



# Análisis de la precipitación media mensual y extrema bajo la influencia conjunta de forzantes climáticos remotos en el centro-este de Argentina

Tesis de grado para obtener la Licenciatura en  
Meteorología y Ciencias de la Atmósfera.

**Autora:** Tec. Caterina L. Basso  
**Directora:** Dra. Vanesa C. Pántano

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas  
Universidad Nacional de La Plata, Argentina  
La Plata, Diciembre 2024

# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi directora, la Dra. Vanesa Pántano, cuya experiencia, conocimiento, generosidad y dedicación fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

Vane, gracias por tu apoyo y por motivarme desde el comienzo. Contar con tu confianza me hizo crecer tanto académica como personalmente. Gracias por acompañarme emocional y espiritualmente siempre, principalmente, cuando más lo necesitaba.

A cada uno de mis compañeros y compañeras, por ayudarme siempre que lo necesité.

A los docentes, de cada uno de ellos me llevo no solo sus enseñanzas, sino su amor y dedicación por esta profesión.

A la Universidad pública, que me abrió sus puertas y me permitió llegar hasta aquí.

A mis compañeros de trabajo. En especial a mi jefe, Alvaro Scardilli, por la confianza que depositó en mí. Gracias por su constante apoyo, tanto en lo profesional como en lo personal.

A mis padres y a mi hermana, por su amor incondicional y su acompañamiento tanto en los momentos más felices como en los más desafiantes. Gracias por estar siempre a mi lado, alentándome a seguir adelante.

Mamá y papá, ustedes son mi ejemplo de esfuerzo, dedicación y perseverancia. Me siento profundamente afortunada de tenerlos conmigo.

A mis amigos: Meli, Morita, Belu, Nahue, Chedu y Agus por escucharme, por sus palabras de aliento y por compartir conmigo tanto los momentos de alegría como los de desafío durante esta etapa. Gracias por los recuerdos inolvidables de los proyectos de extensión y congresos que hemos disfrutado juntos. Su amistad ha sido fundamental a lo largo de estos años.

Finalmente, quiero agradecer a todos los que de alguna u otra manera contribuyeron a que pudiera finalizar este trabajo de tesis. Me siento profundamente feliz de haber alcanzado este objetivo.

---

A mis padres, Carmen y Edgardo  
A mi hermana, Chiara

# Resumen

La respuesta climática a los principales forzantes remotos de la precipitación (PP) en el centro-este del territorio argentino se ha estudiado en forma individual y a escala estacional. Sin embargo, desde los últimos años resulta necesario poder explicar esta respuesta a una escala comprendida entre la estacional y la sinóptica. Por lo tanto, el objetivo de la presente tesis es analizar el impacto de la combinación de forzantes climáticos en la PP media mensual y extrema en el centro-este de Argentina, durante la primavera y el verano austral, en el período 1980-2019.

En primer lugar, se llevó a cabo un control de calidad y homogeneidad de la base de datos observados de PP diaria, obteniendo 31 estaciones aptas para el análisis. Se trabajó con anomalías de PP media mensual, calculadas a partir de la climatología de 1981-2010. Los forzantes climáticos estudiados fueron El Niño-Oscilación del Sur, el Dipolo del Océano Índico y el Modo Anular del Sur (ENSO, IOD y SAM, por sus siglas en inglés, respectivamente). Se utilizó el Índice Oceánico de El Niño, el índice SAM y el Índice del Modo Dipolar. Por último, se definió la PP extrema como aquellos valores que superaron los umbrales de percentil 90, 95 y 99.

Para los meses de estudio, se encontró una marcada prevalencia de coocurrencia de igual fase del ENSO con el IOD y del ENSO con la fase positiva del SAM. Para los meses de septiembre y octubre predomina la señal del SAM en fase neutra del ENSO, con anomalías de PP positiva y negativa durante las fases positiva y negativa del SAM, respectivamente. Durante diciembre, se observó una inversión de esta señal para estas combinaciones de fases, por lo que predominan anomalías positivas (negativas) en la coocurrencia de fase neutra del ENSO con fase negativa (positiva) del SAM. Para el mes de enero, en coocurrencia de fase neutra del ENSO con fase negativa y positiva del IOD, predominan anomalías de PP significativas positivas y negativas en el noreste de la provincia de Buenos Aires y en el norte y este del territorio, respectivamente. Por último, para el mes de noviembre predominan anomalías positivas ante la ocurrencia del ENSO positivo, mientras que para febrero existe una inversión de signos en los valores de anomalías significativas para la combinación de fases del ENSO positivo con la fase negativa y positiva del IOD (anomalías negativas y positivas, respectivamente).

A su vez, por un lado, se detectó que los valores de anomalías de PP más representativos corresponden a la coocurrencia de fases ENSO con el SAM para los meses de la primavera (fase neutra del ENSO con negativa del SAM para septiembre y octubre, fase positiva del ENSO con positiva del SAM para noviembre). Por otro lado, se obtuvo mayor representatividad para la coocurrencia del ENSO con fase positiva del IOD para los meses de verano (fase positiva, neutra y negativa del ENSO con fase positiva del IOD para diciembre, enero y febrero, respectivamente).

Por último, se observó una gran variabilidad espacial y temporal entre los valores de los umbrales de extremos que, si bien dificulta la predictibilidad de estos eventos, se puede anticipar una mayor probabilidad de ocurrencia en determinadas combinaciones de fases. La mayor cantidad de extremos durante los meses de septiembre y noviembre se presentó para la combinación de fase positiva de los tres forzantes estudiados, mientras que, para febrero,

---

durante la fase negativa de los forzantes. En octubre, se detectó la mayor cantidad de extremos durante la fase neutra del ENSO en coocurrencia de la fase negativa del IOD y la fase positiva del SAM. Por su parte, diciembre (enero) presentó la mayor cantidad de eventos de este tipo durante la coocurrencia de fase positiva (neutra) del ENSO con la positiva (negativa) del IOD y durante fase neutra (positiva) del ENSO con fase negativa (positiva) del SAM. No se observaron extremos para la coocurrencia de fase negativa del ENSO con la positiva del SAM.

A partir de estos resultados, es evidente que forzantes como el IOD y el SAM mantienen un rol protagonista en el comportamiento de la PP cuando se presenta una fase neutra (o débil) del ENSO. Incluso, en algunos meses logran ser determinantes en el tipo de respuesta de la PP en la región de estudio.

# Acrónimos y abreviaturas

**A(PP):** Anomalía de precipitación

**BA:** Provincia de Buenos Aires, Argentina

**CO:** Provincia de Córdoba, Argentina

**CR:** Provincia de Corrientes, Argentina

**DF:** Dato faltante

**DMI:** Dipole Mode Index

**EN:** El Niño

**ENSO:** El Niño – Oscilación del Sur

**ENSO–:** Fase negativa del ENSO

**ENSO+:** Fase positiva del ENSO

**ENSO+IOD–:** ENSO+ con IOD–

**ENSO+IOD+:** ENSO+ con IOD+

**ENSO+SAM–:** ENSO+ con SAM–

**ENSO+SAM+:** ENSO+ con SAM+

**ENSO–IOD–:** ENSO– con IOD–

**ENSO–IOD+:** ENSO– con IOD+

**ENSO–SAM–:** ENSO– con SAM–

**ENSO–SAM+:** ENSO– con SAM+

**ENSO<sub>n</sub>:** Fase neutra del ENSO

**ENSO<sub>n</sub>IOD–:** ENSO<sub>n</sub> con IOD–

**ENSO<sub>n</sub>IOD+:** ENSO<sub>n</sub> con IOD+

**ENSO<sub>n</sub>SAM–:** ENSO<sub>n</sub> con SAM–

**ENSO<sub>n</sub>SAM+:** ENSO<sub>n</sub> con SAM+

**ER:** Provincia de Entre Ríos, Argentina

---

**IOD−:** Fase negativa del Dipolo del Océano Indico

**IOD+:** Fase positiva del Dipolo del Océano Indico

**IOD:** Dipolo del Océano Indico

**LN:** La Niña

**LP:** La Pampa, Argentina

**ONI:** Índice Oceánico de El Niño

**PP:** Precipitación

**P90:** Percentil 90

**P95:** Percentil 95

**P99:** Percentil 99

**SAM:** Modo Anular del Sur

**SAM−:** Fase negativa del SAM

**SAM+:** Fase positiva del SAM

**SF:** Provincia de Santa Fe, Argentina

**SMN:** Servicio Meteorológico Nacional

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos	5
<b>2. Datos y metodología</b>	<b>6</b>
2.1. Región de estudio y datos utilizados	6
2.2. Rellenado de la base de datos	8
2.3. Índices de circulación utilizados	10
2.4. Precipitación mensual y combinación de forzantes	11
2.4.1. Variabilidad de anomalías de precipitación	12
2.4.2. Variabilidad de índices de forzantes	12
2.5. Extremos de precipitación	12
<b>3. Coocurrencia de fases de forzantes</b>	<b>14</b>
3.1. Climatología de la precipitación y forzante ENSO	14
3.2. Cantidad de casos de coocurrencia	18
3.3. Impacto en la precipitación bajo la coocurrencia de forzantes	19
<b>4. Variabilidad entre eventos de forzantes combinados</b>	<b>26</b>
4.1. Representatividad de los <i>composites</i>	26
4.2. Variabilidad de anomalías de precipitación	28
4.3. Variabilidad de los índices de los forzantes	32
4.4. Análisis de casos particulares: forzantes extremos	33
4.4.1. Año 1988: septiembre 1988 – febrero 1989	33
4.4.2. Año 2014: septiembre 2014 – febrero 2015	35
4.4.3. Año 2019: septiembre 2019 – febrero 2020	38
<b>5. Extremos de precipitación</b>	<b>41</b>
5.1. Climatología de los umbrales (percentiles) para los extremos de precipitación	41
5.2. Extremos de precipitación y combinación de forzantes	43
5.3. Análisis de casos particulares: extremos regionales de precipitación	45
5.3.1. Septiembre, 1982	45
5.3.2. Octubre, 2012	46
5.3.3. Febrero, 1984	48
<b>6. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>56</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>62</b>



# Índice de figuras

1.1. Región de estudio (sombreado gris): 27°S a 38°S; 66°O a 56°O. . . . .	2
2.1. Distribución de las estaciones utilizadas. . . . .	10
3.1. Precipitación (PP) acumulada media semestral (mm) de los meses de septiembre a febrero para el período 1980-2019 (panel izquierdo), para años de fase negativa del ENSO (ENSO–, panel central) y para años de fase positiva del ENSO (ENSO+, panel derecho). Las estaciones representadas con una cruz, indican valores medios significativos a un nivel de 0.1. . . . .	15
3.2. <i>Composite</i> de anomalías de precipitación mensual (A(PP), en mm) para la fase negativa, neutra y positiva del forzante ENSO (ENSO–, ENSOn y ENSO+). Se indica la significancia (nivel de confianza 0.1) respecto a las otras dos fases (punto negro), o bien, respecto a una de las otras fases: ENSO– (cuadrado), ENSOn (triángulo) o ENSO+ (rombo). . . . .	17
3.3. Cantidad de casos como resultado de la coocurrencia entre años negativo, neutro y positivo del ENSO (ENSO–, ENSOn y ENSO+) con fases positiva y negativa del SAM (SAM– y SAM+) para los meses de septiembre a febrero. Los símbolos “–” y “+” en el eje de abscisas corresponden a las fases negativa y positiva del SAM. . . . .	18
3.4. Ídem Figura 3.3, pero para el IOD. . . . .	19
3.5. <i>Panel izquierdo: Composite</i> de anomalías de precipitación (A(PP)) para el mes de septiembre para casos de coocurrencia de años negativo, neutro y positivo del ENSO (ENSO–, ENSOn y ENSO+) con fase positiva y negativa del IOD (IOD– y IOD+). <i>Panel derecho: Ídem panel izquierdo, pero para forzante SAM</i> (SAM– y SAM+). Las estaciones con un punto negro en el centro representan valores medios significativos a un nivel de 0.1. . . . .	20
3.6. Ídem Figura 3.5, pero para octubre. . . . .	21
3.7. Ídem Figura 3.5, pero para noviembre. . . . .	22
3.8. Ídem Figura 3.5, pero para diciembre. . . . .	23
3.9. Ídem Figura 3.5, pero para enero. . . . .	24
3.10. Ídem Figura 3.5, pero para febrero. . . . .	25
4.1. Representatividad [%] de los <i>composites</i> para los meses de septiembre (S, ENSOnSAM– y S, ENSOnSAM+), octubre (O, ENSOnSAM– y O, ENSOnSAM+), noviembre (N, ENSO+SAM– y N, ENSO+SAM+), diciembre (D, ENSO+IOD– y D, ENSO+IOD+), enero (E, ENSOnIOD– y E, ENSOnIOD+) y febrero (F, ENSO–IOD– y F, ENSO–IOD+). . . . .	27
4.2. Distribución de las estaciones. Cada color representa estaciones de una provincia diferente. . . . .	28

4.3.	<i>Boxplot</i> de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO <sub>n</sub> con SAM <sup>-</sup> (arriba) y con SAM <sup>+</sup> (abajo) durante el mes de septiembre. El punto de color negro indica la media. . . . .	29
4.4.	<i>Boxplot</i> de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO <sup>+</sup> con SAM <sup>-</sup> (arriba) y con SAM <sup>+</sup> (abajo) durante el mes de noviembre. El punto de color negro representa la media. . . . .	30
4.5.	<i>Panel superior</i> : Gráfico de puntos de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO <sup>+</sup> con IOD <sup>-</sup> durante el mes de diciembre. <i>Panel inferior</i> : <i>Boxplot</i> de A(PP) en coocurrencia de ENSO <sup>+</sup> con IOD <sup>+</sup> durante el mes de diciembre. El punto de color negro representa la media. . . . .	31
4.6.	<i>Panel superior</i> : <i>Boxplot</i> de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO <sup>+</sup> con IOD <sup>-</sup> durante el mes de febrero. <i>Panel inferior</i> : Gráfico de puntos de A(PP) en coocurrencia de ENSO <sup>-</sup> con IOD <sup>+</sup> durante el mes de febrero. El punto de color negro representa la media. . . . .	32
4.7.	Gráfico de dispersión entre el índice ONI y el índice IOD (DMI). La línea vertical discontinua indica los umbrales para separar la fase negativa, neutra y positiva del ENSO; mientras que la línea discontinua horizontal indica el umbral para dividir en fase negativa y positiva del IOD. Para los meses de enero y febrero, se indica el año anterior para poder identificar de forma continuada el evento que corresponde a los 6 meses de estudio. . . . .	34
4.8.	Ídem Figura 4.7, pero para el índice SAM (SAM). . . . .	35
4.9.	Anomalías de precipitación (A(PP)) para los meses de septiembre de 1988 a febrero de 1989. . . . .	36
4.10.	Ídem Figura 4.9, pero para los meses de septiembre de 2014 a febrero de 2015. . . . .	38
4.11.	Ídem Figura 4.9, pero para los meses de septiembre de 2019 a febrero de 2020. . . . .	40
5.1.	Mapa de calor de los percentiles 90, 95 y 99 ( <i>P</i> <sub>90</sub> , <i>P</i> <sub>95</sub> y <i>P</i> <sub>99</sub> ) de las anomalías de precipitación en mm (A(PP)). El panel del <i>P</i> <sub>99</sub> presenta el año en el que ocurre el evento extremo. El orden del número de las estaciones en el <i>eje y</i> corresponde a orden geográfico de norte a sur y de oeste a este (los colores del <i>eje y</i> coinciden con los utilizados en la Figura 4.2 del capítulo anterior). . . . .	43
5.2.	<i>Panel izquierdo</i> : Ubicación de las estaciones, en color celeste se indican las que presentaron extremos de precipitación (PP) para septiembre de 1982. <i>Panel derecho</i> : Anomalías de PP (PP) extrema en azul. . . . .	46
5.3.	Ídem Figura 5.2, pero para octubre de 2012. . . . .	47
5.4.	Ídem Figura 5.2, pero para febrero de 1984. . . . .	49
6.1.	Diagrama con los principales resultados para el mes de septiembre. . . . .	51
6.2.	Ídem Figura 6.1, pero para el mes de octubre. . . . .	51
6.3.	Ídem Figura 6.1, pero para el mes de noviembre. . . . .	52
6.4.	Ídem Figura 6.1, pero para el mes de diciembre. . . . .	53
6.5.	Ídem Figura 6.1, pero para el mes de enero. . . . .	54
6.6.	Ídem Figura 6.1, pero para el mes de febrero. . . . .	54

# Índice de tablas

2.1.	Código correspondiente a la precipitación (PP) diaria y su significado, establecido por el Servicio Meteorológico Nacional. . . . .	6
2.2.	Puntos de quiebre identificados a partir del método de Pettit y de Buishand-R. Se detalla la información de las estaciones (número de identificación -ID-, nombre y ubicación), así como el mes y año correspondientes. . . . .	8
2.3.	Información de las estaciones seleccionadas. Se indica el número de identificación (ID), la provincia, la latitud, longitud y la altura para cada una de las estaciones. . . . .	9
3.1.	Clasificación de años de fase negativa, neutra y positiva del ENSO (ENSO-, ENSOn y ENSO+) a partir del Oceanic Niño Index. El año de referencia corresponde al año de inicio del semestre de estudio. . . . .	15
4.1.	Valores de los índices DMI y SAM para los meses de septiembre de 1988 a febrero de 1989. . . . .	36
4.2.	Ídem Tabla 4.1, pero para los meses de septiembre 2014 a febrero de 2015. . . . .	37
4.3.	Estaciones y mes para los cuales las anomalías de precipitación en mm (A(PP)) superan los 200mm para el período de septiembre de 2014 a febrero de 2015. . . . .	39
4.4.	Ídem Tabla 4.1, pero para los meses de septiembre 2019 a febrero 2020. . . . .	39
5.1.	Cantidad de casos (incluye estaciones y años) bajo la coocurrencia de fases ENSO y de fases IOD. Los valores máximos de cada mes se indican en sombreado. . . . .	44
5.2.	Ídem Tabla 5.1, pero bajo la coocurrencia de fases ENSO y de fases SAM. . . . .	44
5.3.	Cantidad de estaciones afectadas, año del extremo y signo de las fases de los forzantes (-: negativa, n: neutra y +: positiva) según el mes de estudio. . . . .	45
5.4.	Valores de los índices ONI, DMI y SAM para septiembre de 1982. . . . .	45
5.5.	Ídem Tabla 5.4, pero para octubre de 2012. . . . .	46
5.6.	Ídem Tabla 5.4, pero para febrero de 1984. . . . .	48
A.1.	Tendencias significativas detectadas a partir del test no paramétrico de Mann-Kendall. Se detalla la información de las estaciones (número de identificación -ID-, nombre y ubicación), así como el mes y signo correspondientes. . . . .	62

# Capítulo 1

## Introducción

La respuesta climática a los principales forzantes remotos de la precipitación (PP) en el centro-este del territorio argentino (Figura 1.1) ha sido estudiada en las últimas décadas, principalmente, en escala estacional. En los últimos años, se ha planteado en la comunidad científica la necesidad de explicar dicha respuesta en una escala comprendida entre la estacional y la sinóptica (Vitart et al., 2012; Meehl et al., 2021). Los avances en esta temática se están abordando no sólo desde el estudio de un forzante y la respuesta climática, sino también en el análisis de la acción combinada de los principales forzantes remotos. Sin embargo, aún hay pocos trabajos que aborden estos nuevos desafíos desde el análisis de las observaciones empíricas y que contribuyan a una de las metas de la última década del World Climate Research Programme para mejorar el desempeño del pronóstico a escala subestacional, que se ha abordado principalmente desde el modelado (WMO, 2023).

La variabilidad interanual de las PP en la región es modulada por forzantes remotos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el Modo Anular del Sur (SAM, por sus siglas en inglés) y por el Dipolo del Océano Índico (IOD, por sus siglas en inglés). La interacción dinámica entre estos sistemas de variabilidad climática también modula la PP en la región, por lo que también tiene implicancias en la toma de decisiones para la planificación agrícola, la gestión de recursos hídricos y la adaptación al cambio climático (Barros et al., 2008; Cavalcanti, 2012). A su vez, son monitoreados para anticiparse a la posible ocurrencia de eventos extremos como sequías y consecuentes incendios, así como inundaciones (Cai et al., 2020).

El ENSO es un fenómeno acoplado océano-atmosférico donde la componente oceánica se caracteriza por anomalías de temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) en el Océano Pacífico ecuatorial y, la componente atmosférica, por el patrón de circulación de la atmósfera adyacente (C. Wang et al., 2017; Reboita et al., 2021). Diferentes autores tales como C. Wang et al. (2017) y Anderson et al. (2019) establecen que inicia a fines del invierno y principios de la primavera austral, alcanzando el pico de intensidad durante el verano, y su decaimiento durante el otoño-invierno. El Niño (EN) y La Niña (LN) representan las fases cálida y fría que se identifican monitoreando los aumentos y disminuciones de las anomalías de SST, respectivamente, en determinadas regiones del Océano Pacífico tropical.

Durante eventos EN, los vientos del este son más débiles de lo normal, favoreciendo aguas más cálidas sobre el Océano Pacífico ecuatorial central y oriental, lo que se asocia a una presión atmosférica más baja y a un aumento de la convección en dicha región (Reboita et al., 2021). A su vez, se genera la activación de ondas de Rossby que se propagan desde el Pacífico ecuatorial hacia el sudeste, llegando al sudeste de Sudamérica. Esta serie de anomalías negativas y positivas de presión en la atmósfera, que se extiende hacia latitudes medias, favorece un fortalecimiento de la corriente en chorro subtropical y un incremento en el transporte de humedad desde el

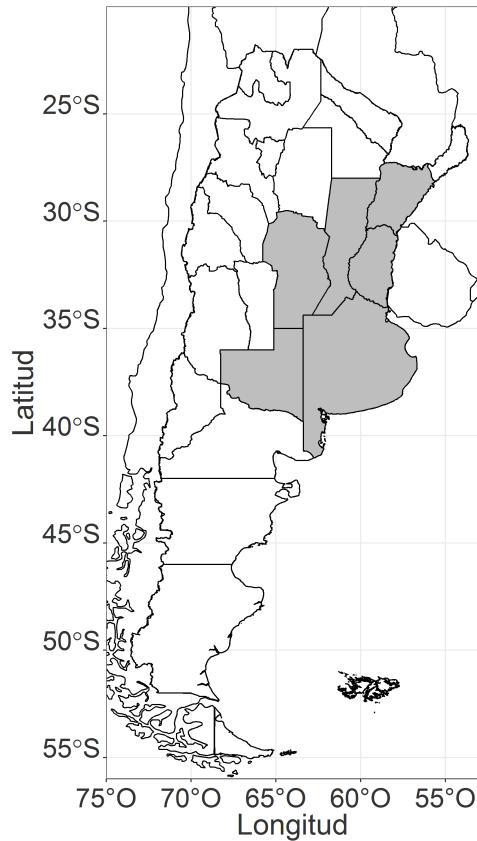


Figura 1.1: Región de estudio (sombreado gris): 27°S a 38°S; 66°O a 56°O.

Atlántico. Como consecuencia, estos factores, sumados a las condiciones meteorológicas, resultan en anomalías positivas de PP en el centro-este de Argentina (Grimm et al., 1998; Garreaud et al., 2009; Cai et al., 2020).

En contraste, durante eventos LN, los vientos del este son más intensos de lo normal sobre el Océano Pacífico ecuatorial y transportan las aguas superficiales más cálidas hacia el Pacífico occidental, lo que se asocia a una mayor convección sobre esta región y a la surgencia de las aguas en la cuenca del Pacífico ecuatorial oriental (Reboita et al., 2021). La respuesta en el centro-este de Argentina cambia como consecuencia del corrimiento de las regiones con mayor calentamiento. Por lo tanto, esta fase se asocia con una mayor incidencia de condiciones de sequía (Ropelewski y Halpert, 1987; Vera et al., 2006).

De este modo, el ENSO se correlaciona positivamente con la PP en la región de estudio, especialmente en los meses de primavera (Barreiro, 2010). Los primeros trabajos que presentaron esta asociación fueron los realizados por Ropelewski y Halpert (1987, 1989) y la vasta bibliografía que le ha proseguido ha sido revisada en un trabajo publicado recientemente Cai et al., 2020. Debido a la fuerte señal que se ha evidenciado, este forzante es utilizado como predictor en la escala estacional y se han llevado a cabo numerosos estudios de impacto en los distintos sectores que involucran tomadores de decisión: la influencia del ENSO en la humedad del suelo (Pántano et al., 2022), en el rendimiento de los cultivos (R. Hurtado et al., 2003, 2005 ; Fernández Long et al., 2011), en los caudales de los ríos (Camilloni y Barros, 2003; Antico y Vuille, 2022), en la extensión areal de lagunas pampeanas (Bohn et al., 2016) y en el turismo (McPhaden et al., 2020), entre otros. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se desarrollan en la escala estacional que, para muchos sectores, excede el tiempo adecuado para la toma de decisiones. Sumado a esto, en términos generales, pocos trabajos incluyen el comportamiento en condiciones

neutrales. Durante esta fase, puede tomar mayor relevancia la influencia de los otros forzantes que modulan la variabilidad de la PP, principalmente, el SAM y el IOD.

El SAM es el principal modo de variabilidad climática extratropical del hemisferio sur (Campitelli et al., 2022) y se define por la diferencia en la anomalía de presión atmosférica entre las latitudes medias y altas (Thompson y Wallace, 2000). Durante su fase positiva, el SAM se caracteriza por un fortalecimiento de los vientos del oeste y un desplazamiento hacia el sur de las tormentas extratropicales, lo que conlleva a un déficit de PP en gran parte de la región de estudio debido a un menor ingreso de los sistemas frontales desde el sur (Gillett et al., 2006; Fogt et al., 2011). La fase negativa del SAM genera un desplazamiento hacia el norte de las tormentas y una mayor entrada de aire húmedo desde el Atlántico, favoreciendo condiciones de mayor PP (Marshall, 2003; Silvestri y Vera, 2003). A partir de esto, se ha observado que para el sureste de Sudamérica la fase positiva (negativa) del SAM está asociada con valores de anomalía de PP negativa (positiva) y significativa. Este comportamiento sucede para todas las estaciones del año, a excepción del invierno y hasta inicio de la primavera austral (Campitelli et al., 2022). En este sentido, autores como Silvestri y Vera (2003) han encontrado correlaciones positivas (negativas) y significativas al 90 – 95 % (no significativas) entre el SAM y las anomalías de PP a principios (fines) de la primavera, en el centro-norte del territorio argentino. Cada evento SAM, positivo o negativo, tiende a durar entre 15 días y algunos meses, por lo cual, los índices de monitoreo más usados se calculan a escala diaria o mensual, es decir, a una escala menor que la estacional. En particular, se presenta más activo durante los meses de primavera (Thompson y Wallace, 2000).

Por su parte, el IOD es un modo de variabilidad del Océano Índico caracterizado por un patrón de acople océano-atmósfera con anomalías térmicas opuestas en sus regiones occidental y oriental (Saji y Yamagata, 2003). Puede generar trenes de ondas de Rossby que se activan en el Índico, en lugar del Pacífico tropical. En la actualidad existen diferentes estudios sobre la relación entre el ENSO y el IOD. Mientras algunos estudios (Zhao y Nigam, 2015) sugieren que el IOD se desarrolla como consecuencia de anomalías del viento asociadas al ENSO en el Océano Índico oriental, otros (H. Wang et al., 2016) indican que el IOD puede generarse en ausencia del ENSO e incluso preceder y contribuir a su desarrollo (H. Wang et al., 2019). El IOD comienza durante el principio del invierno, tiene un pico en primavera y luego comienza a debilitarse en el verano austral (Saji y Yamagata, 2003; Sena y Magnusdottir, 2021).

La fase positiva del IOD, que suele ser más intensa que la negativa (Stuecker et al., 2017), se caracteriza por un calentamiento en el oeste del Océano Índico y un enfriamiento en el este; mientras que durante la fase negativa dichas anomalías de SST se invierten (Saji et al., 1999; Sena y Magnusdottir, 2021). A su vez, se ha observado que durante la primavera austral la fase positiva favorece el aumento de las PP sobre la cuenca del Plata y una disminución sobre el centro de Brasil (Chan et al., 2008).

Además de estos forzantes, existen otros modos de variabilidad. Por ejemplo, las anomalías de SST del Atlántico Sur sobre latitudes extratropicales pueden modular la ciclogénesis cerca del sudeste de Brasil e influyen en los sistemas convectivos, favoreciendo o inhibiendo la PP (Bombardi et al., 2014). Otro patrón, cuya influencia ha sido estudiada en los últimos años, es la Oscilación de Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés; C. Zhang, 2005). Este forzante, cuando está activo, puede presentar ocho fases. En la fase 1 se observa una gran cantidad de PP sobre el Océano Índico occidental. Luego, dicha PP se desplaza hacia el este durante las dos fases consecutivas, alcanzando la región de Indonesia y el Pacífico occidental en las fases 4 y 5. Finalmente, durante las fases 6, 7 y 8, la banda de convección se desplaza a lo largo del Océano Pacífico, alcanzando la región de Sudamérica, donde se disipa (Reboita et al., 2021). Alvarez et al. (2016) describe la influencia sobre la PP en la región de estudio y su comportamiento



dipolar con respecto a la Zona de Convergencia del Atlántico Sur.

Por lo tanto, por lo desarrollado y por la región de estudio seleccionada, para el presente trabajo se estudiarán los forzantes ENSO, SAM y el IOD. Todos estos forzantes no actúan en forma independiente, sino que se dan en simultáneo. Las consecuencias de la combinación de la acción de los forzantes en la PP no han sido tan estudiadas aún; sin embargo, se puede afirmar que las interacciones entre ellos no son lineales. La coocurrencia de estos forzantes puede resultar en un espectro diverso de respuestas climáticas, pudiendo generar desde fuertes sequías hasta inundaciones extremas, por lo que resulta un desafío para la previsión y la gestión de riesgos climáticos en la región de estudio (McPhaden et al., 2020).

