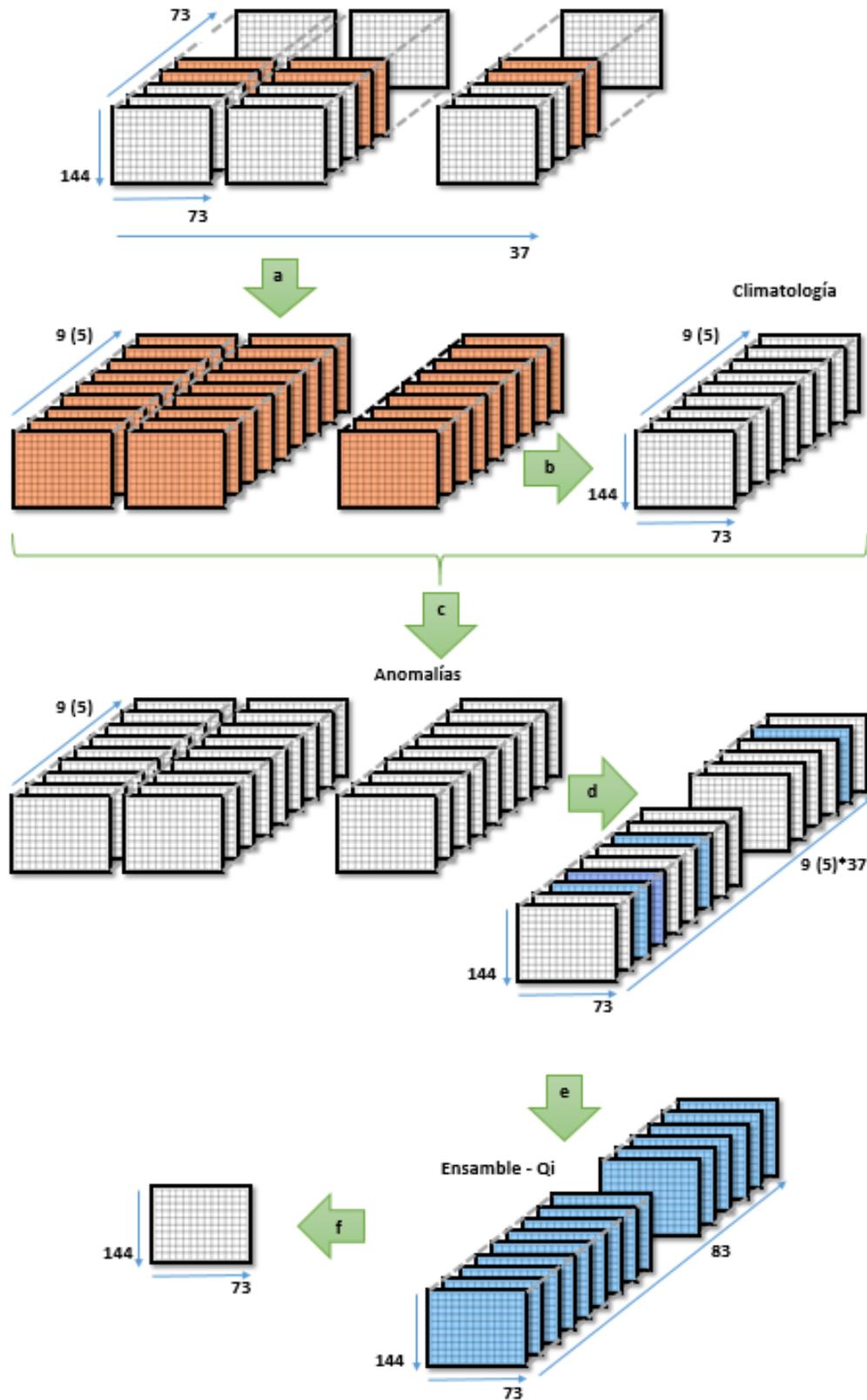


Figura 7: Esquema de cálculo anomalías de  $u_{200}$  y  $v_{200}$ , y construcción de composites.

En la figura 7 se ilustra el procedimiento llevado a cabo para el cálculo de *composites* de anomalías de u200 o v200 condicionadas por el primer o cuarto cuartil de los índices seleccionados en cada caso. Cada una de las variables se presenta como una matriz de cuatro dimensiones de tamaño 144x73x73x37. Las dimensiones son:

- 1) latitud;
- 2) longitud;
- 3) número de péntadas en cada año;
- 4) cantidad de años considerados (de 1979 a 2015).

A partir de estos datos, se realizan los siguientes cálculos:

- a) Selección de las péntadas que pertenecen a cada temporada elegida. Se obtienen nuevas matrices de tamaño 144x73x9x37 para las estaciones de otoño y verano, y de tamaño 144x73x5x37 para la estación de primavera.
- b) Cálculo de la climatología de u200 o v200 para cada péntada, promediando según la cuarta dimensión de las matrices de cada temporada.
- c) Cálculo de matrices de anomalías de u200 o v200 para cada temporada, restando a las matrices originales la climatología calculada en el paso anterior.
- d) Redimensionamiento de las matrices de anomalías de u200 o v200. Se obtienen matrices de tamaño 144x73x333 (para otoño y verano) o 144x73x185 (para primavera).
- e) Estratificación de las anomalías de las variables según los cuartiles Q1 o Q4 de los índices de MJO, SOI, MJO+SOI, MJO-SOI, y Q4 de PP. Se obtienen matrices de tamaño 144x73x83 (para otoño y verano) o 144x73x46 (para primavera).
- f) Promedio de las matrices anteriores según la tercera dimensión, obteniéndose los *composites* de circulación (matrices del mismo tamaño que la grilla espacial de 144x73).

Finalmente, con el propósito de investigar la espacialidad de la señal y confirmar que los resultados no son consecuencia de coincidencias puntuales, se realizan *composites* de anomalías de precipitación a partir del campo grillado condicionadas a subconjuntos de péntadas que se indicarán.

## 3 RESULTADOS

---

### 3.1 SELECCIÓN DE TEMPORADA E ÍNDICE DE LA MJO

El estudio del sesgo en la pluviometría local permitió definir el conjunto de temporadas e índices de la MJO que se usarán en el análisis que vincula la MJO con la circulación atmosférica. La figura 8 muestra el ciclo anual de precipitación media y aquella condicionada por los cuartiles Q1 y Q4 de tres índices de MJO en cinco estaciones meteorológicas; también se señalan los umbrales de significancia al 5% y 95% tal cual ya fue descrito.

# Trabajo Especial de la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

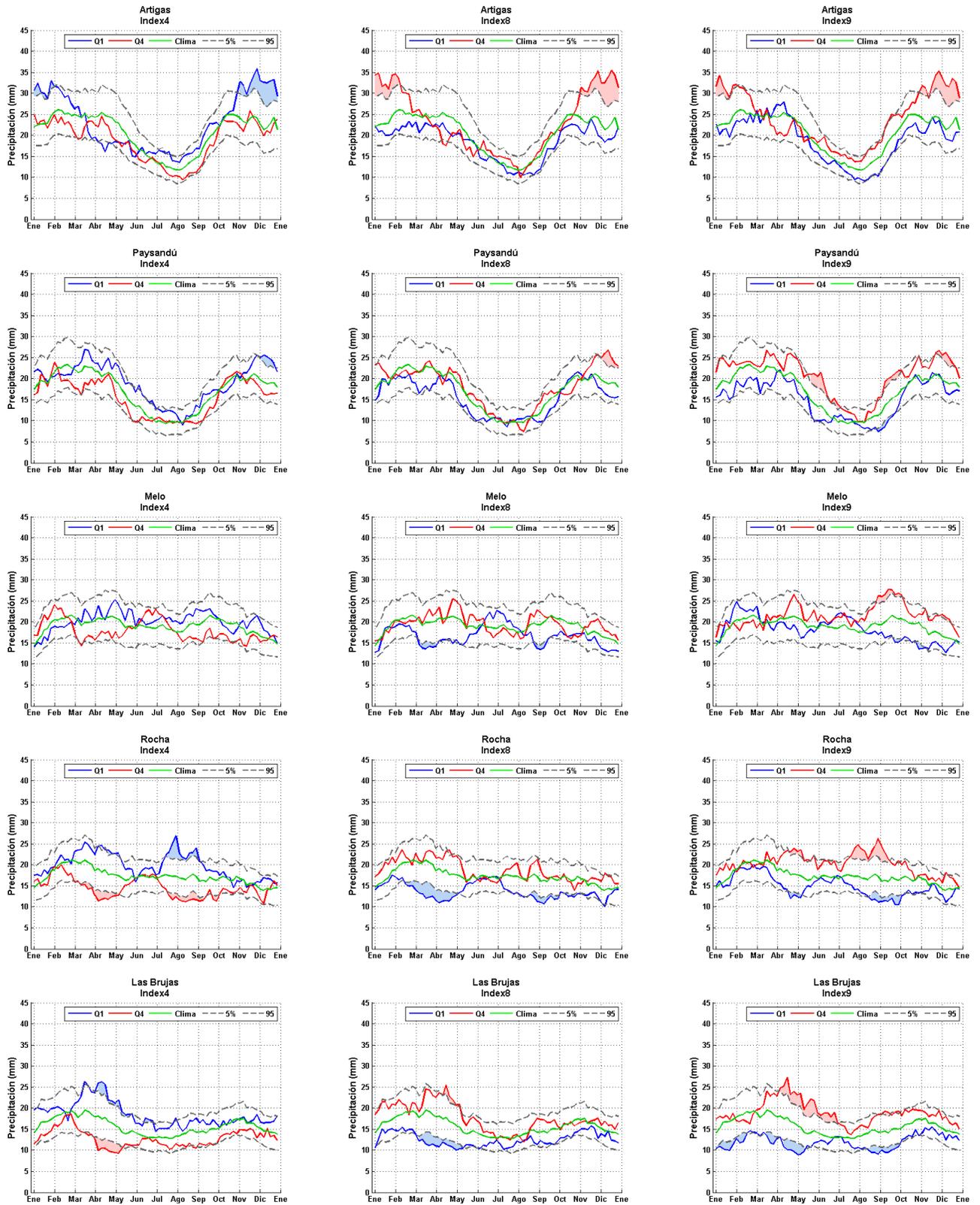


Figura 8: Media climatológica y muestreos condicionados por la MJO de precipitación media.

La figura 8 confirma que el ciclo anual de la precipitación es más pronunciado en las estaciones del norte del país, Artigas y Paysandú. Éstas presentan un notorio mínimo en invierno, entre julio y agosto, y dos máximos en primavera y otoño. El mismo patrón de lluvias, pero con menor amplitud, se percibe en la estación de Las Brujas. Las estaciones con menor variación anual en los montos de precipitación son Melo y Rocha. En la primera se observa un mínimo en verano y en la segunda un máximo entre marzo y abril.

Como se mencionó anteriormente, para la construcción de estas gráficas se siguió la metodología planteada por De Vera y Terra, únicamente ampliando el período de estudio (de 1978-2008 a 1979-2015), por lo que se empezó por contrastar los resultados. Los resultados obtenidos en ambos casos son similares, aunque existen algunas diferencias. En De Vera y Terra, las gráficas de la estación de Artigas con los tres índices seleccionados muestran una señal que se concentra principalmente en el mes de noviembre, mientras que en este trabajo se encuentra una señal que se extiende desde comienzos de noviembre hasta finales de enero. En Paysandú, los resultados previos indican una señal prolongada entre abril y julio al condicionar los muestreos por los índices de MJO Index 4 e Index 9, que en la figura 8 no se distinguen ya que Q1 y Q4 se encuentran más cerca de los valores climatológicos en esta época. Sin embargo, se puede apreciar una señal de verano para los tres índices, semejante a la de Artigas, pero más débil y concentrada en menos péntadas en diciembre. Las mayores diferencias respecto a los resultados de De Vera y Terra se observan en Melo, donde la señal de otoño detectada no resulta evidente para el período 1979-2015. Las curvas de la estación de Las Brujas son muy parecidas. Para la estación de Rocha no se tiene resultados contra los que comparar.

La figura 8 pone de manifiesto la existencia de períodos subestacionales en los que los muestreos condicionados por la MJO son significativos al 5% o 95%. Un ejemplo de lo anterior se encuentra en la estación de Paysandú, considerando el Index 9, donde Q4 es significativo al 5% en septiembre. Hallando las intersecciones de cada una de las curvas, y encontrando las péntadas en las que Q1 y Q4 superan los umbrales (sombreadas en la figura), se eligieron, en una primera instancia, los siguientes índices y temporadas de 5 péntadas:

- otoño (péntadas 20 a 24) condicionado por Index 4;
- primavera (péntadas 50 a 54) condicionado por Index 9;
- verano (péntadas 68 a 72) condicionado por Index 8.

Sin pretenderlo, coinciden con los meses calendario abril y septiembre, en los que la señal de ENOS es débil, y diciembre, que se encuentra al final de un período de señal fuerte de primavera (Pisciottano et al. 1994).

