



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY

# Caracterización de las olas de calor en Uruguay, análisis de la variabilidad interanual y variabilidad diaria.

Santiago de Mello

Programa de Posgrado de PEDECIBA Geociencias  
Facultad de Ciencias  
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Marzo de 2024



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY

# Caracterización de las olas de calor en Uruguay, análisis de la variabilidad interanual y variabilidad diaria.

Santiago de Mello

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado de PEDECIBA Geociencias, Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en PEDECIBA Geociencias.

Director:

PHd. Prof. Madeleine Renom

Montevideo – Uruguay

Marzo de 2024

de Mello, Santiago

Caracterización de las olas de calor en Uruguay, análisis de la variabilidad interanual y variabilidad diaria.  
/ Santiago de Mello. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ciencias, 2024.

xvi, 143 p.: il.; 29,7cm.

Director:

Madeleine Renom

Tesis de Maestría – Universidad de la República,  
Programa de PEDECIBA Geociencias, 2024.

Referencias bibliográficas: p. 106 – 112.

1. Olas de calor, 2. Variabilidad interanual,  
3. Variabilidad diaria. I. Renom, Madeleine, .  
II. Universidad de la República, Programa de Posgrado  
de PEDECIBA Geociencias. III. Título.

## INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

---

PHd. Prof. Marcelo Barreiro

---

PHd. Prof. Maria Laura Bettoli

---

PHd Prof. Mercedes Fourment

Montevideo – Uruguay

Marzo de 2024

## RESUMEN

Esta tesis se centra en las Olas de Calor (OC) que afectan a Uruguay, en particular en Olas de Calor Generalizadas (OCG) en el período 1950-2014. Define con precisión tanto las OC como las OCG, estableciendo una metodología que permite su análisis a lo largo de todas las estaciones del año.

Se observa un incremento en la frecuencia de OC en el norte del país al examinar las tendencias por estación meteorológica. Se identifican y definen 82 OCG durante el período estudiado, representando el 1.45 % de los datos. El invierno registra la mayor cantidad de OCG, seguido por el otoño, verano y primavera. Sin embargo, no se detectan tendencias significativas en cuanto a la cantidad, duración e intensidad de las OCG a lo largo de los años.

Se lleva a cabo un análisis interanual que relaciona las características de las OCG con diversos índices oceánicos, atmosféricos y del estado hidrológico. Durante el verano, se observa que un déficit de precipitaciones se asocia con un aumento tanto en la cantidad como en la intensidad de las OCG, y viceversa. Además, el SAM sugiere que valores negativos están correlacionados con OCG más prolongadas e intensas. Durante los eventos de El Niño, las OCG tienden a ser más prolongadas y menos frecuentes, mientras que durante La Niña son más frecuentes pero de menor duración. La combinación de un SAM negativo y un evento de El Niño da como resultado OCG más prolongadas, menos frecuentes y de mayor intensidad, revelando el impacto sinérgico de estos fenómenos climáticos en Uruguay.

El análisis a escala diaria, se realizó a través de la determinación de Patrones Sinópticos (PS), lo que permitió identificar 4 PS asociados a días de OCG, dos con predominancia del viento del norte y dos del noreste. Estos patrones varían según las estaciones, siendo PS-1 y PS-3 predominantes en invierno, PS-2 en verano, PS-7 junto con PS-2 en otoño, y PS-7 en primavera. Este estudio es pionero en determinar estos patrones de circulación para Uruguay que abarca todo el año, lo que supone un avance en la comprensión de estos fenómenos meteorológicos para Uruguay.

Palabras claves:

Olas de calor, Variabilidad interanual, Variabilidad diaria.

# Lista de figuras

1.1	Figura tomada del Foro Económico Global de Davos 2018, Fekete et al. 2009. . . . .	3
1.2	Esquema de los principales fenómenos meteorológicos que inciden en la variabilidad de Sudamérica. A la izq. en superficie y a la der. en altura, adaptado de Reboita et al. 2010. . . . .	4
1.3	Esquema de la circulación de Walker para el invierno (DJF) basados en cálculos de vientos divergentes de la tropósfera superior e inferior. Tomado de: <a href="https://www.meted.ucar.edu/tropicaltextbook_2nd_edition/mediagraphicsenso_walker_mean.gif">https://www.meted.ucar.edu/tropicaltextbook_2nd_edition/mediagraphicsenso_walker_mean.gif</a> . . . . .	7
1.4	Esquema del impacto del ENSO en el clima de Sudamérica. Se muestra la temperatura superficial del mar (izquierda), climatologías de lluvia (centro) y temperatura del aire en la superficie (derecha) (parte a), y anomalías relacionadas para junio-julio-agosto (JJA; parte b), septiembre-octubre-noviembre (SON; parte c), diciembre-enero-febrero (DJF; parte d) y marzo-abril-mayo (MAM; parte e). Tomada de Cai et al. 2020 . . . . .	9
1.5	Fases del Modo Anular del Sur: positiva (izquierda) y negativa (derecha). En azul se muestra la posición predominante de los vientos del oeste (SWW) en cada fase de SAM. Tomada de Davies, 2024 . . . . .	12
2.1	Ubicación geográfica de las estaciones. . . . .	21
2.2	Ubicación geográfica de los pluviómetros de la red de UTE. Tomada del convenio UTE-FING-UdelaR para el pronóstico de variables relevantes para la gestión de sistema eléctrico (Resolución: R18.-1166). . . . .	22
3.1	Ejemplo análisis de la fecha 21/01/2012. . . . .	27
3.2	Porcentaje de datos faltantes de Tx y Tn por año . . . . .	29

3.3	Porcentaje de datos faltantes de Tx y Tn por día . . . . .	30
3.4	Distribución del porcentaje de datos faltantes de todas las series de Tx y Tn para cada día del año. . . . .	31
3.5	Densidad de Tn de la estación Artigas por décadas. . . . .	34
3.6	Densidad de Tx-Uruguay y Tn-Uruguay por décadas. . . . .	35
3.7	Boxplot de Tx y Tn por mes y por estación meteorológica. . . . .	37
3.8	Mapas de tendencias y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn . . . . .	39
3.9	Mapas de tendencias para el verano (Diciembre, Enero y Febrero - DEF ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn . . . . .	40
3.10	Mapas de tendencias para el otoño (marzo, abril y mayo - MAM ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn . . . . .	41
3.11	Mapas de tendencias para el invierno (junio, julio y agosto - JJA ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn . . . . .	42
3.12	Mapas de tendencias para el primavera (setiembre, octubre y noviembre - SON ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn . . . . .	43
4.1	Percentil: 10 (P10), 25 (P25), 50 (P50), 75 (P75) y 90 (P90) de las Tx en la estación meteorológica Estanzuela, para ventanas móvil de 1, 3, 5 y 15 días. . . . .	48
4.2	Percentiles 90 de las Tx (línea roja) en la estación meteorológica Estanzuela (EST) para la ventana móvil de 15 días y datos observados en cada día (puntos negros). . . . .	48
4.3	Percentiles 90 de las Tn (línea roja) en la estación meteorológica Estanzuela (EST) para la ventana móvil de 15 días y datos observados en cada día (puntos negros). . . . .	49
4.4	Olas de calor en la Estanzuela. a) Cantidad ( ) de días con olas de calor en la marcha anual. b) Distribución de las olas de calor. c) Cantidad ( ) de días con ola de calor que ocurrieron por año. . . . .	52
4.5	Histograma duración de las olas de calor para Estanzuela . . . . .	52