A modo de ejemplo, se pueden mencionar diferentes estudios que han demostrado que la fase del SAM puede modular los efectos del ENSO en las PP del hemisferio sur, amplificando o atenuando sus impactos dependiendo de la fase concurrente de ambos forzantes (Hendon et al., 2007; Fogt et al., 2011). Silvestri y Vera (2003) sugieren que la relación entre estos forzantes es más evidente a partir de la década de 1970 y que, en general, el SAM tiende a ser negativo durante la fase cálida del ENSO (L'Heureux y Thompson, 2006). Hu et al. (2023) muestran que el impacto del SAM en la PP de primavera sobre el Sudeste de Sudamérica es mayor que el propio impacto del ENSO en eventos LN .

Por otra parte, la interacción entre el IOD y el ENSO también ha sido estudiada. A pesar de que el origen de cada modo de variabilidad es independiente (Ashok et al., 2001), tiende a ponerse en fase la ocurrencia de eventos positivos del IOD con eventos EN. Este acoplamiento se evidencia con más frecuencia después de la década de 1970 (Yuan y Li, 2008). En cuanto a la evolución de los dos forzantes, la fase positiva del IOD no sólo refuerza el desarrollo de EN sino que también favorece la rápida transición hacia la fase LN (Cai et al., 2020). A su vez, se ha estudiado que, si bien la fase negativa del IOD no tiene un impacto significativo en Sudamérica, al combinarse con LN puede modular la posición de los centros de circulación anómala en las cercanías a nuestro continente y modificar la típica señal de LN (Andrian et al., 2023). A modo de ejemplo, ante la coocurrencia de fases positivas de ambos forzantes, las anomalías de PP se refuerzan en el noreste y se expanden hacia el centro-norte de nuestro país (Andrian et al., 2022).

Por último, cabe destacar que el efecto combinado de los forzantes va a resultar en un impacto diverso, sumado a que cada evento de un determinado forzante presenta características distintas (en el patrón espacial, en intensidad y en su evolución temporal). Por lo tanto, la respuesta de la PP regional en un evento individual no necesariamente se corresponde con la respuesta esperada en términos estadísticos, por ejemplo, con el promedio de los casos bajo una determinada condición (análisis de *composites*). Son pocos los trabajos que profundizan en la variabilidad entre eventos y, sin embargo, es información clave para el usuario de los servicios climáticos.

En particular, esta variabilidad podría dar lugar a la ocurrencia de eventos extremos, que se pueden identificar cuando una variable meteorológica o climática, en este caso la PP, presenta valores por encima (debajo) de un determinado umbral cerca de los extremos superior (inferior) del rango de valores observados (Field et al., 2012). Con respecto a nuestra región, se ha estudiado la influencia del ENSO, el SAM y el IOD en los extremos de PP de Sudamérica, pero en forma aislada, como por ejemplo Iacovone et al. (2024). Aún son escasos los estudios que presentan la señal conjunta de los forzantes mencionados en eventos de PP extrema en la región.

## 1.1. Objetivos

A partir de lo expuesto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo realizar un análisis espacio-temporal de la PP y sus extremos climáticos en el centro-este del territorio argentino, a escala subestacional, como respuesta a la combinación de los principales forzantes climáticos remotos y la variabilidad entre estos eventos. Para tal fin, se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- describir la PP media mensual esperada en términos estadísticos y climatológicos bajo las distintas combinaciones de fases de los forzantes remotos seleccionados;
- analizar la variabilidad entre eventos de forzantes combinados e identificar casos particulares de estudio;
- detectar los extremos climáticos ocurridos bajo la influencia combinada de los forzantes remotos.

Este análisis se llevará a cabo para los meses de septiembre a febrero debido a que son los meses en los que se observa la mayor señal de los forzantes ENSO, IOD y SAM.



# Capítulo 2

## Datos y metodología

En este capítulo se describen los datos y la metodología utilizada para el desarrollo de la presente tesis. Para llevar a cabo los cálculos y los gráficos presentados a continuación, y en los próximos capítulos, se utilizó el lenguaje de programación R ([Team, 2021](#)).

### 2.1. Región de estudio y datos utilizados

Para realizar este trabajo se utilizaron datos observados de PP diarios provenientes de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). A través de la política de Datos Abiertos, se solicitó al SMN la base de datos de las 87 estaciones distribuidas en las provincias de Buenos Aires (BA), Entre Ríos (ER), Santa Fe (SF), Córdoba (CO), La Pampa (LP) y Corrientes (CR). Estos datos fueron sometidos a un proceso de control de calidad que se detalla a continuación.

Inicialmente, en base al código de PP establecido por el SMN (Tabla 2.1), cuando el código es “-”, “0”, “SF” se consideró como dato faltante (DF) y si el código es “A”, “F” o “x” se mantuvo el valor informado. Con el objetivo de garantizar un período suficientemente extenso para un análisis climatológico, se seleccionaron aquellas estaciones cuya base de datos abarca el período comprendido entre septiembre de 1980 y febrero de 2020, y cuya cantidad de DF es menor al 5%. A partir de esto, se seleccionaron 37 estaciones.

Código de PP	Significado
-	No se realizó observación.
0	PP observada, pero no medida.
A	Cantidad acumulada.
F	Cantidad diaria incompleta.
PF	Dato proveniente de faja.
SF	Sin dato.
X	No se midió. Acumulada del día posterior.

Tabla 2.1: Código correspondiente a la precipitación (PP) diaria y su significado, establecido por el Servicio Meteorológico Nacional.

A continuación, para las 37 estaciones seleccionadas, se realizó un control de posibles errores en los datos: tanto de valores negativos como de valores fuera de rango a través del Software RClimdex ([X. Zhang y Yang, 2004](#)). No se detectaron inconsistencias en esta instancia.

Por último, con el objetivo de obtener una serie de datos homogénea, se realizó una evaluación de puntos de quiebre ([Aguilar et al., 2003](#)) para los meses de septiembre a febrero. Para llevar

a cabo este análisis, se calculó el acumulado mensual de PP para cada una de las estaciones, por ser la variable con la que se va a trabajar. Debido a la baja densidad espacial de estaciones en nuestro país, se realizaron las pruebas con los métodos absolutos de Pettit (Pettitt, 1979) y Buishand-R (Buishand, 1982), con un nivel de significancia de 0.1. Pettit y Buishand-R son métodos no paramétricos, por lo que no se debe presuponer que los datos provienen de una distribución determinada. A su vez, Buishand-R requiere del uso de un test de remuestreo para evaluar el estadístico, por lo que es computacionalmente costoso. A diferencia de este, el test de Pettit se basa en Wilcoxon-Mann-Whitney y utiliza los valores ordinales, por lo que es un método robusto y resistente. El test de hipótesis de los métodos es:

- Hipótesis nula: los datos provienen de la misma distribución.
- Hipótesis alternativa: existe un punto a partir del cual cambia la distribución.

Los métodos de Pettit y Buishand-R son eficientes para reproducir la fecha del punto de quiebre cuando ocurre en medio de una serie de tiempo, en comparación a los puntos de ruptura en sus fronteras (Wijngaard et al., 2003; S. I. Hurtado et al., 2020). Además, S. I. Hurtado et al. (2020) encuentran que las diferencias entre las pruebas en el año del punto de quiebre detectado pueden deberse a la distinta sensibilidad de cada una de ellas a pequeños cambios y establecen un límite de cinco años como margen de error temporal entre las mismas. En consecuencia, para el presente trabajo, se consideró punto de quiebre cuando los dos métodos utilizados coinciden en la fecha del punto de quiebre detectado, teniendo en cuenta esta diferencia de cinco años.

A su vez, con el objetivo de poder analizar si los puntos de quiebre detectados son debido a una tendencia, se testearon las tendencias para todo el período de estudio y para los períodos antes y después de los puntos de quiebre encontrados. Esto se llevó a cabo con el test no paramétrico de Mann-Kendall (Hamed y Rao, 1998), con un nivel de significancia de 0.1. Dicho test utiliza la correlación  $\tau$  de Kendall y el estadístico de prueba es igual a la sumatoria del signo de las diferencias entre las distintas variables:

$$S = \sum_{i < j} a_{ij} = \sum_{i < j} \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{donde} \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i < x_j, \\ 0 & \text{si } x_i = x_j, \\ -1 & \text{si } x_i > x_j. \end{cases} \quad (2.1)$$

Al tomar el signo de dichas diferencias, se realiza una independización de los datos originales y los valores estarán entre  $-1$  y  $1$  (2.1). Cuando el período presenta una tendencia positiva, el estadístico es grande y positivo. Por el contrario, el estadístico será negativo cuando el período presenta una tendencia negativa y, por lo tanto, se debe evaluar a dos colas. El test de hipótesis de los métodos es:

- Hipótesis nula: la serie no tiene una tendencia monótona.
- Hipótesis alternativa: la serie tiene una tendencia monótona.

En la Tabla 2.2 se muestran las estaciones que presentaron algún punto de quiebre y el año en el que este se detectó. Para estos casos, se analizó la significancia de las tendencias para el período de estudio y para los períodos anterior y posterior a los puntos de quiebre encontrados, y se obtuvo que ninguno se debe a la tendencia. Dado que no es objetivo del presente trabajo profundizar en el análisis de los puntos de quiebre detectados, se descartan las estaciones en las que se encontró un punto de quiebre. Sin embargo, debido a la importancia de la ubicación de las estaciones *10082-Villa De María del Río Seco* (CO) y *10192-Santa Rosa Aero* (LP), se

ID	Nombre	Provincia	Latitud	Longitud	Altura (m)	Mes	Año
10082	Villa de María del Río Seco	CO	-29.9	-63.68	341	12	2007
10105	Córdoba Observatorio	CO	-31.4	-64.18	425	11	2007
10111	Pilar Observatorio	CO	-31.07	-63.88	338	12	2005
10156	Buenos Aires Observatorio	BA	-34.58	-58.48	25	1	1997
10192	Santa Rosa Aero	LP	-36.57	-64.27	191	11	1994
10221	Bahía Blanca Aero	BA	-38.73	-62.02	83	2	1997
10332	Aeroparque Aero	BA	-34.57	-58.42	6	1	1997

Tabla 2.2: Puntos de quiebre identificados a partir del método de Pettit y de Buishand-R. Se detalla la información de las estaciones (número de identificación -ID-, nombre y ubicación), así como el mes y año correspondientes.

determinó no descartarlas y utilizarlas para el análisis, siempre teniendo en cuenta que presentan dichos quiebres.

Por otro lado, para el caso de estaciones que no presentaron puntos de quiebre, se testeó la tendencia del período de estudio, encontrando que ciertas estaciones presentan una tendencia significativa. Debido al tipo de cálculos y al análisis que se llevan a cabo en el presente trabajo, se decidió no remover dichas tendencias ni descartar estas estaciones. Estos se muestran en la Tabla A.1 del anexo.

Como resultado de lo mencionado a lo largo de la presente subsección, se seleccionaron 31 estaciones. La información y ubicación de dichas estaciones se encuentran en la Tabla 2.3 y en la Figura 2.1, respectivamente.

## 2.2. Rellenado de la base de datos

Para cada mes de cada una de las estaciones utilizadas, se estableció el siguiente criterio para llevar a cabo el proceso de relleno de datos, a partir de la contabilización de la cantidad de DF, el valor acumulado y el valor climatológico para el período 1981-2010:

- Si DF es  $<3$  ( $< 10\%$ ), se mantuvo el valor obtenido a partir del acumulado mensual.
- Si DF equivale a la cantidad de días del mes, se reemplazó el dato mensual por el valor climatológico correspondiente.
- En los casos intermedios, se determinó un criterio que procure no perder la información de los meses que han superado el valor climatológico, ya que el análisis estará enfocado en los extremos de PP:
  - Si el valor acumulado es mayor que el climatológico, se mantuvo el valor acumulado.
  - Si el valor acumulado es menor que el climatológico, se realizó una corroboración con estaciones cercanas.

ID	Nombre	Provincia	Latitud	Longitud	Altura (m)
10081	Ceres Aero	SF	-29.88	-61.95	88
10082	Villa De María Del Río Seco	CO	-29.9	-63.68	341
10087	Monte Caseros Aero	CR	-30.27	-57.65	54
10100	Córdoba Aero	CO	-31.3	-64.2	495
10113	Paraná Aero	ER	-31.78	-60.48	78
10117	Villa Dolores Aero	CO	-31.95	-65.13	566
10133	Rosario Aero	SF	-32.92	-60.78	25
10134	Gualeguaychú Aero	ER	-33.00	-58.62	23
10138	Río Cuarto Aero	CO	-33.12	-64.23	421
10148	Laboulaye Aero	CO	-34.13	-63.37	137
10159	El Palomar Aero	BA	-34.6	-58.6	12
10166	Ezeiza Aero	BA	-34.82	-58.53	20
10170	La Plata Aero	BA	-34.97	-57.90	23
10177	Punta Indio	BA	-35.37	-57.28	22
10178	Nueve De Julio	BA	-35.45	-60.88	76
10190	Dolores Aero	BA	-36.35	-57.73	9
10192	Santa Rosa Aero	LP	-36.57	-64.27	191
10204	Coronel Suárez Aero	BA	-37.95	-61.88	233
10210	Mar Del Plata Aero	BA	-37.93	-57.58	21
10309	Reconquista Aero	SF	-29.18	-59.70	53
10311	Tandil Aero	BA	-37.23	-59.25	175
10334	General Pico Aero	LP	-35.70	-63.75	145
10346	Paso De Los Libres Aero	CR	-29.68	-57.15	70
10358	Castelar Inta	BA	-34.67	-58.65	22
10369	Marcos Juárez Aero	CO	-32.70	-62.15	114
10451	Sauce Viejo Aero	SF	-31.70	-60.82	18
10453	Junín Aero	BA	-34.55	-60.92	81
10456	Pehuajó Aero	BA	-35.87	-61.90	87
10470	Corrientes Aero	CR	-27.45	-58.77	62
10477	Concordia Aero	ER	-31.30	-58.02	38
10490	Tres Arroyos	BA	-38.03	-60.25	115

Tabla 2.3: Información de las estaciones seleccionadas. Se indica el número de identificación (ID), la provincia, la latitud, longitud y la altura para cada una de las estaciones.

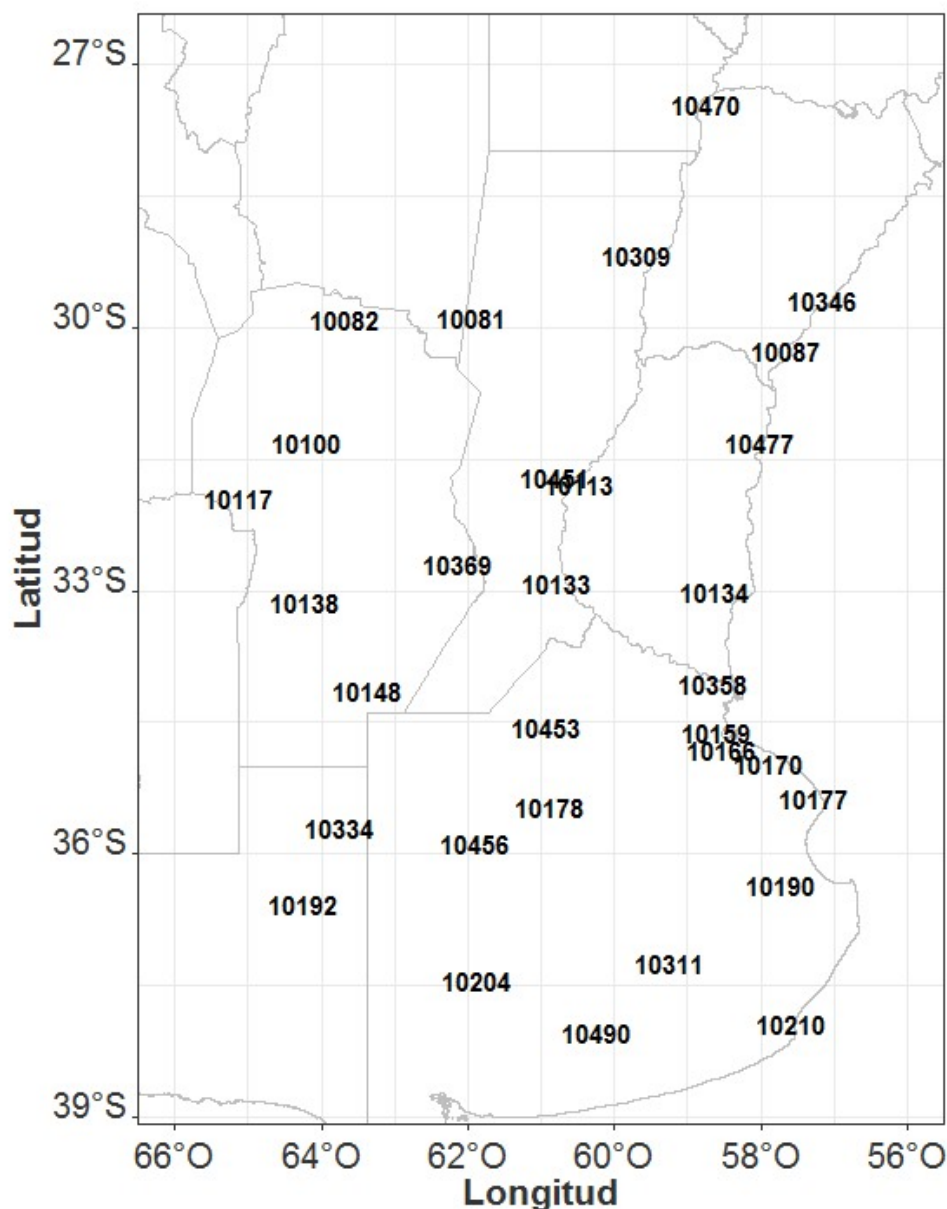


Figura 2.1: Distribución de las estaciones utilizadas.

## 2.3. Índices de circulación utilizados

A lo largo de la presente tesis, se trabajó con tres índices de circulación para caracterizar la variabilidad temporal de los tres forzantes seleccionados.

El Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés), que caracteriza al ENSO, se calcula a partir de la media móvil de 3 meses de anomalías de la temperatura superficial del mar, datos obtenidos de ERSST.v5 SST (Huang et al., 2017), en la región Niño 3.4 (5°N - 5°S y 120°O - 170°O), la cual se compara con la media de 30 años actualizada cada 5 años. Se consideró condición EN cuando la anomalía es mayor o igual a 0,5°C y condición LN cuando la anomalía es menor o igual a -0,5°C durante al menos 5 trimestres móviles consecutivos (datos obtenidos de [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)).

El Dipole Mode Index (DMI), que caracteriza al IOD, se obtiene a partir del gradiente de la

anomalía de la temperatura de la superficie del mar entre el océano Índico ecuatorial occidental (50°E - 70°E y 10°S - 10°N) y el océano Índico ecuatorial sudoriental (90°E - 110°E y 10°S - 0°N). Cuando el valor del DMI es positivo, se consideró fase positiva del IOD (IOD+), mientras que cuando el DMI es negativo, se consideró IOD negativo (IOD-). Los datos fueron extraídos de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” ([https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/DMI/](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/DMI/)).

Se utilizó el índice SAM propuesto por Marshall (2003) y se obtiene del British Antarctic Survey (<https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>). Dicho índice se calcula como la diferencia entre la presión normalizada media mensual observada a 40°S y 65°S. Cuando el valor del índice es positivo, se consideró fase positiva del SAM (SAM+), mientras que cuando el SAM es negativo, se consideró fase negativa del índice (SAM-).

## 2.4. Precipitación mensual y combinación de forzantes

Para describir la climatología de la PP en la región, se calculó la media del acumulado semestral para cada una de las 31 estaciones. Para llevarlo a cabo, se utilizó el período comprendido entre 1980 y 2019, considerando un año como el intervalo de tiempo entre septiembre de un año y febrero del año consecutivo (es decir, que el año 1980 corresponde al período comprendido entre septiembre de 1980 a febrero de 1981).

A su vez, para el período 1980-2019 se contabilizó la cantidad de años de fase negativa del ENSO (ENSO-), fase neutra del ENSO (ENSON) y fase positiva del ENSO (ENSO+). Dicha clasificación se realizó a partir de definir que cada año ENSO-, ENSON y ENSO+ debía cumplir con 4 o más trimestres móviles que comprenden los meses de estudio con condición LN, neutro y EN, respectivamente, según el índice ONI. A partir de esta definición, se calculó la climatología para años ENSO- y ENSO+.

Una vez caracterizada la climatología semestral de la PP, se continuó con un análisis mensual de la variable. Se calcularon las anomalías de la PP (A(PP)) media mensual respecto a la climatología 1981-2010. La respuesta de esta variable para cada una de las fases ENSO-, ENSON y ENSO+ se estudió a través del análisis de *composites*. Dichos *composites* se testearon con el test de Welch (Heumann y Shalabh, 2016), según el cual, dadas 2 muestras independientes con tamaños  $n_1$  y  $n_2$  y varianzas diferentes y desconocidas, se plantea el siguiente test de hipótesis:

- Hipótesis nula: las medias de las muestras son iguales.
- Hipótesis alternativa: las medias de las muestras son diferentes.

El rechazo de la hipótesis nula implica una diferencia significativa en la media de las muestras. Este test se llevó a cabo con un nivel de significancia de 0.1.

Luego, para estudiar la coocurrencia de fases de los forzantes seleccionados, se contabilizó, para cada mes de cada fase ENSO-, ENSON y ENSO+, la cantidad de años del período de estudio con fases IOD-, IOD+, SAM- y SAM+. Además, esta contabilización se utilizó para evaluar la robustez de los *composites* que se realizaron para describir la A(PP) media mensual esperada bajo las distintas combinaciones de fases de los forzantes remotos ENSO, IOD y SAM para cada uno de los meses de estudio. Por lo tanto, a partir de lo mencionado, se establecen los siguientes casos de coocurrencia:

- Forzantes en fase:
  - ENSO- con IOD- y SAM-, en adelante: ENSO-IOD- y ENSO-SAM-

- ENSO+ con IOD+ y SAM+, en adelante: ENSO+IOD+ y ENSO+SAM+
- Forzantes en fase opuesta:
  - ENSO− con IOD+ y SAM+, en adelante: ENSO−IOD+ y ENSO−SAM+
  - ENSO+ con IOD− y SAM−, en adelante: ENSO+IOD− y ENSO+SAM−
- Forzantes con ENSOn :
  - ENSOn con IOD+ y SAM+, en adelante: ENSOnIOD+ y ENSOnSAM+
  - ENSOn con IOD− y SAM−, en adelante: ENSOnIOD− y ENSOnSAM−

### 2.4.1. Variabilidad de anomalías de precipitación

Para analizar los *composites* de coocurrencia de forzantes, se calculó su representatividad, definida como el porcentaje de casos que coinciden en signo con el valor del *composite*. Se consideró buena representatividad un valor mayor o igual al 70%.

Una vez obtenida la representatividad, se prosiguió a estudiar la variabilidad entre los casos de cada una de las coocurrencias a través de gráficos en formato *boxplot*. Este tipo de diagrama permite visualizar la distribución de la PP. La caja está delimitada por los cuartiles superior ( $Q_3$ , percentil 75) e inferior ( $Q_1$ , percentil 25), abarcando así el 50% de los datos. En el interior de la caja, la barra representa la mediana ( $Q_2$ , percentil 50), lo que la convierte en un método robusto frente a valores atípicos. Los bigotes se extienden desde el cuadro hasta los dos valores extremos. Por último, se puede decir que los datos son simétricos, si la mediana está cerca del centro de la caja y los bigotes son de longitud comparable.

Teniendo en cuenta que este tipo de gráfico utiliza 5 valores (Wilks, 2011): el límite inferior, el  $Q_1$ , el  $Q_2$ , el  $Q_3$  y el límite máximo, en el caso de que la coocurrencia sea de una cantidad igual o menor a 5, no se utilizará esta representación, sino un gráfico de puntos.

### 2.4.2. Variabilidad de índices de forzantes

Para estudiar la variabilidad entre los diferentes eventos de forzantes, se realizaron gráficos de dispersión entre el índice ONI (por el forzante ENSO) y los índices DMI (por el forzante IOD) y SAM (por el forzante SAM), para cada uno de los meses de estudio. Como ya se estableció antes, se usó  $\pm 0,5$  para diferenciar entre fases ENSO, mientras que para los otros dos forzantes se usa mayor o menor a 0. Este último criterio se definió con el objetivo de poder tener muestras un poco más grandes, ya que el análisis de coocurrencia reduce el número de casos.

Luego, en función de los diferentes valores e intensidades de los índices, se seleccionan casos particulares de estudio para analizar.

## 2.5. Extremos de precipitación

Como se hizo referencia en la introducción, se puede definir a un evento extremo, en este caso extremo húmedo, como la ocurrencia de un determinado valor de PP por encima de un umbral cerca del extremo superior del rango de valores observados (Field et al., 2012). Sin embargo, aunque ha crecido el interés en este tipo de eventos debido, entre otras razones, a los diferentes impactos socioeconómicos, no existe una única definición (McPhillips et al., 2018). A su vez, existen diversas técnicas estadísticas paramétricas y no paramétricas para determinar la PP extrema (Anagnostopoulou y Tolika, 2012).

Uno de las técnicas más utilizadas es el método no paramétrico basado en el uso de valores fijos o percentiles para seleccionar un umbral para eventos extremos (Gimeno et al., 2022). Este tipo de índice suele ser, en general, uno de los más adecuados para realizar comparaciones entre regiones. Por lo tanto, se utilizaron los percentiles 90, 95 y 99 ( $P_{90}$ ,  $P_{95}$  y  $P_{99}$ ; respectivamente) para identificar los extremos de A(PP). A partir de estos valores se llevó a cabo una climatología mensual de umbrales de valores de A(PP) extrema para la región de estudio.

Luego se seleccionaron aquellos eventos mensuales que superan el  $P_{95}$ , se utilizó este percentil con el objetivo de no ser tan restrictivo como lo es el  $P_{99}$ . A partir de estos eventos extremos encontrados, se clasificó a qué caso de combinación de forzantes correspondían (ENSO–IOD–, ENSO–IOD+, ENSO–SAM–, ENSO–SAM+, ENSOnIOD–, ENSOnIOD+, ENSOnSAM–, ENSOnSAM+, ENSO+IOD–, ENSO+IOD+, ENSO+SAM–, ENSO+SAM+) según el mes de ocurrencia. A partir de estos resultados, se seleccionaron tres casos particulares de estudio.



# Capítulo 3

## Coocurrencia de fases de forzantes

En este capítulo se analiza el primer objetivo específico de la tesis. Este consiste en realizar una descripción de la PP media mensual esperada, en la región de estudio, bajo las distintas combinaciones de fases de los forzantes remotos ENSO, IOD y SAM para los meses de primavera y verano austral.

### 3.1. Climatología de la precipitación y forzante ENSO

Tal como se mencionó anteriormente, el objetivo del presente capítulo es analizar la ocurrencia conjunta de los diferentes forzantes seleccionados. Para ello, primero resulta necesario conocer el comportamiento climatológico de la PP y la influencia del ENSO, por ser el forzante de mayor influencia en la región de estudio durante los meses de septiembre a febrero.

Para describir la climatología, se calculó la media del acumulado semestral de PP para cada una de las 31 estaciones. Dicha información está representada en el panel izquierdo de la Figura 3.1, donde se observa que los valores de PP pueden oscilar entre 78mm y 148mm aproximadamente. Los mayores valores se presentan en el noreste de la región de estudio, siendo la estación más al norte de la provincia de CR (*10470-Corriente Aero*) la de mayor valor con 147,57mm de PP. Los menores valores de PP se encuentran al suroeste y oeste de la región de estudio, siendo la estación más al oeste de CO (*10117-Villa Dolores Aero*) la de menor valor con 78,62mm. Esta distribución de valores de PP coincide con los encontrados por diferentes autores tales como [Penalba y Vargas \(2008\)](#).

A su vez, se analizó cómo cambia la PP acumulada semestral en las distintas fases del ENSO. Para ello, se comparó la cantidad de años ENSO–, ENSOn y ENSO+ para el período 1980-2019, obteniendo 14, 13 y 13 años; respectivamente (Tabla 3.1). En el panel central y derecho de la Figura 3.1 se muestran los *composites* correspondientes a los años ENSO– y ENSO+, respectivamente. Se observa un patrón espacial similar al del período de estudio con mayores valores al noreste y menores valores al oeste y sur, prevaleciendo los valores menores (mayores) a la climatología en la fase ENSO– (ENSO+). La diferencia en los valores de PP entre estas dos fases supera los 60mm en algunas estaciones. Estas diferencias son significativas, sobre todo en las provincias de ER, CR, SF, el sur de CO y gran parte de BA (estaciones representadas con una cruz en el panel central y derecho de la Figura 3.1).

Para el caso de ENSO– el menor valor medio de PP es 72,56mm (*10204-Coronel Suárez Aero* en BA) y el mayor es 127,26mm (*10470-Corriente Aero* en CR), mientras que para el caso ENSO+ los valores son 76,23mm (*10117-Villa Dolores Aero* en CO) y 181,42mm de PP (*10087-Monte Caseros Aero* en CR). Estos valores de PP mayores para fases ENSO+ respecto a ENSO– coinciden con lo encontrado por diferentes autores tales como [Podestá et al. \(1999\)](#),

Reboita et al. (2021), entre otros. La mayor diferencia entre las fases y la climatología se presenta en las estaciones más al norte de la región de estudio. Como ejemplo, se menciona la estación 10346-Paso de los Libres Aero en la provincia de CR, donde el valor medio climatológico semestral es de 141,77mm, mientras que para ENSO– es 112,16mm y para ENSO+ es de 179,32mm.