Notar que la selección inicial de temporadas de estudio, sobre la base de las gráficas en la figura 8, está afectada por las ventanas de 11 péntadas que se usó para aumentar el muestreo. Como segundo paso en la selección de las temporadas, se calcularon la precipitación media y la frecuencia condicionadas por los cuartiles de MJO (según el Index correspondiente) en las temporadas de otoño, primavera y verano, seleccionadas anteriormente, para períodos de 5, 7 y 9 péntadas de largo (ahora sin ventanas), y los umbrales de 1%, 5%, 10%, 90%, 95% y 99%. Los resultados reflejan que la significancia se deteriora al considerar períodos más largos en primavera (Index 9). Esto se debe a que la señal se concentra en pocas péntadas, como se advierte en las gráficas de todas las estaciones meteorológicas. En verano (Index 8) ocurre lo contrario, la significancia mejora al considerar 9 péntadas en lugar de 5, ya que en Artigas y parcialmente en Paysandú, la señal se extiende sobre un período más largo. En otoño (Index 4) mejora

levemente la significancia al considerar períodos de 9 pñtadas. Teniendo en cuenta lo anterior, la selección final de las temporadas es la que sigue:

- 9 pñtadas en otoño (18 a 26) condicionado por Index 4;
- 5 pñtadas en primavera (50 a 54) condicionado por Index 9;
- 9 pñtadas en verano (66 a 1) condicionado por Index 8;

La influencia de la actividad de la MJO fue identificada en todo el año, como se puede verificar en la figura 8, pese a que su intensidad varía en función del índice y la ubicación de la estación meteorológica, confirmando los resultados hallados por Álvarez et al. (2016) y Vera et al. (2017). Notar que la temporada de verano está comprendida dentro de la estación cálida definida por González y Vera (2013), la temporada de primavera se sitúa sobre el final de la estación fría definida por Álvarez et al. (2014), y las tres temporadas seleccionadas antes pertenecen a la estación húmeda considerada por Vera et al. (2017). Por consiguiente, resulta interesante comparar las anomalías de circulación mostradas en la sección de *composites* con las de trabajos previos.

### 3.2 SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA DE LOS SESGOS EN LA PRECIPITACIÓN (MONTOS Y FRECUENCIA) EN TEMPORADAS SELECCIONADAS EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE MJO

#### 3.2.1 Primavera – Index 9

Las tablas 1, 2 y 3, que se exhiben a continuación, contienen los valores promediados de montos de precipitación y frecuencia para aquellas pñtadas que pertenecen al primer y cuarto cuartil de los índices de MJO elegidos para cada una de las temporadas. Las celdas con valores significativos están coloreadas según se indica en el cuadro de la derecha.

	Primavera Index 9 – 5 pñtadas					Significancia	
	Artigas	Paysandú	Melo	Rocha	Las Brujas		
<b>Frecuencia Q1</b>	25.2%	20.4%	26.5%	30.9%	16.1%	90%	10%
<b>Frecuencia Q4</b>	33.9%	30.0%	37.4%	50.0%	35.2%	95%	5%
<b>Montos Q1</b>	12.9 mm	7.8 mm	15.4 mm	11.2 mm	7.9 mm	99%	1%
<b>Montos Q4</b>	22.1 mm	20.7 mm	34.9 mm	27.3 mm	22.1 mm		

Tabla 1: Significancia estadística en primavera para montos y frecuencias de precipitación condicionadas por el índice Index 9 de MJO en períodos de 5 pñtadas.

En primavera se observa señal significativa en todas las estaciones meteorológicas, tanto en montos como frecuencia (ver tabla 1). Artigas es dónde se presenta señal más débil en esta temporada, significativa al 10% solo para Q1 (montos y frecuencias). Las estaciones situadas más al sur, Rocha y Las Brujas, son las de mayor señal. En general, en la temporada de primavera, aquellas pñtadas con menor Index 9 son en promedio secas y de baja frecuencia de lluvia, mientras que las que tienen mayor Index 9 son en promedio húmedas con alta frecuencia de lluvia.

### 3.2.2 Verano – Index 8

	Verano Index 8 – 9 pñtadas					Significancia	
	Artigas	Paysandú	Melo	Rocha	Las Brujas		
<b>Frecuencia Q1</b>	22.4%	26.5%	24.8%	28.4%	21.9%	90%	10%
<b>Frecuencia Q4</b>	28.7%	29.6%	26.5%	30.1%	23.1%	95%	5%
<b>Montos Q1</b>	19.4 mm	16.4 mm	13.9 mm	10.9 mm	12.2 mm	99%	1%
<b>Montos Q4</b>	34.7 mm	25.7 mm	16.2 mm	18.7 mm	16.3 mm		

Tabla 2: Significancia estadística en verano para montos y frecuencias de precipitación condicionadas por el índice Index 8 de MJO en períodos de 9 pñtadas.

A diferencia de lo que ocurre en primavera, en verano la señal es significativa únicamente en el norte, en Paysandú y principalmente en Artigas, y en Rocha (ver tabla 2). Si consideramos períodos más cortos (de 5 o 7 pñtadas), solo se observa señal en Artigas y Paysandú. En las tres estaciones mencionadas, las pñtadas que forman Q4 tienen en promedio acumulados de precipitación altos, y en el caso de Artigas, también frecuencias altas. En cuanto a Q1, en Artigas consta en promedio de pocos días de lluvia, y en Rocha de bajos acumulados.

### 3.2.3 Otoño – Index 4

	Otoño Index 4 – 9 pñtadas					Significancia	
	Artigas	Paysandú	Melo	Rocha	Las Brujas		
<b>Frecuencia Q1</b>	29.2%	29.2%	29.9%	37.8%	27.5%	90%	10%
<b>Frecuencia Q4</b>	30.6%	26.8%	26.3%	34.0%	19.3%	95%	5%
<b>Montos Q1</b>	18.0 mm	23.1 mm	22.4 mm	25.7 mm	24.4 mm	99%	1%
<b>Montos Q4</b>	24.7 mm	23.5 mm	19.9 mm	12.2 mm	10.5 mm		

Tabla 3: Significancia estadística en otoño para montos y frecuencias de precipitación condicionadas por el índice Index 4 de MJO en períodos de 9 pñtadas.

En otoño no hay señal ni en Paysandú ni en Melo, ésta se concentra esencialmente en las estaciones meteorológicas posicionadas más al sur. En Rocha, Q1 está formado en promedio por pñtadas con montos elevados de lluvia, y Q4 por pñtadas con bajos montos. En Las Brujas, además, Q1 se caracteriza por tener una alta frecuencia de precipitación, y Q4 baja frecuencia.

La temporada con mayores sesgos en promedio es la de primavera. A su vez, es la única con señal significativa en todas las estaciones meteorológicas. Por otra parte, las estaciones meteorológicas que tienen señal significativa en las tres temporadas elegidas son Artigas y Rocha.

## 3.3 DISTRIBUCIONES CONDICIONADAS DE LAS ESTACIONES Y TEMPORADAS CON MAYOR SEÑAL

Las tablas anteriores permiten seleccionar las estaciones meteorológicas con más señal en cada temporada, Las Brujas en otoño y primavera, y Artigas en Verano. Para cada una de ellas se graficaron las distribuciones empíricas normalizadas de montos de precipitación y los diagramas de caja (ver figuras 9, 10 y 11) considerando todo el conjunto de datos (en verde), aquellos pertenecientes a Q1 (en rojo) y a Q4 (en azul). Recordar que las pñtadas que constituyen Q1 y Q4 son aquellas condicionadas por el índice de la MJO que fue seleccionado para la temporada como se explicó antes.

Los diagramas de caja proveen información gráfica acerca de las distribuciones de los datos. Los bordes de las cajas representan el percentil 25 ( $q_{25}$ ) y el percentil 75 ( $q_{75}$ ), y la línea que se encuentra entre éstos

es la mediana. La diferencia entre  $q_{75}$  y  $q_{25}$  se denomina rango intercuartil ( $IQR$ ). Las líneas que se extienden desde las cajas alcanzan los valores  $\pm 1.5 \times IQR$ , y los puntos que se encuentran fuera de estas líneas son considerados valores atípicos.

Como es de esperar, las distribuciones de montos precipitación que se muestran en las siguientes tres figuras son sesgadas positivamente dado el límite físico sobre la izquierda, es decir, no presentan valores negativos. Asimismo, debido a la alta frecuencia de péntadas con monto igual cero, el  $q_{25}$  es cero en casi todos los casos (ver tablas 4, 5 y 6).

### 3.3.1 Primavera – Las Brujas

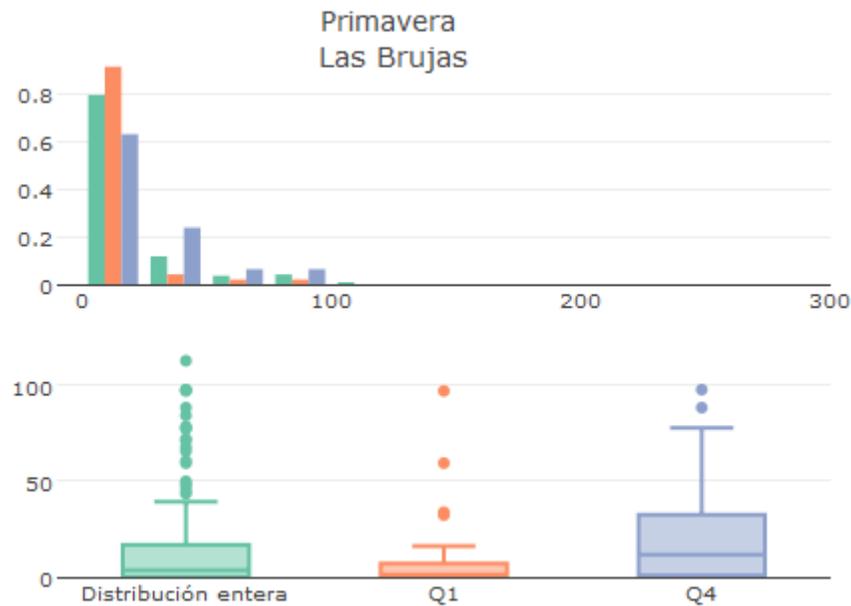


Figura 9: Distribuciones y diagramas de caja de montos de precipitación en la temporada de primavera en la estación meteorológica Las Brujas.

	Distribución entera	Q1	Q4
<b>Mín.</b>	0.0	0.0	0.0
<b><math>q_{25}</math></b>	0.0	0.0	0.8
<b>Mediana</b>	3.5	1.2	11.7
<b>Media</b>	14.5	7.9	22.1
<b><math>q_{75}</math></b>	16.3	6.8	31.1
<b>Máx.</b>	113.0	97.2	97.9
<b>Std</b>	23.4	17.4	26.8

Tabla 4: Estadísticas de los montos de precipitación en la temporada de primavera en la estación meteorológica Las Brujas.

Las distribuciones normalizadas y los diagramas de caja de montos de precipitación en la temporada de primavera en la estación meteorológica Las Brujas están representados en la figura 9. Se eligió mostrar las distribuciones de esta estación meteorológica porque es la que registra mayor señal significativa en primavera, como se puede observar en la tabla 1. En verde se tiene la distribución entera, en rojo la distribución de Q1 y en azul la de Q4.

Las observaciones más frecuentes de montos de precipitación en la estación Las Brujas en primavera pertenecen al intervalo [0, 25) mm. En este rango la distribución de Q1 es la que tiene mayor cantidad de observaciones, aproximadamente 91%, mientras que la distribución de Q4 es la que muestra menor frecuencia, 63%. Esto se revierte en el intervalo [25, 50) mm, donde la frecuencia en Q4 es cinco veces y media la de Q1.

La mediana de Q1 (Q4) es aproximadamente un tercio (más de tres veces) la mediana de la distribución entera. En lo que refiere a las medias, la de Q1 (Q4) es un poco mayor a la mitad (una vez y media) la media de la población histórica, todo lo cual reflejan la magnitud del sesgo asociado a MJO.

El conjunto de datos con mayor rango intercuartil y con mayor dispersión es el que pertenece a Q4 y el menor a Q1. Sin embargo, el valor atípico más alto no está presente en ninguno de estos dos conjuntos.

### 3.3.2 Verano - Artigas

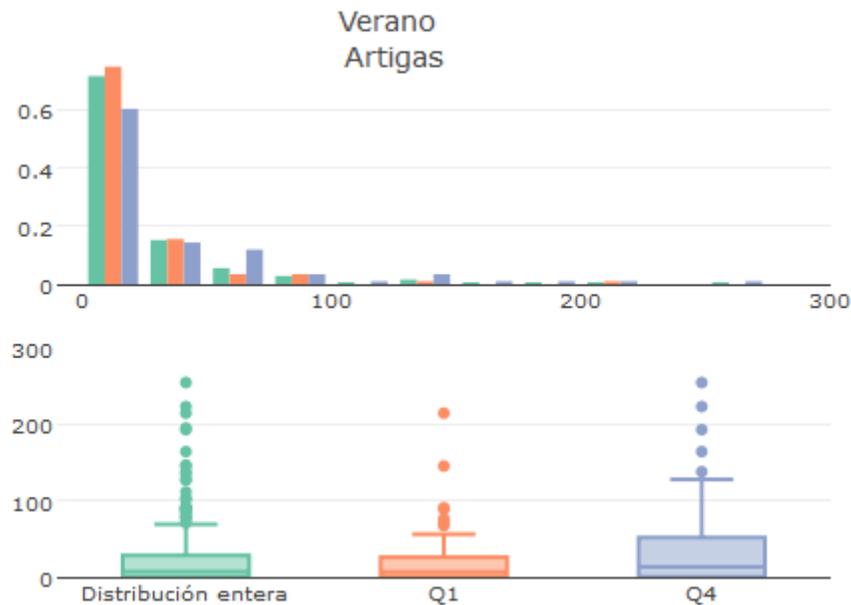


Figura 10: Distribuciones y diagramas de caja de montos de precipitación en la temporada de verano en la estación meteorológica Artigas.

	Distribución entera	Q1	Q4
<b>Mín.</b>	0.0	0.0	0.0
<b><math>q_{25}</math></b>	0.0	0.0	0.3
<b>Mediana</b>	6.7	6.2	13.1
<b>Media</b>	22.0	19.4	34.7
<b><math>q_{75}</math></b>	28.1	25.2	50.9
<b>Máx.</b>	254.0	214.0	254.0
<b>Std</b>	37.4	33.6	51.7

Tabla 5: Estadísticas de los montos de precipitación en la temporada de verano en la estación meteorológica Artigas.