4.6	Tendencia anual de la cantidad de olas de calor al año, con significancia estadística al 5 %.	53
4.7	Olas de calor generalizadas. a) Cantidad (#) de días con olas de calor en la marcha anual. b) Distribución de las olas de calor. c) Cantidad (#) de días con ola de calor que ocurrieron por año.	59
4.8	Histograma de D-OCG.	60
5.1	Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5 %. Para todo el año.	67
5.2	Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5 %. Para la estación del año DEF.	69
5.3	Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5 %. Para la estación del año MAM.	72
5.4	Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5 %. Para la estación del año JJA.	73
5.5	Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5 %. Para la estación del año SON.	74
6.1	Composite de los días de con OCG para SLP.	80
6.2	Desviación estándar (SD) de los composite de los días de con OCG para SLP.	81
6.3	Composite de los días de con OCG para SLP por estación del año. A) Verano (DEF), B) Otoño (MAM), C) Invierno (JJA) y D) Primavera (SON)	82
6.4	Gráfico del Pseudo-F para k entre 2 y 20.	83

6.5 Patrón sinóptico asociado al cluster 1 (PS-1) (izq.) y patrón sinóptico asociado al cluster 2 (PS-2) (der.). . . . .	85
6.6 Patrón sinóptico asociado al clúster 3 (PS-3) (izq.) y patrón sinóptico asociado al cluster 4 (PS-4) (der.). . . . .	86
6.7 Patrón sinóptico asociado al clúster 5 (PS-5) (izq.) y patrón sinóptico asociado al clúster 6 (PS-6) (der.). . . . .	87
6.8 Patrón sinóptico asociado al clúster 7 (PS-7) (izq.) y patrón sinóptico asociado al cluster 8 (PS-8) (der.). . . . .	88
6.9 Patrón sinóptico asociado al clúster 9 (PS-9) (izq.) y patrón sinóptico asociado al clúster 10 (PS-10) (der.). . . . .	88
6.10 Histograma de la cantidad ( ) de días en cada PS o clúster, discretizando en cada clúster los días que presenta OCG. . . . .	90
6.11 Histograma de la cantidad (#) de días en cada PS discretizando por estación del año. . . . .	91
6.12 Gráfico de torta del porcentaje de días con OCG discretizando por estación del año y PS. . . . .	92
6.13 (a) Cantidad de días con OCG discretizando por estación del año y PS. (b) Gráfico de torta del porcentaje de días con OCG discretizando por estación del año y PS. . . . .	93
6.14 Composite del PS-2 (a). Diferencia de SLP del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %. . . . .	97
6.15 Composite del PS-7 (a). Diferencia de SLP del PS-7 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-7 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-7 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %. . . . .	99

6.16 Composite del PS-1 (a). Diferencia de SLP del PS-1 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-1 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-1 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.	100
6.17 Composite del PS-3 (a). Diferencia de SLP del PS-3 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-3 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-3 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.	101
A.1 Datos faltantes de Tx por estación meteorológica.	115
A.2 Datos faltantes de Tn por estación meteorológica.	116
B.1 Olas Artigas.	117
B.2 Olas Carrasco.	118
B.3 Olas Melo.	119
B.4 Olas Mercedes.	120
B.5 Olas Paso de los Toros.	121
B.6 Olas Paysandú.	122
B.7 Olas Prado.	123
B.8 Olas Rivera.	124
B.9 Olas Rocha.	125
B.10 Olas Salto.	126
B.11 Olas Artigas.	126
B.12 Olas Carrasco.	127
B.13 Olas Melo.	127
B.14 Olas Mercedes.	128
B.15 Olas Paso de los Toros.	128

B.16 Olas Paysandú. . . . .	129
B.17 Olas Prado. . . . .	129
B.18 Olas Rivera. . . . .	130
B.19 Olas Rocha. . . . .	130
B.20 Olas Salto. . . . .	131
B.21 Ola al 50 % . . . . .	131
C.1 Primer EOF del PCA (EOF 1) . . . . .	135
C.2 Primer EOF rotado mediante Varimax . . . . .	136
C.3 Primer EOF rotado mediante Quartimax . . . . .	137

# Lista de tablas

2.1	Procedencia, código OMM y datos geográficos de las estaciones meteorológicas consideradas. . . . .	21
3.1	Cantidad de datos identificados para ser revisados, cantidad de datos que se pudieron revisar en el Inumet y datos pendientes a revisar. . . .	28
3.2	Tx: Máximos, mínimos, percentiles y datos faltantes . . . . .	32
3.3	Tn: Máximos, mínimos, percentiles y datos faltantes . . . . .	33
4.1	Largo medio de las OCG discretizadas por década y por estación de año. En paréntesis se agrega la cantidad de OCG que componen el promedio. Los casos donde no hay registros se indican con: –. (*) década no completa (2010-2014) . . . . .	61
4.2	Intensidad media de las OCG discretizadas por década y por estación de año. Los valores indican el promedio las IOCGn de cada período. En paréntesis, se agrega el promedio de I <sub>max</sub> OCG. Los casos donde no hay registros se indican con: –. (*): década no completa (2010-2014). . .	63
4.3	Promedio de las intensidades I <sub>max</sub> OCG y IOCGn según largo de las olas. Se agrega la cantidad de OCG para cada largo en la columna #OCG . . . . .	63
B.1	OCG y sus índices entre 1950 a 1985 . . . . .	133
B.2	OCG y sus índices entre 1986 y 2014 . . . . .	134
D.1	OCG por fechas y clúster (I) . . . . .	139
D.2	Ejemplo1 . . . . .	140

D.3 OCG por fechas y clúster (II) . . . . .	141
D.4 OCG por fechas y clúster (III) . . . . .	142
D.5 OCG por fechas y clúster (IV) . . . . .	143