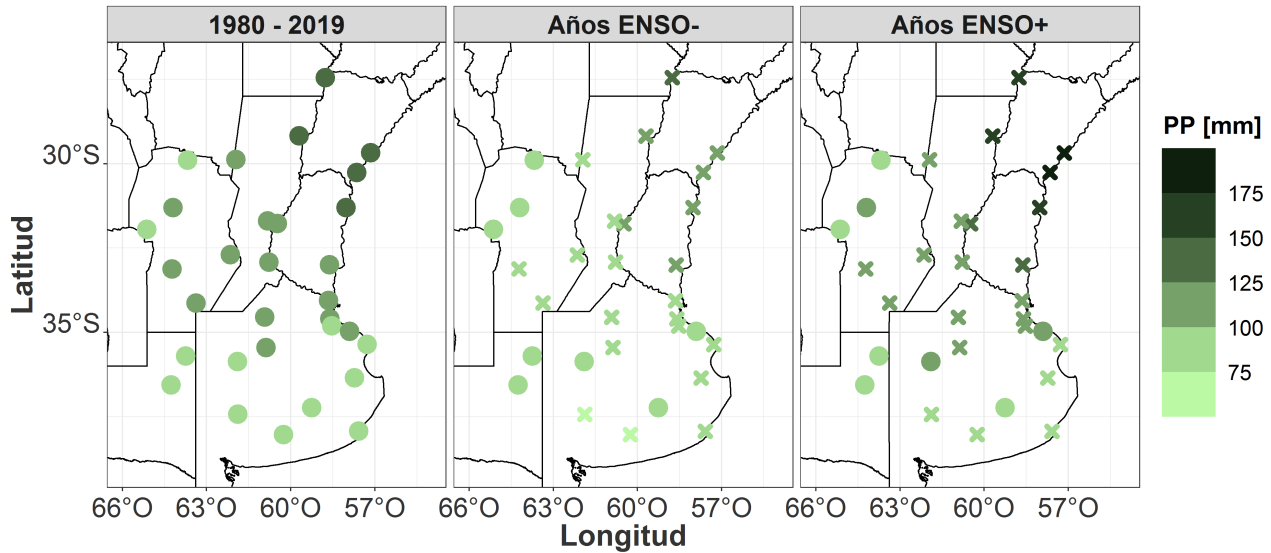


Figura 3.1: Precipitación (PP) acumulada media semestral (mm) de los meses de septiembre a febrero para el período 1980-2019 (panel izquierdo), para años de fase negativa del ENSO (ENSO–, panel central) y para años de fase positiva del ENSO (ENSO+, panel derecho). Las estaciones representadas con una cruz, indican valores medios significativos a un nivel de 0.1.

Años ENSO–	Años ENSOn	Años ENSO+
1983	1980	1982
1984	1981	1986
1988	1985	1987
1995	1989	1991
1998	1990	1994
1999	1992	1997
2000	1993	2002
2005	1996	2004
2007	2001	2006
2008	2003	2009
2010	2012	2014
2011	2013	2015
2016	2019	2018
2017		

Tabla 3.1: Clasificación de años de fase negativa, neutra y positiva del ENSO (ENSO–, ENSOn y ENSO+) a partir del Oceanic Niño Index. El año de referencia corresponde al año de inicio del semestre de estudio.

Hasta ahora se describió el comportamiento esperado de la PP media para el semestre completo de estudio; ahora se estudiará la respuesta a escala mensual. Para ello, se llevó a cabo el análisis de los *composites* de A(PP) media mensual y su significancia para las fases del ENSO (Figura 3.2). Analizando cada fase:

- **ENSO–:** para los meses de octubre a enero predominan los valores negativos de A(PP), siendo mayores y significativas las A(PP) para los meses de noviembre y diciembre. En noviembre, los valores en ENSO– son significativamente distintos de las demás fases en CR, ER, sur de SF y norte de BA; mientras que para las estaciones de LP son significativos solo respecto a ENSOn. Para el mes de diciembre, casi el 90% de las estaciones presentan un valor significativamente distinto respecto a ENSO+. A su vez, los valores son significativamente distintos respecto a ENSOn para las estaciones del norte de CO, de SF, de LP; sureste de SF y de CR y centro de BA.

Durante el mes de enero comienza a disminuir la señal y para febrero se observa inversión de la señal del forzante para la mayoría de las estaciones. Como excepción a lo anterior se mencionan las estaciones *10177-Punta Indio* (BA) y *10346-Paso de los Libres* (ER) que presentan para todo el semestre valores de A(PP) negativos. Durante el mes de enero (febrero) existen algunas estaciones que presentan valores medios significativamente distintos respecto al de ENSO+ (ENSON). Notar que para enero el valor medio de la estación *10148-Laboulaye Aero* (CO) es significativamente distinto respecto al de las otras dos fases ENSO.

A modo de ejemplo, se menciona que para años ENSO– el menor valor de A(PP) es  $-71,66\text{mm}$  durante noviembre y es significativo respecto a las otras fases ENSO (estación *10346-Paso de los Libres Aero* en ER); mientras que el mayor valor de A(PP) es  $+50,01\text{mm}$  durante febrero y es significativo respecto a ENSOn (estación *10134-Gualeguaychú Aero en ER*).

- **ENSON:** para los meses de septiembre y febrero predominan valores de A(PP) negativos, mientras que para los meses de octubre a diciembre predominan valores de A(PP) positivos. Se observa que la A(PP) se encuentra entre  $\pm 40\text{mm}$  aproximadamente, siendo el menor valor  $-38,06\text{mm}$  durante septiembre, significativo respecto a ENSO+ (estación *10087-Monte Caseros Aero* en CR) y el mayor valor  $+44,943\text{mm}$  durante octubre (estación *10477-Concordia Aero* en ER), no significativo. Además, se menciona que estaciones como la *10177-Punta Indio* (BA) presentan siempre A(PP) positivas.

Para esta fase existen muy pocas estaciones que presenten, al mismo tiempo, valores de A(PP) significativos respecto a las otras dos fases ENSO. Por el contrario, y principalmente para los meses de noviembre y diciembre, se observan valores significativos respecto solo a ENSO–.

- **ENSO+:** para el mes de septiembre se observa un marcado comportamiento de A(PP) negativas (positivas) al oeste (este) de la región de estudio. Sin embargo, de octubre a diciembre predominan los valores positivos.

De forma similar a los años ENSO–, para los meses de enero y febrero la mayoría de las estaciones de LP y BA comienzan a disminuir (incluso algunas invierten) la señal. En contraposición, las estaciones *10134-Gualeguaychú Aero* (ER), *10311-Tandil Aero* (BA) y *10477-Concordia Aero* (ER) presentan siempre A(PP) positivas. A su vez, se menciona que el menor valor de A(PP) para años ENSO+ es  $-23,32\text{mm}$  durante octubre (estación *10113-Paraná Aero* en ER) y el mayor valor es  $+90,5\text{mm}$  durante diciembre, significativo respecto a las otras fases ENSO (estación *10477-Concordia Aero* en ER).

Al igual que en fase ENSOn, para la fase ENSO+ existen pocas estaciones que presenten valor significativo respecto a ambas fases, al mismo tiempo. La mayoría de las estaciones del centro y norte de la región de estudio presentan un valor medio de A(PP) distinto respecto a la muestra ENSO– para los meses de noviembre y diciembre.

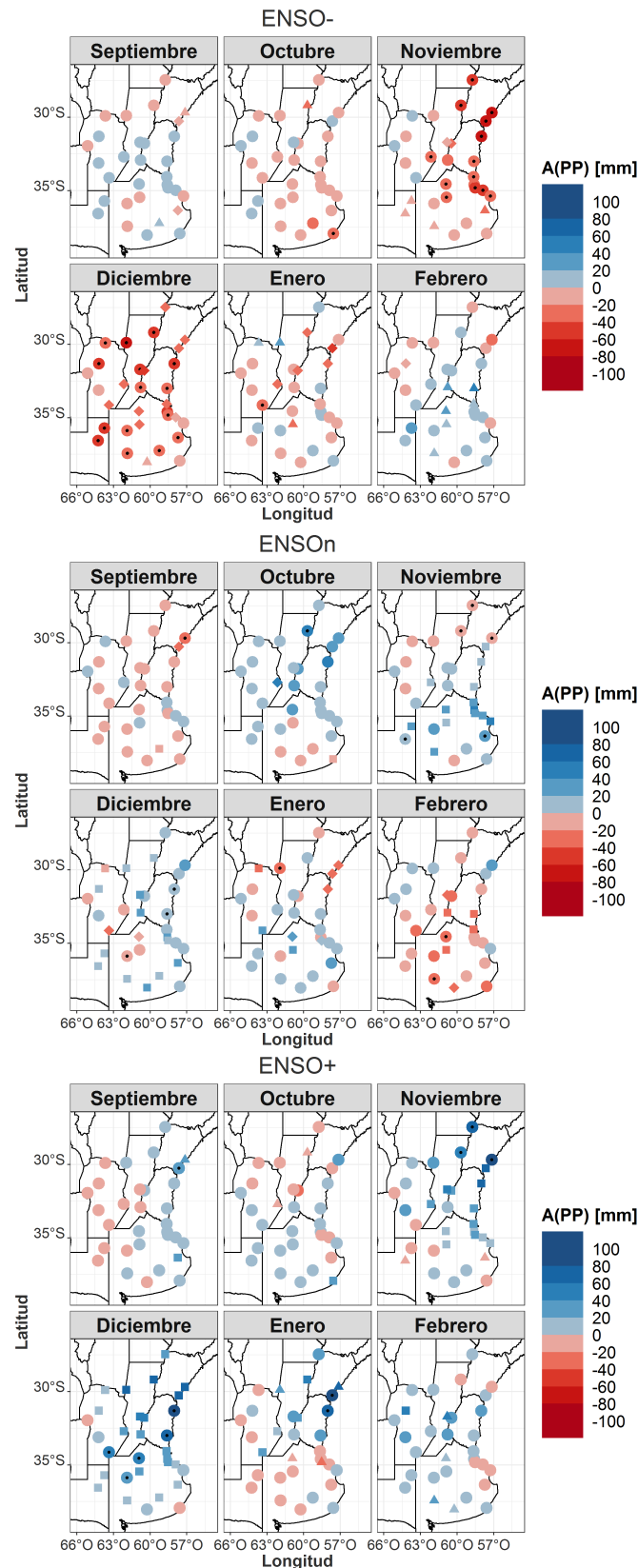


Figura 3.2: *Composite* de anomalías de precipitación mensual (A(P), en mm) para la fase negativa, neutra y positiva del forzante ENSO (ENSO-, ENSOn y ENSO+). Se indica la significancia (nivel de confianza 0.1) respecto a las otras dos fases (punto negro), o bien, respecto a una de las otras fases: ENSO- (cuadrado), ENSOn (triángulo) o ENSO+ (rombo).

Por lo mencionado anteriormente, se puede inferir que el mayor impacto significativo del

ENSO en la PP se observa principalmente en los meses de noviembre y diciembre, en los que existe una marcada A(PP) negativa durante años ENSO<sup>-</sup> y positiva en años ENSO<sup>+</sup>. Esto coincide con lo encontrado por diversos autores, como por ejemplo [Reboita et al. \(2021\)](#), quienes establecen que esta A(PP) es mayor a partir del mes de noviembre hasta febrero del año consecutivo al del inicio del ENSO.

### 3.2. Cantidad de casos de coocurrencia

Para estudiar la coocurrencia de fases de los forzantes seleccionados, se contabilizó, para cada mes, la cantidad de eventos ENSO<sup>-</sup>, ENSOn y ENSO<sup>+</sup> establecidos en la Tabla 3.1, en simultáneo con IOD<sup>-</sup>, IOD<sup>+</sup>, SAM<sup>-</sup> y SAM<sup>+</sup> en el período de estudio. La Figura 3.3 muestra el resultado de la contabilización para la combinación de los distintos años ENSO con las fases del SAM (ENSO<sup>-</sup>SAM<sup>-</sup>, ENSO<sup>-</sup>SAM<sup>+</sup>, ENSOnSAM<sup>-</sup>, ENSOnSAM<sup>+</sup>, ENSO<sup>+</sup>SAM<sup>-</sup> y ENSO<sup>+</sup>SAM<sup>+</sup>). Promediando los seis meses, prevalece ENSO<sup>+</sup> con SAM<sup>-</sup> y ENSO<sup>-</sup> con SAM<sup>+</sup>, coincidente con resultados encontrados por diferentes autores tales como [Gong et al. \(2010\)](#) y [Fogt et al. \(2011\)](#). Al analizar mensualmente, durante octubre y febrero predominan los casos ENSOnSAM<sup>+</sup>, mientras que de noviembre a enero prevalece la ocurrencia de casos ENSO<sup>-</sup>SAM<sup>+</sup>. Por lo tanto, como resultado de lo antes mencionado, se observa que prevalece una mayor coocurrencia de años ENSO con SAM<sup>+</sup>. Septiembre no presenta marcada diferencia entre las distintas combinaciones de fases entre ambos forzantes.

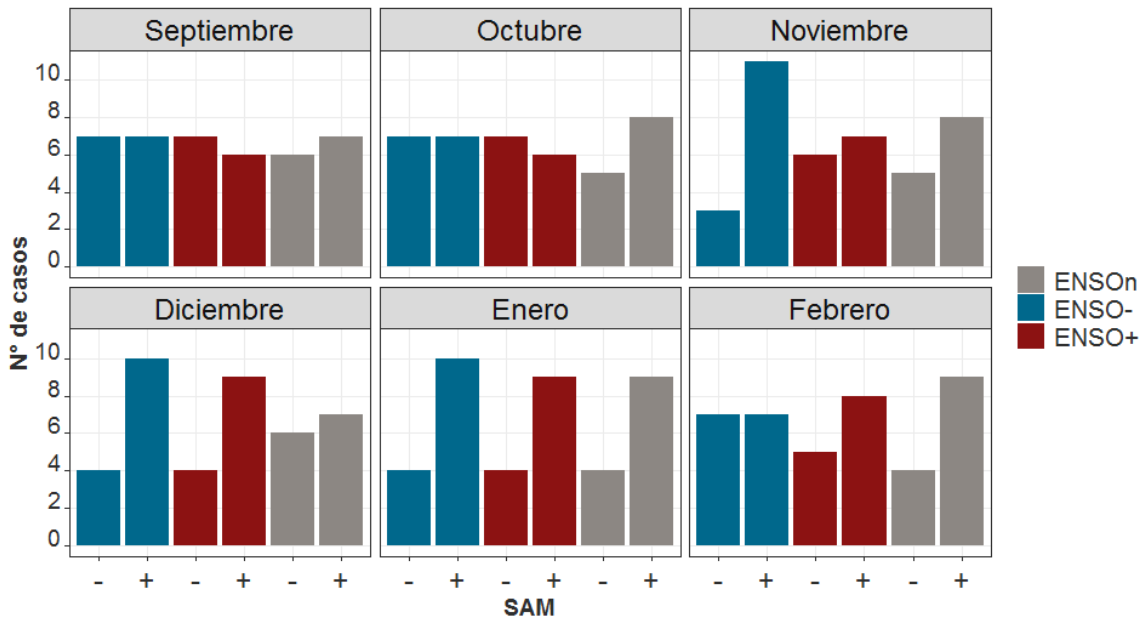


Figura 3.3: Cantidad de casos como resultado de la coocurrencia entre años negativo, neutro y positivo del ENSO (ENSO<sup>-</sup>, ENSOn y ENSO<sup>+</sup>) con fases positiva y negativa del SAM (SAM<sup>-</sup> y SAM<sup>+</sup>) para los meses de septiembre a febrero. Los símbolos “-“ y “+” en el eje de abscisas corresponden a las fases negativa y positiva del SAM.

Los meses de septiembre, octubre y febrero presentan la misma cantidad de casos para la coocurrencia de fases SAM con ENSO<sup>-</sup>. El mes de noviembre presenta la mayor diferencia entre SAM<sup>-</sup> y SAM<sup>+</sup> en combinación con años ENSO<sup>-</sup>, siendo menor la cantidad de casos ENSO<sup>-</sup>SAM<sup>-</sup> (3) con respecto a ENSO<sup>-</sup>SAM<sup>+</sup> (11).

La Figura 3.4 muestra el resultado de la contabilización para la combinación de los distintos años ENSO con las fases del IOD (ENSO-IOD-, ENSO-IOD+, ENSOnIOD-, ENSOnIOD+, ENSO+IOD- y ENSO+IOD+). Promediando los seis meses, es mayor la coocurrencia de años ENSO- y ENSOn con IOD-, y la coocurrencia de años ENSO+ con IOD+, coincidiendo con resultados encontrados por diferentes autores, tales como [Hong et al. \(2008\)](#); [Luo et al. \(2010\)](#) y [Yang et al. \(2018\)](#). Esta prevalencia de coincidencia de igual fase de forzantes es más marcada en los meses de septiembre a diciembre. En particular, el mes de noviembre presenta la mayor diferencia para IOD entre las combinaciones ENSO-IOD+ (2 casos) y ENSO-IOD- (12 casos). Durante enero y febrero, disminuye la diferencia de cantidad de casos para todas las combinaciones de fases, principalmente para las fases ENSOn y ENSO+.

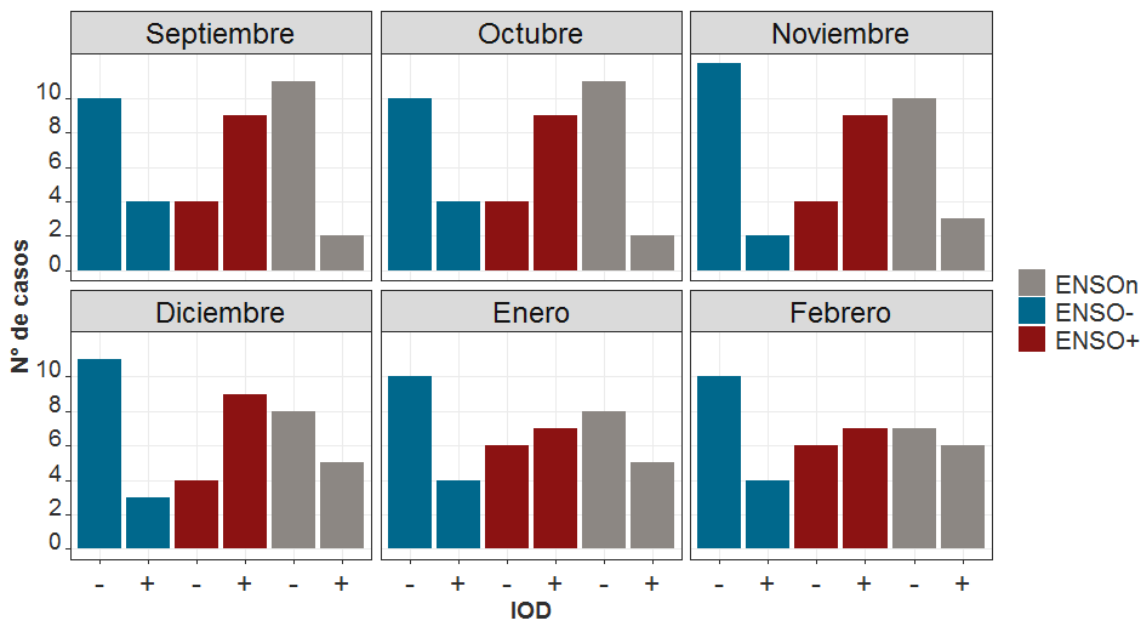


Figura 3.4: Ídem Figura 3.3, pero para el IOD.

### 3.3. Impacto en la precipitación bajo la coocurrencia de forzantes

Una vez descrita la señal del ENSO en la PP y la cantidad de casos de coocurrencia entre los forzantes remotos seleccionados, se analizó el impacto sobre la PP. Para esto, se calcularon los valores medios (*composite*) de A(PP) bajo las distintas combinaciones de los forzantes. A su vez, para cada fase ENSO, se testearon las diferencias entre las dos fases de cada uno de los otros forzantes. Los resultados se presentan mes a mes.

- Septiembre:** Cuando los forzantes ENSO e IOD están en la misma fase, prevalecen las A(PP) negativas, al igual que el caso ENSOnIOD- (panel izquierdo de la Figura 3.5), que son las combinaciones que predominan para este mes (Figura 3.4). Lo contrario ocurre cuando las fases están cruzadas, si bien son pocos casos (Figura 3.4). Para los casos de ENSOnIOD+, prevalecen A(PP) positivas (negativas) en el centro (norte y sur) de la región de estudio. Tener en cuenta que, para este último caso, el *composite* está conformado por sólo 2 casos (Figura 3.4). A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es  $-52,9\text{mm}$ ,



significativo para ENSOnIOD+ (estación *10470-Corrientes Aero* en CR), y el mayor valor de A(PP) es +43,2mm para ENSO+IOD- (estación *10087-Monte Caseros Aero* en ER).

Cuando el ENSO se combina con fases SAM (panel derecho de la Figura 3.5), la mayor señal se presenta para años ENSOn con coocurrencia de fase SAM+ (SAM-), en los que prevalecen valores positivos (negativos) significativos de A(PP) en más del 60% de las estaciones. Para estos casos ENSOn, se puede analizar las diferencias entre las dos fases SAM. Se ha estudiado que para SAM+ (SAM-) predominan condiciones secas (húmedas) en el sur de Sudamérica y condiciones húmedas (secas) entre las regiones del sureste y noreste de Brasil; sin embargo, [Reboita et al. \(2021\)](#) encuentran que dicho patrón presenta cierta variabilidad estacional. En coincidencia con lo encontrado para la primavera por dichos autores, durante SAM- predominan A(PP) negativas en la región de estudio, a excepción del noreste de la provincia de BA. Por otro lado, para el caso SAM+, no toda la región presenta A(PP) positivas. A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es -54,74mm (estación *10346-Paso de los Libres Aero* en CR) y el mayor es +32,26mm (estación *10159-El Palomar Aero* en BA), ambos para ENSOnSAM-.

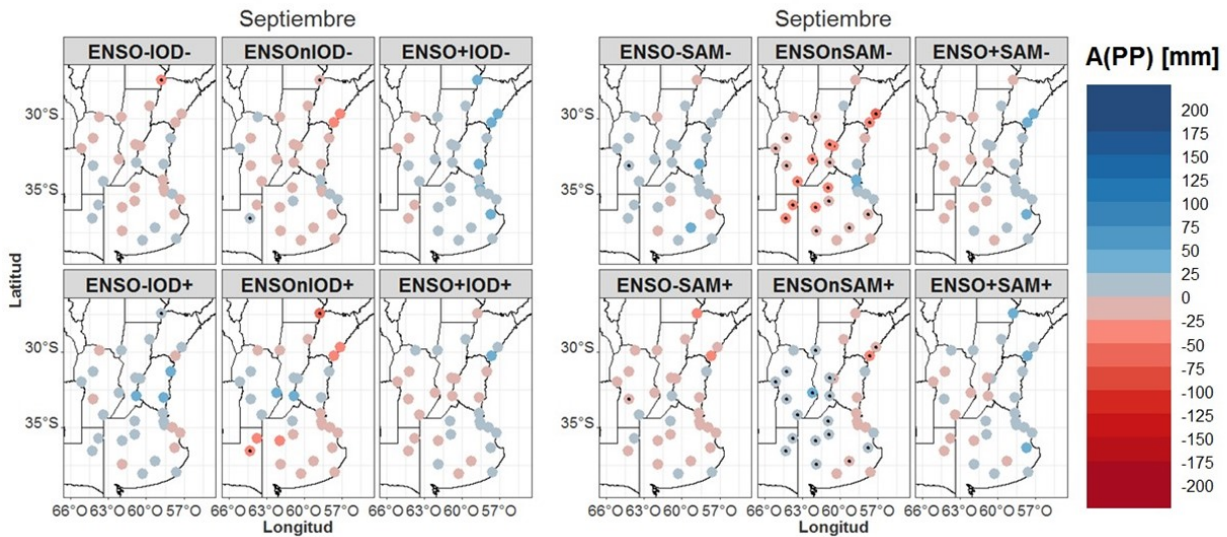


Figura 3.5: *Panel izquierdo:* Composite de anomalías de precipitación (A(PP)) para el mes de septiembre para casos de coocurrencia de años negativo, neutro y positivo del ENSO (ENSO-, ENSOn y ENSO+) con fase positiva y negativa del IOD (IOD- y IOD+). *Panel derecho:* Ídem panel izquierdo, pero para forzante SAM (SAM- y SAM+). Las estaciones con un punto negro en el centro representan valores medios significativos a un nivel de 0.1.

- **Octubre:** La respuesta de la A(PP) a la coocurrencia del ENSO y el IOD en este mes (panel izquierdo de la Figura 3.6), cuando los dos forzantes están en fase, es similar a la analizada bajo la sola ocurrencia del ENSO (Figura 3.2). Cuando ocurre ENSO+IOD-, se presenta una inversión de la señal respecto a ENSO+IOD+ y a ENSO+ (Figura 3.2) para estaciones de LP y BA, entre las cuales *10334-General Pico Aero* (LP) y *10190-Dolores Aero* (BA) presentan valores significativos. De la misma manera, para ENSO-IOD+, se observa una clara inversión de la señal hacia el noreste de la región de estudio, en la que la estación *10087-Monte Caseros Aero* (CR) presenta un valor significativo respecto al valor medio para ENSO-IOD-. Sin embargo, se debe tener en cuenta que son pocos los casos en los que se combinan las fases de los dos forzantes en forma opuesta (Figura 3.4). Es interesante destacar la respuesta al IOD cuando la señal del ENSO es débil, por encontrarse en fase neutral. Para los dos casos de ENSOnIOD+, se observa gran intensificación

de los valores de A(PP) obteniendo que el 45 % de las estaciones presenta un aumento de más de 50mm de PP respecto al valor esperado. A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es  $-45,59\text{mm}$  (estación *10081-Ceres Aero* en SF), significativo, mientras que el mayor valor de A(PP) es  $+206,66\text{mm}$  (estación *10477-Concordia Aero* en ER), no significativo, ambos para ENSOnIOD+.

La respuesta de las A(PP) durante este mes indica que la acción combinada de los forzantes ENSO± y SAM+ debilitan, e incluso invierten, la señal para gran parte de la región de estudio (panel derecho de la Figura 3.6), con respecto a lo analizado en la Figura 3.2. En cambio, para SAM− en coocurrencia con ENSO− (ENSO+), prevalecen las A(PP) negativas (positivas), en concordancia con la Figura 3.2. La influencia de este forzante es determinante en los años en que el ENSO se encuentra en fase neutral, dando como respuesta A(PP) opuestas con SAM+ o SAM− para estaciones del centro-sur de BA, con valores significativos coincidiendo, en signo, con los encontrados por [Reboita et al. \(2021\)](#). A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es  $-54,34\text{mm}$  para ENSO+ con SAM+, mientras que el mayor valor de A(PP) es de  $+86,37\text{mm}$  para ENSO+ con SAM−, ambos significativos para la estación *10346-Paso de los Libres Aero* (CR).

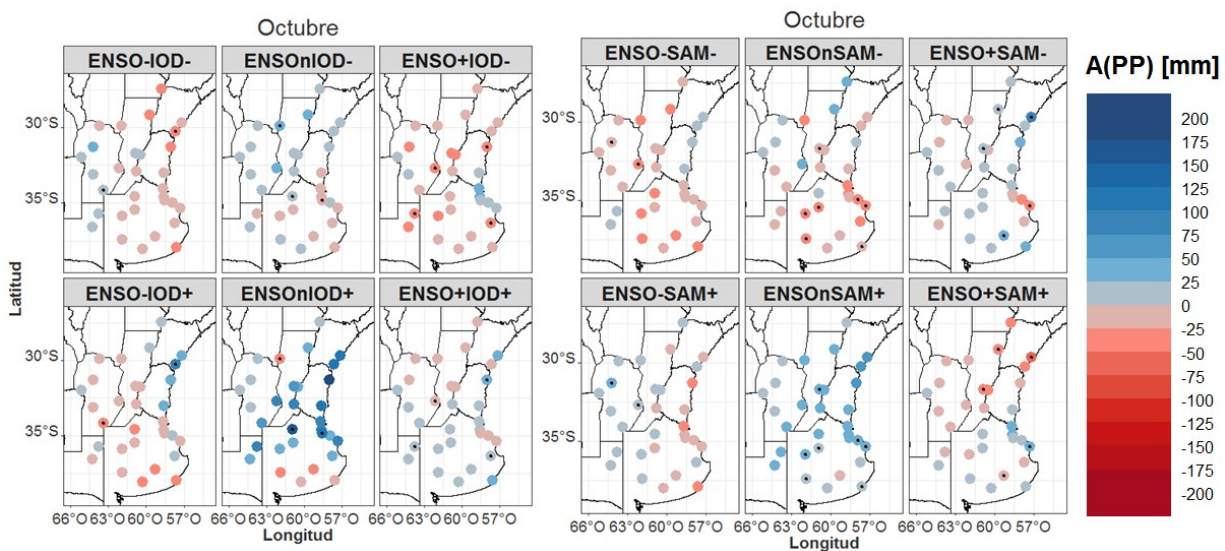


Figura 3.6: Ídem Figura 3.5, pero para octubre.

- Noviembre:** la respuesta de las A(PP) durante este mes para la combinación de ENSOn con las fases IOD es similar a la señal respecto a lo analizado en la Figura 3.2 (panel izquierdo de Figura 3.7). El caso de ENSO−IOD+ presenta una inversión de la señal al sur de la provincia de BA y de LP con respecto al *composite* de ENSO−IOD− y de ENSO− (Figura 3.2), lo que genera que estaciones como *10192-Santa Rosa Aero* (LP) y *10210-Mar del Plata Aero* (BA) presenten valores medios significativos. A su vez, para el caso ENSO+IOD− se observa una inversión de la señal en las estaciones de LP con respecto a los *composites* de ENSO+IOD+ y de ENSO+ (Figura 3.2) obteniendo un valor medio significativo en la estación *10334-General Pico Aero* (LP). El menor valor de A(PP) es  $-87,71\text{mm}$  (estación *10346-Paso de los Libres Aero* en CR) para ENSO−IOD+, mientras que el mayor valor de A(PP) es  $+174,5\text{mm}$  (estación *10087-Monte Caseros Aero* en CR) para ENSO+IOD−.

Por otro lado, para el caso ENSO−SAM+ (ENSO+SAM+) predominan valores negativos (positivos) aunque de menor valor absoluto respecto a la Figura 3.2 (panel derecho de



la Figura 3.7). Durante casos ENSO+SAM−, se invierte la señal en gran parte de las estaciones de la provincia de BA y del norte de CO con respecto a los *composites* de ENSO+SAM+, presentando valores significativos en gran parte de dichas estaciones. Durante la combinación de la fase ENSOn con SAM− (SAM+), prevalecen valores negativos (positivos). A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es −72,11mm (estación 10309-Reconquista Aero en SF) para ENSO−SAM+, mientras que el mayor valor de A(PP) es +156,54mm (estación 10470-Corrientes Aero en CR) significativo para el caso ENSO+SAM−.

Cuando ENSOn se combina con IOD− o SAM+, se observa un comportamiento similar de A(PP) en este mes. Notar que, para estos casos, no se obtuvieron valores significativos, a excepción de una o dos estaciones.