En la figura 10 se muestran las distribuciones y diagramas de caja de los montos de precipitación de la estación de Artigas, que es la que tiene mayor sesgo en verano. Como se advierte en las tablas 2 y 5, los montos del conjunto Q1 no son significativamente distintos a los de la población general. Sí lo son los de Q4, cuya mediana es el doble que en la distribución entera y la media es un 57% mayor.

Al comparar las figuras anteriores, se observa un incremento en los valores atípicos y en la dispersión de los datos de la figura 10 respecto a la figura 9. En los tres conjuntos predominan las péntadas con menores montos, aunque la frecuencia de éstas disminuye. También son mayores el *IQR* y la mediana en verano en Artigas que en primavera en Las Brujas.

### 3.3.3 Otoño – Las Brujas

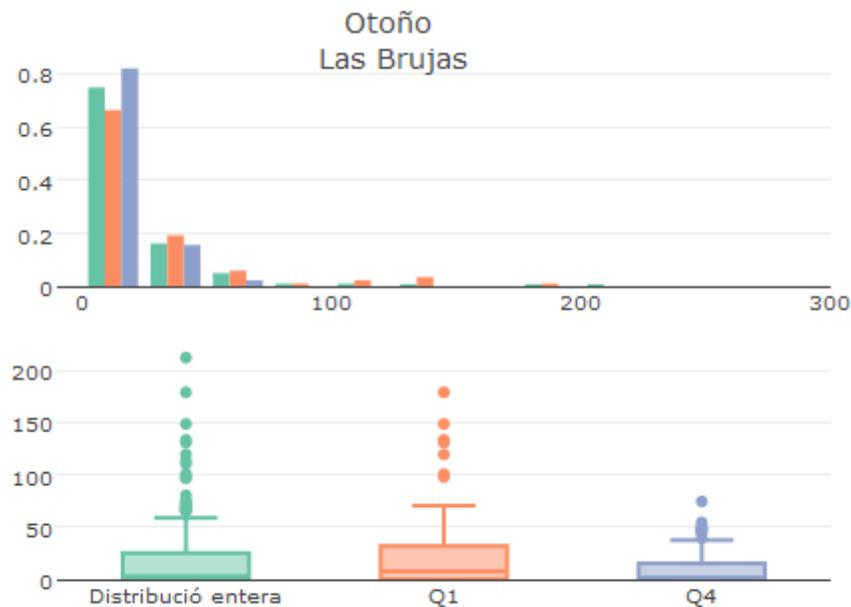


Figura 11: Distribuciones y diagramas de caja de montos de precipitación en la temporada de otoño en la estación meteorológica Las Brujas.

	Distribución entera	Q1	Q4
<b>Mín.</b>	0	0	0
<b>q<sub>25</sub></b>	0	0	0
<b>Mediana</b>	3	7.8	1.2
<b>Media</b>	16.7	24.4	10.5
<b>q<sub>75</sub></b>	25.1	31.5	15.2
<b>Máx.</b>	212.2	179.0	74.5
<b>Std</b>	28.7	37.4	16.5

Tabla 6: Estadísticas de los montos de precipitación en la temporada de otoño en la estación meteorológica Las Brujas.

En la figura 11 se pueden observar las distribuciones y diagramas de caja de los montos de precipitación en la temporada de otoño en la estación meteorológica Las Brujas. Esta estación es la única con señal significativa tanto en montos como en frecuencias en otoño (ver tabla 3). La relación entre MJO y lluvia es opuesta a las temporadas anteriores porque el índice seleccionado (Index 4) está aproximadamente en fase opuesta a los índices 8 y 9 usados anteriormente. Por tanto, en esta temporada, Q4 es el conjunto con menor dispersión y Q1 es el que tiene mayor dispersión, inversamente a lo que ocurre en las otras dos temporadas.

La mediana de Q1 (Q4) es 2,6 veces (un 40%) la mediana de la distribución entera, mientras que la media de Q1 (Q4) es un 46% mayor (un 37% menor) que la media de la población general.

La distribución entera y la de Q1 contienen valores extremos considerablemente mayores que los valores atípicos de Q4. Al igual que en primavera, el máximo absoluto no ocurre ni en Q1 ni en Q4.

### 3.4 CONDICIONAMIENTO ENTRE MJO, PRECIPITACIÓN Y SOI

Para analizar la co-dependencia entre MJO y SOI en las temporadas de interés, se calcularon las tablas de contingencia (tablas 8, 10 y 12) donde cada casillero muestra la cantidad de péntadas encontradas en la intersección de cuartiles de los índices MJO y SOI. Los valores que resultan significativos según el test binomial están coloreados (ver tabla 7). Los bordes resaltan los conjuntos [Q1+Q2] o [Q3+Q4] que son significativos.

A su vez, para analizar la superposición de las señales de MJO y SOI sobre la precipitación, también se construyeron tablas de frecuencia de péntadas del cuartil superior de la precipitación (PP\_Q4) en función de los cuartiles de MJO y SOI (tablas 9, 11 y 13). En estas últimas, la columna y la fila con la suma de cada cuartil también están sombreadas según los resultados del test binomial. Estas tablas revelan en qué situaciones la MJO y ENOS tienen influencia sobre PP\_Q4, y permiten determinar si el efecto de ambos fenómenos en la precipitación se superpone.

0.99/0.01	0.99/0.01 0.95/0.05
0.95/0.05	
0.90/0.10	

Tabla 7: Valores de significancia estadística.

### 3.4.1 Primavera

		MJO (Index 9)			
		Q1	Q2	Q3	Q4
SOI	Q1	2	13	16	15
	Q2	13	11	12	10
	Q3	10	9	12	16
	Q4	21	13	7	5

Tabla 8: Tabla de contingencia. Frecuencia en cada par de cuartiles de índices SOI-MJO en la temporada de primavera.

		MJO (Index 9)				Suma
		Q1	Q2	Q3	Q4	
SOI	Q1	0	1	2	8	11
	Q2	0	2	5	5	12
	Q3	2	2	5	5	14
	Q4	2	3	1	3	9
	Suma	4	8	13	21	46

Tabla 9: Tabla de contingencia. Frecuencia de péntadas del cuarto cuartil de precipitación en la estación meteorológica Las Brujas, en función de los cuartiles de los índices de MJO, Index 9, y SOI. Los datos pertenecen a la temporada de primavera.

La tabla 8 muestra que en la temporada de primavera, SOI y MJO (Index 9) están anticorrelacionados, es decir, los valores de ocurrencia de péntadas más bajos se encuentran en la diagonal de la matriz, mientras que los más altos se sitúan fuera de la misma. En particular, los casilleros más significativos son Q1-Q1 y Q1-Q4 (de MJO y SOI respectivamente).

En la tabla 9, de la temporada de primavera, se descomponen la cantidad de péntadas de PP\_Q4 en la estación Las Brujas según los cuartiles de los índices MJO (Index 9) y SOI. Se confirma que la influencia de ENOS sobre la precipitación no es significativa en la temporada de primavera, consistente con los resultados obtenidos por Pisciotto et al. (1994). Por otra parte, las demás columnas de la tabla resaltan la influencia de la MJO sobre la precipitación en primavera, señalando que la frecuencia de péntadas aumenta conforme se incrementa el Index 9 de MJO. La última fila muestra valores altamente significativos para MJO\_Q1 y MJO\_Q4.

### 3.4.2 Verano

		MJO (Index 8)			
		Q1	Q2	Q3	Q4
SOI	Q1	30	18	17	18
	Q2	21	21	17	24
	Q3	14	23	28	19
	Q4	18	21	22	22

Tabla 10: Tabla de contingencia. Frecuencia en cada par de cuartiles de índices SOI-MJO en la temporada de verano.

		MJO (Index 8)				
		Q1	Q2	Q3	Q4	Suma
SOI	Q1	8	5	6	8	27
	Q2	7	6	5	13	31
	Q3	2	2	4	4	12
	Q4	1	3	2	7	13
	Suma	18	16	17	32	83

Tabla 11: Tabla de contingencia. Frecuencia de péntadas del cuarto cuartil del de precipitación en la estación meteorológica Artigas, en función de los cuartiles de los índices de MJO, Index 8, y SOI. Los datos pertenecen a la temporada de verano.

La frecuencia de ocurrencia de las péntadas en cada par de cuartiles de los índices SOI y MJO (Index 8) en la temporada de verano se expone en la tabla 10. Esta temporada cuenta con la particularidad de que los valores más altos se sitúan en la diagonal de tabla, evidenciando una relación positiva entre ambos índices climáticos, y contrastando con las demás temporadas seleccionadas en este estudio. De hecho, la frecuencia de péntadas en Q1-Q1 es muy significativa, y la de Q3-Q3 es significativa. Además, hay más valores en la intersección de conjuntos Q1 de MJO con [Q1+Q2] de SOI que con [Q3+Q4] de SOI, y esta diferencia es también significativa.

Con respecto a la tabla de frecuencias condicionadas por PP\_Q4, se observa que tanto ENOS como la MJO tienen influencia sobre los montos de precipitación en la temporada de verano. De la última fila se deduce que la MJO tiene una influencia muy significativa sobre PP\_Q4 cuando el Index 8 pertenece a Q4. En cambio, cuando se trata de SOI, son significativas las frecuencias de los casilleros de los cuatro cuartiles (última columna); y también resulta significativo el test para los conjuntos [Q1+Q2] y [Q3+Q4], observándose mayores frecuencias de lo normal cuando SOI es menor que la mediana, y mayores valores que lo normal cuando SOI es mayor que la mediana. Este resultado era esperado de acuerdo con Pisciottano et al. (1994) y otros estudios posteriores mencionados en la introducción.

Las tablas anteriores indican que llueve más en la estación Artigas cuando el índice SOI es bajo y el Index 8 de MJO es alto, lo cual sugiere que la combinación de índices MJO-SOI podría capturar una señal mayor que la de los índices por separado. En base a esto se considerará también MJO-SOI\_Q4 a la hora de analizar *composites* de circulación en la siguiente sección.

### 3.4.3 Otoño

		MJO (Index4)			
		Q1	Q2	Q3	Q4
SOI	Q1	14	16	27	26
	Q2	25	18	19	21
	Q3	19	22	19	24
	Q4	25	27	19	12

Tabla 12: Tabla de contingencia. Frecuencia en cada par de cuartiles de índices SOI-MJO en la temporada de otoño.

		MJO (Index4)				Suma
		Q1	Q2	Q3	Q4	
SOI	Q1	6	6	8	9	29
	Q2	10	3	4	1	18
	Q3	5	7	1	2	15
	Q4	7	9	3	2	21
	Suma	28	25	16	14	83

Tabla 13: Tabla de contingencia. Frecuencia de péntadas del cuarto cuartil de precipitación en la estación meteorológica Las Brujas, en función de los cuartiles de los índices de MJO, Index 4, y SOI. Los datos pertenecen a la temporada de otoño.

La tabla 12 fue realizada con los datos de la temporada de otoño y muestra la matriz de contingencia para cada par de índices MJO (Index 4) y SOI. En general, en otoño, es menor la significancia estadística de los condicionamientos en comparación con las otras dos temporadas. Se observa que MJO y SOI están anti-estratificados, distinguiéndose menor cantidad de péntadas en los casilleros de la diagonal que fuera, al igual que en la estación de primavera. En los cuartiles Q2 y Q3 de SOI no hay ningún valor significativo, pero Q1 de SOI tiende a favorecer valores por encima de la mediana de MJO y Q4 de SOI tiende a favorecer valores por debajo de la mediana de MJO.

Se manifiesta en la tabla 13, de frecuencias de PP\_Q4 en la estación Las Brujas condicionadas por los cuartiles de Index 4 de MJO y SOI, que llueve más cuando los índices de SOI y MJO (Index 4) son bajos. Al mismo tiempo, en el caso de MJO, la frecuencia de péntadas disminuye al aumentar el Index 4, de manera que PP\_Q4 se ve favorecido significativamente cuando el índice es menor que la mediana. Con el índice SOI no se percibe tal patrón. En ambos casos, la significancia es débil.

Teniendo en cuenta los resultados extraídos de las tablas 12 y 13, se espera que la combinación de índices MJO+SOI pueda tener una señal significativa en la precipitación en Las Brujas en otoño; y por esta razón se tomó MJO+SOI\_Q1 como estratificación adicional al analizar *composites* de circulación en la siguiente sección.

A partir del análisis de las tablas de contingencia de las tres temporadas y los índices seleccionados en las secciones previas, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- En primavera, la relación entre SOI y MJO (Index 9) es inversa y fuerte, la señal en precipitación es opuesta, pero muy débil en el caso de SOI, por lo que MJO permanece como señal dominante.
- En verano, la relación entre SOI y MJO (Index 8) es directa, y la señal en precipitación es opuesta y relativamente fuerte. Se incorpora, entonces MJO-SOI como índice adicional con la expectativa que MJO-SOI\_Q4 estratifique PP\_Q4.
- En otoño la relación entre SOI y MJO (Index 4) es inversa y débil, y la señal en precipitación es en el mismo sentido y relativamente débil en ambos casos. Se incorporó MJO+SOI como índice adicional con la expectativa que MJO+SOI\_Q1 condicione la frecuencia de PP\_Q4.

En todos los casos la variabilidad IS modula fuertemente los mayores montos de precipitación, en concordancia con trabajos previos (Álvarez et al. 2014, González et al. 2008).