# Tabla de contenidos

<b>Lista de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto global de las olas de calor . . . . .	1
1.2 Temperaturas extremas y olas de calor en Sudamérica . . . . .	3
1.3 Modos de variabilidad climáticos . . . . .	6
1.4 Humedad del suelo . . . . .	14
1.5 Patrones Sinópticos de Circulación . . . . .	15
1.6 Objetivo . . . . .	18
1.6.1 Objetivos específicos . . . . .	18
1.7 Estructura de la tesis . . . . .	19
<b>2 Datos</b>	<b>20</b>
2.1 Datos observados de temperatura . . . . .	20
2.2 Datos observados de precipitación . . . . .	21
2.3 Modos de variabilidad climáticos . . . . .	22
2.4 Datos de reanálisis . . . . .	23
<b>3 Análisis de temperaturas máximas y mínimas observadas</b>	<b>25</b>

3.1	Control de calidad . . . . .	25
3.2	Datos faltantes . . . . .	28
3.3	Análisis de las series de temperaturas y tendencias . . . . .	31
3.3.1	Estadísticos, percentiles, ciclo anual y distribución de probabilidades . . . . .	32
3.4	Tendencias de Tx y Tn . . . . .	37
3.5	Síntesis del capítulo . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Olas de calor</b>	<b>45</b>
4.1	Definición de Ola de Calor . . . . .	47
4.1.1	Olas de Calor por estación meteorológica. . . . .	51
4.2	Olas de Calor Generalizadas (OCG) . . . . .	56
4.2.1	Definición de OCG . . . . .	57
4.2.2	Caracterización de las OCG . . . . .	57
4.2.3	Duración de las OCG . . . . .	59
4.2.4	Tendencia y frecuencia de las OCG . . . . .	61
4.2.5	Intensidad de las OCG . . . . .	62
4.3	Síntesis del capítulo . . . . .	63
<b>5</b>	<b>OCG, índices de circulación y condiciones hídricas.</b>	<b>65</b>
5.1	Análisis de los resultados . . . . .	66
5.1.1	Verano (DEF) . . . . .	68
5.1.2	Otoño (MAM) . . . . .	71
5.1.3	Invierno (JJA) . . . . .	72
5.1.4	Primavera (SON) . . . . .	73
5.2	Síntesis del capítulo . . . . .	74

<b>6 Patrones Sinópticos de Circulación</b>	<b>76</b>
6.1 Determinación y descripción de los patrones sinópticos . . . . .	82
6.2 Distribución de los patrones sinópticos y vínculo con las OCG . . . . .	90
6.3 Análisis de estabilidad de los patrones sinópticos en las OCG . . . . .	94
6.4 Análisis de los patrones sinópticos asociados a las OCG por estación del año. . . . .	94
6.5 Síntesis del capítulo . . . . .	102
<b>7 Conclusiones y consideraciones finales</b>	<b>103</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
<b>Apéndices</b>	<b>113</b>
<b>Anexos</b>	<b>114</b>
Anexo A Gráficos datos faltantes. . . . .	115
Anexo B Olas de Calor por estación meteorológica . . . . .	117
B.1 Histogramas . . . . .	126
B.2 OCG al 50 % . . . . .	131
B.3 Lista de OCG y sus índices . . . . .	132
Anexo C Rotación de EOF mediante Varimax y Quartimax . . . . .	135
Anexo D PS diarios asociados a cada OCG . . . . .	138

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto global de las olas de calor

Las olas de calor son fenómenos climáticos extremos de creciente preocupación en las últimas décadas, teniendo impactos significativos en la salud humana, los ecosistemas, la producción agrícola y en la sociedad en general. Estos casos de condiciones meteorológicas extremas se caracterizan por periodos prolongados de temperaturas elevadas para la época. Hoy en día ocupan una gran importancia en la realidad global y regional. Su creciente frecuencia e intensidad plantea desafíos que requieren mejorar la comprensión de ellas, como también realizar un análisis detallado del problema que conllevan, con el objetivo que, los tomadores de decisión y las sociedad en su conjunto, tomen acciones coordinadas para mitigar los efectos adversos.

Las olas de calor son caracterizadas por un aumento de las temperaturas diurnas y también contribuyen las noches cálidas, creando condiciones extremas que desafían la sustentabilidad de los ecosistemas y la adaptabilidad de los seres humanos. La incidencia de enfermedades relacionadas con el calor, la pérdida de cultivos y productividad, la presión sobre las infraestructuras y el sector eléctrico son solo algunas de las consecuencias observadas. Desde El Foro Económico Global de Davos del 2018 y hasta el informe “The Global Risks Report 2023, 18th Edition”, [2023](#), siguen indicando que los eventos climáticos extremos son los que tienen mayor probabilidad de ocurrencia y mayor impacto como lo muestran en la figura 1.1. Si bien las armas de destrucción masiva conservaron su lugar como el riesgo más destructivo, el foro considera que su ocurrencia es menos probable. Los riesgos más cercanos son los desastres naturales (volcanes, tsunamis, etc.), ciberataques, fraudes de datos masivos, y una falla para frenar el cambio climático son algunos de los riesgos que se encuentran por debajo de los eventos extremos. Dentro de los eventos climáticos extremos, las olas de calor

tienen un rol fundamental en el mundo teniendo una gran cantidad de impactos.

A escala global los impactos de las olas de calor cada vez son más relevantes, a modo de ejemplo Mora et al. [2017](#) revisaron artículos publicados entre 1980 y 2014 y encontraron 783 artículos de mortalidad humana relacionada con el calor en 164 ciudades de 36 países. Los autores indican que aproximadamente el 30 % de la población mundial experimenta condiciones que superan umbrales de ola de calor durante al menos 20 días al año. Proyectan para el año 2100 que este porcentaje aumentará a aproximadamente el 48 % en un escenario de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En Europa, el verano del 2003 fue recordado por la cantidad de olas de calor. Se estima que en agosto de ese mismo año, fallecieron 22.080 personas en la región comprendida entre Inglaterra, Gales, Francia, Italia y Portugal (Kosatsky, [2005](#)). Se agregan otras estimaciones para España (entre 6595-8648 muertes adicionales) y en los Países Bajos (1400-2200 muertes adicionales). Se indica en el artículo que de las 22.080 muertes en agosto, debería revisarse al alza en al menos un 50 % para toda Europa occidental y en un 100 % o más si se tienen en cuenta eventos de calor ocurridos en junio y julio de 2003. Dado lo anterior, podemos destacar la importancia de estos eventos.

La ola de calor de 2010 en el este de Europa y oeste de Rusia fue caracterizada por una circulación anticiclónica intensa y persistente, alcanzando su máxima intensidad entre julio y principios de agosto. Las temperaturas superaron los valores normales en 10°C, estableciendo récords históricos, como los 38°C ocurridos en Moscú. La región experimentó además una sequía y déficit de precipitación, reduciendo el contenido de agua del suelo y amplificando las olas de calor. Esta mega-ola de calor causó la muerte de más de 55.000 personas en Rusia, incendios forestales, una pérdida del 35 % en la cosecha anual y una caída del 1 % en el PIB ruso según Barriopedro et al. [2011](#).