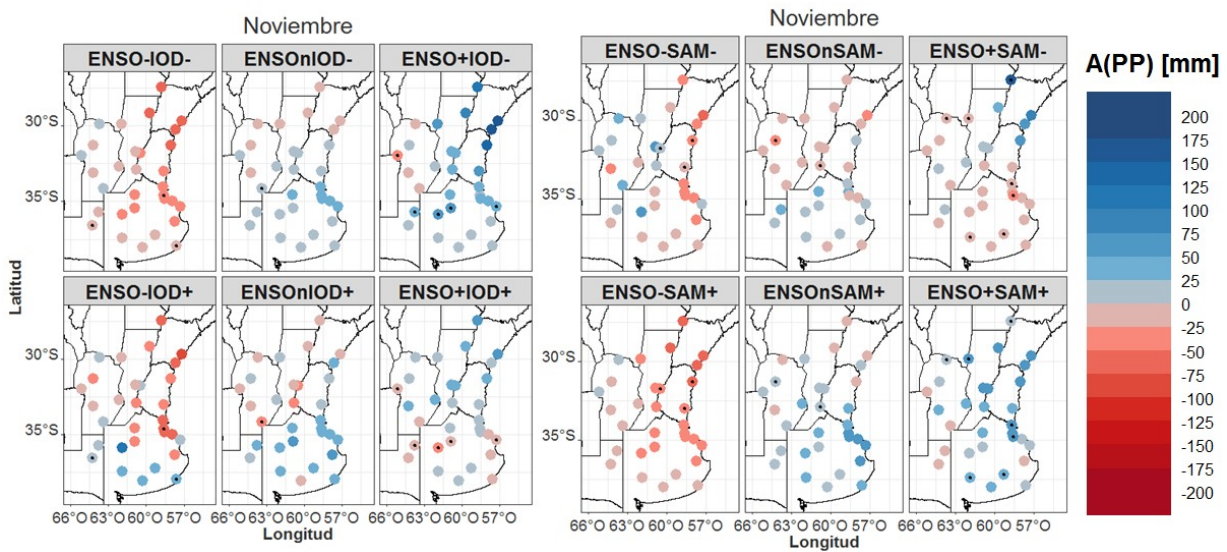


Figura 3.7: Ídem Figura 3.5, pero para noviembre.

- Diciembre:** se observa que para este mes la acción combinada de los forzantes ENSO e IOD refuerza la señal, respecto a Figura 3.2, razón por la cual se representa con una escala mayor. Se observan A(PP) negativas (positivas) más intensas en fases ENSO−IOD− (ENSO+IOD+) (panel izquierdo de la Figura 3.8). Para el caso ENSO−IOD+, predominan valores negativos, sin cambios en el signo de la señal respecto a la combinación ENSO−IOD− a excepción de estaciones como 10177-Punta Indio (BA), que presentan una diferencia significativa entre dichas muestras. Esto no sucede para el caso de ENSO+ con fases IOD, donde se invierte la señal de estaciones del este de BA respecto a ENSO+IOD+ y a ENSO+, y donde se presentan valores medios de A(PP) significativos. Para el caso en que IOD− se combina con ENSOn, se invierte la señal de estaciones al noreste de la región de estudio respecto a ENSOnIOD+ y a ENSOn. Es decir, se destaca en este mes el rol del forzante IOD, sobre todo en fases ENSOn y ENSO+. A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es −87,45mm significativo para ENSO−IOD+ (estación 10309-Reconquista Aero en SF), mientras que el mayor valor de A(PP) es +129,36mm no significativo para ENSO+IOD+ (estación 10477-Concordia Aero en ER).

La respuesta de las A(PP) durante este mes pone en evidencia que la acción combinada de los forzantes ENSO y SAM refuerza la señal, respecto a lo analizado en la Figura 3.2 (panel derecho de la Figura 3.8). Durante ENSO− (ENSO+), prevalecen las A(PP) negativas (positivas) independientemente de la fase SAM de ocurrencia. Sin embargo, en

ambos casos las A(PP) son más húmedas en la fase SAM−: A(PP) menos negativas en ENSO− y más positivas en ENSO+. A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es −86,29mm (estación 10334-General Pico Aero en LP) significativo para ENSO−SAM−, mientras que el mayor valor es +169,15mm no significativo (estación 10081-Ceres Aero en SF) para el caso ENSO+SAM−. Para la fase ENSOn, en combinación con las fases SAM, existe una marcada diferencia en el impacto de la señal en el sector este de la región de estudio, presentando valores positivos (negativos), aunque no significativos, para fase SAM− (SAM+).

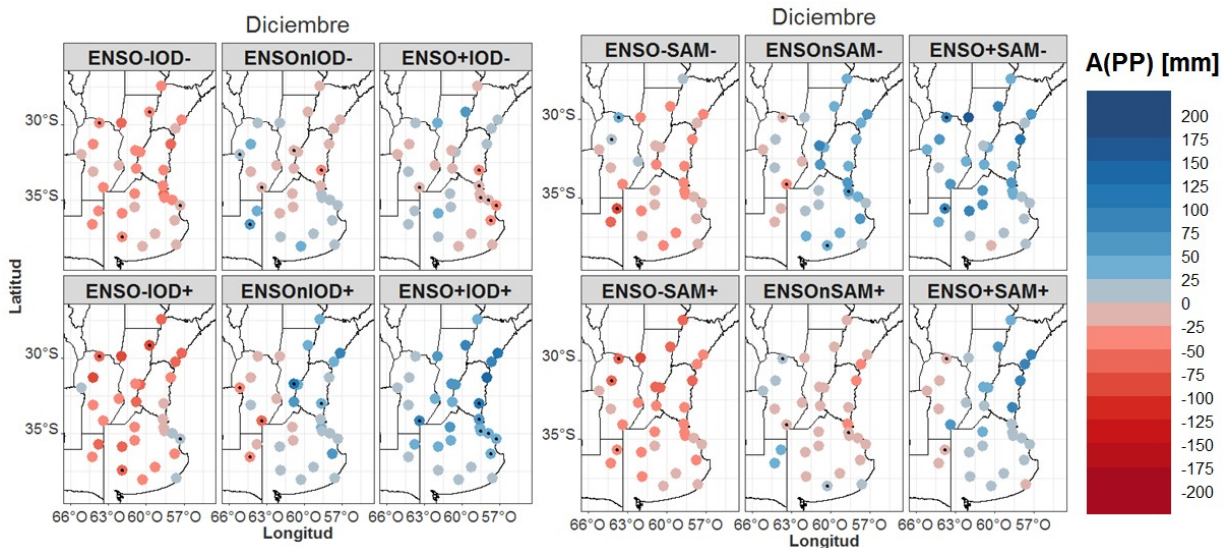


Figura 3.8: Ídem Figura 3.5, pero para diciembre.

- Enero:** La respuesta de las A(PP) durante este mes establece que la acción combinada de los forzantes ENSO con el IOD (panel izquierdo de la Figura 3.9) debilita e incluso invierte la señal para gran parte de la región de estudio respecto a lo analizado en la Figura 3.2. Como ejemplo, se menciona lo que sucede en el caso ENSO+IOD− para el sector norte de la región, en la cual estaciones como 10470-Corrientes Aero (CR) y 10087-Monte Caseros Aero (CR) presentan valores medios negativos significativamente distintos de los valores positivos de las muestras de ENSO+IOD+. Además, se destaca el rol del IOD en fases ENSOn, en las que se observa que, para la coocurrencia con IOD− (IOD+), prevalecen valores de A(PP) positivos (negativos). A modo de ejemplo, el menor valor significativo de A(PP) es −84,39mm para ENSOnIOD+, mientras que el mayor valor significativo de A(PP) es +168,5mm para ENSO+IOD+ (ambos para la estación 10087-Monte Caseros Aero en CR).

Para la acción combinada de ENSO−SAM+ y ENSO+SAM− (panel derecho de la Figura 3.9) también se debilita la señal, para la mayoría de las estaciones, respecto a lo analizado en la Figura 3.2. Por ejemplo, para estaciones de ER y del este de SF, existe una inversión de la señal en ENSO+SAM+ respecto de ENSO+ (Figura 3.2). En esta misma región, estaciones tales como 10113-Paraná Aero (ER) y 10134-Gualeguaychú Aero (ER) presentan valores medios significativos entre las muestras ENSO+ combinado con SAM− y SAM+. A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es −77,46mm para ENSO−SAM−, mientras que el mayor valor de A(PP) es +121,9mm para el caso ENSO+SAM+ (ambos no significativos para la estación 10087-Monte Caseros Aero en CR).

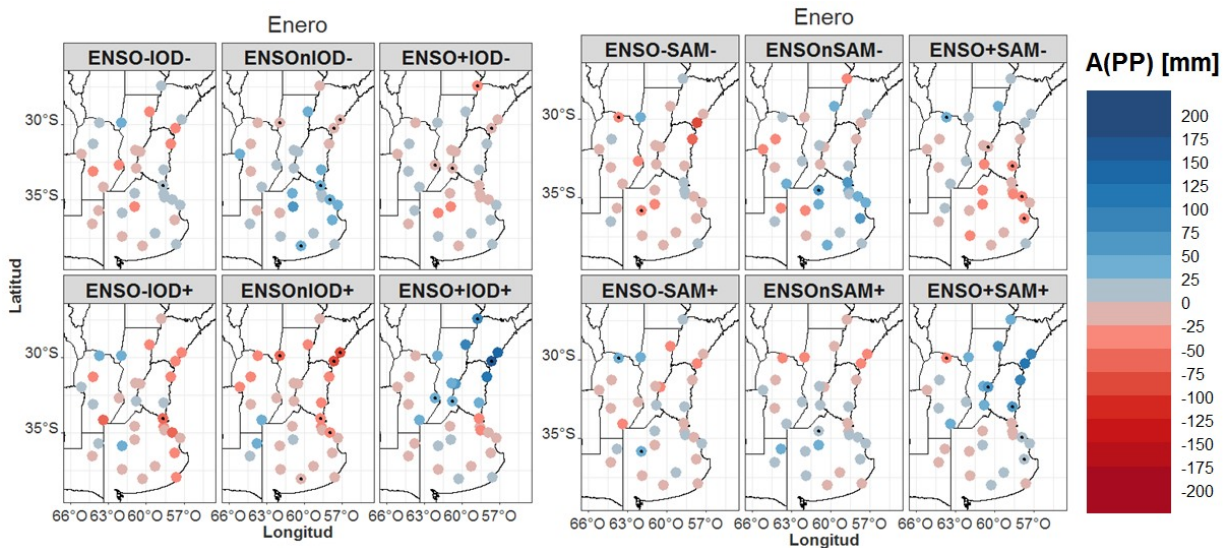


Figura 3.9: Idem Figura 3.5, pero para enero.

- Febrero:** durante este mes cuando los forzantes ENSO e IOD están los dos en fase positiva o los dos en fase negativa, si bien los valores son bajos, prevalecen las A(PP) positivas (panel izquierdo de la Figura 3.10). Para los casos de ENSO–IOD+ se observa inversión de los valores de A(PP) para las estaciones de BA, respecto a lo analizado en los *composites* de ENSO–IOD– y de ENSO– (Figura 3.2). El menor valor de A(PP) es  $-60,58\text{mm}$  (estación 10170-La Plata Aero en BA), mientras que el mayor valor es  $+90,85\text{mm}$  (estación 10138-Rio Cuarto Aero en CO), ambos significativos y para ENSO+IOD–.

La respuesta de las A(PP) establece que para ENSO–SAM–, predominan los valores positivos (panel derecho de la Figura 3.10). Además, se observan A(PP) negativas para ENSO–SAM+, lo que genera una inversión de la señal en gran parte de la región de estudio respecto a los *composites* de ENSO–SAM– y de ENSO– (Figura 3.2) para la región de estudio. A modo de ejemplo, el menor valor de A(PP) es  $-105,34\text{mm}$  (estación 10113-Paraná Aero en ER), significativo para el caso ENSOnSAM–, y el mayor valor de A(PP) es  $+98,03\text{mm}$  (estación 10134-Gualeguaychú Aero en ER), no significativo para el caso ENSO–SAM–. En los casos ENSOnSAM– prevalecen valores negativos y significativos de A(PP), a diferencia de lo esperado, lo cual podría atribuirse a la poca cantidad (4) de casos. En el caso de coocurrencia con SAM+, se observa gran variabilidad de signos de valores significativos de A(PP).



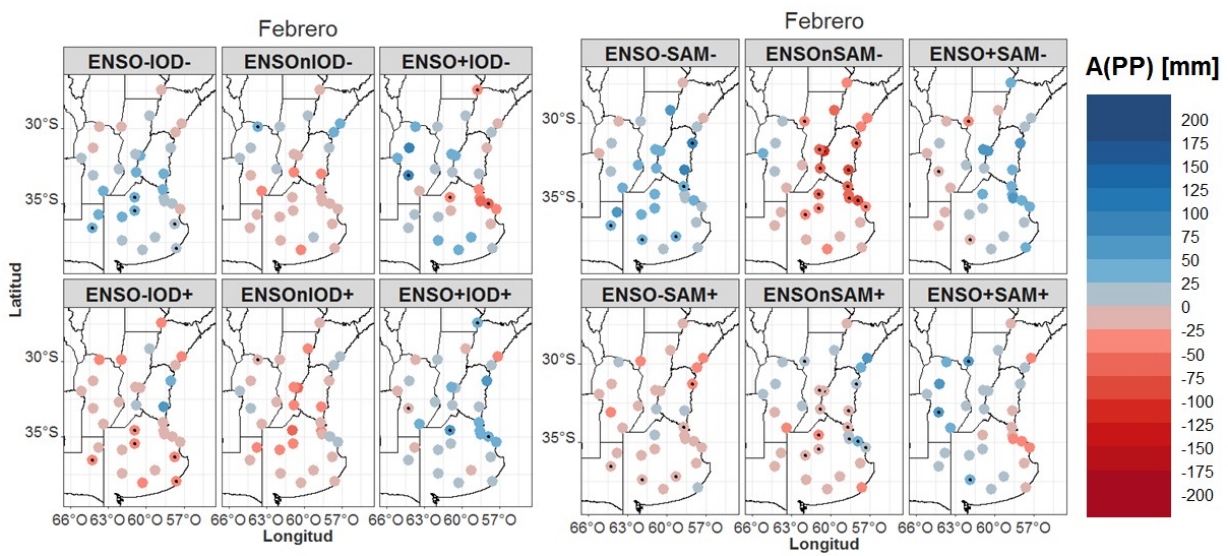


Figura 3.10: Ídem Figura 3.5, pero para febrero.

# Capítulo 4

## Variabilidad entre eventos de forzantes combinados

En este capítulo se analiza el segundo objetivo específico de esta tesis. Este consiste en analizar la variabilidad entre eventos de los forzantes combinados, haciendo hincapié en los casos que presentaron mayor cantidad de estaciones significativas. A su vez, se identifican casos particulares de estudio.

### 4.1. Representatividad de los *composites*

La gran variabilidad entre eventos que caracteriza la ocurrencia de los forzantes analizados implica una variabilidad en la respuesta de la PP. Como consecuencia, el valor medio que se observa en los *composites* podría ser representativo o no de los casos particulares. Es por ello que se analizó cuán representativo es el valor de la media para la distribución de  $A(PP)$ . En la Figura 4.1 se muestran los resultados únicamente para las combinaciones que presentan la mayor cantidad de estaciones significativas para cada mes. La mayor representatividad de los *composites* se da para la coocurrencia de fases SAM para la primavera y de fases IOD durante el verano.

Los valores oscilan entre un 25 % y 100 %. Por un lado, con respecto a valores de representatividad del 100 %, se observan 20 casos distribuidos entre los meses de estudio: 7 en septiembre para la combinación ENSOnSAM $-$  ( $n = 6$ ), 1 en octubre para ENSOnSAM $-$  ( $n = 5$ ), 2 en noviembre para ENSO+SAM $-$  ( $n = 2$ ), 2 en diciembre para ENSO+IOD $-$  ( $n = 4$ ), 1 en diciembre para ENSO+IOD $+$  ( $n = 9$ ), 4 en enero para ENSOnIOD $+$  ( $n = 5$ ) y 3 en febrero para ENSO-IOD $+$  ( $n = 4$ ). En general, estos valores altos de representatividad (mayores al 70 %) predominan durante septiembre (fines de enero/febrero) en fase SAM $-$  (IOD $+$ ).

Por otro lado, una representatividad del 50 % indica que la mitad de los casos observados presenta valores opuestos al del *composite*; por lo tanto, esto no representa una idea real de cuál es el impacto o el comportamiento de la PP esperado en determinada estación durante un cierto mes. Esta situación se presenta 61 veces:

- 4 estaciones para septiembre ENSOnSAM $-$  ( $n = 6$ );
- 10 estaciones para octubre ENSOnSAM $+$  ( $n = 8$ );
- 6 estaciones para noviembre ENSO+SAM $-$  ( $n = 6$ );
- 14 estaciones para diciembre ENSO+IOD $-$  ( $n = 4$ );

- 9 estaciones para enero ENSOnIOD- ( $n = 8$ );
- 7 estaciones para ENSO-IOD- ( $n = 10$ ) y 11 para ENSO-IOD+ ( $n = 4$ ) durante el mes de febrero.

Por último, se mencionan los 6 casos con un porcentaje del 25%: 3 para diciembre y 3 para febrero. A modo de ejemplo, se menciona uno correspondiente al mes de febrero para la estación 10369-Marco Juárez Aero (CO) durante la coocurrencia de ENSO-IOD+ ( $n = 4$ ). Por lo tanto, el signo negativo del valor medio está dado solo por el evento con  $-114,33\text{mm}$  de A(PP) del año 2018, mientras que para los eventos restantes se observaron valores de  $+43,97\text{mm}$  (2009),  $+23,97\text{mm}$  (2011) y  $+20,27\text{mm}$  (2017). A su vez, se observa que, para meses como noviembre en fase SAM- y diciembre en fase IOD-, hay una menor representatividad en el centro-este y en el centro-oeste, respectivamente. Para los meses de enero y febrero en fase IOD-, se observa una mayor prevalencia de valores no representativos.

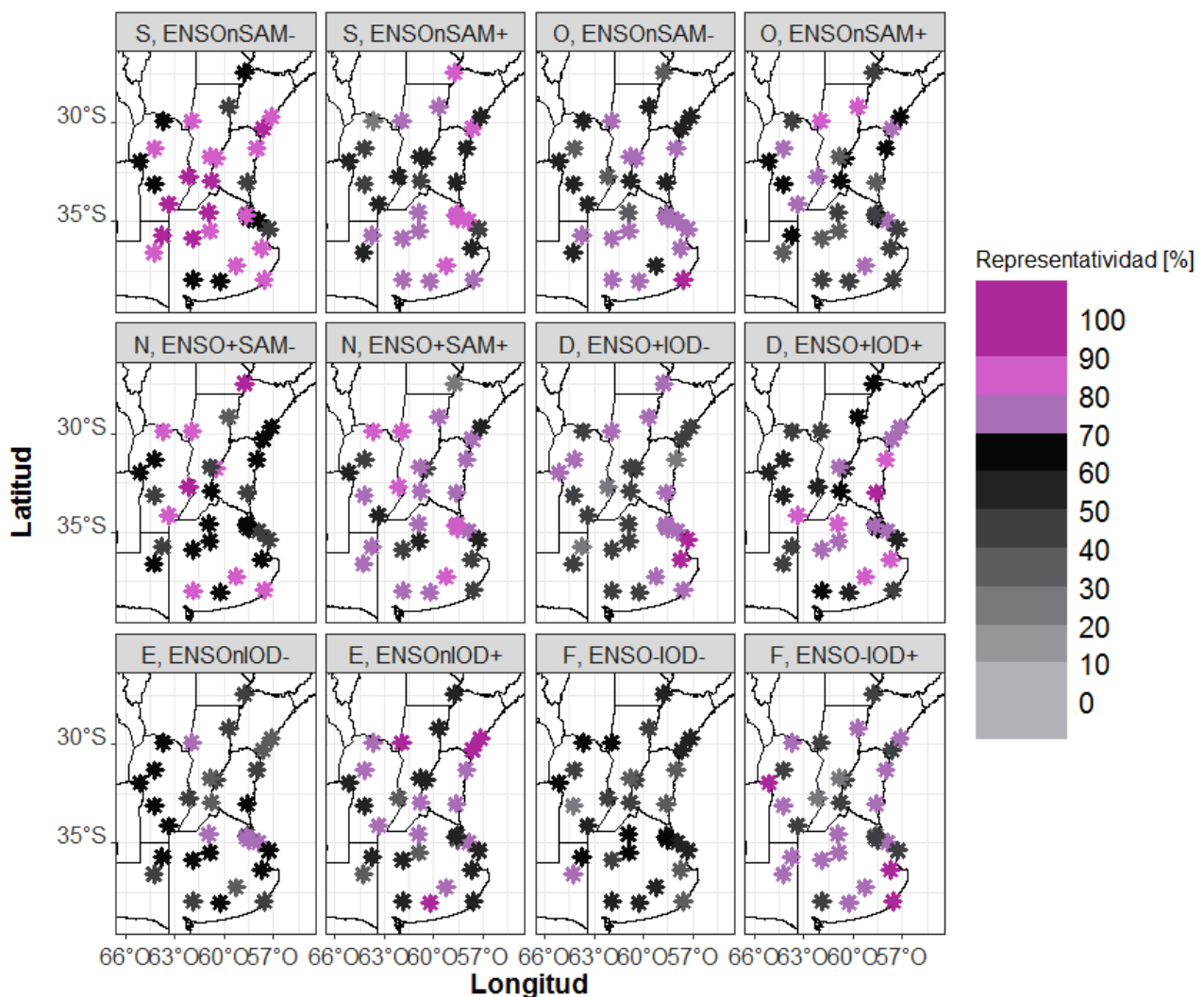


Figura 4.1: Representatividad [%] de los *composites* para los meses de septiembre (S, ENSOnSAM- y S, ENSOnSAM+), octubre (O, ENSOnSAM- y O, ENSOnSAM+), noviembre (N, ENSO+SAM- y N, ENSO+SAM+), diciembre (D, ENSO+IOD- y D, ENSO+IOD+), enero (E, ENSOnIOD- y E, ENSOnIOD+) y febrero (F, ENSO-IOD- y F, ENSO-IOD+).

## 4.2. Variabilidad de anomalías de precipitación

Como se obtuvo en la subsección anterior, no siempre el valor del *composite* de A(PP) es representativo de eventos individuales debido a la variabilidad en el impacto de la PP. A modo de ejemplo, se analiza la variabilidad de las A(PP) a través de gráficos tipo *boxplot* para los casos de ENSOn con SAM durante septiembre, ENSO+ con SAM durante noviembre, ENSO+ con IOD durante diciembre y ENSO- con IOD durante febrero.

Las estaciones representadas en los *boxplots* están ordenadas en el *eje x* conforme al criterio geográfico de norte a sur y de oeste a este, tanto por provincia como por las estaciones que las componen, siguiendo los colores, según se muestra en la Figura 4.2. Se decidió establecer este tipo de discretización para facilitar la identificación de estaciones, sin aplicar una regionalización metodológica que habría resultado diversa para cada mes y combinación de forzantes.

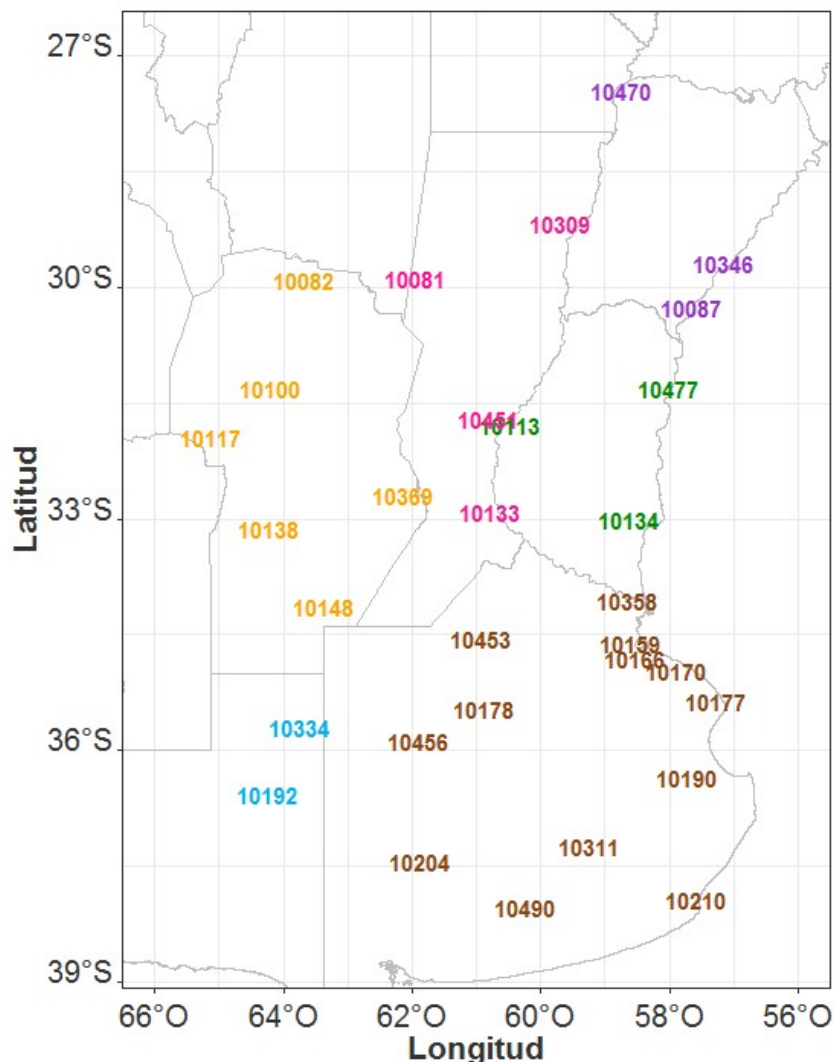


Figura 4.2: Distribución de las estaciones. Cada color representa estaciones de una provincia diferente.

Para septiembre (Figura 4.3) se presentan los casos ENSOn en combinación con SAM- ( $n = 6$ ) y SAM+ ( $n = 7$ ). En concordancia con lo presentado en el capítulo anterior, se observa que la combinación de estos forzantes tiene impactos variables en las distintas estaciones. En términos generales, el intervalo intercuartílico (IQR) se encuentra en concordancia con los valores negativos de la media y la mediana en eventos ENSOnSAM-, a excepción del noreste de la

provincia de BA y otras 5 estaciones dispersas en la región de estudio. En cambio, para eventos ENSOnSAM+, si bien el *composite* presentaba predominancia de valores positivos, la mayoría de las estaciones presentan una distribución que abarca valores positivos y negativos, evidenciando la variabilidad de este evento.

Existen valores atípicos de A(PP) que alcanzan los +100mm en el norte o +150mm en el sur de la región de estudio, según la combinación, lo que podría afectar el resultado de la media de la distribución. A su vez, se observa que estaciones tales como *10334-General Pico Aero* (LP) y *10311-Tandil Aero* (BA), para SAM-, y estaciones como *10166-Ezeiza Aero* (BA) y *10190-Dolores Aero* (BA), para SAM+, presentan valores atípicos en ambos extremos, lo que podría indicar una mayor dispersión de los datos y la presencia de diferentes grupos dentro de la misma distribución (principalmente para los casos de las estaciones de BA, que presentan valores atípicos negativos y positivos). En particular, para estas 4 estaciones se observa que la media y la mediana de la distribución son similares, pero la variabilidad y la presencia de valores *outliers* sugieren una posible distribución multimodal.

Para la provincia de CR las estaciones más al norte durante la combinación con SAM-(SAM+) presentan una simetría hacia la derecha (izquierda); mientras que la estación más al sur pareciera tener una distribución más simétrica. Para las estaciones de LP y para la combinación con SAM+, la estación más al norte tiene una simetría hacia la izquierda, mientras que la estación más al sur, hacia la derecha. Las estaciones de ER para SAM+(SAM-) parecieran tener una distribución simétrica (asimétrica).

Estaciones como *10470-Corrientes Aero* (norte de CR), *10134-Gualeguaychú Aero* (sur de ER) y *10490-Tres Arroyos* (sur de BA) para SAM-, presentan una gran variabilidad interna o extensión de los datos, ya sea por el IQR o por los bigotes. De manera similar, estaciones como *10346-Paso de los Libres Aero* (centro de CR), *10100-Córdoba Aero* (CO), *10369-Marco Juárez Aero* (CO), *10138-Río Cuarto Aero* (CO), *10133-Rosario Aero* (sur de SF), *10477-Concordia Aero* (norte de ER), *10178-Nueve de Julio Aero* (centro de BA) y *10456-Pehuajo Aero* (centro de BA), para SAM+, también presentan esta característica.

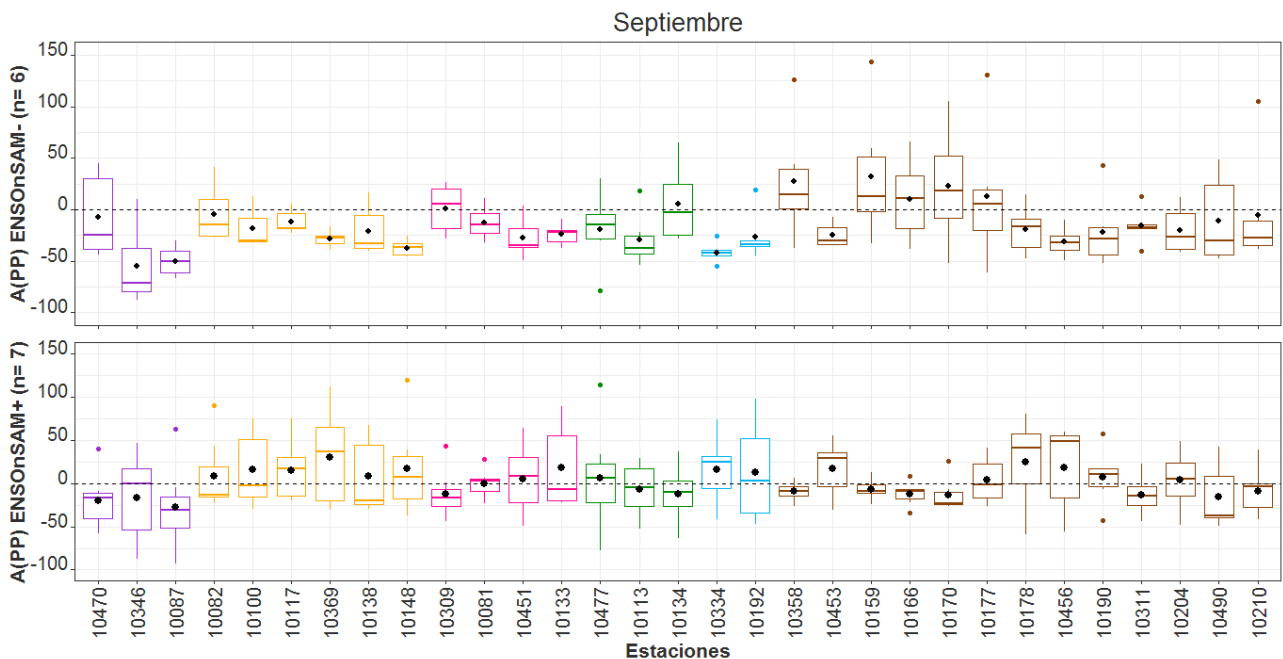


Figura 4.3: *Boxplot* de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSOn con SAM- (arriba) y con SAM+ (abajo) durante el mes de septiembre. El punto de color negro indica la media.