### 3.5 ANOMALÍAS DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

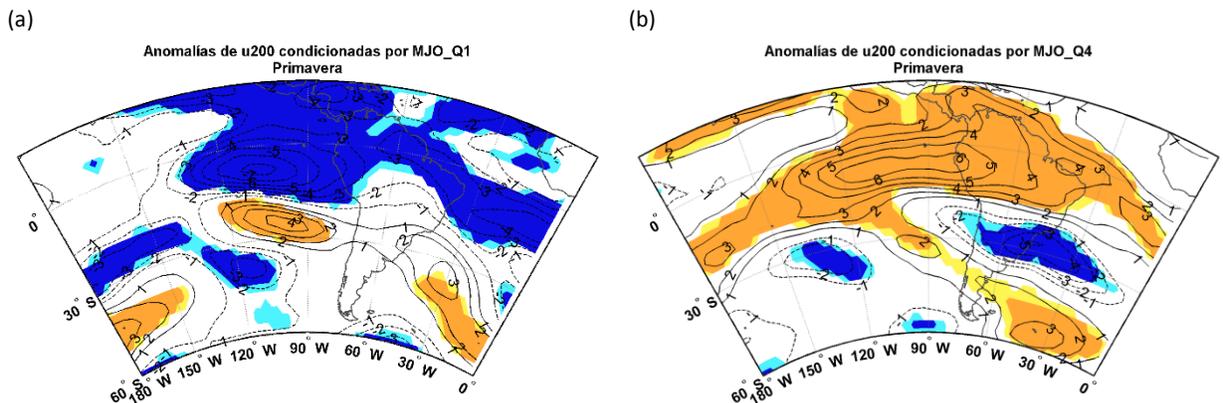
Considerando cada una de las temporadas seleccionadas, se realizaron *composites* de las variables  $u_{200}$  y  $v_{200}$  condicionadas por Q1 y Q4 de MJO (Index 4, Index 8 o Index 9), SOI (salvo primavera), Q4 de PP (Artigas o Las Brujas), MJO-SOI\_Q4 en verano y MJO+SOI\_Q1 en otoño.

Se definieron los índices MJO+SOI y MJO-SOI como la suma y resta en cada péntada de los índices MJO y SOI, que ya se encuentran normalizados. Por lo tanto, las péntadas de MJO-SOI\_Q4 son aquellas en las que MJO es alto y SOI es bajo, mientras que MJO+SOI\_Q1 corresponde a las péntadas en las que ambos índices son bajos. Estas combinaciones de índices tienen como objetivo capturar una mayor señal que con cada uno de ellos por separado.

El dominio de las figuras se extiende de  $180^\circ$  W a  $0^\circ$  E y de  $20^\circ$  N a  $60^\circ$  S, y se usaron todos los datos del período 1979-2015. Los contornos de los mapas son isolíneas de anomalías de la variable condicionada por el índice en cuestión; los valores positivos se muestran con líneas sólidas, mientras que los negativos están representados con líneas punteadas, y la isolínea cero está omitida. Las regiones sombreadas son aquellas que se determinaron significativas según el test de Student de dos extremos al 5% (tonos oscuros) y 10% (tonos claros). Los extremos positivos están sombreados con colores cálidos, en tanto que los extremos negativos están sombreados con colores fríos.

#### 3.5.1 Primavera

En las figuras 12 y 13 se muestran los *ensembles* de  $u_{200}$  y  $v_{200}$ , respectivamente, condicionados por (a) MJO\_Q1 (Index 9), (b) MJO\_Q4 (Index 9), y (c) PP\_Q4 (construido a partir de los montos de precipitación en la estación meteorológica Las Brujas), en la temporada de primavera.



(c)

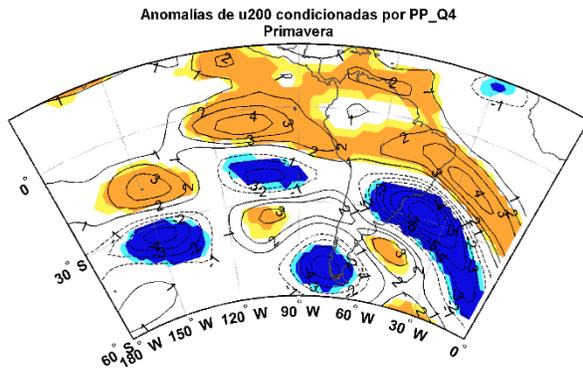
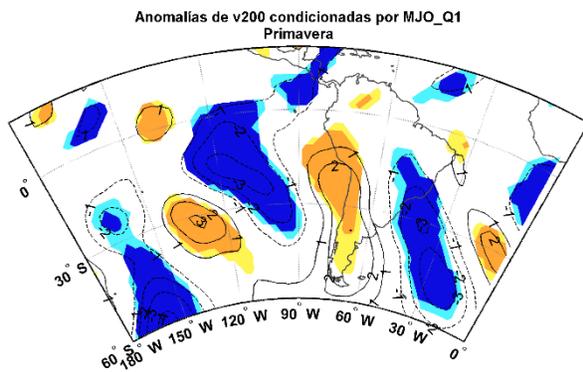
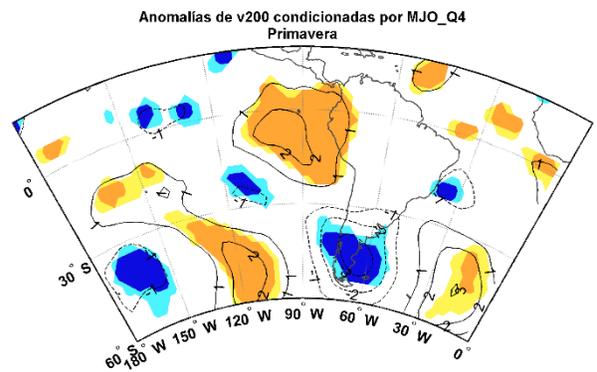


Figura 12: Composites de anomalías de u200 condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 9), (b) MJO\_Q4 (Index 9), (c) PP\_Q4 (Las Brujas), en la temporada de primavera. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

(a)



(b)



(c)

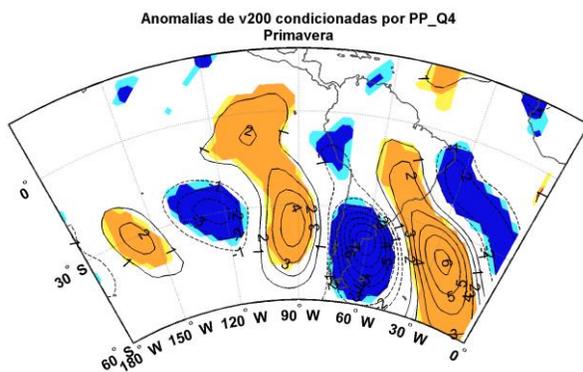
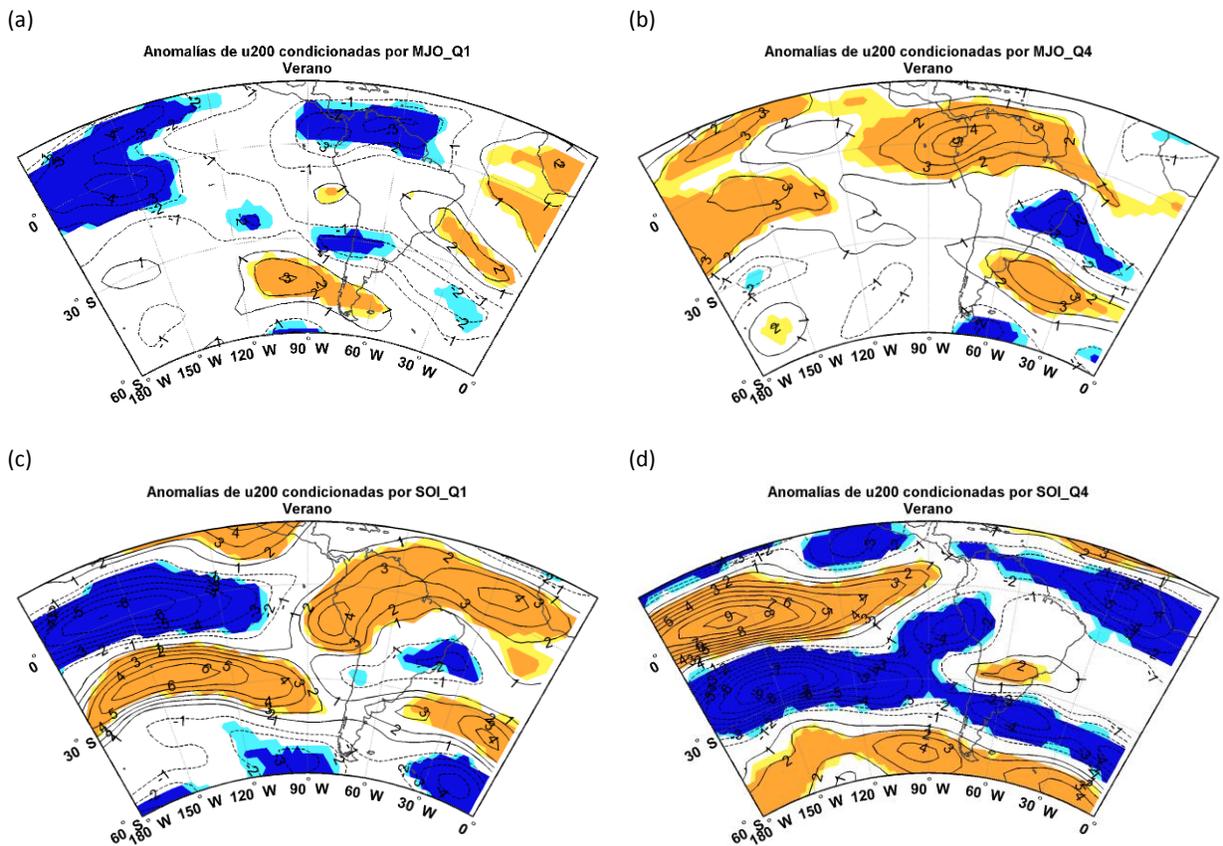


Figura 13: Composites de anomalías de v200 condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 9), (b) MJO\_Q4 (Index 9), (c) PP\_Q4 (Las Brujas), en la temporada de primavera. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

Las anomalías condicionadas por PP\_Q4 (c) se presentan como un tren de ondas, más organizado sobre el este del continente y el océano Atlántico que sobre el océano Pacífico –donde el campo de u200 no muestra una conexión con los trópicos. La manifestación local consiste en un claro vórtice anticiclónico, coherente con Díaz y Aceituno (2003). El campo de anomalías de u200 condicionadas por PP\_Q4 se parece al de MJO\_Q4 en longitudes locales, pero la vinculación en el Pacífico es pobre. En v200 se encuentran algunas similitudes entre MJO\_Q4 (b) y PP\_Q4 (c), pero en menor medida que en el caso de u200.

### 3.5.2 Verano

En las figuras 14 y 15 se pueden observar los *ensembles* de la temporada de verano de la variable u200 y v200, respectivamente, condicionados por (a) MJO\_Q1 (Index 8), (b) MJO\_Q4 (Index 8), (c) SOI\_Q1, (d) SOI\_Q4, (e) PP\_Q4 (construido a partir de los datos de la estación meteorológica Artigas), y (f) MJO-SOI\_Q4 (Index 8).