Las regiones del mundo con mayor riesgo de sufrir olas de calor severas están asociadas al aumento global de la temperatura según Thompson et al. [2023](#). El año 2023 se caracterizó por tener el julio más caluroso de la historia en referencia al período preindustrial (1850-1900) como indica Tollefson, [2023](#). A este acontecimiento se le suman, primero, que la temperatura global promedio durante los últimos 12 meses (de noviembre de 2022 a octubre de 2023) fue 1.32 °C superior a la del período preindustrial recién mencionado (Wong, [2023](#)). Y ya cerrado el año 2023, se determinó que fue el año más cálido al comparar con el período preindustrial cerrando 1.48°C por encima de dicho promedio Witze, [2024](#). Recientemente, una reconocida investigadora del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) de Argentina comentó en una nota que: 'Estamos atravesando las olas de calor más frescas del

resto de nuestras vidas' (Vera, 2023).

Recientemente, según Ludovic, 2023, se estima que hasta agosto de 2023, las olas de calor han provocado una disminución de aproximadamente un punto porcentual en el Producto Interno Bruto (PIB) de China, España y Grecia. En el caso de Italia, la pérdida se acerca a medio punto, la de Estados Unidos a un tercio de punto y en Francia es insignificante (0.1 %). En resumen y promediando el PIB global de estos países, el PIB es afectado en 0.6 puntos porcentuales de decrecimiento. También se indica que un día de calor extremo (superior a 32°C) equivale a medio día de huelga (lo que implica que una ola de calor de cuatro días equivale a una huelga de dos días).

### These Are the Biggest Global Risks for 2018

The World Economic Forum's top 10 risks, ranked by likelihood and impact

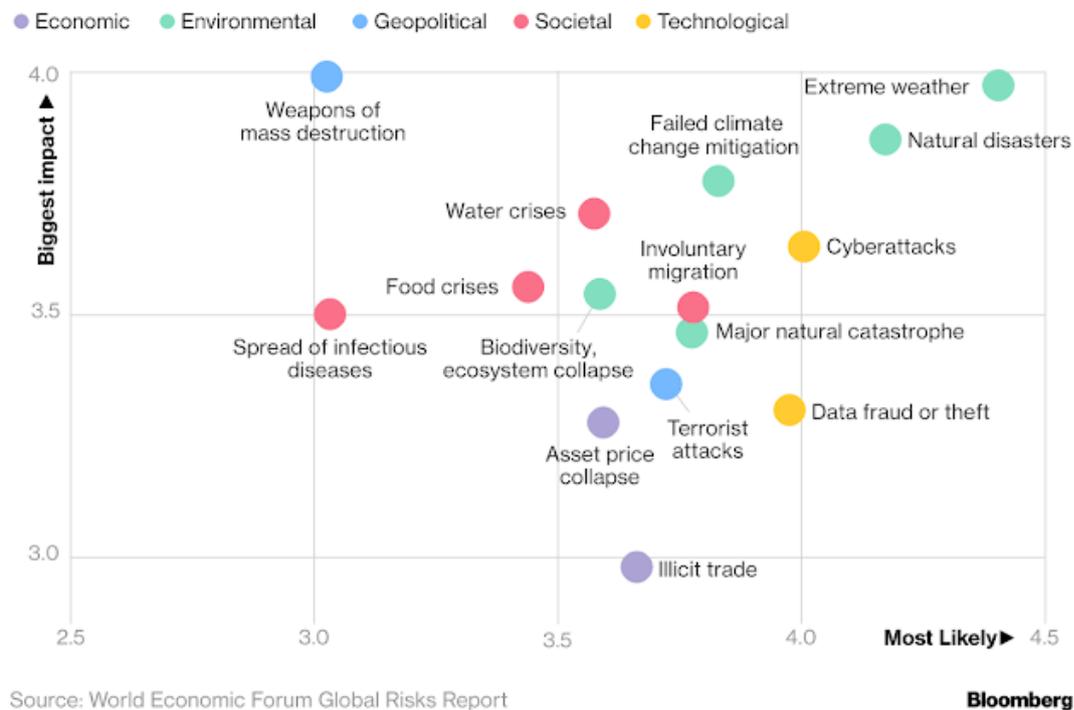


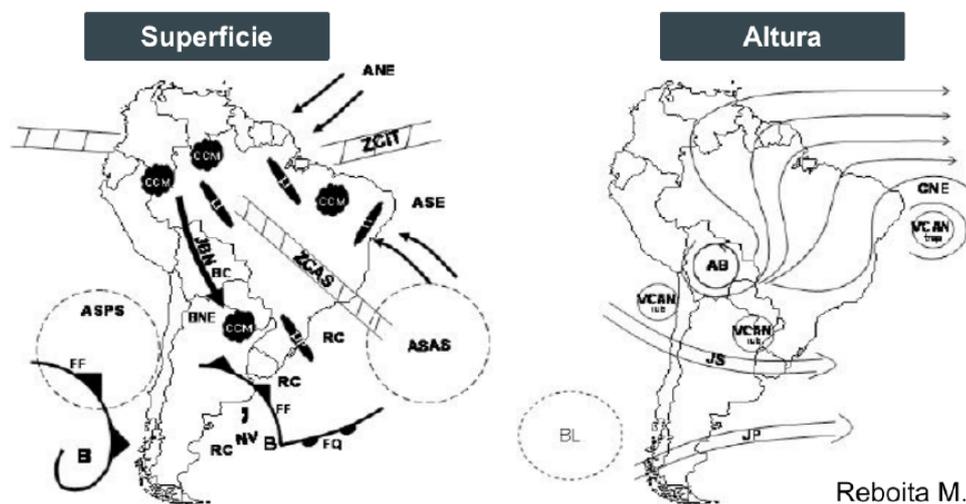
Figura 1.1: Figura tomada del Foro Económico Global de Davos 2018, Fekete et al. 2009.

## 1.2. Temperaturas extremas y olas de calor en Sudamérica

Comenzaremos describiendo los principales aspectos de la variabilidad de temperatura y precipitación en Sudamérica, la cual esta dominada por distintos sistemas atmosféricos que intervienen a distintas escalas espacio-temporales que pueden incidir en las olas de calor.

Reboita et al. 2010 realiza un análisis de los sistemas atmosféricos que intervienen en las distintas regiones de Sudamérica y determina su variabilidad a distintas escalas. En la figura 1.2 se muestra una representación esquemática de los principales fenómenos meteorológicos de superficie y altura. De los fenómenos se destacan: la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT o ITCZ por sus siglas en inglés), la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), Alisios de Sudeste (ASE) y Alisios de Noreste (ANE), Jet en Bajos Niveles (JBN), los Anticiclones Semipermanentes del Atlántico Sur (ASAS) y Pacífico Sur (ASPS), Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), Frentes Fríos (FF) y Frentes Cálidos (FQ, por sus siglas en portugués).