Para noviembre (Figura 4.4) se presenta el *boxplot* de ENSO+ en combinación con SAM− ( $n = 6$ ) y con SAM+ ( $n = 7$ ). Para el primer caso, se observan valores atípicos de A(PP) de hasta +400mm, por lo que se podría pensar que, en este caso, la presencia de algún evento extremo podría afectar el resultado de la media de la distribución. En cuanto al signo de A(PP), por un lado, para la combinación ENSO+SAM+ se observa que la mayoría de estaciones (excepciones: estaciones del norte y centro de CR, de CO, de LP y BA) presentan valores positivos que se mantienen en un gran porcentaje de la totalidad de la caja, indicando una posible señal más homogénea. Por otro lado, para casos ENSO+SAM−, las estaciones presentan una gran variabilidad entre eventos, lo que se evidencia en las diferencias en la longitud del IQR y de los bigotes.

A modo de ejemplo, se puede mencionar la estación más al norte de CR (10470-Corrientes Aero) que presenta una totalidad y una gran variabilidad de A(PP) positivas para SAM−, mientras que para SAM+, la mayoría de los valores se encuentra por debajo de cero y con un valor IQR mucho menor. A su vez, para SAM− y para la estación 10148-Laboulaye Aero (sur de CO) se observan valores atípicos en ambos extremos; lo que podría indicar una mayor dispersión de los datos y la presencia de diferentes grupos dentro de la distribución.

Notar que, en estaciones como 10087-Monte Caseros Aero (CR), 10081-Ceres Aero (SF) y 10477-Concordia Aero (ER), para el caso de SAM−, el valor medio se encuentra fuera de la caja, lo que implica una marcada asimetría hacia la derecha y una fuerte influencia de valores atípicos de A(PP) o extremos de PP.

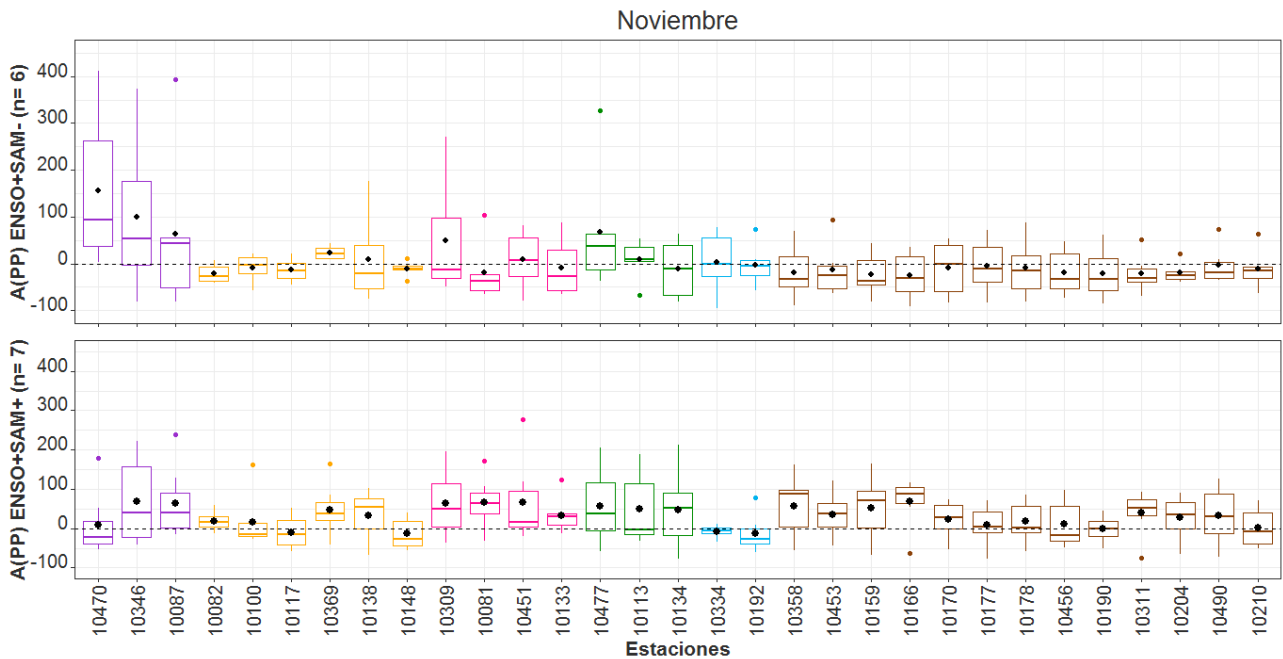


Figura 4.4: *Boxplot* de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO+ con SAM− (arriba) y con SAM+ (abajo) durante el mes de noviembre. El punto de color negro representa la media.

Para diciembre (Figura 4.5) se analiza el caso de ENSO+ en combinación con IOD− ( $n = 4$ ) y con IOD+ ( $n = 9$ ). Para la primera combinación, debido a la baja cantidad de eventos, se representa la información en forma de gráfico de dispersión (panel superior de Figura 4.5). Los valores de A(PP) se encuentran aproximadamente entre los  $-100\text{mm}$  y los  $+200\text{mm}$ , por lo que no se puede establecer una PP esperada que sirva para futuros eventos de este tipo, que de por sí son escasos.

Para la combinación de ENSO+ con IOD+, es más robusto el comportamiento esperado de

A(PP) positivas. Estos valores positivos pueden alcanzar hasta los +450mm, mientras que los valores mínimos se mantienen en  $-100\text{mm}$ . A excepción de unas pocas estaciones, se observa una marcada asimetría hacia la derecha. Debido a la longitud de los bigotes y a los valores del IQR, se observa que las estaciones de CR, del norte de SF, del sur de ER y del norte de BA, presentan la mayor variabilidad y dispersión de los datos.

A modo de ejemplo, se menciona la estación *10311-Tandil Aero* (BA) para el caso ENSO+IOD+. Para esta coocurrencia, tanto el valor medio de A(PP) como el IQR (el cual es pequeño) y los bigotes presentan valores positivos. Sin embargo, existe un único valor atípico negativo de  $-51,5\text{mm}$  para el 2015. Este valor puede resultar llamativo debido a que el 2015 es conocido como un año ENSO+ intenso y en el cual, durante agosto y diciembre, se dieron PP superiores a la media en el centro y noreste de Argentina (Blunden y Arndt, 2016). Incluso, durante el principio del verano, se presentaron nuevos récords de PP hasta ese momento en dicha región. Sin embargo, este mismo informe establece que, para regiones al sur de  $34^\circ\text{S}$ , se observó un período de menor PP respecto a la media para este período.

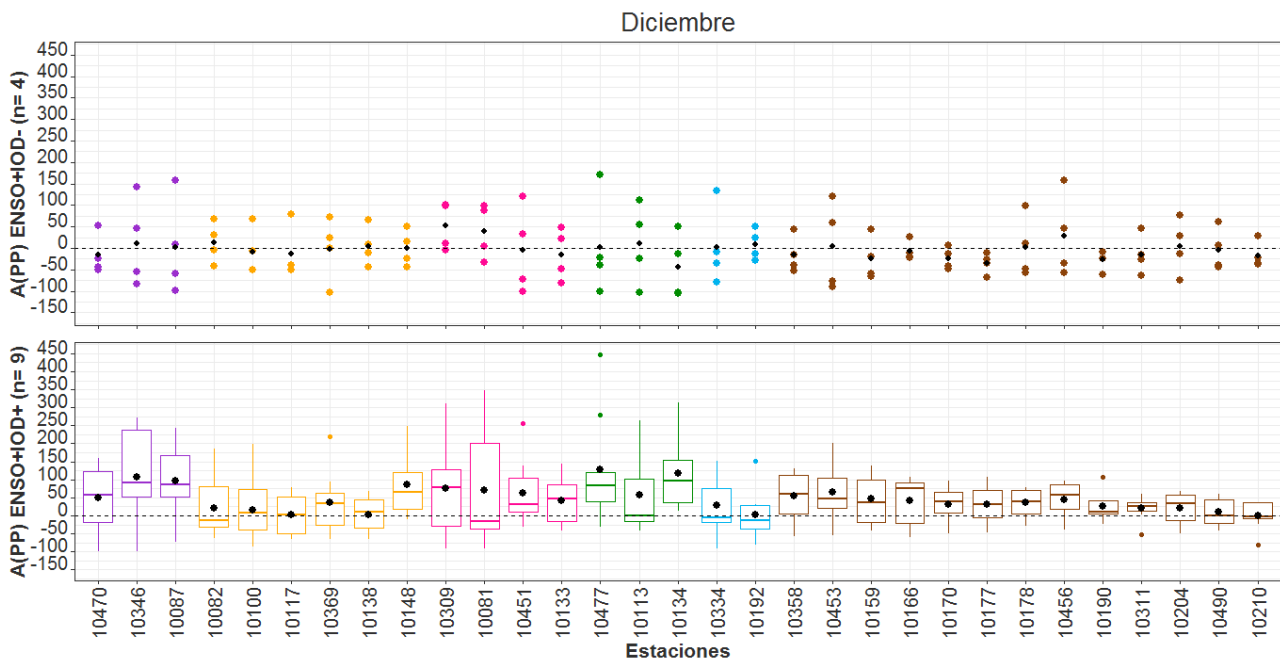


Figura 4.5: *Panel superior:* Gráfico de puntos de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO+ con IOD- durante el mes de diciembre. *Panel inferior:* *Boxplot* de A(PP) en coocurrencia de ENSO+ con IOD+ durante el mes de diciembre. El punto de color negro representa la media.

Para la combinación ENSO- IOD- ( $n = 10$ ) durante el mes de febrero, los valores positivos de A(PP) pueden alcanzar los 300mm. Incluso, para la estación *10134-Gualeguaychú Aero* (sur de ER), existe un valor que supera los +500mm (Figura 4.6). Este caso se da en el año 1984 (septiembre 1983 - febrero 1984) con un valor exacto de 530,0mm. Considerando la distribución de la estación y la de las estaciones circundantes, se considera un caso interesante de estudio para analizar en el próximo capítulo. A su vez, para esta combinación de fases de forzantes, para las A(PP) negativas se observan valores cercanos a  $-130\text{mm}$ .

Para este mes, la variabilidad es alta para ambas combinaciones, por lo que se pueden presentar tanto valores positivos como negativos de A(PP). Esto genera que la predictibilidad sea baja. A modo de ejemplo, se menciona lo que sucede para estaciones como *10138-Rio Cuarto Aero* (sur de CO) y *10477-Concordia Aero* (norte de ER), que, si bien no presentan valores atípicos ni asimetrías, presentan una dispersión de los datos.

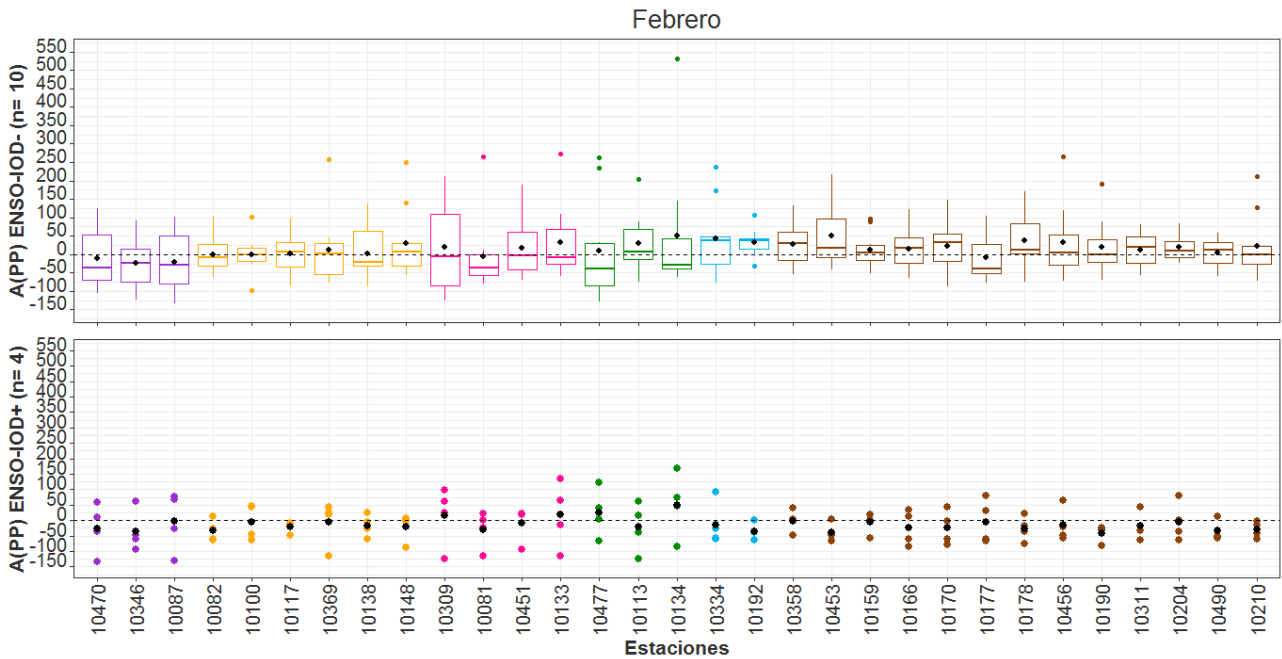


Figura 4.6: *Panel superior:* *Boxplot* de anomalías de precipitación en mm (A(PP)) para la coocurrencia de ENSO+ con IOD– durante el mes de febrero. *Panel inferior:* Gráfico de puntos de A(PP) en coocurrencia de ENSO– con IOD+ durante el mes de febrero. El punto de color negro representa la media.

A partir de estos resultados, se puede observar que existen diferencias entre los casos que se presentan para una misma combinación de fases de forzantes durante un determinado mes. Se podría pensar que una de las razones por las cuales se da esta diferencia en el comportamiento de la PP se debe a la diferente intensidad de cada forzante. Por esta razón, a continuación, se estudiaron los valores de los índices.

### 4.3. Variabilidad de los índices de los forzantes

Para analizar la variabilidad entre eventos de cada forzante, se presenta el diagrama de dispersión de los índices ONI-DMI (Figura 4.7) y de los índices ONI-SAM (Figura 4.8). A partir de este análisis, se identifican casos de estudio.

Para los meses de primavera y para diciembre (aunque en menor medida), se observa una marcada prevalencia de coocurrencia de igual fase de los forzantes ENSO e IOD (Figura 4.7). A su vez, se puede decir que, por un lado, los eventos ENSO– son más “débiles” que los eventos ENSO+, ya que los valores mínimos y máximos del índice ONI son  $-1,8^{\circ}\text{C}$  (1988) y  $+2,6^{\circ}\text{C}$  (2015), respectivamente, manteniéndose con el mismo valor durante los meses de noviembre y diciembre. Por otro lado, se menciona que el valor más negativo del índice DMI es  $-1,1^{\circ}\text{C}$  durante el mes de octubre (1996), mientras que el mayor valor positivo es  $+1,3^{\circ}\text{C}$  durante noviembre (1997). Por lo tanto, con respecto al índice del forzante IOD, se aprecia que, en general, los mayores valores del índice DMI se presentan para los meses de primavera respecto a los de verano.

Como casos interesantes de estudio, se puede mencionar el año 1982, ya que presenta la particularidad de que el DMI cambia de signo entre noviembre y diciembre. En este caso, los meses de primavera presentan IOD+, mientras que los de verano, IOD–, lo que contradice lo esperado, ya que un año ENSO+ se pone en fase con IOD+. Otro año interesante es 1996, ya que es un año ENSO+ pero con valores negativos grandes del DMI para los meses de octubre y

noviembre.

Otro caso interesante, y actual, es el período de septiembre a noviembre de 2019, ya que, al ser un año ENSO<sub>n</sub>, se puede analizar la influencia del forzante IOD. A partir de diciembre, el valor del índice de este forzante disminuye considerablemente.

En la Figura 4.8 se presentan los valores de los índices ONI y SAM. Durante noviembre, se observa una marcada prevalencia de combinación de valores negativos y positivos de los índices ONI y SAM, respectivamente. A su vez, en relación al signo de fases del índice SAM, durante los meses de diciembre y enero parece prevalecer la fase positiva sobre la negativa. En relación a esto, se observa que la fase negativa del SAM es más intensa que la positiva, ya que los valores que se presentan son  $-6,03$  durante el mes de octubre en 1988 y  $+4,92$  durante febrero en 2014.

Como casos interesantes de estudio, se puede mencionar el año 1988 debido a los altos valores de ambos índices (ambos en fase negativa), en especial durante el mes de octubre. Otro año de interés es el 2002, principalmente para el mes de octubre. A su vez, este año se puede comparar con 1988, ya que se observan valores similares del SAM pero diferente ONI.

Otro año interesante, pero más reciente, es el 2014, ya que permite estudiar el caso en el que se presentan valores del índice SAM positivos durante valores del índice ONI bajos. A su vez, llama la atención el alto valor del índice SAM durante el mes de febrero.

## 4.4. Análisis de casos particulares: forzantes extremos

Ante la variabilidad en la intensidad de los forzantes previamente observada, en esta subsección se analiza su evolución y las A(PP) asociadas. Para esto se estudiaron tres casos particulares, uno por cada fase del ENSO.

### 4.4.1. Año 1988: septiembre 1988 – febrero 1989

El año 1988, en función del criterio definido en la sección 2.4, se determinó como año ENSO<sub>-</sub> (Tabla 3.1). Comienza con valores del índice ONI de  $-0,9$  °C desde mayo (no se muestra), hasta alcanzar  $-1,2$  °C en septiembre (Figura 4.7). Luego, sigue intensificándose hasta alcanzar un valor de  $-1,8$  °C en diciembre, para posteriormente comenzar a debilitarse. A su vez, en la Tabla 4.1 se observan los valores de los índices DMI y SAM durante los meses de septiembre de 1988 a febrero de 1989. Para diciembre se observó IOD<sub>+</sub>, mientras que para el resto de los meses se presentó IOD<sub>-</sub>. Sin embargo, todos los valores son relativamente débiles (el más alto es  $-0,52$  °C para octubre). Con respecto al índice SAM, presenta valores fuertemente negativos (positivos) durante los meses de septiembre y octubre (noviembre, diciembre y febrero).

Durante los meses de octubre a febrero, predominan las A(PP) negativas (4.9). Estos valores responden a la intensidad del evento ENSO<sub>-</sub> y pueden estar acompañados por los valores del SAM<sub>+</sub> (SAM<sub>-</sub>) durante los meses de noviembre, diciembre y febrero (octubre y enero). A su vez, durante el mes de septiembre se observan valores de A(PP) positivos que superan los 50mm. Estos valores pueden estar asociados a la combinación ENSO<sub>-</sub>SAM<sub>-</sub>.

Según el *ranking* anual y mensual de los 10 valores más bajos de PP a nivel país, se obtiene que la primavera de 1988 y el verano 1988/89 se encuentran en tercer y en primer lugar, respectivamente, con anomalías del  $-30\%$  (datos obtenidos de la página del SMN: <https://www.smn.gob.ar/clima/rankingtemprec>). A modo de ejemplo, se menciona que el valor más negativo de A(PP) es  $-133,18$ mm durante febrero para la estación 10087-Monte Caseros Aero (CR), mientras que el mayor valor positivo es  $+135,54$ mm para 10117-Villa Dolores Aero (CO) durante diciembre. Tener en cuenta que la media climatológica mensual de PP para

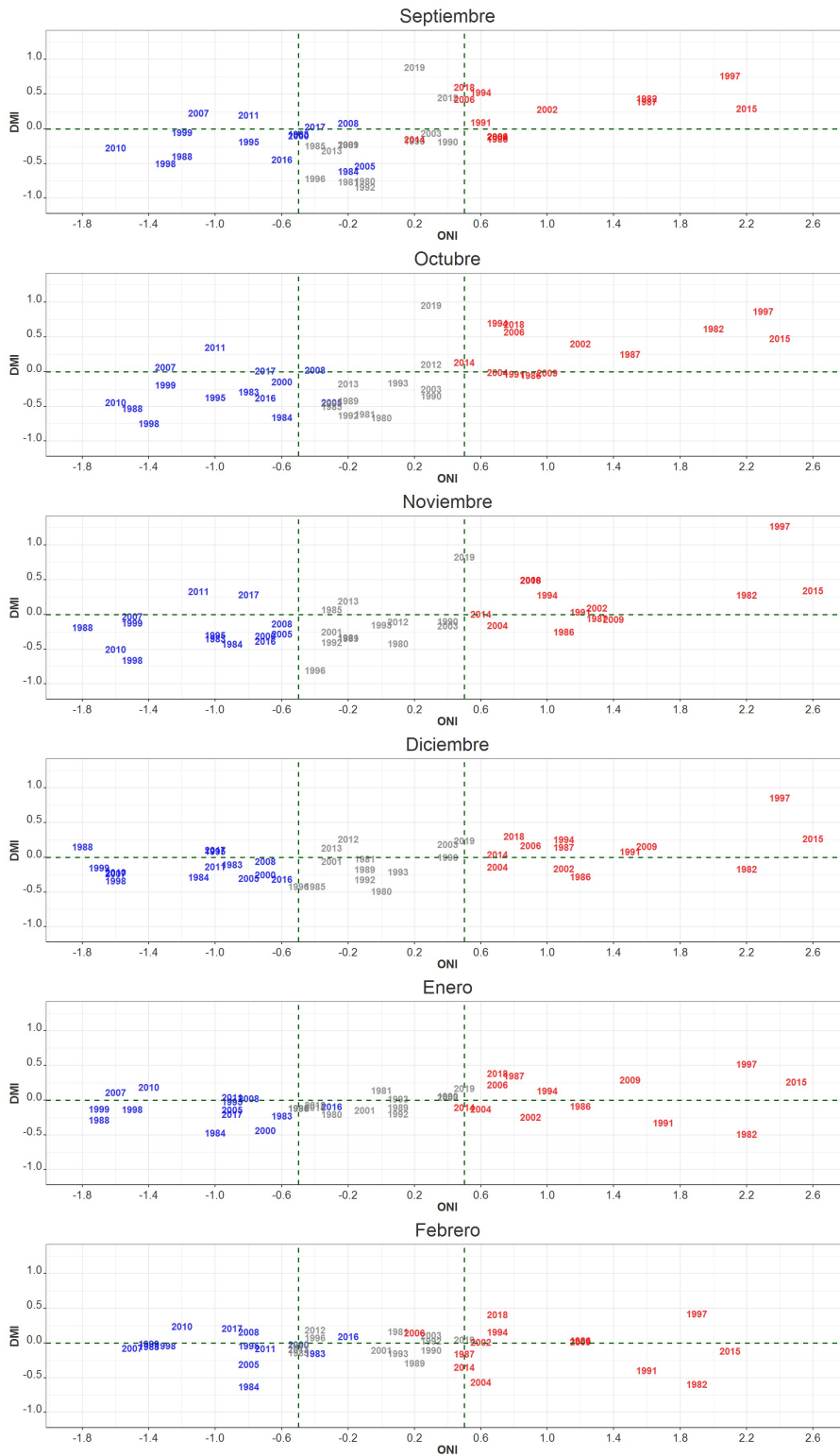


Figura 4.7: Gráfico de dispersión entre el índice ONI y el índice IOD (DMI). La línea vertical discontinua indica los umbrales para separar la fase negativa, neutra y positiva del ENSO; mientras que la línea discontinua horizontal indica el umbral para dividir en fase negativa y positiva del IOD. Para los meses de enero y febrero, se indica el año anterior para poder identificar de forma continuada el evento que corresponde a los 6 meses de estudio.

este mes (período 1981-2010) es de 113,3mm (datos obtenidos de [https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn\\_8.1](https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn_8.1)).

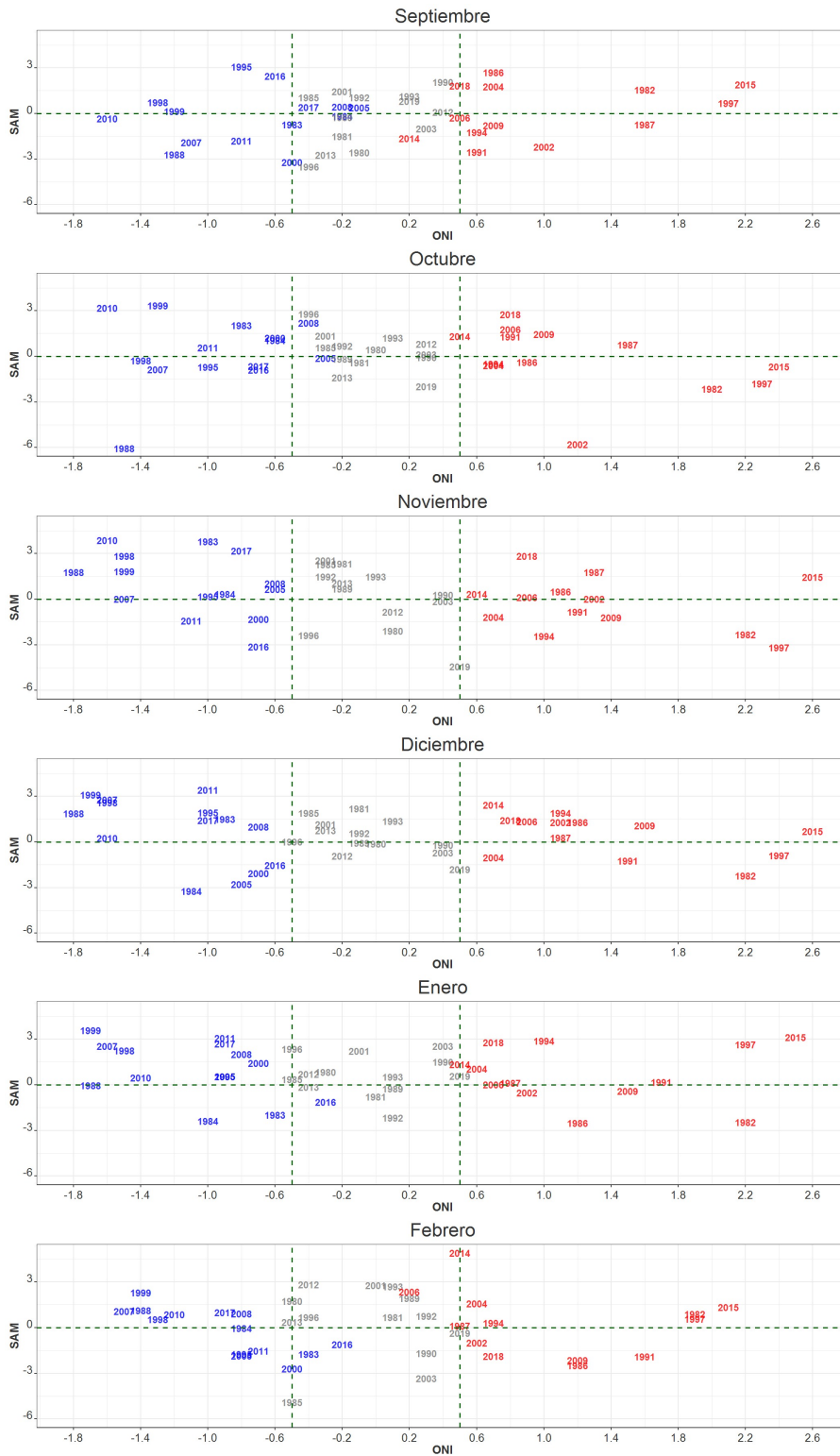


Figura 4.8: Ídem Figura 4.7, pero para el índice SAM (SAM).

#### 4.4.2. Año 2014: septiembre 2014 – febrero 2015

El año 2014, en función del criterio definido en la sección 2.4, se determinó como año ENSO+ (Tabla 3.1). En la Tabla 4.2 se indican los valores de los índices DMI y SAM para los meses de septiembre de 2014 a febrero de 2015. Por un lado, todos los valores de DMI son relativamente débiles. Sin embargo, presenta IOD– durante los meses de septiembre, enero y febrero, mientras



	DMI	SAM
Septiembre	-0,39°C	-2,7
Octubre	-0,52°C	-6,03
Noviembre	-0,18°C	+1,77
Diciembre	+0,15°C	+1,88
Enero	-0,28°C	-0,02
Febrero	-0,04°C	+1,14

Tabla 4.1: Valores de los índices DMI y SAM para los meses de septiembre de 1988 a febrero de 1989.