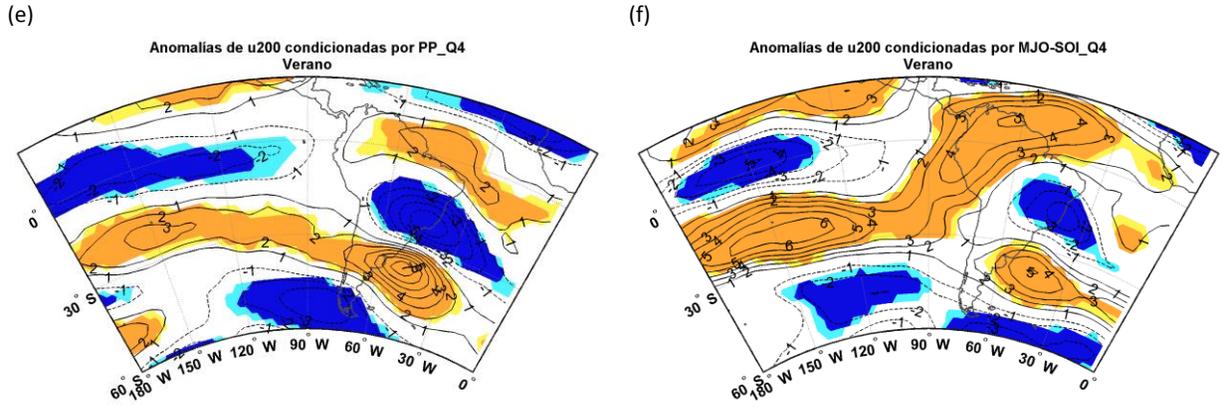
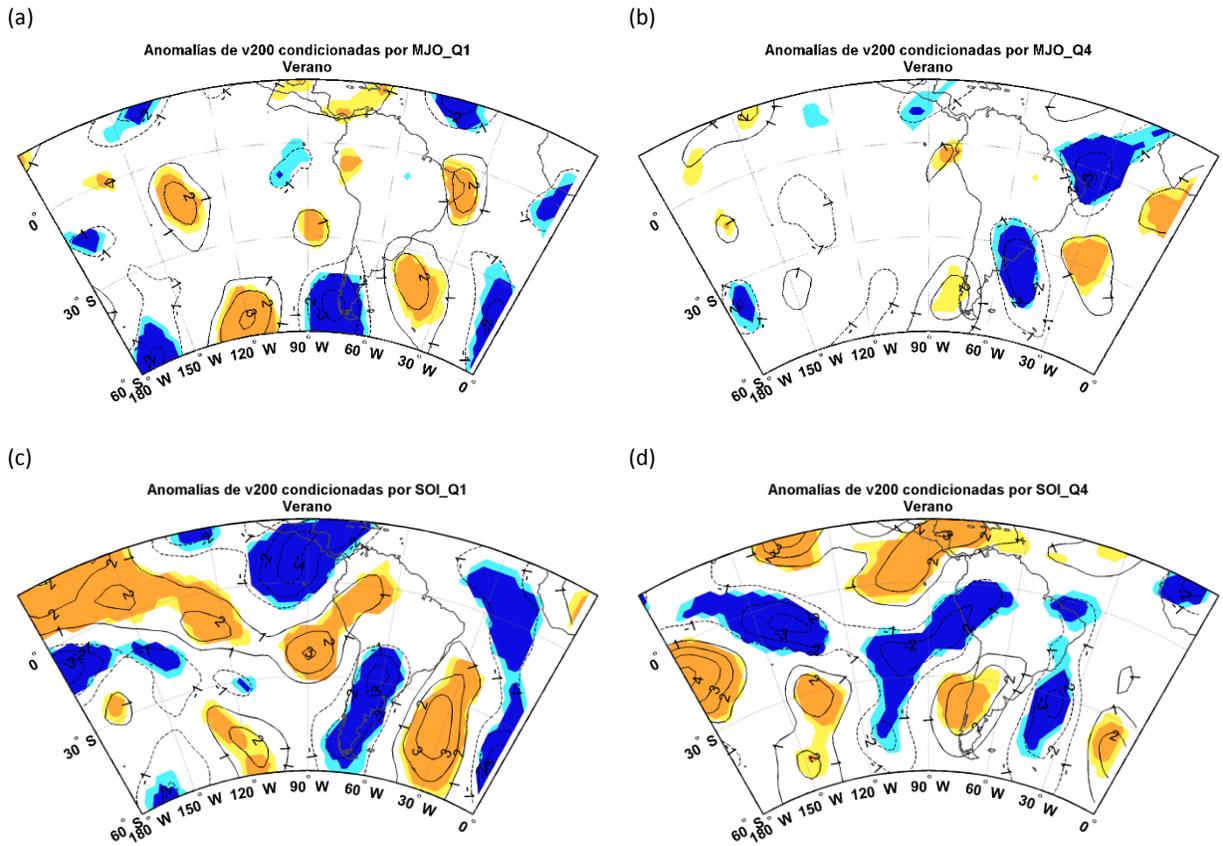


Figura 14: Composites de anomalías de u200 condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 8), (b) MJO\_Q4 (Index 8), (c) SOI\_Q1, (d) SOI\_Q4), (e) PP\_Q4 (Artigas), y (f) MJO-SOI\_Q4 (Index 8), en la temporada de verano. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.



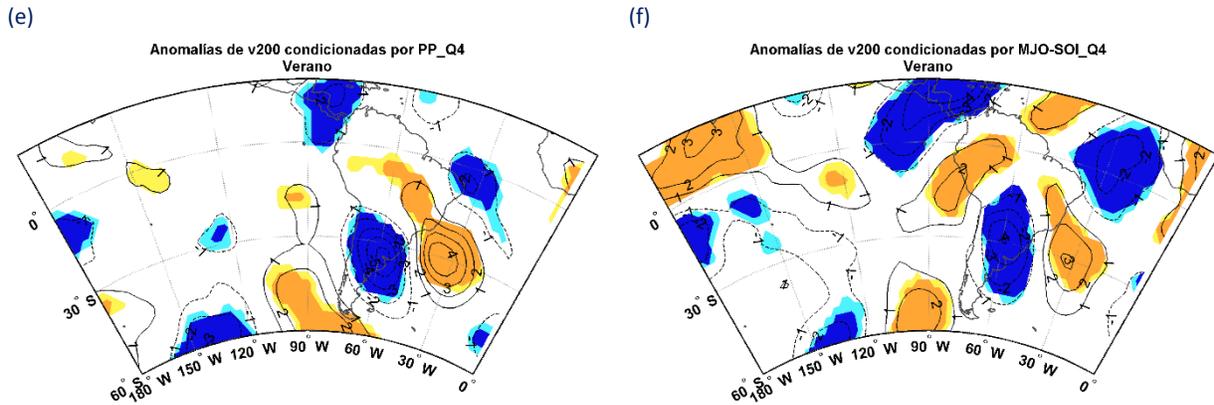


Figura 15: Composites de anomalías de v200 condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 8), (b) MJO\_Q4 (Index 8), (c) SOI\_Q1, (d) SOI\_Q4, (e) PP\_Q4 (Artigas), y (f) MJO-SOI\_Q4 (Index 8), en la temporada de verano. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

Como es de esperar, se observan claras simetrías entre los mapas de anomalías de u200 y v200 condicionadas por el primer y el cuarto cuartil del índice de MJO como de SOI (paneles (a), (b), (c), y (d)).

En los mapas de u200 surgen notables diferencias entre las señales en las cuencas Pacífica y Atlántica. En el Atlántico se aprecian similitudes entre MJO\_Q4, SOI\_Q1 y PP\_Q4, consistente con la señal de cada índice climático sobre la lluvia local. Dicha similitud se mantiene en la cuenca del Pacífico entre SOI\_Q1 y PP\_Q4, pero no se verifica en MJO\_Q4.

Las similitudes en el océano Atlántico se comprueban también en v200, confirmando que al igual que en primavera, se manifiestan localmente como un vórtice anticiclónico sobre la región.

Tal cual lo esperado, se verifica que las anomalías de circulación asociadas al *composite* de MJO-SOI\_Q4 son las más semejantes a las observadas en el cuartil superior de la precipitación (PP\_Q4) sugiriendo que, si bien hay superposición en la señal asociada a cada índice climático, el uso conjunto agrega información.

Es interesante examinar los resultados a la luz de los hallazgos de Cazes-Boezio et al. (2003) que concuerda en que el vórtice en altura, característica dominante de la variabilidad regional, tiene vinculación estacionalmente variable con la celda local de Walker y el Pacífico ecuatorial (asociado a ENOS) mediante un tren de ondas. En el pico del verano (Enero-Febrero) encuentra que la conexión con la celda local de Walker es fuerte (en nuestro caso es evidente en todas las variables) y la conexión con el Pacífico débil, que en el presente estudio es clara en PP\_Q4 y SOI\_Q1. Más allá de diferencias de período y de metodología, se puede especular que la limitación de la temporada a enero (donde todavía se verifica la señal de ENOS) puede ser una causa fundamental de la diferencia en los resultados, lo cual confirma el interés inicial del trabajo de limitar los análisis a escalas subestacionales.

### 3.5.3 Otoño

En las figuras 16 y 17 se exponen los *composites* de la temporada de otoño de las anomalías de u200 y v200, respectivamente, condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 4), (b) MJO\_Q4 (Index 4), (c) SOI\_Q1, (d)

SOI\_Q4), (e) PP\_Q4 (construido a partir de los montos de precipitación en la estación meteorológica Las Brujas), y (f) MJO-SOI\_Q4 (Index 4).

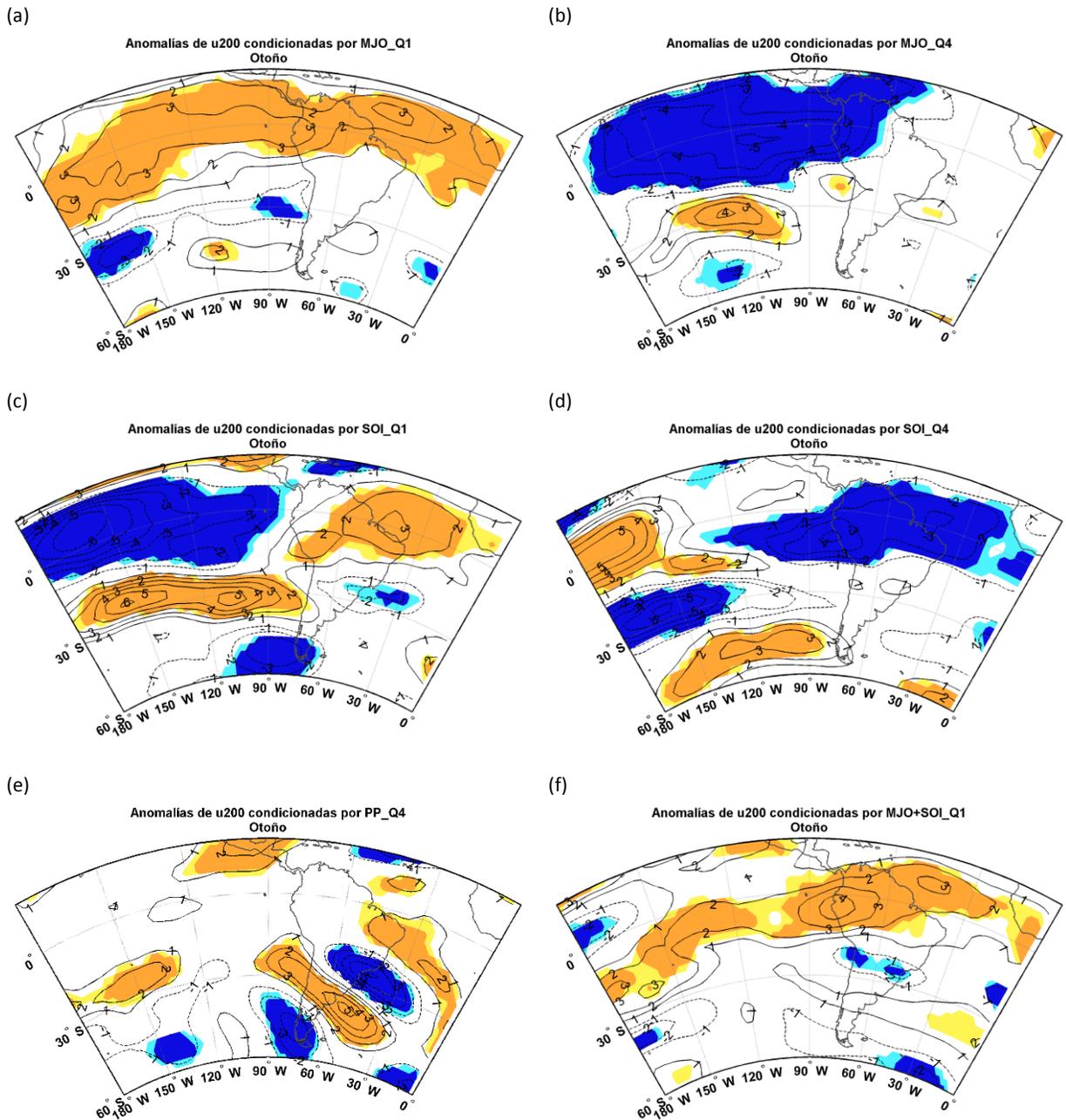


Figura 16: Composites de anomalías de u200 condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 4), (b) MJO\_Q4 (Index 4), (c) SOI\_Q1, (d) SOI\_Q4), (e) PP\_Q4 (Las Brujas), y (f) MJO-SOI\_Q4 (Index 4), en la temporada de otoño. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

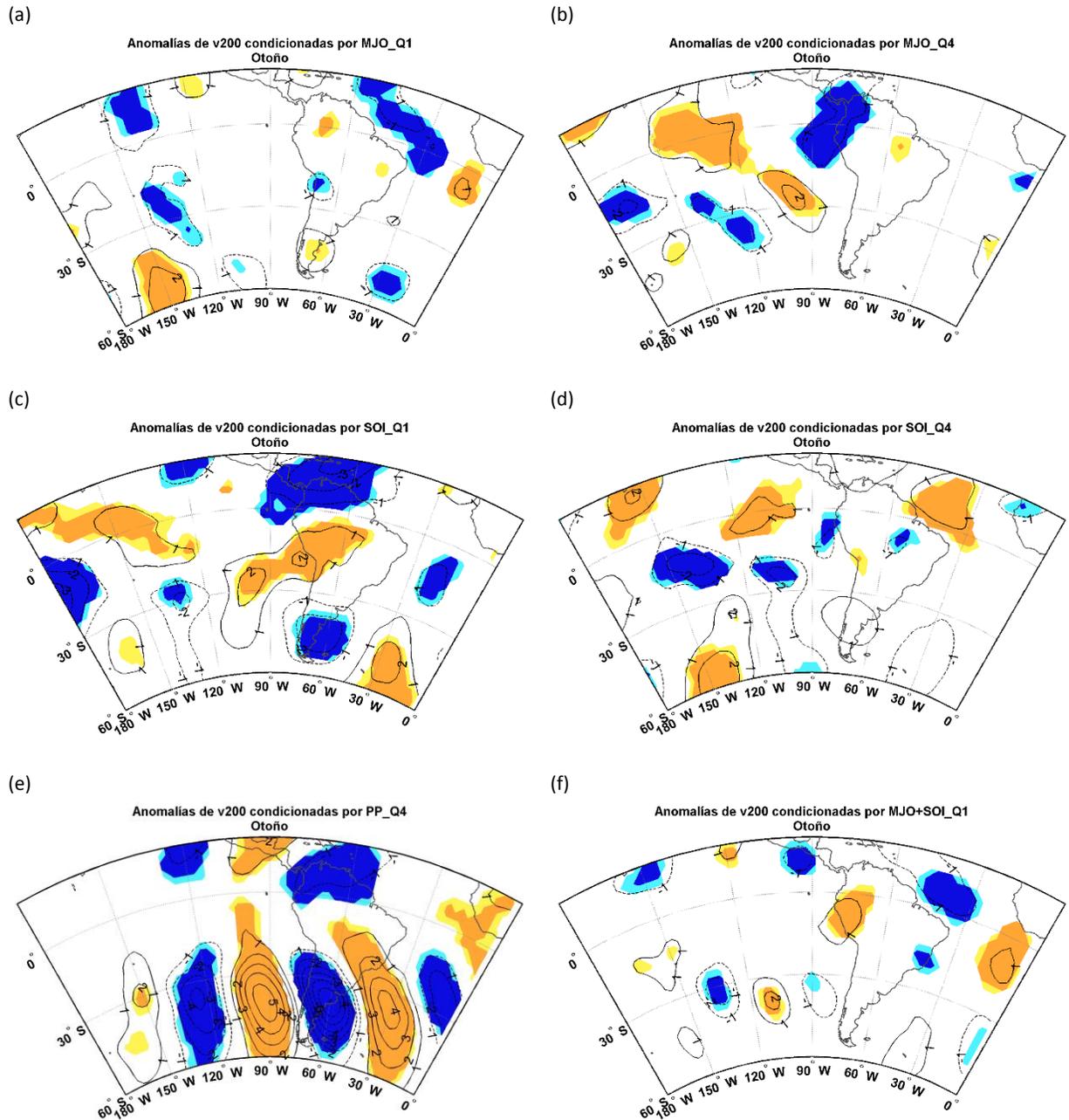


Figura 17: Composites de anomalías de v200 condicionadas por (a) MJO\_Q1 (Index 4), (b) MJO\_Q4 (Index 4), (c) SOI\_Q1, (d) SOI\_Q4, (e) PP\_Q4 (Las Brujas), y (f) MJO-SOI\_Q4 (Index 4), en la temporada de otoño. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