Las distintas regiones de Sudamérica están influenciadas por uno o varios de estos sistemas meteorológicos. Además, cada uno de ellos tiene su propia variabilidad a distintas escalas temporales: decadal, interanual, estacional, intraestacional y a escala sinóptica.



**Figura 1.2:** Esquema de los principales fenómenos meteorológicos que inciden en la variabilidad de Sudamérica. A la izq. en superficie y a la der. en altura, adaptado de Reboita et al. 2010.

En particular para Sudamérica existen varios trabajos sobre eventos extremos de temperatura. Rusticucci y Vargas, 1995 estudian la circulación de la atmósfera relacionada con eventos puntuales de olas de calor y de frío para verano e invierno, determinando los patrones que originan dichos eventos en Argentina.

Con cinco estaciones meteorológicas, Agosta y Barrucand, 2012 analiza la región argentina subtropical. El análisis se realiza caracterizando los eventos extremos de temperatura en función de percentiles, definiendo noches cálidas y frías para el invierno. Como principales resultados se destaca que la ocurrencia de noches cálidas está modulada, a escala interanual, por ondas de Rossby cuasi-estacionarias que se propagan

desde el Pacífico e Índico. Para las noches frías (cálidas), encuentra que la frecuencia esta relacionada con una máxima (o mínima) intensidad del Jet Subtropical sobre Sudamérica.

En cuanto a la escala intraestacional, Cerne y Vera, [2011](#) analizan las olas de calor en SESA (Sudeste de Sudamérica), específicamente en Córdoba, Argentina. Definen las olas de calor basándose en la anomalía de temperatura máxima intraestacional ( $T_x'$ ), caracterizada por un período de al menos cinco días con  $T_x'$  positiva, y en al menos tres de esos días,  $T_x'$  supera una desviación estándar. Sus resultados muestran que las olas de calor están vinculadas con eventos en la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) en un 73 % de los casos.

En diciembre de 2013 tuvo lugar una ola de calor que duró 18 días afectando a gran parte de Sudamérica, principalmente al centro de Argentina ( $35^{\circ}\text{S}$  y  $70^{\circ}\text{W}$ ). En Hannart et al. ([2015](#)), los autores muestran mediante simulaciones numéricas que este tipo de eventos tienden a aumentar hasta 5 veces su probabilidad de retorno bajo un escenario de calentamiento global. Asimismo, se observa que la ola de calor de  $3.5^{\circ}\text{C}$  de anomalía tiene escalas espaciales cercanas a 1000 Km, y si bien también se notó sobre Uruguay, su intensidad fue significativamente menor. Esto sugiere que los mecanismos que provocan las olas de calor en el centro de Argentina difieren de los que afectan a Uruguay.

Dentro de los trabajos realizados para temperaturas extremas en Uruguay, se encuentra la tesis doctoral de Renom, [2009](#). En este trabajo se analizaron índices de extremos de temperatura, estudiándose la variabilidad decadal, las tendencias y su relación con los patrones de circulación de gran escala. El análisis de tendencias mostró una disminución en la ocurrencia de días cálidos y noches frías durante el verano, mientras que para el invierno presenta una disminución en los extremos fríos acorde a (Rusticucci y Renom, [2008](#)). Por otro lado, se detectó un cambio importante a partir del año 1976 en la relación de las noches cálidas durante el invierno y los eventos de El Niño (Renom Molina, [2009](#)).

En cuanto a trabajos locales relacionados con olas de calor en Uruguay, si bien aún son incipientes, los trabajos presentados en congresos internacionales muestran diferencias en cuanto a los umbrales que se deben superar para considerar al evento "ola de calor" en el verano para la región norte y sur. El principal cambio en el umbral se observa en las temperaturas máximas. Por otro lado, se determinó que las olas de calor más intensas ocurren principalmente durante eventos de La Niña (por ejemplo: Renom et al. [2014](#)).

Suli et al. [2023](#) describe varios de los mecanismos involucrados en las olas de ca-

lor en latitudes medias. Entre ellos se encuentran: patrones anticiclónicos persistentes que advectan aire cálido desde latitudes más bajas asociados a su posición (bloqueo atmosférico). Circulación meridional de baja frecuencia asociada a bajos números de onda de Rossby (siendo 3 en estos eventos cuando lo usual es 5). Esto determina que los sistemas de altas y bajas presiones transitorios de latitudes medias se muevan más lento de lo usual y facilitan condiciones propensas a las olas de calor. Otros de los factores que ya fue mencionado son las ondas de Rossby cuasi-estacionarias. Los autores indican que estos mecanismos pueden facilitar la advección cálida, el calentamiento adiabático y/o procesos de calentamiento diabático. Las temperaturas resultantes pueden verse amplificadas por algún otro factor como las temperaturas de la superficie del mar en otras regiones y/o teleconexiones.

En Uruguay, y vinculado a las olas de calor, están los bloqueos atmosféricos que fueron analizados por Giacosa, [2018](#). En este trabajo se creó un índice para detectar bloqueos atmosféricos en latitudes medias y altas, centrándose en el Hemisferio Sur y específicamente en el Océano Pacífico Sureste y el Océano Atlántico Sur. Utilizando datos de reanálisis de altura geopotencial (z500) entre 1980 y 2016, fueron identificados dos regiones con ocurrencia de bloqueos. En la región Pacífico-Atlántico Sur tuvieron efectos opuestos sobre Uruguay, con anomalías negativas de temperatura y precipitación en verano, y anomalías positivas en otoño e invierno.