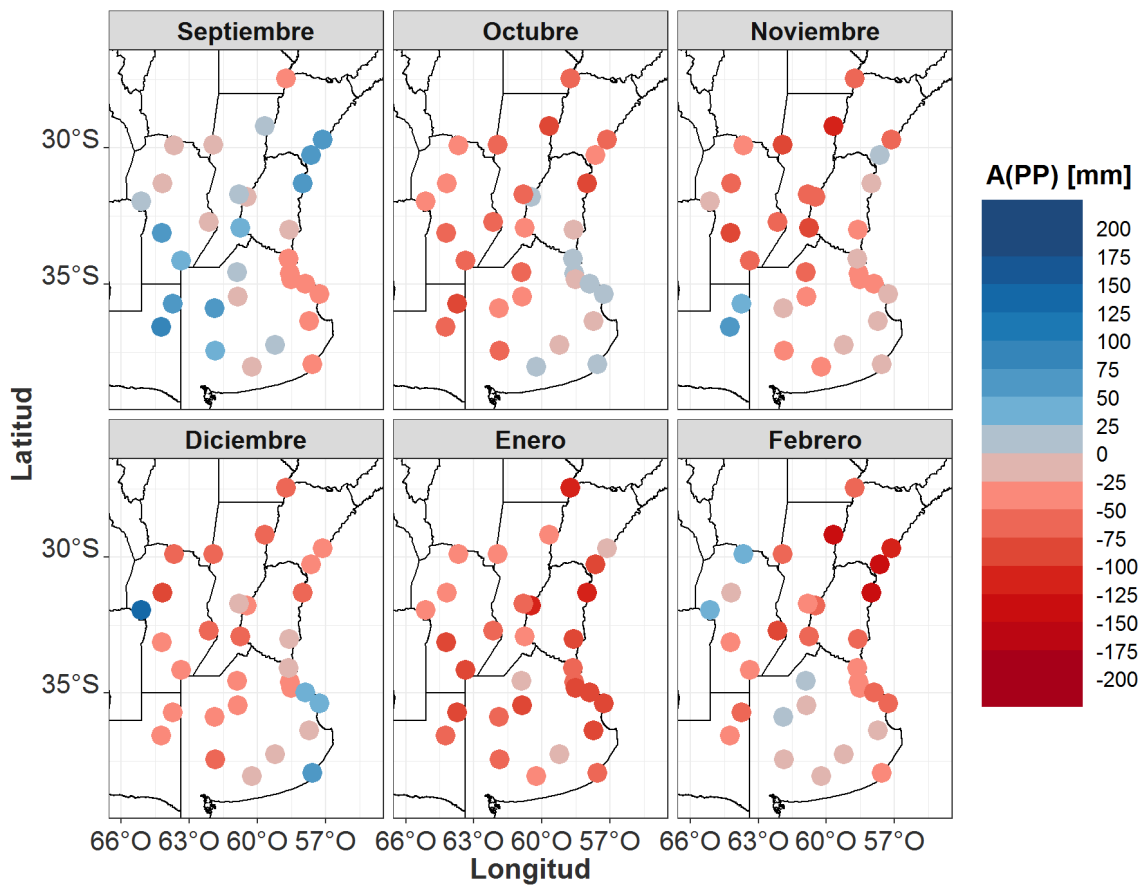


Figura 4.9: Anomalías de precipitación (A(PP)) para los meses de septiembre de 1988 a febrero de 1989.

que para octubre a diciembre presenta IOD+. Por otro lado, para el SAM se observa un valor fuerte y negativo para septiembre, que luego se invierte para octubre y disminuye en noviembre. Luego, vuelve a aumentar y se mantiene elevado hasta el mes de febrero. A su vez, resulta interesante observar lo que sucede en la coocurrencia ENSO+SAM+, ya que en la bibliografía está identificado como un caso menos frecuente.

Al observar los valores del ONI, se trata de un evento ENSO+ débil, ya que comienza con valores de +0,5 °C en octubre, aumenta a +0,7 °C en diciembre y luego disminuye nuevamente a +0,5 °C (Figura 4.7). Estas condiciones ENSO+ se mantienen hasta alcanzar valores de +2,6

°C para fines de 2015 (no se muestra). Por lo tanto, analizando los valores de los índices, para nuestro caso de estudio, las A(PP) durante el mes de septiembre estarían asociadas al forzante SAM.

Según un informe del SMN (Skansi et al., 2014b), durante el mes de septiembre se registraron valores de PP mayores a lo esperado en algunas regiones, como el sur de ER o el noreste de la provincia de BA. Esto se puede observar al comparar, en dicha región, los valores de A(PP) de los *composites* de fase ENSO+ para el mes de septiembre (Figura 3.2) con los valores de A(PP) de la Figura 4.10 (tener en cuenta que cambia la escala de colores). A modo de ejemplo, se menciona que para la estación *10346-Paso de los Libres* (ER) se registró 91,0mm en un solo día, cuando la media climatológica mensual (basada en el período 1981-2010) es de 108,7mm (dato obtenido de [https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn\\_8.1](https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn_8.1)).

Durante el mes de octubre, predominaron las A(PP) positivas al oeste de CO, al este de ER y al sur de aproximadamente los 35 °S (noreste y suroeste de BA), mientras que A(PP) negativas se observaron en el centro-norte de la región de estudio (Figura 4.10). A modo de ejemplo, se menciona que el mayor valor de A(PP) positivas es de +146,79mm (221,5mm de PP) para la estación *10192-Santa Rosa Aero* (LP), mientras que el menor valor de A(PP) es de -113,79mm para la estación *10470-Corrientes Aero* (CR). La primera estación registró el valor máximo hasta esa fecha -2014- (Skansi et al., 2014a); sin embargo, considerando el período 1961-2023, el máximo es de 246,4mm para el 2016.

	DMI	SAM
Septiembre	-0,14°C	-1,62
Octubre	0,14°C	+1,32
Noviembre	0,01°C	+0,35
Diciembre	0,04°C	+2,45
Enero	-0,10°C	+1,35
Febrero	-0,34°C	+4,92

Tabla 4.2: Ídem Tabla 4.1, pero para los meses de septiembre 2014 a febrero de 2015.

Durante el verano (diciembre de 2014, enero y febrero de 2015), las PP con valores superiores a los 500mm se registraron en gran parte de nuestra región de estudio, como es el norte y centro de SF y CO. A modo de ejemplo, se menciona la estación *10081-Ceres Aero* (SF) que registró un acumulado de 879mm de PP (Skansi et al., 2015). En su contraparte, se menciona la estación *10456-Pehuajo Aero* (BA) que registró su valor más bajo durante el período 1961-2014, con 156,1mm de PP. En un análisis mensual del verano, en la Tabla 4.3 se indican los valores de A(PP) que superaron los 200mm. Se puede mencionar que para:

- la estación *10309-Reconquista Aero* (SF), el valor de A(PP) correspondiente al mes de diciembre se registró como el acumulado mensual máximo histórico (1961-2023) para dicho mes, con un valor de 448,3mm;
- la estación *10134-Gualeguaychú Aero* (ER), el valor de A(PP) correspondiente al mes de enero está relacionado al acumulado diario máximo histórico (6/01/2015) para el período 1961-2023, con un valor de 168,5mm;



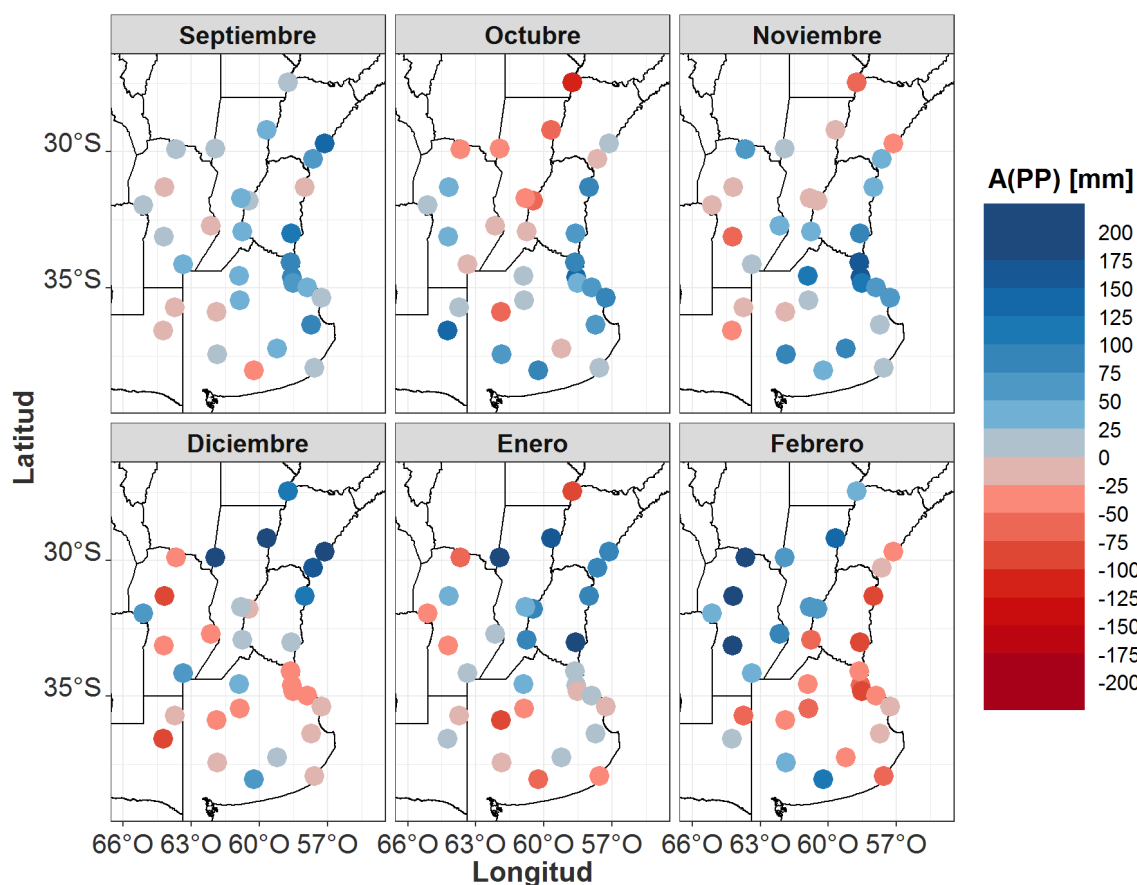


Figura 4.10: Ídem Figura 4.9, pero para los meses de septiembre de 2014 a febrero de 2015.

- la estación *10100-Córdoba Aero* (CO), el valor de A(PP) correspondiente al mes de febrero está relacionado con el acumulado diario máximo histórico (15/02/2015) para el período 1961-2023, con un valor de 116,0mm;
- la estación *10138-Río Cuarto Aero* (CO), el valor de A(PP) correspondiente al mes de febrero se registró como el acumulado mensual máximo histórico (1961-2023) para dicho mes, con un valor de 357,7mm.

Estos datos fueron obtenidos de la sección “Estadísticas climáticas” de la página del SMN (<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>).

#### 4.4.3. Año 2019: septiembre 2019 – febrero 2020

Se decidió estudiar este año debido a que es un evento reciente. A su vez, en función del criterio definido en la sección 2.4, se clasificó como año ENSOn (Tabla 3.1), por lo que permitió analizar el comportamiento de los otros dos forzantes.

En la Tabla 4.4 se indican los valores de los índices DMI y SAM durante los meses de septiembre de 2019 a febrero de 2020. Se aprecia que durante este período, se presentó ENSOnIOD+, mientras que se da coocurrencia de ENSOnSAM– para los meses de octubre a diciembre y durante febrero, aunque con un valor mucho más débil. Si se observan los valores de los índices, se puede decir que predomina en intensidad el forzante SAM–, principalmente durante el mes de noviembre.

N° Estación	Provincia	Mes	A(PP)
10081	SF	Diciembre	201,32mm
10309	SF	Diciembre	311,88mm
10346	CR	Diciembre	236,84mm
10081	SF	Enero	205,98mm
10134	ER	Enero	233,41mm
10100	CO	Febrero	301,13mm
10138	CO	Febrero	267,08mm

Tabla 4.3: Estaciones y mes para los cuales las anomalías de precipitación en mm (A(PP)) superan los 200mm para el período de septiembre de 2014 a febrero de 2015.

	DMI	SAM
Septiembre	0,89°C	+0,81
Octubre	0,96°C	-1,97
Noviembre	0,83°C	-4,42
Diciembre	0,24°C	-1,78
Enero	0,17°C	+0,57
Febrero	0,05°C	-0,36

Tabla 4.4: Ídem Tabla 4.1, pero para los meses de septiembre 2019 a febrero 2020.

Durante el mes de septiembre (Figura 4.11), predominan valores negativos de A(PP) en toda la región de estudio, con valores de PP muy por debajo de la media (Skansi et al., 2019, Richter-Menge y Druckenmiller, 2020). Según el “Boletín Climático - Septiembre 2019” publicado por el SMN, este mes se presenta como el más seco después de 1973. Sin embargo, al observar los *composites* durante este mes para la combinación de fase ENSOn con IOD+ y con SAM+ (Figura 3.5), se obtienen A(PP) positivas en el centro y centro-oeste de la región de estudio. Es decir que, en este caso, los *composites* no fueron representativos del comportamiento del evento individual. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que existen otros forzantes.

Durante los meses de octubre y noviembre, se observan A(PP) positivas en el centro-este y en el noreste de la región de estudio, respectivamente, lo que puede estar asociado a la ocurrencia de IOD+ y de SAM-. Sin embargo, podría decirse que en ambos meses existió una mayor influencia del SAM-, ya que se obtuvo una prevalencia de A(PP) negativas (Figura 4.11). Esto es más notable para la provincia de BA y durante el mes de octubre, ya que para este mes se espera predominio de valores positivos para el caso ENSOnIOD+, y valores negativos en coocurrencia con SAM- (Figura 3.6). En diciembre, las A(PP) positivas del este se extienden hacia el centro de la región de estudio. A modo de ejemplo, se menciona la estación 10100-Córdoba Aero (CO) que registró la PP máxima diaria (29/12/2019), con un valor de 130,0mm.

Según el informe “State of the climate in 2020” (Blunden y Boyer, 2021), durante el verano

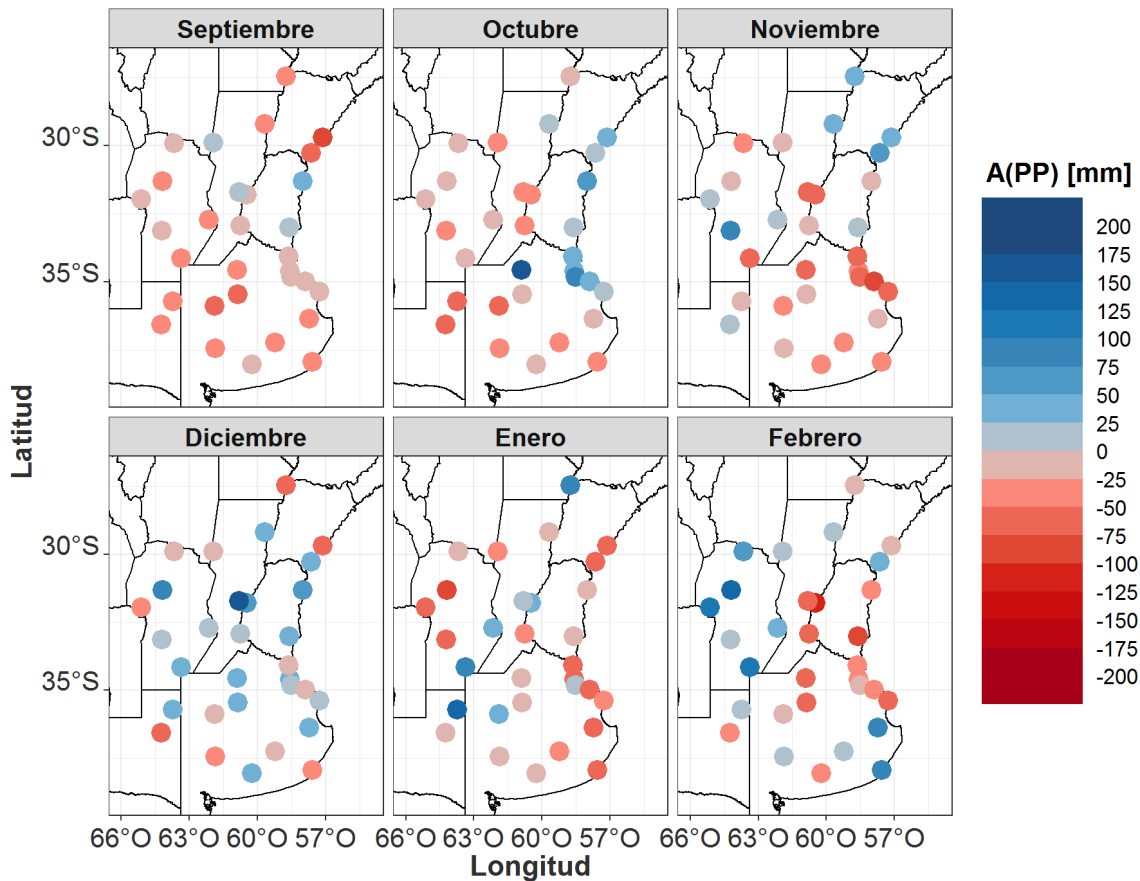


Figura 4.11: Ídem Figura 4.9, pero para los meses de septiembre de 2019 a febrero de 2020.

austral de la temporada 2019/20 predominaron las PP por debajo de la media 1981-2010 para gran parte de Argentina. A su vez, según el informe del SMN, cuando se hace referencia a la A(PP) a nivel país para este verano, da como resultado un desvío de  $-6,3\%$ , por lo que se lo determinó como un verano dentro del rango normal a levemente más seco. Sin embargo, cuando estos autores analizaron a nivel provincial, existieron más provincias con déficit que con excesos. A modo de ejemplo, y haciendo referencia a nuestra región de estudio, se obtuvieron déficit para BA y excesos para CO. Esto coincide con nuestro resultado al promediar los mapas de los meses de verano en la Figura 4.11.

A modo de ejemplo, se menciona que el valor más negativo es de  $-101,77\text{mm}$  para la estación *10113-Paraná Aero* (ER) durante el mes de febrero, mientras que el valor más positivo es de  $+169,92\text{mm}$  para *10451-Sauce Viejo* (SF) durante el mes de diciembre. En este sentido, se puede agregar que el 14/12/2019, esta última estación, registró el valor máximo histórico (entre 1961-2023) de PP con  $241,0\text{mm}$ .

En los tres casos analizados, parece haber una fuerte influencia del forzante SAM. En el caso de 2019, también existe una débil influencia del IOD+ y se pone en evidencia la presencia de otros forzantes actuando, principalmente durante septiembre de ese año.

# Capítulo 5

## Extremos de precipitación

En este capítulo se analiza el tercer y último objetivo específico de la presente tesis. Este consiste en identificar los extremos climáticos ocurridos bajo la influencia combinada de los forzantes climáticos estudiados.

### 5.1. Climatología de los umbrales (percentiles) para los extremos de precipitación

Para estudiar los extremos de PP bajo la coocurrencia de fases de los diferentes forzantes, primero se presenta la climatología de los umbrales utilizados ( $P_{90}$ ,  $P_{95}$  y  $P_{99}$ ) en la Figura 5.1. Para los tres percentiles, los mayores valores se encuentran en las estaciones de CR (*10470*, *10346* y *10087*) y de ER (*10477*, *10113*, *10134*). A su vez, para estas provincias, los mayores umbrales son para los meses de octubre a diciembre en el caso de  $P_{90}$ , de octubre a enero para  $P_{95}$  y de octubre a febrero para  $P_{99}$ . Por lo tanto, los mayores umbrales se dan desde mediados de la primavera a fines del verano.

En cuanto a los menores umbrales, se encuentran en las estaciones de CO y BA tanto para  $P_{90}$  como para  $P_{95}$ . En este sentido, estaciones como *10138-Río Cuarto Aero* (CO) o *10166-Ezeiza Aero* y *10190-Dolores Aero* (ambas en BA) presentan valores más homogéneos durante los meses de estudio. En cambio, el resto de las estaciones tiene mayor variabilidad entre los valores de los umbrales mensuales.

El umbral del  $P_{90}$  varía entre 18,67mm durante septiembre (estación *10117-Villa Dolores Aero* en CO) hasta 181,04mm durante octubre (estación *10346-Paso de Los Libres Aero* en CR), por lo que sugiere gran variabilidad entre estaciones y meses. En el caso de  $P_{95}$ , el umbral varía entre 32,23mm para septiembre (igual que para  $P_{90}$ , es para la estación *10117-Villa Dolores Aero* en CO) y 281,33mm durante enero (estación *10087-Monte Caseros Aero* en CR). Por último, en el caso de  $P_{99}$ , los umbrales varían entre 48,6mm durante septiembre (estación *10204-Coronel Suárez Aero* en BA) y 463,76mm durante enero (estación *10346-Paso de Los Libres Aero* en CR).

A su vez, resulta interesante mencionar la menor y mayor diferencia entre los umbrales  $P_{99}$  y  $P_{90}$ . El primer caso es de 7,4mm (48,6mm en  $P_{99}$  y 41,2mm en  $P_{90}$ ) durante el mes de septiembre para la estación *10204-Coronel Suárez Aero* (BA), mientras que la mayor diferencia entre percentiles es de 342,14mm (463,76mm en  $P_{99}$  y 121,62mm en  $P_{90}$ ) durante enero para la estación *10346-Paso de Los Libres Aero* (CR). Esto muestra que para la estación de CR existe una gran variabilidad entre los extremos de PP, lo que dificulta la predictibilidad de estos eventos.

Para el caso de *P99*, se indica el año al que corresponde el extremo registrado (panel derecho de la Figura 5.1). Se observa que, para algunos meses, el año del extremo coincide de forma tal que dicho evento abarcó amplias extensiones dentro de la región de estudio. Entre ellos, se destacan los extremos ocurridos durante septiembre de 1982 y octubre de 2012, que superaron el *P99* en 12 y 10 estaciones, respectivamente. En el primer caso, algunas de las estaciones son 2 de CR, 3 de SF, 1 de ER y 6 estaciones del norte y este de BA, por lo que podría pensarse que no son eventos extremos de PP aislados. En el segundo caso, los eventos extremos se presentaron en forma más dispersa espacialmente, aunque en el centro-oeste de la región de estudio.

Continuando con el análisis de *P99*, se observa que, en determinados eventos, se registraron PP extremas en más de un mes. En este sentido, las siguientes estaciones presentan extremos durante meses consecutivos:

- la estación *10369-Marco Juárez Aero* (CO) para los meses de septiembre y octubre en el 2012;
- la estación *10477-Concordia Aero* (ER) para los meses de diciembre de 1997 y enero de 1998;
- la estación *10490-Tres Arroyos* (BA) para los meses de diciembre de 1989 y enero de 1990;
- la estación *10204-Coronel Suárez Aero* (BA) para los meses de octubre-noviembre de 1985 y para enero de 1986.

Otras estaciones presentan extremos en meses cercanos son:

- la estación *10133-Rosario Aero* (SF) para los meses de octubre y diciembre del 2012;
- la estación *10133-Rosario Aero* (SF) para los meses de noviembre del 2018 y enero del 2019;
- la estación *10113-Paraná Aero* (ER) para los meses de noviembre del 2018 y enero del 2019;
- la estación *10166-Ezeiza Aero* (BA) para los meses de octubre y diciembre del 2012;
- la estación *10178-Nueve de Julio* (BA) para los meses de diciembre de 1983 y febrero de 1984;
- la estación *10087-Monte Caeros Aero* (CR) para los meses de septiembre de 1982 y febrero de 1983;
- la estación *10177-Punta Indio* (BA) para los meses de septiembre del 2013 y enero del 2014;
- la estación *10456-Pehuajó Aero* (BA) para los meses de septiembre del 2010 y enero del 2011.

Estos últimos resultados, por un lado, exponen la necesidad de poder predecir la ocurrencia de estos eventos para la toma de decisión, ya que eventos extremos de PP consecutivos o cercanos pueden afectar gravemente la cosecha, la seguridad de la población y generar un impacto socioeconómico (Anagnostopoulou y Tolika, 2012; Vazquez et al., 2020). Por otro lado, al observar los meses y años en los que se dan estos extremos, es vital poder llevar a cabo un análisis mensual de su ocurrencia bajo la combinación de los forzantes estudiados.

A su vez, resulta importante mencionar que se registraron otros eventos más localizados, pero con umbrales de *P99* elevados. Algunos de estos son:



- los eventos de noviembre del 2009 y enero del 2019 en la provincia de CR;
- los eventos de diciembre de 1997 y enero de 1998 para el norte de la provincia de ER (estación *10477-Concordia Aero*);
- el evento de diciembre de 2012 en la estación *10346-Paso de los Libres* (centro de ER);
- el evento de febrero de 1984 en la estación de *10134-Gualeguaychú Aero* (sur de ER).

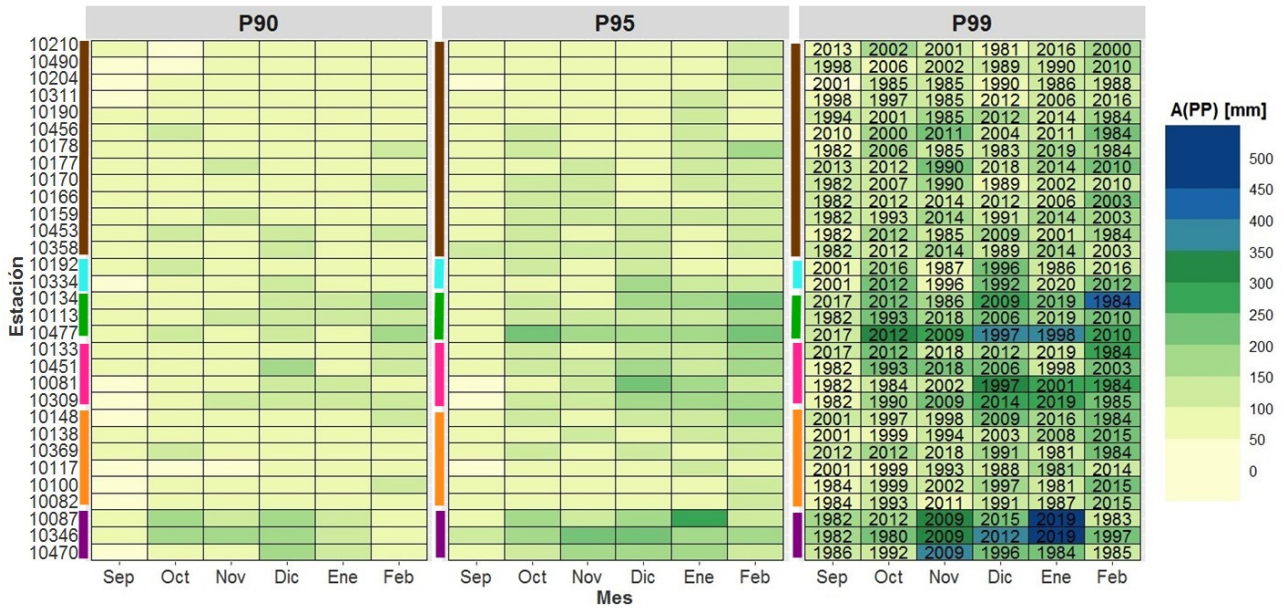


Figura 5.1: Mapa de calor de los percentiles 90, 95 y 99 ( $P_{90}$ ,  $P_{95}$  y  $P_{99}$ ) de las anomalías de precipitación en mm ( $A(PP)$ ). El panel del  $P_{99}$  presenta el año en el que ocurre el evento extremo. El orden del número de las estaciones en el *eje y* corresponde a orden geográfico de norte a sur y de oeste a este (los colores del *eje y* coinciden con los utilizados en la Figura 4.2 del capítulo anterior).

## 5.2. Extremos de precipitación y combinación de forzantes

En esta subsección se analizó la cantidad de eventos extremos observados para cada co-ocurrencia de forzantes. A modo de síntesis, se muestran los resultados únicamente para  $P_{95}$  (Tabla 5.1 y 5.2), ya que este umbral proporciona información sobre los extremos de la región de estudio, pero no es tan restrictivo como el  $P_{99}$ . En términos generales, para los tres umbrales de percentiles, se obtuvo que la mayor cantidad de extremos se presenta en años ENSO+, tanto en combinación con fase IOD+ como con SAM+ para los meses de septiembre, noviembre y diciembre. No se detectaron extremos en el caso de ENSO–SAM+.

Por un lado, en la coocurrencia del ENSO con el IOD, la mayor frecuencia de extremos corresponde a casos ENSO+IOD+ durante los meses de septiembre, noviembre y diciembre, a los casos ENSOnIOD– durante octubre y enero, y a casos ENSO–IOD– durante el mes de febrero (Tabla 5.1). Por otro lado, en la coocurrencia del ENSO con el SAM, la mayor frecuencia de extremos corresponde a casos ENSO+SAM+ durante los meses de septiembre, noviembre y enero; a los casos ENSOnSAM+ durante octubre; a los casos ENSOnSAM– durante diciembre, y a casos ENSO–SAM– durante el mes de febrero (Tabla 5.2). De este primer análisis, resulta interesante observar la gran cantidad de eventos extremos durante años ENSOn, e incluso

durante años ENSO–, por lo que se pone en evidencia que no es el único forzante que actúa en la ocurrencia de este tipo de eventos. En este sentido, es importante tener en cuenta que existen diversos mecanismos que influyen en el transporte de humedad y en la PP extrema, entre los que se puede mencionar el Low-Level Jets de Sudamérica (Gimeno et al., 2022).

La ocurrencia de estos extremos está en concordancia con las A(PP) esperadas, según el análisis de los *composites* del Capítulo 3.3 y de su representatividad en el Capítulo 4.1. Recordando para el mes de octubre, los *composites* de combinación del ENSO con IOD– (panel izquierdo Figura 3.6) y con SAM+ (panel derecho Figura 3.6), se observaron valores positivos de A(PP). A su vez, para el caso ENSOnSAM+, se obtuvo que esos valores de A(PP) son representativos en un 70% o más para estaciones al centro y sureste de CO, norte de SF y alguna estación de BA (Figura 4.1). En el caso de noviembre, el *composite* de combinación del ENSO+SAM+ (panel derecho Figura 3.7) presentó valores más intensos respecto a los valores para ENSO+IOD+ (panel izquierdo Figura 3.7), pero ambas combinaciones con A(PP) positivas. Recordar que la representatividad para ENSO+SAM+ es entre un 70% y un 90% para toda la región de estudio (Figura 4.1).

Para el mes de diciembre, en el *composite* del ENSO+IOD+ (panel izquierdo Figura 3.8) se observaron valores positivos de A(PP), siendo que los de mayor intensidad y representatividad al 70% o más (Figura 4.1) se encuentran al este de la región de estudio. Para el mes de enero, durante casos ENSO+SAM+ (panel derecho, Figura 3.9) los valores positivos de A(PP) solo se encuentran al noreste de la región de estudio (provincias de CR, ER y noreste de SF). En el caso de ENSOnIOD– (panel izquierdo, Figura 3.9), solo se dan valores positivos y representativos de A(PP) en el norte de la provincia de BA.