En los mapas de la figura 16 se encuentran evidencias de la relación opuesta, aunque débil, entre MJO y SOI descrita en la sección anterior. Ejemplos de esta relación son la similitud encontrada en la cuenca del Pacífico entre los mapas de anomalías de u200 condicionados por MJO\_Q4 (b) y SOI\_Q1 (c), o entre MJO\_Q1 (a) y SOI\_Q4 (d).

En cuanto a la señal en PP\_Q4, se ve un claro tren de ondas, como en las demás temporadas y variables, tanto en u200 como v200. Además, se aprecia una leve semejanza entre PP\_Q4 (e) y SOI\_Q1 (c) si nos

limitamos a la circulación regional, que en el caso de SOI se vincula con los trópicos pero en el caso de PP no. En esta temporada, la similitud con PP\_Q4 (e) no mejora demasiado con la incorporación del índice elegido, MJO+SOI\_Q1, aunque en el caso de v200 comparten un mismo patrón en extratropicos pero muy debilitado

Cazes-Boezio et al. (2003) argumentan que en la temporada de marzo-julio, la circulación en Sudamérica extratropical está vinculada con el Pacífico Sur por medio de un tren de ondas, siendo la correlación con la precipitación sobre Uruguay significativa. Sin embargo, el tren de ondas no está correlacionado significativamente con ENOS.

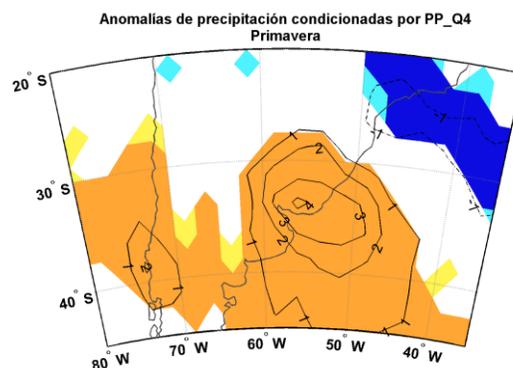
### 3.6 DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA SEÑAL DE PRECIPITACIÓN

Finalmente, se explora la distribución regional de la señal en el campo de precipitación en los casos seleccionados en que la misma es significativa. Con este objetivo, se realizan *composites* de precipitación condicionados por PP\_Q4, el índice elegido como de mayor señal para cada temporada en función de los resultados anteriores (MJO\_Q4 en primavera, MJO-SOI\_Q4 en verano, y MJO+SOI\_Q1 en otoño), y por la intersección de ambos conjuntos; ver figuras 18, 19 y 20.

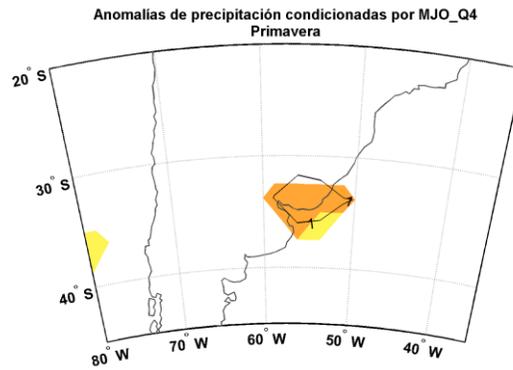
Lo primero a mencionar es que, en todos los casos, se encuentra un patrón espacial coherente de la anomalía de precipitación asociado a PP\_Q4. Además, dicho patrón es muy similar en todas las temporadas, centrado en Uruguay, extendiéndose hacia el oeste hasta Chile central y con un dipolo de menor intensidad en la zona de la SACZ. Más aún, en los 3 casos el máximo de la señal coincide casi exactamente con la posición de la estación meteorológica original, Las Brujas para primavera y otoño, y Artigas para verano. Todo lo anterior confirma que si bien los análisis, y por tanto los resultados, se enfocaron en la pluviometría en unos pocos puntos, la validez de los mismos es más general.

#### 3.6.1 Primavera

(a)



(b)



(c)

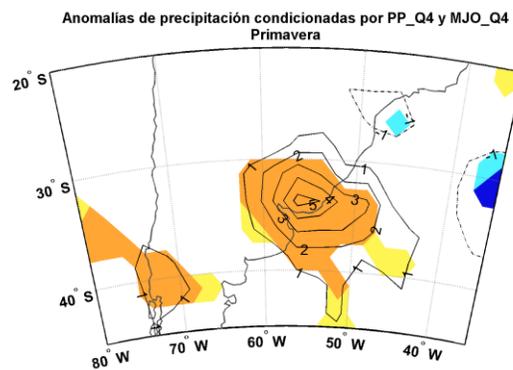
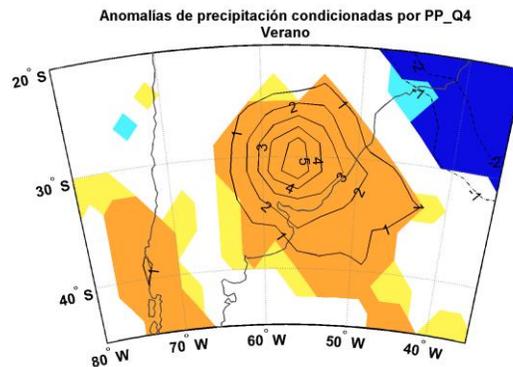


Figura 18: Composites de anomalías de precipitación condicionadas por (a) PP\_Q4 (Las Brujas), (b) MJO\_Q4 (Index 9), (c) PP\_Q4 y MJO\_Q4, en la temporada de primavera. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

El mapa condicionado por MJO\_Q4 captura un patrón muy debilitado (panel b), aunque correctamente posicionado del patrón espacial asociado a PP\_Q4 (panel a). Al considerar los casos en la intersección de PP\_Q4 y MJO\_Q4 el patrón se intensifica pero reduce su extensión espacial. En los tres casos, la señal se centra en el sur de Uruguay, donde la señal es dominante.

### 3.6.2 Verano

(a)



(b)

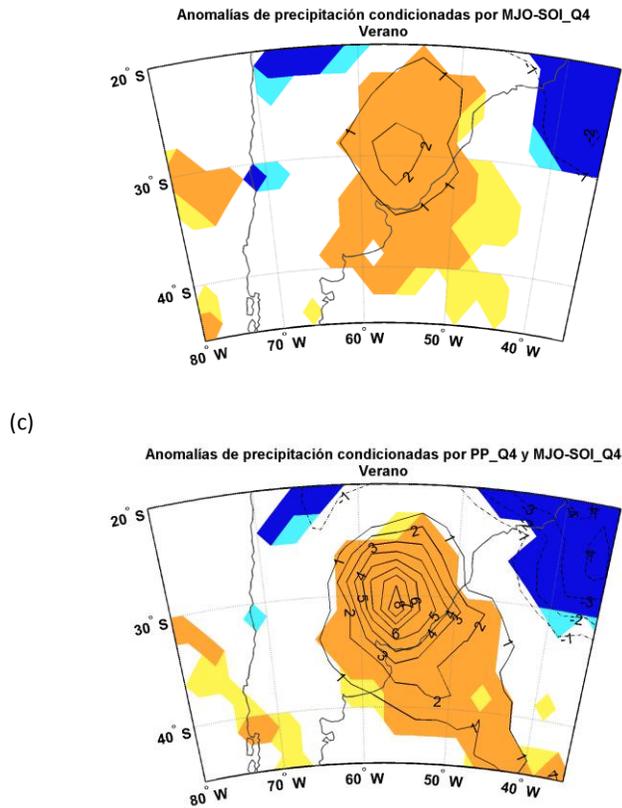


Figura 19: : Composites de anomalías de precipitación condicionadas por (a) PP\_Q4 (Artigas), (b) MJO-SOI\_Q4 (Index 8), (c) PP\_Q4 y MJO-SOI\_Q4, en la temporada de verano. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

Se destaca que en verano el patrón espacial asociado a PP\_Q4 es más fuerte que en primavera y más extenso en su extensión continental, se puede decir que el patrón está corrido hacia el noroeste respecto al encontrado en primavera. El mismo está centrado sobre el norte de Uruguay y abarca todo el territorio nacional.

La estratificación asociada a MJO-SOI\_Q4 captura una señal muy semejante, aunque un poco más débil, un resultado muy auspicioso para la predictibilidad en esta temporada. El panel (c) de intersección entre PP\_Q4 y MJO-SOI\_Q4 es casi idéntico al de PP\_Q4 y aún más intenso, reforzando las conclusiones anteriores.

### 3.6.3 Otoño

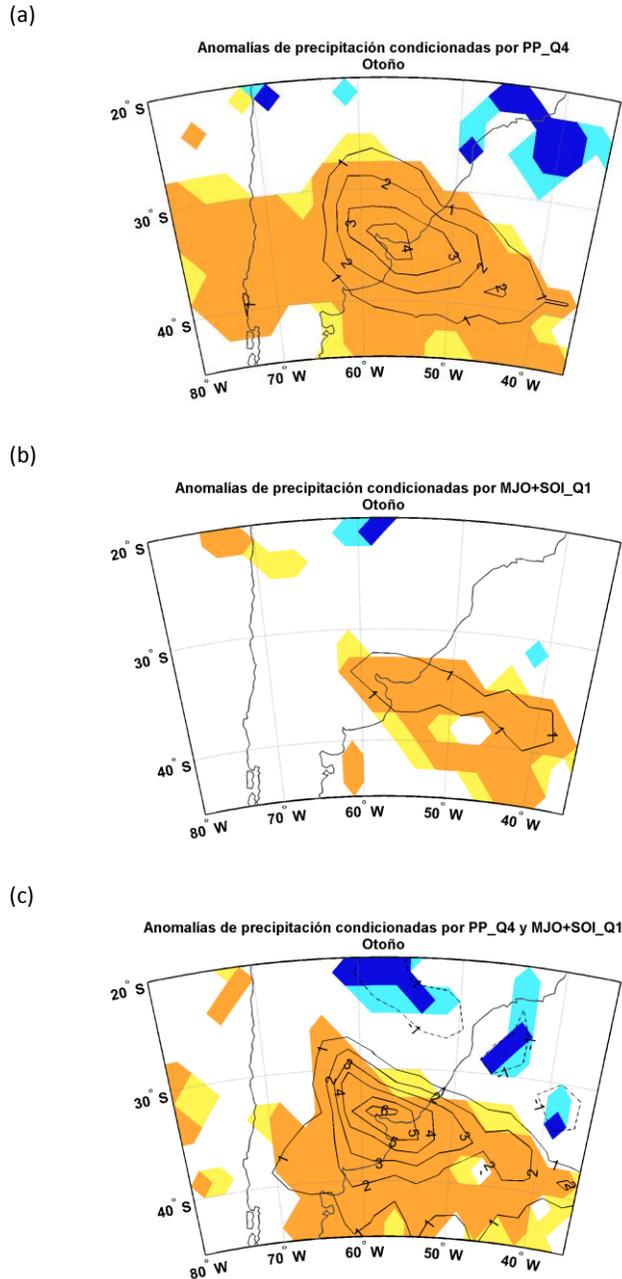


Figura 20: Composites de anomalías de precipitación condicionadas por (a) PP\_Q4 (Las Brujas), (b) MJO\_Q4 (Index 4), (c) PP\_Q4 y MJO\_Q4, en la temporada de otoño. El intervalo de los contornos es de 1 m/s. Las regiones donde las anomalías son significativas al 5% y 10% según el test de dos extremos de Student están sombreadas.

El otoño, nuevamente la señal se encuentra centrada sobre el sur de Uruguay extendiéndose un poco hacia el continente en el norte, pero más hacia el océano en dirección sureste, en forma similar a primavera (panel a).

De los paneles (b) y (c) se confirma que la señal de la anomalía de precipitación asociada al índice MJO-SOI (visualizado a través de su estratificación respecto a Q1) es más fuerte que en el caso de la primavera y más débil que en el verano.