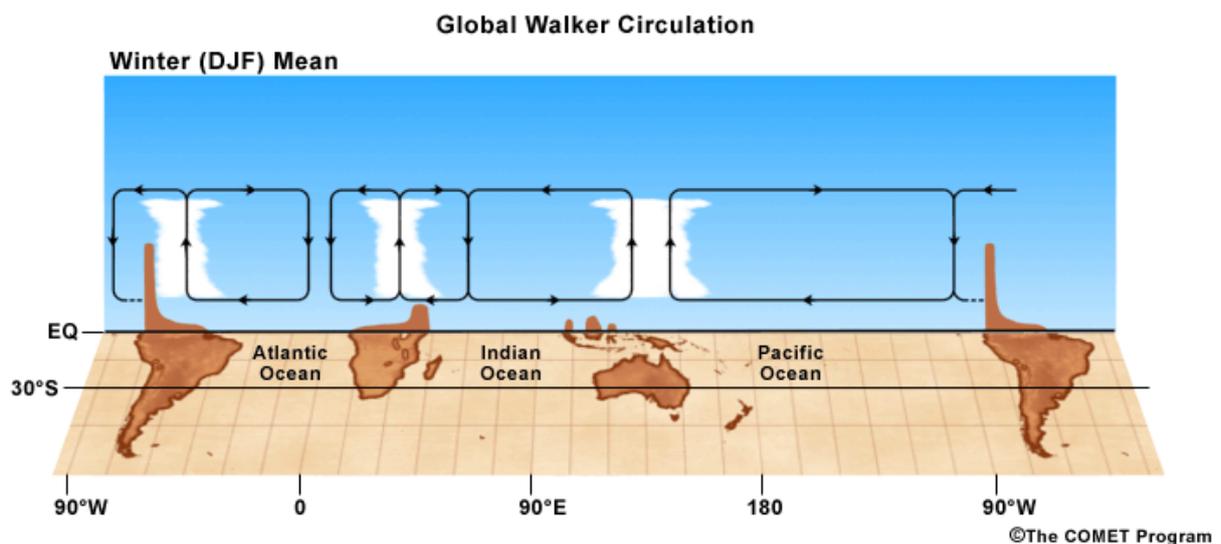
### **1.3. Modos de variabilidad climáticos**

Los modos de variabilidad climáticos y los índices de circulación están estrechamente relacionados, ya que ambos describen patrones recurrentes y sistemáticos en el comportamiento de la atmósfera y los océanos. Los modos de variabilidad representan variaciones a gran escala en la temperatura y presión atmosférica. Los índices de circulación cuantifican estos patrones y facilitan el seguimiento de sus fases y magnitudes.

Reboita et al. [2021](#) encontró que -el Sureste de América del Sur y en las regiones Norte y Nordeste de Brasil- son las zonas más afectadas por distintos modos de variabilidad como el El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación Decadal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation, PDO por sus siglas en ingles), el Modo Anular del Sur (Southern Annular Mode, SAM por sus siglas en ingles), también conocido como la Oscilación Antártica (Antarctic Oscillation) y otros modos como la Oscilación Multidecadal del Atlántico, el Dipolo del Atlántico Tropical, la Oscilación Madden-Julian y el Dipolo del Océano Índico.

El principal modo de circulación que impacta en Sudamérica es el ENSO. Este modo es debido a una interacción entre el océano y la atmósfera en el Pacífico tropical y es considerado el principal modo de variabilidad climática global en escalas de tiempo interanuales y decadales. Cai et al. 2020 hace una revisión del impacto del ENSO para Sudamérica, en el cual se resume la comprensión de las teleconexiones del ENSO hacia Sudamérica. Se ha encontrado que los impactos del ENSO varían notablemente, afectados no solo por la amplitud de los distintos tipos de ENSO, sino también por otros modos de variabilidad dentro y fuera del Pacífico.

Los impactos del ENSO se manifiestan en cambios en la circulación de la celda de Walker. El ENSO provoca redistribuciones de calor en el océano y convección profunda en la atmósfera sobre el Pacífico Ecuatorial. El ENSO altera esta circulación (ver figura 1.3) causando cambios significativos en los patrones de lluvia tropical y en la circulación global de Walker. Estas perturbaciones modifican la circulación atmosférica global, generando diversos impactos en otras regiones del planeta.

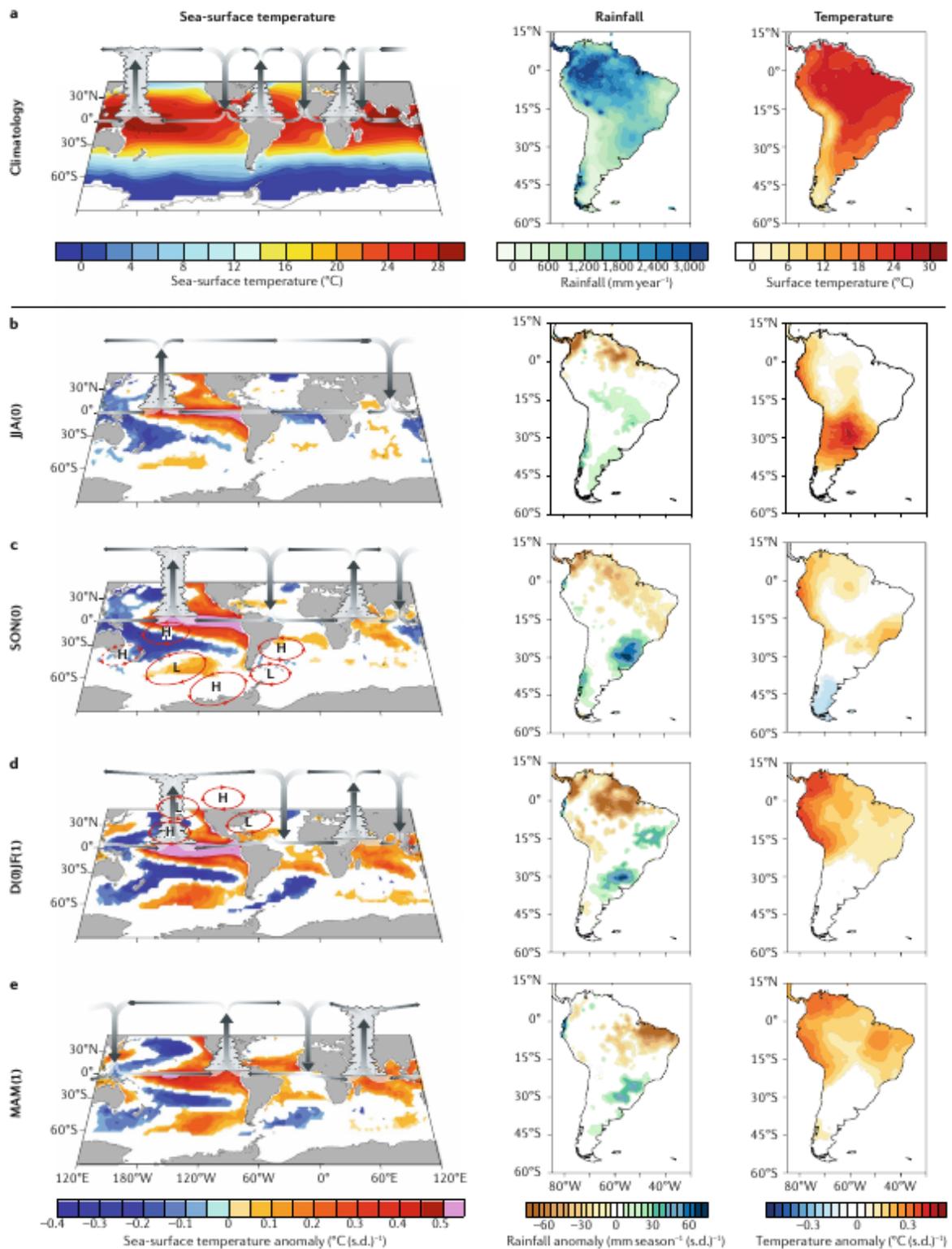


**Figura 1.3:** Esquema de la circulación de Walker para el invierno (DJF) basados en cálculos de vientos divergentes de la tropósfera superior e inferior. Tomado de: [https://www.meted.ucar.edu/tropicaltextbook\\_2nd\\_editionmediagraphicsenso\\_walker\\_mean.gif](https://www.meted.ucar.edu/tropicaltextbook_2nd_editionmediagraphicsenso_walker_mean.gif)