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
<b>ENSO+IOD+</b>	23	11	20	28	18	17
<b>ENSO+IOD–</b>	4	0	14	1	6	14
<b>ENSO–IOD+</b>	9	2	2	2	3	0
<b>ENSO–IOD–</b>	8	10	3	3	10	22
<b>ENSOonIOD+</b>	3	19	10	12	3	4
<b>ENSOonIOD–</b>	15	20	13	16	22	5

Tabla 5.1: Cantidad de casos (incluye estaciones y años) bajo la coocurrencia de fases ENSO y de fases IOD. Los valores máximos de cada mes se indican en sombreado.

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
<b>ENSO+SAM+</b>	20	5	25	14	22	15
<b>ENSO+SAM–</b>	7	6	9	15	2	16
<b>ENSO–SAM+</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ENSO–SAM–</b>	10	5	4	2	2	19
<b>ENSOonSAM+</b>	13	35	20	11	17	8
<b>ENSOonSAM–</b>	5	4	3	17	8	1

Tabla 5.2: Ídem Tabla 5.1, pero bajo la coocurrencia de fases ENSO y de fases SAM.

### 5.3. Análisis de casos particulares: extremos regionales de precipitación

En la subsección anterior, se obtuvo la frecuencia de extremos bajo la combinación de forzantes. Ahora bien, también es importante poder discretizar estos valores en función de la cantidad de estaciones y de años. Se obtuvieron desde meses que no presentaron extremos para determinados años, hasta meses y años en los que se registraron extremos en gran cantidad de estaciones. A fin de identificar eventos que hayan tenido impacto regional, se indica, para cada mes, el o los años en los que se presentan extremos para el 25 % o más (8 o más) de las estaciones analizadas (Tabla 5.3). A su vez, se indica el signo de la fase de cada uno de los forzantes estudiados. Resulta interesante notar que los eventos extremos que impactan en gran parte de la región de estudio predominan en la primera parte de la década del 80.

Mes	Año	Cantidad afectadas	ENSO	IOD	SAM
Septiembre	1982	17 estaciones	+	+	+
Octubre	2012	18 estaciones	n	+	+
Noviembre	1985	10 estaciones	n	+	+
Diciembre	1997	8 estaciones	+	+	-
	2012	8 estaciones	n	+	-
Enero	1980	9 estaciones	n	-	+
	2018	9 estaciones	+	+	+
Febrero	1983	14 estaciones	-	-	-

Tabla 5.3: Cantidad de estaciones afectadas, año del extremo y signo de las fases de los forzantes (-: negativa, n: neutra y +: positiva) según el mes de estudio.

En la sección 4.3, se observó que existe una variabilidad en la intensidad de los índices de los forzantes analizados, y esto, a su vez, afecta a la variabilidad entre eventos de PP. Por lo tanto, teniendo en cuenta la variedad de combinaciones de fases de forzantes que se mencionaron, se decidió estudiar tres casos de los eventos extremos regionales identificados: uno por cada fase ENSO.

#### 5.3.1. Septiembre, 1982

Como se mencionó antes, el año 1982 presentó un extremo regional y, en función del criterio utilizado en la sección 2.4, se clasificó como un año ENSO+. En particular, según Santos et al. (2017), fue un ENSO+ extremo. A su vez, se presentan valores positivos de los índices DMI y SAM (Tabla 5.4), estableciendo un IOD+ más débil respecto a los otros dos forzantes.

ONI	DMI	SAM
+1,6°C	+0,44°C	+1,56

Tabla 5.4: Valores de los índices ONI, DMI y SAM para septiembre de 1982.

Los *composites* para las dos combinaciones de forzantes, ENSO+IOD+ y ENSO+SAM+ (Figura 3.5), presentan valores de A(PP) positivos pequeños en el centro y en gran parte de la región de estudio, respectivamente. Sin embargo, para estaciones del norte y sur de CR, norte de SF y norte de BA, se obtiene una representatividad de más del 70 % de estos valores (Figura 4.1).



Para este caso, se presentaron extremos en 17 estaciones distribuidas entre el norte de la región de estudio y norte-noreste de la provincia de BA (Figura 5.2). Los extremos oscilan entre los 48,17mm y los 208,68mm de A(PP). Dadas las estaciones afectadas y los *composites* de combinación de fases para este mes, parece estar prevaleciendo la influencia del SAM+ con el ENSO+ (panel derecho Figura 3.5). Esto también se puede apreciar al observar los índices ONI y SAM, con valores de +1,6 °C y +1,56, respectivamente (Tabla 5.3).

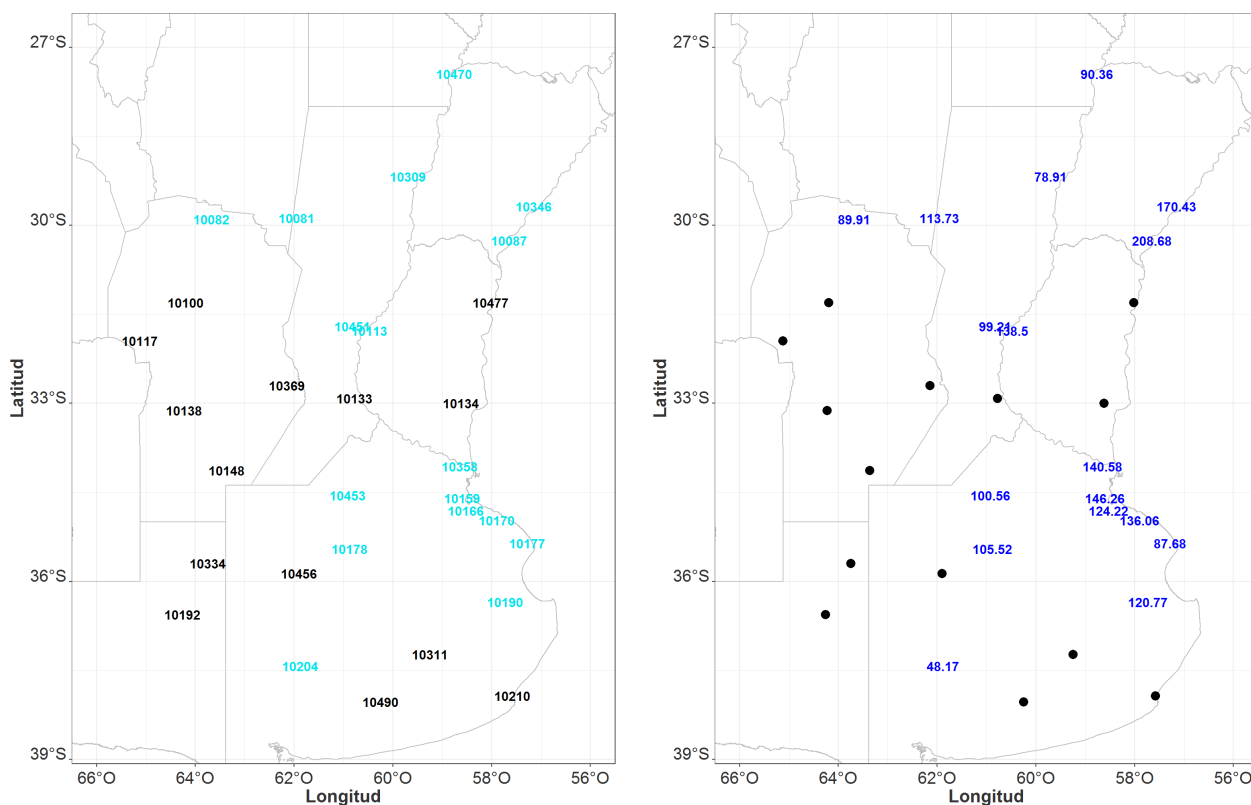


Figura 5.2: *Panel izquierdo*: Ubicación de las estaciones, en color celeste se indican las que presentaron extremos de precipitación (PP) para septiembre de 1982. *Panel derecho*: Anomalías de PP (PP) extrema en azul.

A modo de ejemplo, se menciona que el mayor valor de extremos de A(PP) corresponde a la estación 10087-Monte Caseros Aero (CR) con un valor de 208,68mm (Figura 5.2). Se registraron los valores máximos de PP acumulada diaria (26 de septiembre) y mensual durante el período 1961-2023, con 189,3mm y 316,0mm, respectivamente. Tener en cuenta que, para esta estación, la media climatológica mensual (período 1981-2010) es de 107,3mm (dato obtenido de [https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn\\_8.1](https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn_8.1)).

### 5.3.2. Octubre, 2012

Dado el criterio de clasificación de fases de años ENSO definido en la sección 2.4, el 2012 se consideró un año ENSOn. A su vez, durante este mes de octubre se presentaron valores positivos de los índices DMI y SAM, estableciendo un IOD+ débil (Tabla 5.5).

ONI	DMI	SAM
+0,4°C	+0,1°C	+0,8

Tabla 5.5: Ídem Tabla 5.4, pero para octubre de 2012.

Para este caso, se presentaron extremos de A(PP) en 18 estaciones distribuidas en gran parte del centro-este de la región de estudio. Estos valores se distribuyen entre: el sureste de CR, el sur de SF, el sureste de CO, en ER, el norte de LP y norte de BA (Figura 5.3). Los valores oscilan entre los 98,78mm y los 361,91mm. Recordando los *composites* del mes de octubre para las combinaciones de forzantes de ENSOnIOD+ y ENSOnSAM+ (Figura 3.6), se presentan A(PP) positivas en esta región. Para el caso ENSOnIOD+ ( $n = 2$ ), los valores son más fuertes respecto al caso ENSOnSAM+ ( $n = 8$ ), evidentemente influenciado por este evento extremo. A su vez, para la segunda combinación, se observa una representatividad mayor al 70% solo para la estación más al sur de CR (10087-Monte Caseros Aero) y al sureste de CO (10369-Marco Juárez Aero y 10148-Laboulaye Aero). Por lo tanto, estas coocurrencias de forzantes favorecieron una mayor PP en el centro-este de la región de estudio (58% de las estaciones). Igualmente, hay que considerar que hay otros forzantes actuando.

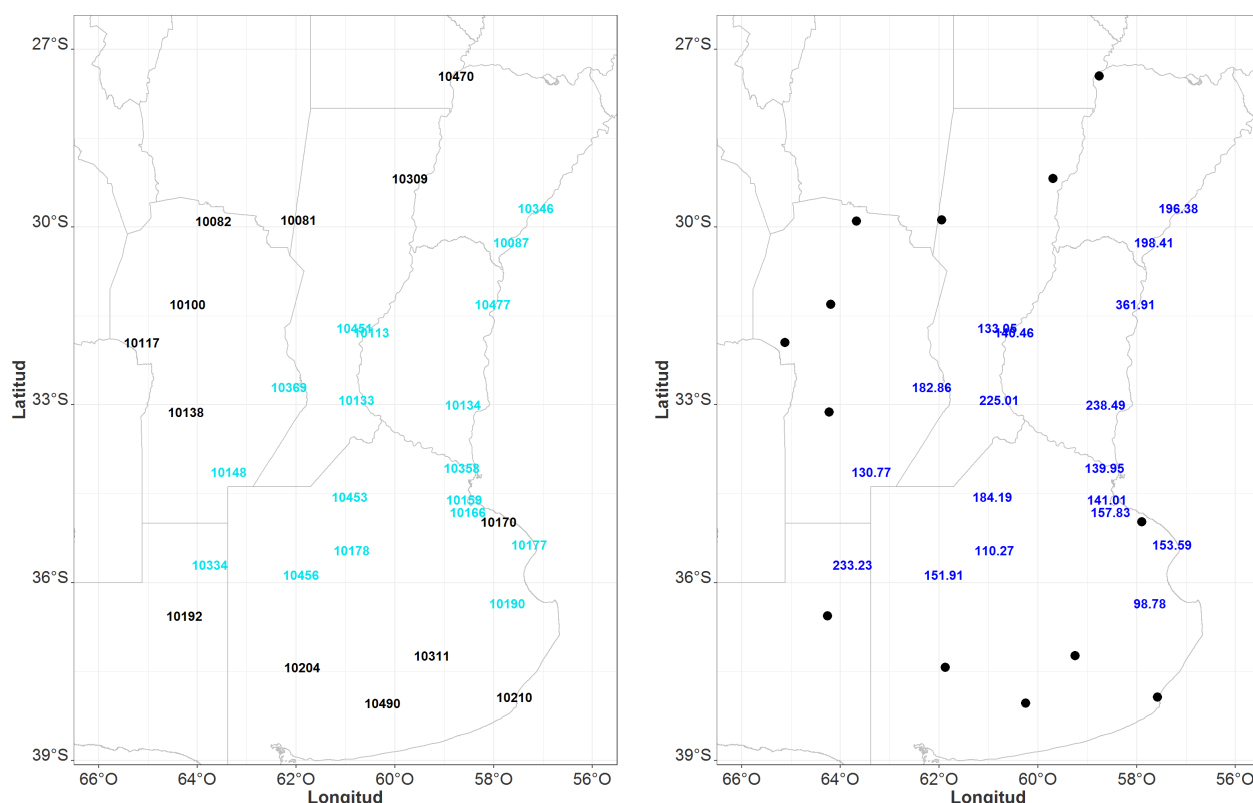


Figura 5.3: Ídem Figura 5.2, pero para octubre de 2012.

A modo de ejemplo, se menciona que el mayor valor de extremos corresponde a la estación 10477-Concordia Aero (ER). Este caso registra los valores máximos de PP acumulada diaria (8 de octubre) y mensual en el período 1961-2023, con 163,0mm y 498,8mm, respectivamente. Tener en cuenta que, para esta estación, la media climatológica mensual de PP es de 161,6mm y que el récord anterior (período 1961-2011) fue de 391,0mm en 2002. A su vez, se destaca una frecuencia observada de 16 días de lluvia, que también superó al máximo valor correspondiente al período 1961-2011 de 15 días de lluvia en el año 2007 (Skansi et al., 2012). Otro caso que es interesante mencionar son los 233,23mm de A(PP) en la estación 10334-General Pico Aero (LP). Este también corresponde al máximo registro diario (14 de octubre) y mensual en el período 1961-2023, con 107,0mm y 320,3mm. Para esta estación, la media mensual es de 100,4mm y el récord anterior (período 1961-2011) era de 194,3mm en 1967. Estos valores se obtuvieron de la página (<https://www.smn.gov.ar/estadisticas>) y del Boletín Climático del SMN (Skansi et

al., 2012). Al tomar estas dos estaciones en el noreste y suroeste de la región de estudio, cuyos valores extremos de A(PP) son elevados, parece no existir un comportamiento de valores altos (bajos) al norte (sur) de la región como ocurre con la media mensual de la PP (Figura 3.1).

### 5.3.3. Febrero, 1984

Recordando el criterio de clasificación que se describió en la sección 2.4, el año 1983 (septiembre 1983 - febrero 1984) se consideró un año ENSO– (Tabla 3.1), ya que el índice ONI presentó valores de  $-0,5$  °C en septiembre, alcanzó valores de  $-1$  °C en noviembre y de  $-0,9$  °C en diciembre, para luego disminuir a  $-0,6$  °C en enero. A su vez, se presentaron valores negativos de los índices DMI y SAM (Tabla 5.6), siendo un evento SAM– fuerte.

ONI	DMI	SAM
$-0,4^{\circ}C$	$-0,15^{\circ}C$	$-1,74$

Tabla 5.6: Ídem Tabla 5.4, pero para febrero de 1984.

En este caso, la región que registró valores de A(PP) que superaron el umbral de  $P95$ , corresponde al centro de la región de estudio: sur y sureste de CO, norte y sur de SF, ER, norte de LP y noroeste y noreste de BA. Los valores oscilan entre 147,24mm y 530,86mm de A(PP).

Comparando estos valores con los resultados de los *composites* de combinación de fases ENSO–IOD– y ENSO–SAM– para el mes de febrero (Figura 3.10), se observan, de forma coincidente a lo esperado, valores positivos de A(PP) en el centro-este de la región de estudio, aunque la representatividad de estos valores (para el caso de ENSO–IOD–) sea de entre el 50 % y el 70 % (Figura 4.1). En el caso de combinación del ENSO– con el SAM–, los valores de A(PP) son mayores que los valores en combinación con IOD–. Por lo tanto, considerando estos tres forzantes, y teniendo en cuenta que existen otros forzantes que pueden estar actuando en la región, estos valores de A(PP) pueden estar asociados al fuerte valor del SAM– ( $-1,74$  en la Tabla 5.6) en coocurrencia con el ENSO– (panel derecho Figura 3.10).

En particular, la estación *10134-Gualeguaychú Aero* (ER) presentó un extremo de 530,86mm de A(PP). Este caso registra los valores máximos de PP acumulada diaria (10 de febrero) y mensual, durante el período 1961-2023, con 180,0mm y 651,7mm, respectivamente. La media climatológica mensual de PP para el mes de febrero, para el período 1981-2010, es de 102,5mm (dato obtenido de [https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn\\_8.1](https://datos.gob.ar/dataset/smn-estadisticas-climaticas-normales/archivo/smn_8.1)).

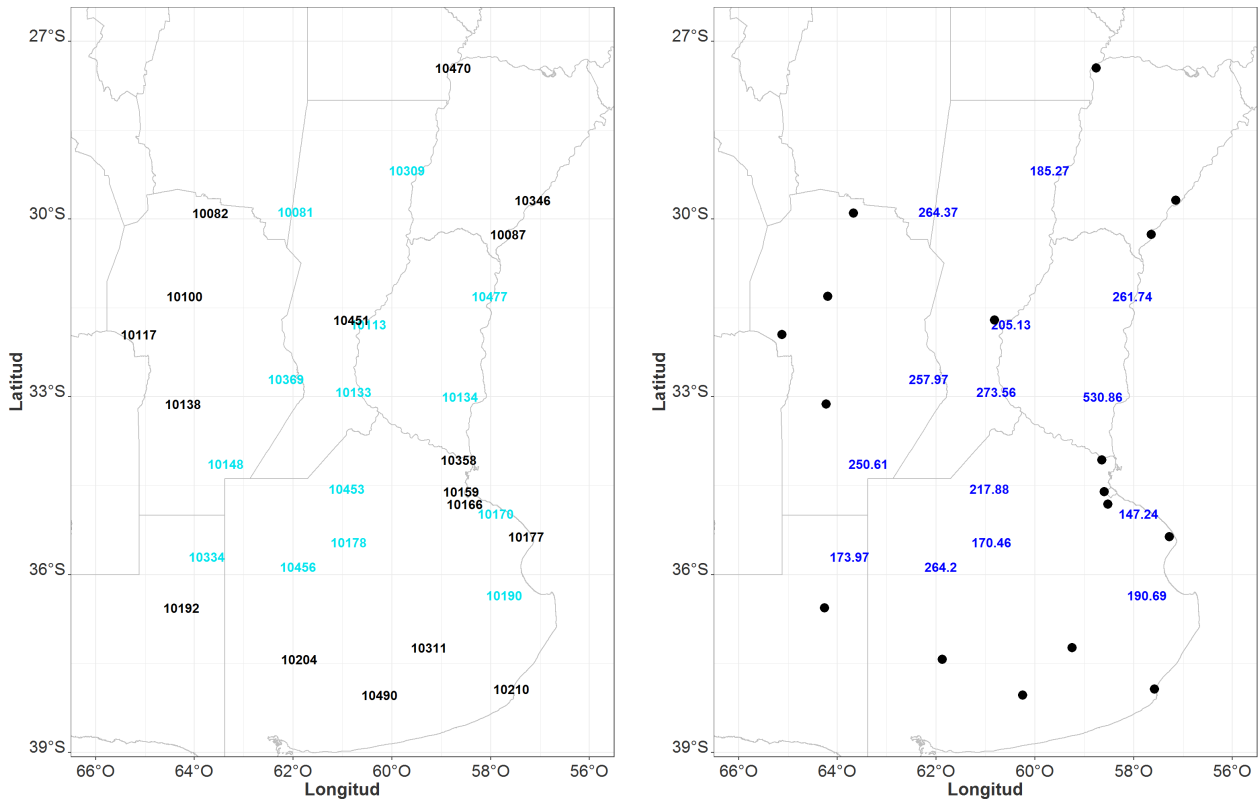


Figura 5.4: Ídem Figura 5.2, pero para febrero de 1984.

Los tres casos analizados han presentado concordancia con las A(PP) esperadas, de acuerdo al análisis de los *composites* y de su representatividad. En los eventos de septiembre de 1982 y febrero de 1984, parecería haber una fuerte influencia del forzante SAM que, en el primer caso, se combina con ENSO+. En cambio, en el evento de octubre de 2012, se pone en evidencia que los forzantes estudiados no son los únicos que influyen en la región de estudio. Es decir, es posible la ocurrencia de extremos climáticos aún cuando el ENSO no se encuentre en una fase ENSO+ extrema, que es la preocupación frecuente de los usuarios de predicciones climáticas estacionales.

# Capítulo 6

## Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha analizado la acción combinada de los principales forzantes remotos a escala mensual para la temporada de primavera-verano en el período 1980-2019. A su vez, se ha analizado la influencia de forzantes IOD y SAM durante condiciones neutrales del ENSO. En esta sección se presenta, para cada mes de estudio, un diagrama que resume los resultados más relevantes obtenidos para cada combinación de fases.

Para el mes de septiembre, se presentan los resultados principales en la Figura 6.1. Se obtuvo que existen diferencias significativas en las A(PP) para el caso de ENSO<sub>n</sub> en combinación con SAM (Figura 3.5). Por un lado, se observaron valores negativos significativos, principalmente en el centro-oeste de la región de estudio, para la combinación con SAM<sub>-</sub>, cuyos valores son representativos hasta en un 90 % (Figura 4.1). Por otro lado, se obtuvieron A(PP) positivas significativas ante la coocurrencia con SAM<sub>+</sub>, con una representatividad del 70 – 80 %, principalmente en la estación del norte y del sur de ER, en el norte de SF, en la estación del norte de LP y en gran parte de la provincia de BA. Para ambas combinaciones, se detectó una gran cantidad de *outliers* (Figura 4.3), que posteriormente fueron clasificados como eventos extremos. A su vez, para los casos ENSO<sub>n</sub>SAM<sub>+</sub> se observó una gran variabilidad espacial y entre los propios eventos correspondientes a cada estación.

Se puede mencionar que, por un lado, en la fase ENSO<sub>-</sub> se observaron A(PP) negativas (positivas) en coocurrencia con IOD<sub>-</sub> (IOD<sub>+</sub>) y de SAM<sub>+</sub> (SAM<sub>-</sub>). Por otro lado, para ENSO<sub>+</sub> con IOD<sub>-</sub> se detectaron A(PP) positivas, mientras que con SAM<sub>-</sub> se observaron A(PP) positivas al este y negativas al oeste de la región de estudio.

Por último, se observó que la mayor cantidad de eventos extremos se presentó en la combinación de la fase positiva de los tres forzantes de estudio (Tabla 5.1 y 5.2). Algunos ejemplos de estos extremos se registraron en las estaciones *10148-Laboulaye Aero (CO)* y *10477-Concordia Aero (ER)* en el año 2001 (ENSO<sub>+</sub> según Tabla 3.1) en coocurrencia con SAM<sub>+</sub> (Figura 4.3) e IOD<sub>+</sub>. A su vez, vale recordar el caso de estudio de 1982, el cual afectó a gran parte del norte y centro-este de la región de estudio (Figura 5.2).

Para el mes de octubre, se presentan los resultados principales en la Figura 6.2. Se encontró que existen diferencias en las A(PP) para el caso de ENSO<sub>n</sub> en combinación con SAM (panel derecho Figura 3.6). Por un lado, se observaron valores negativos (positivos) para la combinación con SAM<sub>-</sub> (SAM<sub>+</sub>); con diferencias significativas al sur de la provincia de BA. Por otro lado, estos valores medios son representativos en un 70 % o más al sur de la región de estudio solo para el caso ENSO<sub>n</sub>SAM<sub>-</sub> (Figura 4.1). A su vez, también en fase ENSO<sub>n</sub> se observan valores de A(PP) positivos fuertes en el centro y noreste de la región de estudio cuando se combina con IOD<sub>+</sub>. Por último, en coocurrencia de ENSO<sub>n</sub> con IOD<sub>-</sub> y con SAM<sub>+</sub>, se detectó la mayor

frecuencia de extremos (Tabla 5.1 y 5.2), coincidiendo con la mayor cantidad de coocurrencia de casos (Figura 3.3 y 3.4).

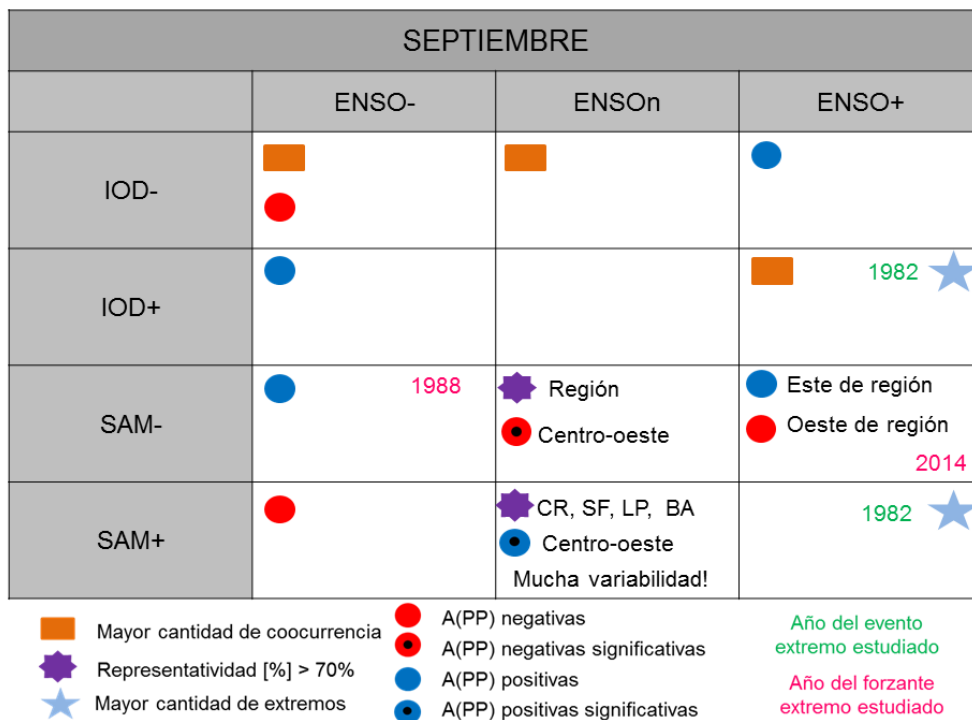


Figura 6.1: Diagrama con los principales resultados para el mes de septiembre.

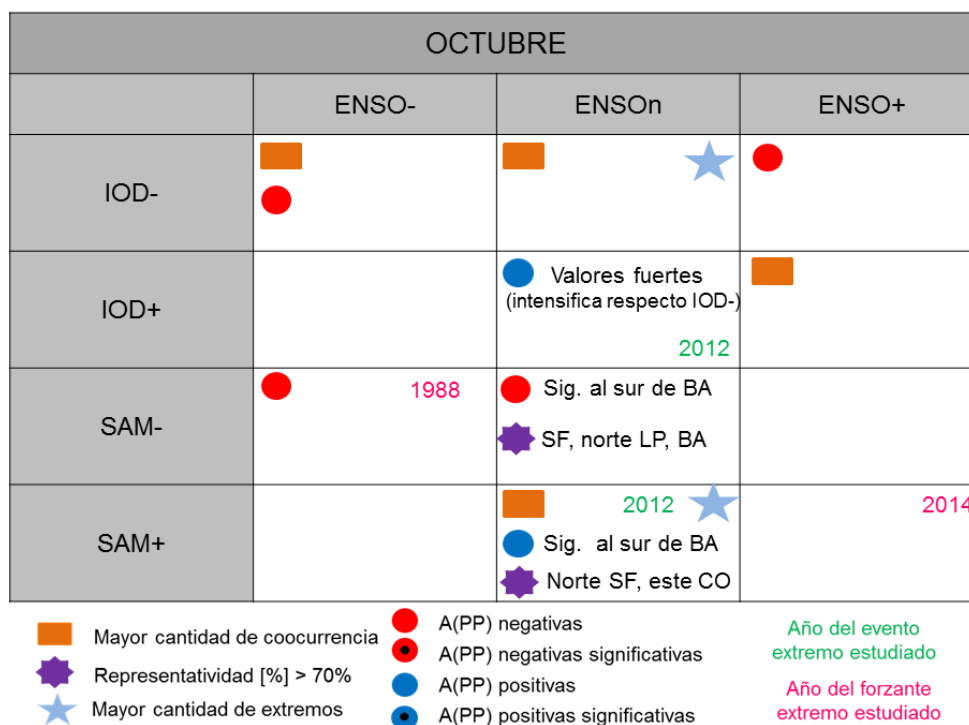


Figura 6.2: Ídem Figura 6.1, pero para el mes de octubre.

Con respecto a las fases ENSO– y ENSO+, para el mes de octubre se observa que, en coocurrencia con IOD–, predominan los valores negativos de A(PP). Lo mismo ocurre para ENSO–SAM–.

Para el mes de noviembre, se presentan los resultados principales en la Figura 6.3. Durante la fase ENSO– predominan valores negativos de A(PP) para todas las combinaciones, como excepción se menciona LP y el sur de la provincia de BA para ENSO–IOD+ (Figura 3.8). En cambio, para ENSO+, predominan valores de A(PP) positivos, a excepción de ENSO+SAM–, que solo presenta estos valores positivos en el noreste de la región de estudio. En cuanto a la representatividad de estos valores medios, se observaron valores mayores al 70 % para gran parte de la región de estudio durante ENSO+SAM+, y durante ENSO+SAM– para el noreste de la región de estudio, norte y suroeste de CO, noroeste de SF y sur de BA (Figura 4.1).

Al igual que para el mes de septiembre, la mayor frecuencia de extremos se observó durante la fase positiva de los tres forzantes estudiados (Tabla 5.1 y 5.2) Sin embargo, al discretizar en función de la cantidad de estaciones y años, se detectó un evento extremo durante el año 1985, donde se dio una coocurrencia de ENSOn con IOD+ y con SAM+ (Tabla 5.3).