En síntesis, las tres figuras anteriores validan la elección de temporadas en base a los registros puntuales. Se reafirma que en primavera y otoño la distribución está centrada en el sur de Uruguay, mientras que en verano se traslada al norte, como se esperaba a partir de evidencia de señal dominante en las estaciones meteorológicas Las Brujas y Artigas (tablas 1, 2 y 3). A su vez, se confirma la fortaleza de las asociaciones con los índices climáticos asociados.

## 4 CONCLUSIONES

---

En este trabajo se diagnosticaron las anomalías de circulación asociadas a la influencia de la MJO en la precipitación local. Partiendo del análisis de montos y frecuencias de precipitación en Uruguay condicionados por algunos índices de MJO, se encontraron tres temporadas intraestacionales (y sus respectivos índices de MJO) con pronunciados sesgos en la precipitación. En estas temporadas se estudiaron las distribuciones de las estaciones meteorológicas con mayor señal. Luego se examinaron las relaciones entre los índices SOI y MJO, y la superposición de ambas señales sobre la precipitación, conduciendo a la elección de nuevos índices que podrían estratificar más significativamente a PP\_Q4. Se analizaron los apartamientos condicionados de las variables u200 y v200 y, por último, se exploró el impacto regional en la precipitación, confirmando y validando los resultados encontrados previamente.

Las gráficas de montos y frecuencias de precipitación condicionados por la MJO son muy similares a los resultados precedentes. En éstas se identifican claramente períodos subestacionales en los que los muestreos condicionados por la MJO son significativos. En base a los eventos hallados, se seleccionaron los siguientes pares de temporadas e índices: pñtadas 18-26 (otoño), Index 4; pñtadas 50-54 (primavera), Index 9; y pñtadas 66-1 (verano), Index 8. La influencia de la MJO es evidente durante todo el año (consistente con Vera et al. (2017)), con variaciones de intensidad que dependen del índice de MJO y la estación meteorológica. Asimismo, las temporadas seleccionadas pertenecen a aquellas donde estudios previos han encontrado que la variabilidad IS, explicada en parte por la MJO, modula la precipitación.

La magnitud de los sesgos en la precipitación (montos y frecuencia) varía en función de los cuartiles, las estaciones y la temporada (índice de MJO). En promedio, son mayores en primavera, temporada en la que todas las estaciones muestran señal significativa. Se deduce que las estaciones con más señal en cada temporada son Las Brujas en otoño y primavera, y Artigas en verano (resultado que se visualiza más claramente en el análisis a partir del campo grillado de precipitación regional). Las distribuciones de estas estaciones y temporadas confirman la magnitud de los sesgos asociados a la MJO.

De la inspección de los condicionamientos entre MJO, SOI y precipitación, se estableció que la relación entre los índices seleccionados de MJO y SOI es inversa y fuerte durante la temporada de primavera, y que la señal en la precipitación es opuesta pero muy débil en SOI. En los mapas de anomalía de circulación en altura de primavera asociados al cuartil superior de la precipitación, se distingue un vórtice anticiclónico en SESA de acuerdo a Díaz y Aceituno (2003), y un tren de ondas asociado. Varios trabajos mencionados en la introducción, señalan que la variabilidad del patrón SASS tiene una fuerte influencia sobre la precipitación a escala regional. Adicionalmente, se encuentran ciertas similitudes entre las anomalías de u200 (y v200 en menor medida) condicionadas por PP\_Q4 y MJO\_Q4 en longitudes locales, pero la vinculación con el Pacífico tropical es pobre.

En verano se observan claras simetrías entre Q1 y Q4 de MJO y SOI en los *ensembles* de u200 y v200. La relación entre MJO y SOI es directa, y la señal en la precipitación es opuesta y relativamente fuerte. En el Atlántico, son comparables los mapas de MJO\_Q4, SOI\_Q1 y PP\_Q4, de manera consistente con la señal en la precipitación local. En el caso de u200, la similitud se mantiene en el Pacífico únicamente entre SOI\_Q1 y PP\_Q4. Se observa también un vórtice anticiclónico en la región de SESA. Se verifica que el *composite* de anomalías de circulación más semejante al obtenido con el cuartil superior de la precipitación es el asociado a MJO-SOI\_Q4, pues captura bien las señales de ambos índices que, si bien se

solapan, no son idénticas. Según Cazes-Boezio et al. (2003), durante el pico del verano (enero-febrero) el vórtice tiene una conexión fuerte con la celda de Walker y débil con el Pacífico, que en este trabajo es clara en PP\_Q4 y SOI\_Q1. Se especula que la diferencia de resultados podría ser causada principalmente por la limitación de la temporada de enero, confirmando el interés inicial de este trabajo de limitar el estudio a escalas subestacionales.

En la temporada de otoño se halla una relación inversa y débil entre MJO y SOI. La señal en la precipitación es en el mismo sentido y relativamente débil. Al igual que en las demás temporadas, se observa un tren de ondas en las figuras de PP\_Q4. También existen algunas semejanzas entre PP\_Q4 y SOI\_Q1 en la circulación regional, que el caso de SOI se vincula con los trópicos.

El estudio de la distribución regional de la señal de precipitación confirma que, aunque los resultados fueron obtenidos en base a registros pluviométricos puntuales sobre Uruguay, su validez es más general. En las tres temporadas se encuentra un patrón espacial similar y coherente de la anomalía de precipitación asociado a PP\_Q4; centrado en Uruguay y extendiéndose hacia el oeste hasta Chile central, con un centro de menor intensidad en la zona de la SACZ. Además, el máximo de la señal se encuentra muy próximo a la estación meteorológica original (Las Brujas en primavera y otoño, Artigas en verano).

Se confirman resultados previos como el de Cazes-Boezio et al. (2003) que encuentran evidencias de que patrones de teleconexión interanual están relacionados con cambios en los regímenes de circulación IS; y Muñoz et al. (2016) que fundamentan que los modelos que consideran interferencias en distintas escalas de tiempo muestran mayor habilidad. En este trabajo se exploró el efecto simultáneo de dos forzantes climáticos que actúan a distintas escalas de tiempo, obteniéndose sesgos importantes cuando el condicionamiento de ENOS se superpone a la señal de MJO en la precipitación, fundamentalmente en verano y en menor medida en otoño. En el caso de la temporada seleccionada en primavera, donde la señal de ENOS es muy débil, se muestra que el condicionamiento de MJO tiene un potencial significativo como predictor de la precipitación local.

## 5 ANEXO A: FUNCIONES ORTOGONALES EMPÍRICAS EXTENDIDAS (EEOF)

Los datos geofísicos tienen una alta correlación en el tiempo y en el espacio. Las Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) son una herramienta que permiten estudiar los patrones de gran escala que explican la mayor parte de la variabilidad. A diferencia de las EOF, las EEOF tienen en cuenta la autocorrelación y la correlación cruzada en el tiempo, además de la correlación en el espacio.

El método fue introducido por primera vez por Weare y Nasstrom (1982). Los autores infirieron que considerar la coherencia entre el espacio y el tiempo puede permitir el uso de campos más compactos en los modelos de regresión que los obtenidos con el método tradicional. Asimismo, las funciones derivadas con este método pueden ser interpretadas no sólo en términos de los principales modos de variabilidad, sino en términos de los modos dominantes de secuencias espacio-temporales de eventos.

Las funciones a derivar deben ser predictores de los campos de datos en ciertas series temporales hacia el futuro o hacia el pasado. Por ejemplo, si se consideran los eventos de  $X$  sobre una sucesión de tres incrementos temporales:

$$X_{t,t+1,t+2} = FZ + E_{t,t+1,t+2}, t = 1, \dots, M,$$

donde  $X$  es un vector de dimensión tres veces la dimensión de los  $NP$  puntos espaciales,  $Z$  es la función empírica buscada,  $F$  es un conjunto de coeficientes y  $E$  es el error que se comete al usar  $Z$  para predecir  $X$  en los tres tiempos  $t, t + 1, t + 2$ . Se busca, al igual que en el método tradicional, que el error cuadrático medio sea mínimo. Si se asume que  $Z$  es una combinación lineal de todos los datos disponibles  $X_{t,t+1,t+2}$ :

$$Z = \mathbb{X}C^T,$$

donde  $C^T$  es un vector de coeficientes temporales y  $\mathbb{X}$  es una matriz de la forma

$$\mathbb{X} = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,M-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{NP,1} & X_{NP,2} & \dots & X_{NP,M-2} \\ X_{1,2} & X_{1,3} & \dots & X_{1,M-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{1,3} & X_{1,4} & \dots & X_{1,M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{NP,3} & X_{NP,4} & \dots & X_{NP,M} \end{pmatrix}$$

Entonces,  $\mathbb{X}$  tiene dimensiones  $(3 * NP) \times (M - 2)$ . La función empírica resultante tiene dimensión  $(3 * NP)$  en este ejemplo.

La matriz de valores propios resultantes tiene la forma:

$$RZ = \lambda Z,$$

donde  $\lambda$  es el valor propio y  $R = \mathbb{X}\mathbb{X}^T$  es la matriz de covarianza. La solución al problema de valores propios es la diagonalización de  $R$  de manera que el componente principal explica la mayor fracción de la varianza de los eventos en  $t, t + 1, t + 2$ .

Este método puede ser generalizado a sucesiones de eventos para cualquier número de tiempos. No es necesario que los eventos sean consecutivos, por ejemplo, los predictandos pueden ser  $X_{t,t+2,t+4}$ .

## 6 ANEXO B: TEST BINOMIAL

---

Comúnmente se emplea el test binomial cuando un experimento tiene dos posibles resultados, por ejemplo, éxito y fracaso, y se conoce la probabilidad de éxito. En este trabajo se realizó el test para determinar la significancia estadística de las desviaciones de la distribución esperada de las observaciones pertenecientes a dos categorías, siendo la hipótesis nula que los resultados obtenidos no se apartan significativamente de los esperados.

Dada una variable aleatoria con distribución binomial, la probabilidad de obtener  $k$  éxitos en  $n \in \mathbb{N}$  sucesos se calcula con la siguiente fórmula:

$$P(X = k) = \frac{n!}{(n-k)!k!} p^k (1-p)^{n-k},$$

donde  $p \in [0, 1]$  es la probabilidad de ocurrencia de cada suceso.

Entonces, la función de distribución acumulada se puede expresar como:

$$P(X \leq k) = \sum_{i=0}^{[k]} \frac{n!}{(n-i)!i!} p^i (1-p)^{n-i},$$

Siendo  $[k]$  el mayor entero menor o igual a  $k$ .

Por la manera en que se han definido los cuartiles, en las temporadas de otoño y verano la probabilidad ( $p$ ) de ocurrencia de una péntada en Q1, Q2 o Q4 es 83/333, y en Q3 es 84/333. En la temporada de primavera,  $p$  es igual a 46/185 para Q1, Q2 y Q4, y 47/185 para Q3. Consiguientemente, se procura responder si la proporción de péntadas observadas en cada cuartil se aparta significativamente de la esperada, calculando la probabilidad de la proporción observada con la función *binocdf* de MATLAB.

## 7 ANEXO C: TEST DE STUDENT

---

La distribución t de Student surge de examinar si la media de una muestra proviene de una población centrada en la media  $\mu_0$  (Wilks, D. S. (2006)). Si el número de datos de la muestra es suficientemente grande como para que la distribución de la muestra se aproxime a una campana de Gauss (por el Teorema del Límite Central), entonces el estadístico del test asociado, que sigue la distribución de Student, es:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{(\widehat{Var}(\bar{x}))^{1/2}}$$

Esta distribución es simétrica y se asemeja a la normal, aunque se le asigna más probabilidad a las colas. El único parámetro de control, llamado grados de libertad, es  $\nu = n - 1$ , siendo  $n$  el número de observaciones independientes.

La comparación de dos medias muestrales independientes es otra prueba de hipótesis usual, cuya hipótesis nula es que la diferencia entre ambas medias es nula. El estadístico es una función de la diferencia de las medias comparadas, y la diferencia observada difiere casi siempre de cero.

Habitualmente se asume que las distribuciones muestrales de ambas muestras son gaussianas, en cuyo caso la diferencia de las medias también tendrá una distribución gaussiana. Bajo estas condiciones el estadístico

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - E(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{(\widehat{Var}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2))^{1/2}}$$

tendrá una distribución normal estándar en el caso de que las muestras sean grandes.

Partiendo de que la hipótesis nula es que ambas poblaciones tienen la misma media, se tiene que

$$E(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = E(\bar{x}_1) - E(\bar{x}_2) = \mu_1 - \mu_2 = 0.$$

Entonces, no es necesaria ninguna suposición acerca de la magnitud de las medias.

Además, la varianza de la diferencia de dos cantidades aleatorias independientes es la suma de la varianza de cada una de las cantidades, y por lo tanto se cumple

$$\widehat{Var}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \widehat{Var}(\bar{x}_1) + \widehat{Var}(\bar{x}_2) = \frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2},$$

Donde  $s^2$  es la varianza muestral de los promedios de  $x$ .

Considerando las relaciones anteriores, se puede reescribir el estadístico como

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^{1/2}}.$$

Esta expresión del estadístico es apropiada cuando las varianzas de las distribuciones de  $x_1$  y  $x_2$  no son iguales. En cambio, cuando se puede asumir que las varianzas son iguales, la ecuación anterior se puede escribir de la forma

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \left\{ \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right\} \right]^{1/2}}$$

y el estadístico tiene una distribución t de Student con  $\nu = n_1 + n_2 - 2$ .

Si el numerador es más del doble, aproximadamente, del denominador en valor absoluto, y el tamaño de las muestras es grande, la hipótesis nula puede ser rechazada al 5% en el caso de un test de dos extremos.