Por otro lado, la conexión extratropical del ENSO hace referencia a un patrón de trenes de ondas estacionarias de Rossby activadas por la convección anómala sobre el Pacífico tropical. Estos trenes de onda describen una serie de anomalías de presión atmosférica positivas y negativas que se extienden hacia el norte y el sur en las latitudes medias antes de dirigirse hacia la cuenca del Atlántico. Durante la fase cálida del ENSO, el patrón atmosférico resulta en anomalías de presión negativas y positivas sobre las latitudes medias, al este de Sudamérica. Estas anomalías de circulación atmosférica favorecen la advección de aire cálido y húmedo desde el noroeste hacia

el sureste de Sudamérica. Estos fenómenos, junto con condiciones meteorológicas sinópticas favorables (patrones sinópticos), ejercen impactos significativos en Sudamérica, provocando alteraciones en los promedios de temperatura y precipitación.

En la figura 1.4 tomada de Cai et al. 2020, se resume el impacto típico de la fase cálida del ENSO en el clima de Sudamérica. Se muestra la temperatura superficial del mar (izquierda), climatologías de lluvia (centro) y temperatura del aire en la superficie (derecha) (parte a), y anomalías relacionadas para junio-julio-agosto (JJA; parte b), septiembre-octubre-noviembre (SON; parte c), diciembre-enero-febrero (DJF; parte d) y marzo-abril-mayo (MAM; parte e). Superpuesto en los paneles izquierdos está la circulación de Walker, con flechas hacia arriba y hacia abajo que reflejan ramas ascendentes y descendentes, respectivamente. Las climatologías se calcularon durante el período 1948-2016. Los valores están en unidades físicas por desviación estándar (d.e.) que son significativos al 90 %. El año 0 entre paréntesis, indica el año de desarrollo de El Niño y el 1, el año siguiente (dada la definición que define al ENSO centrado en el verano). En SON (parte c), se observa la teleconexión Pacífico Sudamericano (PSA), representada como una secuencia de sistemas de alta presión (H) y baja presión (L) desde el Pacífico ecuatorial central hasta el Atlántico Sur. En DJF (parte d), se encuentra una teleconexión hacia el norte, el patrón Pacífico Norteamericano (PNA).



**Figura 1.4:** Esquema del impacto del ENSO en el clima de Sudamérica. Se muestra la temperatura superficial del mar (izquierda), climatologías de lluvia (centro) y temperatura del aire en la superficie (derecha) (parte a), y anomalías relacionadas para junio-julio-agosto (JJA; parte b), septiembre-octubre-noviembre (SON; parte c), diciembre-enero-febrero (DJF; parte d) y marzo-abril-mayo (MAM; parte e). Tomada de Cai et al. 2020

La Oscilación Decadal del Pacífico es un patrón de variabilidad climática a largo plazo en el Océano Pacífico, que se manifiesta principalmente en las anomalías de la temperatura de la superficie del mar. Este fenómeno se caracteriza por fases de aproximadamente 20 a 30 años, durante las cuales se observan cambios significativos en el clima global. En la fase positiva (cálida), las temperaturas de la superficie del Pacífico tropical y frente a la costa de América del Norte son más cálidas de lo normal, mientras que las aguas del Pacífico central y occidental son más frías. En la fase negativa (fría) el patrón se invierte, con aguas más frías en el Pacífico tropical y frente a América del Norte, y aguas más cálidas en el Pacífico central y occidental. Esto altera los patrones de circulación y precipitación a escala global. Estudios como N. J. Mantua y Hare, [2002a](#), encuentran evidencia de dos ciclos de la PDO con períodos fríos entre 1890 y 1924 y nuevamente entre 1947 y 1976, mientras que los regímenes cálidos de la PDO se dieron entre 1925 y 1946 y desde 1977 hasta (al menos) mediados de los años 1990. En estos períodos, se destaca una fuerte tendencia a los impactos de PDO en el hemisferio sur, con importantes anomalías climáticas en la superficie sobre las latitudes medias del Océano Pacífico Sur, Australia y en particular en América del Sur. Específicamente en Argentina Collazo et al. [2017](#) busca relaciones entre la PDO e índices de extremos de temperatura: noches frías (TN10), noches cálidas (TN90), días fríos (TX10), días cálidos (TX90), encontrando que la PDO es un buen predictor del percentil 90 de las noches cálidas desde enero hasta mayo. Con respecto a las Tx, TX10 y TX90 están correlacionados con la PDO en primavera y verano. Es importante mencionar que las correlaciones encontradas de la PDO responden a las fluctuaciones temporales típicas de la PDO que abarcan más de una década como mencionan N. J. Mantua y Hare, [2002a](#).

La TSA es un modo de variabilidad oceánico del Océano Atlántico y se define como la anomalía del promedio de la temperatura de la superficie del mar en la región [0°-20S] de latitud y longitud [10E-30W]. Si bien, son muy pocos los trabajos que vinculan las condiciones de la TSA directamente con nuestra región, hay algunos artículos que vinculan la TSA como un índice que modula y/o interactúa con otros modos de variabilidad, potenciando o debilitando las precipitaciones en eventos del ENSO o la PDO. El estudio de Kayano et al. [2009](#) compara las relaciones interanuales de la precipitación en América del Sur con los índices de temperatura de la superficie del mar en dos períodos: 1948-1976 y 1977-2002 mediante un análisis de correlación. Encuentran que las diferencias entre los períodos están relacionadas con las teleconexiones entre el ENSO y la PDO que actúan para modificar las correlaciones en las precipitaciones sobre América del Sur. Además, sugiere que las variaciones del Alta de Bolivia podrían influir en las correlaciones, y observan que la TSA puede debilitar las relaciones positivas de ENSO con la precipitación sobre Brasil central y oriental durante la fase fría