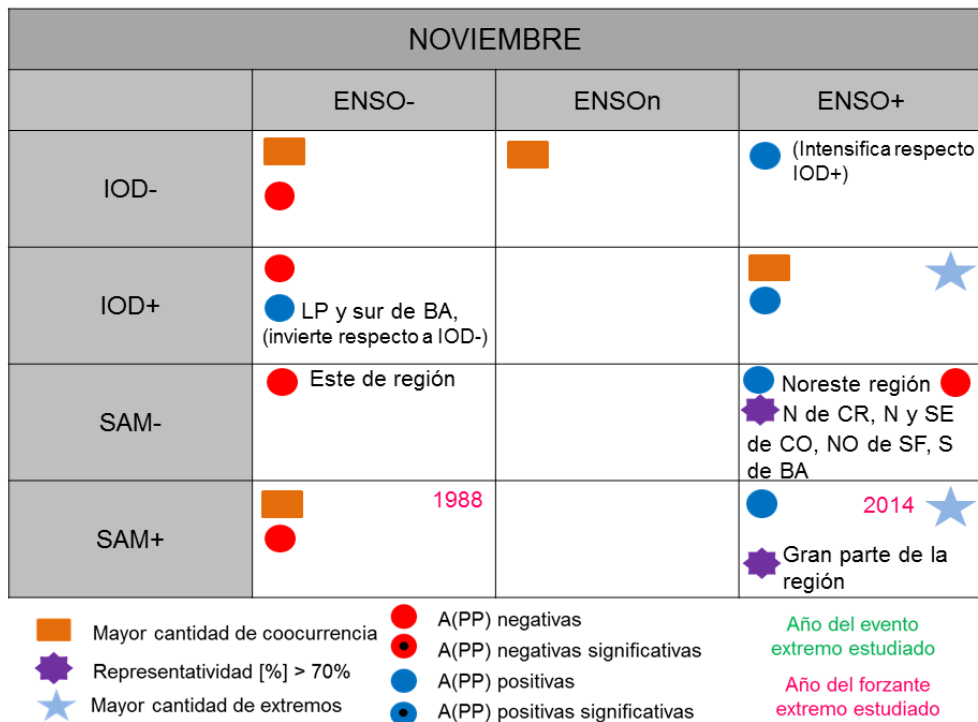


Figura 6.3: Ídem Figura 6.1, pero para el mes de noviembre.

Para diciembre, se presentan los resultados principales en la Figura 6.4. Durante la coocurrencia de ENSO– con cualquier fase IOD o SAM, predominan las A(PP) negativas (Figura 3.9). En cambio, ante la ocurrencia de ENSOn, se observó una inversión en los valores de A(PP), dependiendo de la fase del forzante IOD o SAM. En el primer caso, predominan A(PP) negativas (positivas) en el norte de la región de estudio y A(PP) positivas (negativas) en el norte de CO y en LP para IOD– (IOD+), mientras que para la provincia de BA no se observan cambios. En el segundo caso, predominan valores positivos de A(PP) para ENSOnSAM– y negativos para ENSOnSAM+.

Por último, ante la combinación del ENSO+, predominan las A(PP) positivas para cualquier combinación a excepción del IOD-. Para el caso ENSO+IOD+, se obtuvo que esos valores medios positivos son representativos en un 70% o más, mientras que para ENSO+IOD- se obtuvieron valores similares de representatividad para las A(PP) negativas y significativas del noreste de BA (Figura 4.1). A su vez, para la combinación del ENSO+ con el IOD, existe una gran variabilidad entre eventos (Figura 4.5), siendo que se observó una gran cantidad de outliers para ENSO+IOD+. Luego, estos valores se clasificaron como eventos extremos, coincidiendo con la combinación de fases que presentó la mayor cantidad de eventos extremos para este mes (Tabla 5.1).

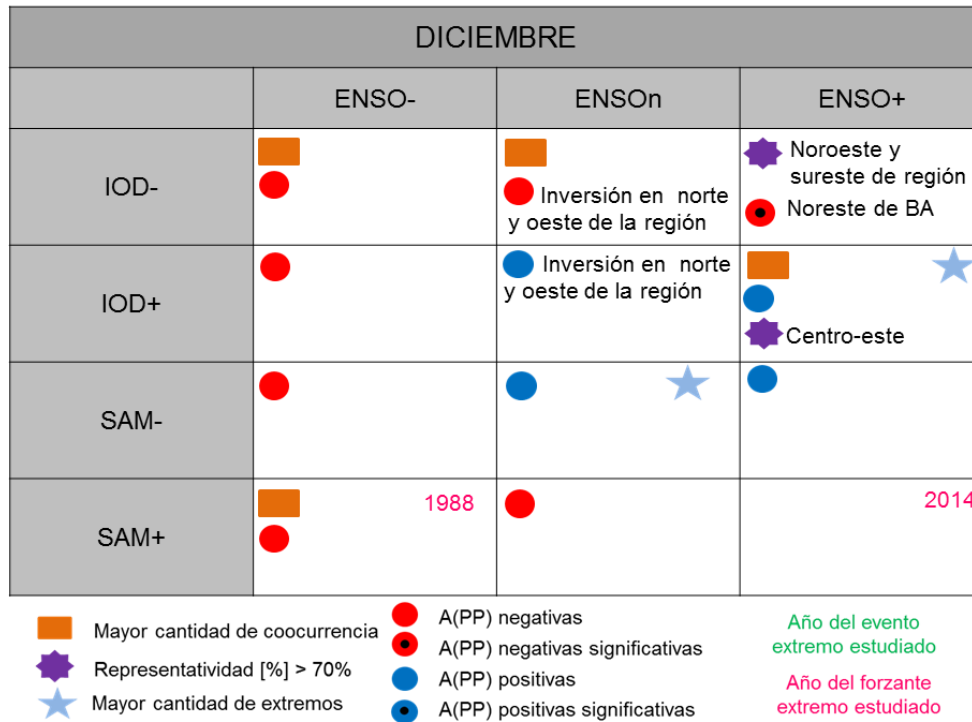


Figura 6.4: Ídem Figura 6.1, pero para el mes de diciembre.

Para el mes de enero, se presentan los resultados principales en la Figura 6.5. Durante la fase ENSO+, tanto en combinación con IOD+ como con SAM+, se obtuvieron fuertes A(PP) positivas en el noreste de la región de estudio; algunas estaciones incluso presentaron valores significativos (Figura 3.9). A su vez, para la coocurrencia con SAM- se observaron A(PP) negativas (algunas significativas) en el centro-este de la región de estudio.

Durante casos ENSON con IOD, se observó una gran inversión en el centro de la región de estudio con A(PP) positivas (negativas) y significativas en combinación con IOD- (IOD+). A su vez, se menciona que, para ENSONIOD+, se observa una gran representatividad de esos valores medios (Figura 4.1). Por último, para este mes se obtuvo que la mayor cantidad de eventos extremos ocurre ante la combinación de ENSONIOD- y de ENSO+SAM+ (Tabla 5.1 y 5.2).

Para el mes de febrero, se presentan los resultados principales en la Figura 6.6. Durante la fase ENSON predominan valores negativos de A(PP) a excepción de la coocurrencia con SAM+ (Figura 3.10). En el caso de ENSONSAM- se observaron valores significativos y fuertes.



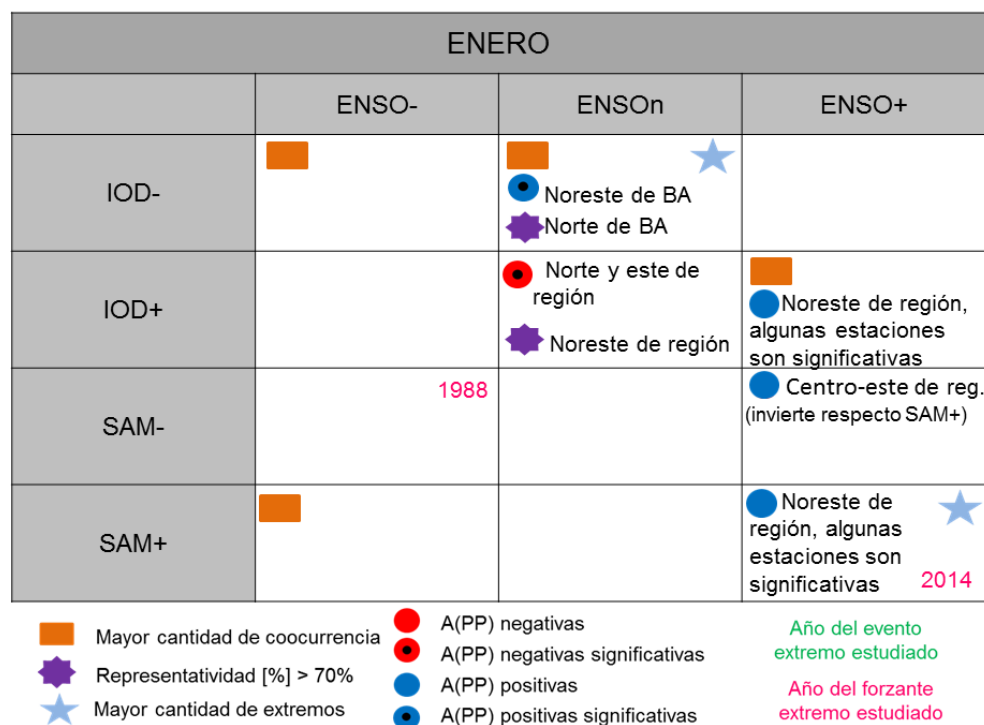


Figura 6.5: Ídem Figura 6.1, pero para el mes de enero.

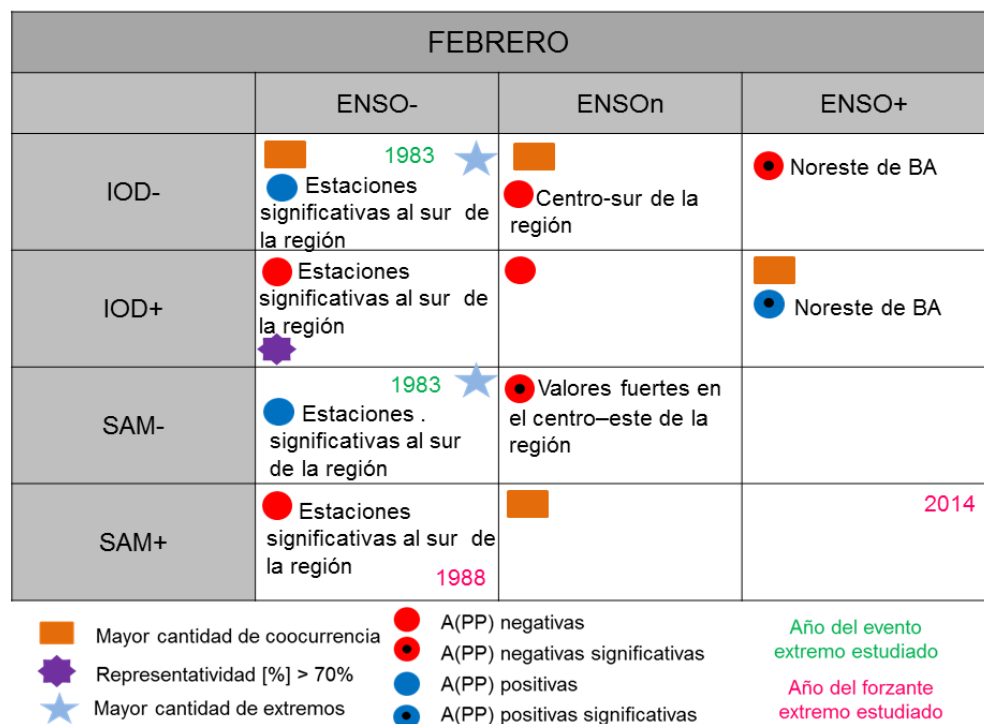


Figura 6.6: Ídem Figura 6.1, pero para el mes de febrero.

Por un lado, para el caso ENSO+ en combinación con el forzante IOD, se observó una inversión en los valores del noreste de BA. Por otro lado, para los casos ENSO-, en combinación con los otros dos forzantes, también en fase negativa, predominan las A(PP) positivas; mientras

que, si se combina con fases positivas, predominan A(PP) negativas. En el caso de ENSO–IOD+ los valores medios son representativos a un valor del 70 % o más (Figura 4.1). A su vez, se detectó una gran cantidad de *outliers* (Figura 4.6), que posteriormente se identificaron como eventos extremos. La mayoría de ellos corresponden al año 1983, el cual, como se analizó antes, fue un evento extremo donde se dio la fase negativa de los tres forzantes (Figura 5.4). Esto coincide con los resultados del análisis de la combinación de forzantes durante eventos extremos, que muestran que la mayor cantidad de estos ocurre durante la fase negativa de los tres forzantes.

Por lo tanto, se ha obtenido, para los meses de estudio, una marcada prevalencia de coocurrencia de igual fase del ENSO con el IOD (ENSO– con IOD– y ENSO+ con IOD+) y del ENSO con el SAM+. A su vez, se detectó que los valores de A(PP) más representativos corresponden a la coocurrencia de fases ENSO con SAM para los meses de primavera (ENSONSAM– en septiembre y octubre, ENSO+SAM+ en noviembre) y a la coocurrencia del ENSO con IOD+ para los meses de verano (ENSO+, ENSOn y ENSO– con IOD+ en diciembre, enero y febrero, respectivamente). En este sentido, a partir de estos resultados y del análisis de casos particulares de forzantes extremos (eventos correspondientes a los años: 1988, 2014 y 2019), se demostró que la respuesta de A(PP) regional frente a un evento individual puede no corresponder con lo esperado para dicha combinación.

Con este trabajo se ha demostrado que existe una gran variabilidad entre los distintos eventos de fases ENSO, lo cual implica una gran variabilidad en la intensidad de los valores de A(PP). Dicha variabilidad de los eventos ENSO puede estar relacionada no sólo con las características particulares con que se presenta cada evento ENSO (amplitud, ciclo, entre otros) sino también puede estar relacionada con la combinación de este forzante con otros forzantes como el SAM y el IOD. Las distintas combinaciones de fases generan diferencias en los valores de A(PP) e incluso variabilidad en la intensidad de eventos extremos. En este sentido, se ha obtenido que existen importantes eventos de este tipo no solo durante la fase ENSO+, sino también durante las fases ENSOn y ENSO–, lo cual es importante conocer a la hora de la toma de decisión. Incluso se observaron eventos extremos de A(PP) durante los meses de enero y febrero, donde la señal de estos forzantes debería tender a disminuir. Por lo tanto, en este sentido queda demostrado que existen también otros forzantes actuando en el comportamiento de la PP en la región de estudio. Es por esto que, a partir de estos resultados, se plantea como trabajo futuro incorporar otros modos de variabilidad como, por ejemplo, algunos patrones del Océano Atlántico. Incluso resulta interesante incluir diversos tipos de eventos ENSO como puede ser el Pacífico Oriental (EP, por sus siglas en inglés) o el Pacífico Central (CP).

# Bibliografía

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., y Wieringa, J. (2003). Guidance on metadata and homogenization. *Wmo Td*, 1186(January 2003), 1–53.
- Alvarez, M. S., Vera, C., Kiladis, G. N., y Liebmann, B. (2016). Influence of the madden julian oscillation on precipitation and surface air temperature in south america. *Climate Dynamics*, 46, 245–262.
- Anagnostopoulou, C., y Tolika, K. (2012). Extreme precipitation in europe: statistical threshold selection based on climatological criteria. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 479–489.
- Anderson, W., Seager, R., Baethgen, W., Cane, M., y You, L. (2019). Synchronous crop failures and climate-forced production variability. *Science advances*, 5(7), eaaw1976.
- Andrian, L. G., Osman, M., y Vera, C. S. (2022). Impactos del dipolo de océano indico en sesa y su acción combinada con el niño oscilación del sur sobre el clima de sudamérica durante la primavera. En *Xiv congreso argentino de meteorología* (p. 759-761). Buenos Aires, Argentina: Libro de resúmenes extendidos.
- Andrian, L. G., Osman, M., y Vera, C. S. (2023). Impacts of the iod and its combined action with the enso on the springtime climate in south america. En *Wcrp open science conference 2023*. Kigali.
- Antico, A., y Vuille, M. (2022). Enso and paraná flow variability: Long-term changes in their connectivity. *International Journal of Climatology*.
- Ashok, K., Guan, Z., y Yamagata, T. (2001). Impact of the indian ocean dipole on the relationship between the indian monsoon rainfall and enso. *Geophysical research letters*, 28(23), 4499–4502.
- Barreiro, M. (2010). Influence of enso and the south atlantic ocean on climate predictability over southeastern south america. *Climate dynamics*, 35, 1493–1508.
- Barros, V. R., Doyle, M. E., y Camilloni, I. A. (2008). Precipitation trends in southeastern south america: relationship with enso phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93, 19–33.
- Blunden, J., y Arndt, D. S. (2016). State of the climate in 2015. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(8), Si–S275.
- Blunden, J., y Boyer, T. (2021). State of the climate in 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(8).

- Bohn, V. Y., Delgado, A. L., Piccolo, M. C., y Perillo, G. M. (2016). Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–15.
- Bombardi, R. J., Carvalho, L. M., Jones, C., y Reboita, M. S. (2014). Precipitation over eastern south america and the south atlantic sea surface temperature during neutral enso periods. *Climate Dynamics*, 42, 1553–1568.
- Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of hydrology*, 58(1-2), 11–27.
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., ... Santoso, A. (2020). Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215–231.
- Camilloni, I. A., y Barros, V. R. (2003). Extreme discharge events in the paraná river and their climate forcing. *Journal of Hydrology*, 278(1-4), 94–106.
- Campitelli, E., Díaz, L. B., y Vera, C. (2022). Assessment of zonally symmetric and asymmetric components of the southern annular mode using a novel approach. *Climate Dynamics*, 58(1), 161–178.
- Cavalcanti, I. F. A. (2012). Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over south america: A review and case studies for the first decade of the 21st century. *Atmospheric Research*, 118, 27–40.
- Chan, S. C., Behera, S. K., y Yamagata, T. (2008). Indian ocean dipole influence on south american rainfall. *Geophysical Research Letters*, 35(14).
- Fernández Long, M., Spescha, L., Hurtado, R., y Murphy, G. (2011). Impacto del enos sobre los rendimientos de maíz en la región pampeana argentina. *agriscientia*, 28(1), 31–38.
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., y Dahe, Q. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Fogt, R. L., Bromwich, D. H., y Hines, K. M. (2011). Understanding the sam influence on the south pacific enso teleconnection. *Climate dynamics*, 36, 1555–1576.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., y Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180–195.
- Gillett, N. P., Kell, T. D., y Jones, P. (2006). Regional climate impacts of the southern annular mode. *Geophysical Research Letters*, 33(23).
- Gimeno, L., Sorí, R., Vazquez, M., Stojanovic, M., Algarra, I., Eiras-Barca, J., ... Nieto, R. (2022). Extreme precipitation events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(6), e1611.
- Gong, T., Feldstein, S. B., y Luo, D. (2010). The impact of enso on wave breaking and southern annular mode events. *Journal of the atmospheric Sciences*, 67(9), 2854–2870.
- Grimm, A. M., Ferraz, S. E., y Gomes, J. (1998). Precipitation anomalies in southern brazil associated with el niño and la niña events. *Journal of climate*, 11(11), 2863–2880.

- Hamed, K. H., y Rao, A. R. (1998). A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182–196.
- Hendon, H. H., Thompson, D. W., y Wheeler, M. C. (2007). Australian rainfall and surface temperature variations associated with the southern hemisphere annular mode. *Journal of Climate*, 20(11), 2452–2467.
- Heumann, C., y Shalabh, M. S. (2016). *Introduction to statistics and data analysis*. Springer.
- Hong, C.-C., Lu, M.-M., y Kanamitsu, M. (2008). Temporal and spatial characteristics of positive and negative indian ocean dipole with and without enso. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D8).
- Hu, X., Eichner, J., Gong, D., Barreiro, M., y Kantz, H. (2023). Combined impact of enso and antarctic oscillation on austral spring precipitation in southeastern south america (sesa). *Climate Dynamics*, 61(1), 399–412.
- Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., ... Zhang, H.-M. (2017). Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ersstv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 30(20), 8179–8205.
- Hurtado, R., Serio, L., Spescha, L., Long, M. F., y Murphy, G. M. (2005). Análisis de la sensibilidad de distintos índices del enso para explicar los rendimientos de maíz en la región pampeana. *Rev. Fac. de Agronomía*, 25(1), 53–60.
- Hurtado, R., Spescha, L., Long, M. F., y Murphy, G. M. (2003). Evaluación del enso como predictor de los rendimientos de maíz en la región pampeana (argentina). *Rev. Fac. de Agronomía*, 23(2-3), 131–139.
- Hurtado, S. I., Zaninelli, P. G., y Agosta, E. A. (2020). A multi-breakpoint methodology to detect changes in climatic time series. an application to wet season precipitation in subtropical argentina. *Atmospheric Research*, 241, 104955.
- Iacovone, M. F., Pántano, V. C., y Penalba, O. C. (2024). The relationship between enso, iod and sam with extreme rainfall over south america. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1–14.
- Luo, J.-J., Zhang, R., Behera, S. K., Masumoto, Y., Jin, F.-F., Lukas, R., y Yamagata, T. (2010). Interaction between el nino and extreme indian ocean dipole. *Journal of Climate*, 23(3), 726–742.
- L'Heureux, M. L., y Thompson, D. W. (2006). Observed relationships between the el niño–southern oscillation and the extratropical zonal-mean circulation. *Journal of Climate*, 19(2), 276–287.
- Marshall, G. J. (2003). Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *Journal of climate*, 16(24), 4134–4143.
- McPhaden, M. J., Santoso, A., y Cai, W. (2020). Introduction to el niño southern oscillation in a changing climate. *El Niño Southern Oscillation in a changing climate*, 1–19.
- McPhillips, L. E., Chang, H., Chester, M. V., Depietri, Y., Friedman, E., Grimm, N. B., ... Rosi, E. J. (2018). Defining extreme events: A cross-disciplinary review. *Earth's Future*, 6(3), 441–455.

- Meehl, G. A., Richter, J. H., Teng, H., Capotondi, A., Cobb, K., Doblas-Reyes, F., ... Han, W. (2021). Initialized earth system prediction from subseasonal to decadal timescales. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(5), 340–357.
- Pántano, V. C., Holzman, M. E., Penalba, O. C., y Rivas, R. (2022). Enso signal on subseasonal precipitation distribution and soil moisture response in the argentine pampas. *Pure and Applied Geophysics*, 179(2), 879–896.
- Penalba, O. C., y Vargas, W. M. (2008). Variability of low monthly rainfall in la plata basin. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 15(3), 313–323.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126–135.
- Podestá, G. P., Messina, C. D., Grondona, M. O., y Magrin, G. O. (1999). Associations between grain crop yields in central-eastern argentina and el niño–southern oscillation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38(10), 1488–1498.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. d. S., Rehbein, A., ... Souza, C. A. d. (2021). Impacts of teleconnection patterns on south america climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1504(1), 116–153.
- Richter-Menge, J., y Druckenmiller, M. (2020). State of the climate in 2019. *Arctic*, 101(8), S239–S286.
- Ropelewski, C., y Halpert, M. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the el niño/southern oscillation. *Monthly weather review*, 115(8), 1606–1626.
- Ropelewski, C., y Halpert, M. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. *Journal of climate*, 268–284.
- Saji, N., Goswami, B. N., Vinayachandran, P., y Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical indian ocean. *Nature*, 401(6751), 360–363.
- Saji, N., y Yamagata, T. (2003). Possible impacts of indian ocean dipole mode events on global climate. *Climate research*, 25(2), 151–169.
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., y Cai, W. (2017). The defining characteristics of enso extremes and the strong 2015/2016 el niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079–1129.
- Sena, A. C., y Magnusdottir, G. (2021). Influence of the indian ocean dipole on the large-scale circulation in south america. *Journal of Climate*, 34(15), 6057–6068.
- Silvestri, G. E., y Vera, C. S. (2003). Antarctic oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern south america. *Geophysical Research Letters*, 30(21).
- Skansi, M. d. l. M., Garay, N., Aldeco, L. S., Domínguez, D. A., Garay, N., Herrera, N., ... Veiga, H. (2014a). *Boletín climatológico-octubre 2014* (Inf. Téc. n.º Volumen XXVI- N°10). Ciudad Autónoma de Buenos Aires- Argentina: Servicio Meteorológico Nacional. Dirección Nacional de Ciencia e Innovación ...

- Skansi, M. d. l. M., Garay, N., Aldeco, L. S., Domínguez, D. A., Garay, N., Herrera, N., ... Veiga, H. (2014b). *Boletín climatológico-septiembre 2014* (Inf. Téc. n.º Volumen XXVI- N°09). Ciudad Autónoma de Buenos Aires- Argentina: Servicio Meteorológico Nacional. Dirección Nacional de Ciencia e Innovación ....
- Skansi, M. d. l. M., Garay, N., Aldeco, L. S., Domínguez, D. A., Garay, N., Herrera, N., ... Veiga, H. (2015). *Boletín climatológico-verano 2014/15* (Inf. Téc. n.º Volumen XXVII). Ciudad Autónoma de Buenos Aires- Argentina: Servicio Meteorológico Nacional. Dirección Nacional de Ciencia e Innovación ....
- Skansi, M. d. l. M., Garay, N., Aldeco, L. S., Domínguez, D. A., Garay, N., Herrera, N., ... Veiga, H. (2019). *Boletín climatológico-septiembre 2019* (Inf. Téc. n.º Volumen XXX N°9). Ciudad Autónoma de Buenos Aires- Argentina: Servicio Meteorológico Nacional. Dirección Nacional de Ciencia e Innovación ....
- Skansi, M. d. l. M., Garay, N., Aldeco, L. S., Garay, N., Herrera, N., Stella, J. L., y Veiga, H. (2012). *Boletín climatológico-octubre 2012* (Inf. Téc. n.º Volumen XXIV- N°10). Ciudad Autónoma de Buenos Aires- Argentina: Servicio Meteorológico Nacional. Dirección Nacional de Ciencia e Innovación ....
- Stuecker, M. F., Timmermann, A., Jin, F.-F., Chikamoto, Y., Zhang, W., Wittenberg, A. T., ... Zhao, S. (2017). Revisiting enso/indian ocean dipole phase relationships. *Geophysical Research Letters*, *44*(5), 2481–2492.
- Team, R. C. (2021). *R: A language and environment for statistical computing [manual de software informático]. vienna, austria.*
- Thompson, D. W., y Wallace, J. M. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. part i: Month-to-month variability. *Journal of climate*, *13*(5), 1000–1016.
- Vazquez, M., Nieto, R., Liberato, M. L., y Gimeno, L. (2020). Atmospheric moisture sources associated with extreme precipitation during the peak precipitation month. *Weather and Climate Extremes*, *30*, 100289.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., y González, P. (2006). Climate change scenarios for seasonal precipitation in south america from ipcc-ar4 models. *Geophysical research letters*, *33*(13).
- Vitart, F., Robertson, A. W., y Anderson, D. L. (2012). Subseasonal to seasonal prediction project: Bridging the gap between weather and climate. *Bulletin of the World Meteorological Organization*, *61*(2), 23.
- Wang, C., Deser, C., Yu, J.-Y., DiNezio, P., y Clement, A. (2017). El niño and southern oscillation (enso): a review. *Coral reefs of the eastern tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment*, 85–106.
- Wang, H., Kumar, A., Murtugudde, R., Narapusetty, B., y Seip, K. L. (2019). Covariations between the indian ocean dipole and enso: A modeling study. *Climate Dynamics*, *53*, 5743–5761.
- Wang, H., Murtugudde, R., y Kumar, A. (2016). Evolution of indian ocean dipole and its forcing mechanisms in the absence of enso. *Climate Dynamics*, *47*, 2481–2500.



- Wijngaard, J., Klein Tank, A., y Können, G. (2003). Homogeneity of 20th century european daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(6), 679–692.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- WMO. (2023). Wwrp/wcrp sub-seasonal to seasonal prediction project (s2s) phase 2 final report. *World Meteorological Organization*.
- Yang, S., Li, Z., Yu, J.-Y., Hu, X., Dong, W., y He, S. (2018). El niño–southern oscillation and its impact in the changing climate. *National Science Review*, 5(6), 840–857.
- Yuan, Y., y Li, C. (2008). Decadal variability of the iod-enso relationship. *Chinese Science Bulletin*, 53(11), 1745–1752.
- Zhang, C. (2005). Madden-julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2).
- Zhang, X., y Yang, F. (2004). Rclimdex (1.0) user manual. *Climate Research Branch Environment Canada*, 22, 13–14.
- Zhao, Y., y Nigam, S. (2015). The indian ocean dipole: A monopole in sst. *Journal of Climate*, 28(1), 3–19.

# Apéndice A

ID	Nombre	Provincia	Latitud	Longitud	Altura (m)	Mes	Signo
10087	Monte Caseros Aero	CR	30.27	57.65	54	12	+
10100	Córdoba Aero	CO	-31.3	-64.2	495	1	-
10111	Pilar Observatorio	CO	-31.07	-63.88	338	1	-
10134	Gualeguaychu Aero	ER	-33.0	-58.62	23	1, 12	+
10177	Punta Indio	BA	-35.37	-57.28	22	2	+
10192	Santa Rosa Aero	LP	-36.57	-64.27	191	10	+
10204	Coronel Suarez Aero	BA	-37.95	-61.88	233	1	-
10210	Mar del Plata Aero	BA	37.93	57.58	21	2, 9	+
10309	Reconquista Aero	SF	-29.18	-59.7	53	9	-
10311	Tandil Aero	BA	-37.23	-59.25	175	10	-
10346	Paso de los Libres Aero	CR	-29.68	-57.15	70	12	+
10369	Marcos Juarez Aero	CO	-32.7	-62.15	114	2	+
10477	Concordia Aero	ER	-31.3	-58.02	38	10	+

Tabla A.1: Tendencias significativas detectadas a partir del test no paramétrico de Mann-Kendall. Se detalla la información de las estaciones (número de identificación -ID-, nombre y ubicación), así como el mes y signo correspondientes.