## 8 ANEXO D: ÍNDICE DE ABREVIACIONES

---

**CDF:** función de distribución acumulada.

**CH200:** potencial de velocidad en 200 hPa.

**CPC:** Climate Prediction Center.

**DOE:** Department of Energy.

**EOF:** Funciones Ortogonales Empíricas

**EEOF:** Funciones Ortogonales Empíricas Extendidas.

**ENOS:** El Niño-Oscilación Sur.

**FOLR:** anomalías de radiación de onda larga emergente filtradas.

**GPCP:** Global Precipitation Climatology Project.

**INIA:** Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

**InUMet:** Instituto Uruguayo de Meteorología.

**IQR:** rango intercuartil.

**IS:** intraestacional.

**MCC:** Complejos Convectivos de Mesoescala.

**MJO:** Oscilación de Madden Julian.

**MSD:** desviación estándar mensual.

**NCEP:** National Centers for Environmental Prediction.

**NetCDF:** Network Common Data Form.

**NOAA:** National Oceanic and Atmospheric Administration

**OLR:** Radiación de Onda Larga Emergente.

**p:** presión.

**PP:** índice de montos de precipitación para cada temporada.

**Q<sub>25</sub> (Q<sub>75</sub>):** percentil 25 (75).

**Q1 (Q4):** primer (cuarto) cuartil del parámetro considerado condicionado por la MJO.

**SACZ:** Zona de Convergencia del Atlántico Sur.

**SAMS:** Sistema Monzónico de América del Sur.

**SASS:** *South American Seesaw*.

**SESA:** Sudeste de Sudamérica.

**SLP:** presión a nivel del mar.

**SOI:** *Southern Oscillation Index*.

**u:** viento zonal.

**u200:** viento zonal en el nivel de 200 hPa.

**v200:** viento meridional en el nivel de 200 hPa.

## 9 ANEXO E: TABLAS DE ILUSTRACIONES

### 9.1 FIGURAS

FIGURA 1: FASES DE LA MJO. FUENTE: NOAA. ....	4
FIGURA 2: ESTRUCTURA DE LA MJO EN SUPERFICIE Y EN NIVELES ALTOS DE LA ATMÓSFERA. FUENTE: NOAA. ....	5
FIGURA 3: FRECUENCIA MEDIA DE LLUVIA EN PÉNTADAS SEGÚN MJO INDEX 4 EN ESTACIÓN MELO (DE VERA Y TERRA). ....	6
FIGURA 4: PRIMER EEOF DE PÉNTADAS DE CHI2 EN VERANOS DE ENSO NEUTRO O DÉBIL DURANTE 1979-2000. FUENTE: CPC/NOAA. ....	11
FIGURA 5: EN EL PANEL SUPERIOR SE MUESTRAN LAS ANOMALÍAS DE TEMPERATURA DEL MAR (°C) EN LA REGIÓN NIÑO 3.4. EN EL PANEL INFERIOR SE MUESTRA LA MEDIA MÓVIL TRIMESTRAL DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO SOI. FUENTE: CPC, NOAA. ....	12
FIGURA 6: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS SOBRE EL TERRITORIO URUGUAYO. ....	13
FIGURA 7: ESQUEMA DE CÁLCULO ANOMALÍAS DE U200 Y V200, Y CONSTRUCCIÓN DE COMPOSITES. ....	17
FIGURA 8: MEDIA CLIMATOLÓGICA Y MUESTREOS CONDICIONADOS POR LA MJO DE PRECIPITACIÓN MEDIA. ....	19
FIGURA 9: DISTRIBUCIONES Y DIAGRAMAS DE CAJA DE MONTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA TEMPORADA DE PRIMAVERA EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRUJAS. ....	23
FIGURA 10: DISTRIBUCIONES Y DIAGRAMAS DE CAJA DE MONTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA TEMPORADA DE VERANO EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ARTIGAS. ....	24
FIGURA 11: DISTRIBUCIONES Y DIAGRAMAS DE CAJA DE MONTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA TEMPORADA DE OTOÑO EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRUJAS. ....	25
FIGURA 12: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE U200 CONDICIONADAS POR (A) MJO_Q1 (INDEX 9), (B) MJO_Q4 (INDEX 9), (C) PP_Q4 (LAS BRUJAS), EN LA TEMPORADA DE PRIMAVERA. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	31
FIGURA 13: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE V200 CONDICIONADAS POR (A) MJO_Q1 (INDEX 9), (B) MJO_Q4 (INDEX 9), (C) PP_Q4 (LAS BRUJAS), EN LA TEMPORADA DE PRIMAVERA. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	31
FIGURA 14: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE U200 CONDICIONADAS POR (A) MJO_Q1 (INDEX 8), (B) MJO_Q4 (INDEX 8), (C) SOI_Q1, (D) SOI_Q4, (E) PP_Q4 (ARTIGAS), Y (F) MJO-SOI_Q4 (INDEX 8), EN LA TEMPORADA DE VERANO. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	33
FIGURA 15: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE V200 CONDICIONADAS POR (A) MJO_Q1 (INDEX 8), (B) MJO_Q4 (INDEX 8), (C) SOI_Q1, (D) SOI_Q4, (E) PP_Q4 (ARTIGAS), Y (F) MJO-SOI_Q4 (INDEX 8), EN LA TEMPORADA DE VERANO. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	34
FIGURA 16: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE U200 CONDICIONADAS POR (A) MJO_Q1 (INDEX 4), (B) MJO_Q4 (INDEX 4), (C) SOI_Q1, (D) SOI_Q4, (E) PP_Q4 (LAS BRUJAS), Y (F) MJO-SOI_Q4 (INDEX 4), EN LA TEMPORADA DE OTOÑO. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	35
FIGURA 17: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE V200 CONDICIONADAS POR (A) MJO_Q1 (INDEX 4), (B) MJO_Q4 (INDEX 4), (C) SOI_Q1, (D) SOI_Q4, (E) PP_Q4 (LAS BRUJAS), Y (F) MJO-SOI_Q4 (INDEX 4), EN LA TEMPORADA DE OTOÑO. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	36
FIGURA 18: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN CONDICIONADAS POR (A) PP_Q4 (LAS BRUJAS), (B) MJO_Q4 (INDEX 9), (C) PP_Q4 Y MJO_Q4, EN LA TEMPORADA DE PRIMAVERA. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. ....	38
FIGURA 19: : COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN CONDICIONADAS POR (A) PP_Q4 (ARTIGAS), (B) MJO-SOI_Q4 (INDEX 8), (C) PP_Q4 Y MJO-SOI_Q4, EN LA TEMPORADA DE VERANO. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBREADAS. .	39

FIGURA 20: COMPOSITES DE ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN CONDICIONADAS POR (A) PP\_Q4 (LAS BRUJAS), (B) MJO\_Q4 (INDEX 4), (C) PP\_Q4 Y MJO\_Q4, EN LA TEMPORADA DE OTOÑO. EL INTERVALO DE LOS CONTORNOS ES DE 1 M/S. LAS REGIONES DONDE LAS ANOMALÍAS SON SIGNIFICATIVAS AL 5% Y 10% SEGÚN EL TEST DE DOS EXTREMOS DE STUDENT ESTÁN SOMBRADAS. .... 40

## 9.2 TABLAS

TABLA 1: SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA EN PRIMAVERA PARA MONTOS Y FRECUENCIAS DE PRECIPITACIÓN CONDICIONADAS POR EL ÍNDICE INDEX 9 DE MJO EN PERÍODOS DE 5 PÉNTADAS. ....	21
TABLA 2: SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA EN VERANO PARA MONTOS Y FRECUENCIAS DE PRECIPITACIÓN CONDICIONADAS POR EL ÍNDICE INDEX 8 DE MJO EN PERÍODOS DE 9 PÉNTADAS. ....	22
TABLA 3: SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA EN OTOÑO PARA MONTOS Y FRECUENCIAS DE PRECIPITACIÓN CONDICIONADAS POR EL ÍNDICE INDEX 4 DE MJO EN PERÍODOS DE 9 PÉNTADAS. ....	22
TABLA 4: ESTADÍSTICAS DE LOS MONTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA TEMPORADA DE PRIMAVERA EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRUJAS. ....	23
TABLA 5: ESTADÍSTICAS DE LOS MONTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA TEMPORADA DE VERANO EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ARTIGAS. .	25
TABLA 6: ESTADÍSTICAS DE LOS MONTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA TEMPORADA DE OTOÑO EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRUJAS. ....	26
TABLA 7: VALORES DE SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA. ....	26
TABLA 8: TABLA DE CONTINGENCIA. FRECUENCIA EN CADA PAR DE CUARTILES DE ÍNDICES SOI-MJO EN LA TEMPORADA DE PRIMAVERA. .	27
TABLA 9: TABLA DE CONTINGENCIA. FRECUENCIA DE PÉNTADAS DEL CUARTO CUARTIL DE PRECIPITACIÓN EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRUJAS, EN FUNCIÓN DE LOS CUARTILES DE LOS ÍNDICES DE MJO, INDEX 9, Y SOI. LOS DATOS PERTENECEN A LA TEMPORADA DE PRIMAVERA. ....	27
TABLA 10: TABLA DE CONTINGENCIA. FRECUENCIA EN CADA PAR DE CUARTILES DE ÍNDICES SOI-MJO EN LA TEMPORADA DE VERANO. ....	27
TABLA 11: TABLA DE CONTINGENCIA. FRECUENCIA DE PÉNTADAS DEL CUARTO CUARTIL DEL DE PRECIPITACIÓN EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ARTIGAS, EN FUNCIÓN DE LOS CUARTILES DE LOS ÍNDICES DE MJO, INDEX 8, Y SOI. LOS DATOS PERTENECEN A LA TEMPORADA DE VERANO. ....	28
TABLA 12: TABLA DE CONTINGENCIA. FRECUENCIA EN CADA PAR DE CUARTILES DE ÍNDICES SOI-MJO EN LA TEMPORADA DE OTOÑO. ....	28
TABLA 13: TABLA DE CONTINGENCIA. FRECUENCIA DE PÉNTADAS DEL CUARTO CUARTIL DE PRECIPITACIÓN EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LAS BRUJAS, EN FUNCIÓN DE LOS CUARTILES DE LOS ÍNDICES DE MJO, INDEX 4, Y SOI. LOS DATOS PERTENECEN A LA TEMPORADA DE OTOÑO. ....	29

## 10 BIBLIOGRAFÍA

---

- Álvarez, M. S., Vera, C. S., Kiladis, G. N., & Liebmann, B. (2014). Intraseasonal variability in South America during the cold season. *Clim Dyn*, 42:3253-3269. doi:10.1007/s00382-013-1872-z
- Álvarez, M. S., Vera, C. S., Kiladis, G. N., & Liebmann, B. (2016). Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. *Clim Dyn*. doi:10.1007/s00382-015-2581-6
- Cazes-Boezio, G., Robertson, A. W., & Mechoso, C. R. (2003). Seasonal Dependence of ENSO Teleconnections over South America and Relationships with Precipitation in Uruguay. *Journal of Climate*, 16, 1159-1176.
- Díaz, A., & Aceituno, P. (2003). Atmospheric Circulation Anomalies during Episodes of Enhanced and Reduced Convective Cloudiness over Uruguay. *Journal of Climate*, 16:3171-3185.
- Gonzalez, P. L., & Vera, C. S. (2013). Summer precipitation variability over South America on long and short intraseasonal timescales. *Clim Dyn*. doi:10.1007/s00382-013-2023-2
- González, P. L., Vera, C. S., Liebmann, B., & Kiladis, G. (2008). Intraseasonal variability in subtropical South America as depicted by precipitation data. *Clim Dyn*, 30:727–744. doi:10.1007/s00382-007-0319-9
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1971). Detection of a 40-50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. *Atmos. Sci.*, 28: 702-708.
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1972). Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period. *Atmos. Sci.*, 29: 1109-1123.
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1993). Observations of the 40-50-Day Tropical Oscillation- A review. *Monthly Weather Review*, 122: 814-837.
- Muñoz, Á. G., Goddard, L., Mason, S. J., & Robertson, A. W. (2016). Cross-Time Scale Interactions and Rainfall Extreme Events in Southeastern South America for the Austral Summer. Part II: Predictive Skill. *Journal of Climate*, 5915-5934. doi:10.1175/JCLI-D-15:0699.1
- Muñoz, Á. G., Goddard, L., Robertson, A. W., Kushnir, Y., & Baethgen, A. (2015). Cross-Time Scale Interactions and Rainfall Extreme Events in Southeastern South America for the Austral Summer. Part: Potential Predictors. *Journal of Climate*, 28:7894-7913. doi:10.1175/JCLI-D-14-00693.1
- Pisciottano, G., Díaz, Á., Cazes, G., & Mechoso, C. R. (1994). El Niño-Southern Oscillation Impact on Rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, vol. 7, 1286-1302.
- Storch, H. v., & Zwiers, F. W. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge: Cambridge University Press.

Vera, C. S., Álvarez, M. S., González, P. L., Liebmann, B., & Kiladis, G. N. (2017). Seasonal cycle of precipitation variability in South America on intraseasonal timescales. *Clim Dym*. doi:DOI 10.1007/s00382-017-3994-1

Weare, B. C., & Nasstrom, J. S. (1982). Examples of Extended Empirical Orthogonal Function Analyses. *American Meteorological Sociaty, Monthly Weather Review*, 110:481-485. doi:0027-0644/82/060481-05\$05.25

Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego, California.: International Geophysics Series. Elsevier Inc.

Yan Xue, W. H. (April 16-18, 2002). Influences of the Madden Julian Oscillations on Temperature and Precipitation in North America during ENSO-Neutral and Weak ENSO Winters. *A Workshop on Prospects for Improved Forecasts of Weather and Short-term Climate Variability on Subseasonal (2 week to 2 month) Time Scales*. NASA/Goddard Space Flight Center.