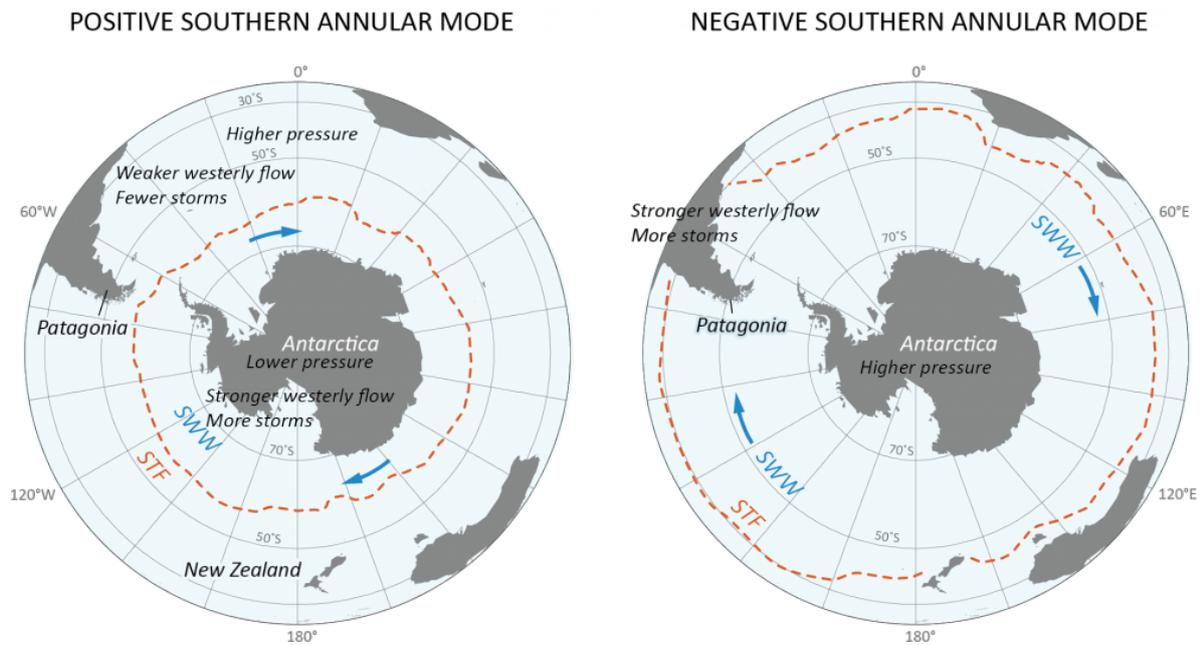
del PDO.

Robledo et al. [2020](#) sugieren que los cambios extremos en las precipitaciones en Argentina están influenciados por la variabilidad multidecenal y las tendencias a largo plazo asociadas con los océanos tropicales. En escalas de tiempo decadales, la actividad principal está relacionada con la PDO, mientras que el segundo modo principal está asociado con la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO). El tercer modo, termina mostrando una covariabilidad positiva entre la TSA y precipitaciones extremas en el centro-este de Argentina.

Los estudios recién mencionados vinculan indirectamente la TSA con las precipitaciones en Sudamérica. No se han encontrado trabajos que relacionen directamente la TSA y las temperaturas, pero dado que Arizmendi et al. [2022](#) encuentra un vínculo entre los PS en una región (centrada en Uruguay) y la TSA, es que se decide no excluir este índice en el análisis.

El SAM, también conocido como la Oscilación Antártica, es el principal modo de variabilidad en la circulación atmosférica del Hemisferio Sur. Este índice, en contraste con el ENSO, la PDO y la TSA (modos de variabilidad oceánicos), está basado en la diferencia normalizada de la presión al nivel medio del mar (pnm) entre  $40^{\circ}$  y  $65^{\circ}$ S (Gong y Wang, [1999](#)), por tanto se trata de un modo de variabilidad atmosférico y tiene un gran impacto en el Hemisferio Sur (Marshall, [2003](#), Nan y Li, [2003](#) y Fogt y Marshall, [2020](#)). En [1.5](#) se muestran las diferencias de las dos fases del SAM, donde se puede apreciar a la izquierda la fase positiva y a la derecha la fase negativa. En esta figura están representados en color azul la posición predominante de los vientos de los oestes (SWW, por sus siglas en inglés). Esto también se refleja en la posición del Jet-Subtropical (JS) en altura de la figura [1.2](#). La posición de estos vientos responde a las diferencias de presión entre  $40^{\circ}$  y  $65^{\circ}$ S, la fase positiva del SAM implica presiones más bajas hacia el sur y un fortalecimiento de los vientos del oeste hacia el sur, lo que refuerza el anticiclón del atlántico, que como lo indica Suli et al. [2023](#) es uno de los principales mecanismos que dan lugar a las olas de calor en latitudes medias. La fase negativa del SAM está relacionada con presiones más altas hacia el sur ( $65^{\circ}$ S), debilitando los vientos del oeste y fortaleciendo el Jet- sub tropical en altura, lo cual permite favorecer la intrusión de frentes fríos sobre Uruguay.

Barrucand et al. [2008](#) realizó un análisis para entender la relación entre el SAM, las temperaturas de la superficie del océano Atlántico y el índice de noches frías en Argentina. Encontró que esta relación es válida en la zona entre  $30^{\circ}$ S y  $36^{\circ}$ S, donde valores positivos más altos del índice SAM están asociados con una mayor prevalencia de sistemas de altas presiones y noches más frías.



**Figura 1.5:** Fases del Modo Anular del Sur: positiva (izquierda) y negativa (derecha). En azul se muestra la posición predominante de los vientos del oeste (SWW) en cada fase de SAM. Tomada de Davies, 2024

Arizmendi et al. 2022 encuentran correlaciones entre los patrones sinópticos en Sudamérica, para la región [15°S, 45°S] de latitud y [90°W, 30°W] de longitud, con los índices ENSO, PDO, SAM y TSA. Observaron que todos estos índices presentan correlaciones estadísticamente significativas con la frecuencia de ocurrencia de los patrones sinópticos, definidos en su investigación, en todas las estaciones del año.

En lo que respecta a la escala intraestacional en Sudamérica, y que pueda influir en las olas de calor, se encuentra la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) ocurre entre los meses de diciembre a marzo (DEFM) y se define como una región de alta actividad convectiva que se extiende desde el centro de Brasil hasta el océano Atlántico subtropical, con una orientación noroeste-sudeste. La ZCAS tiene una gran variabilidad y ocurre en varias escalas temporales, sinópticas, intraestacional e interanual (Cavalcanti, 2016).

Carvalho et al. 2002 analizan la ZCAS estudiando desde la radiación de onda larga (OLR). Esta variable se puede relacionar fácilmente con la precipitación y la convección profunda. Los autores estudian su extensión espacial, los valores mínimos y su variabilidad. En el estudio determinan tres regiones en base a esta características: 1) región continental, 2) región costera y 3) región oceánica. Concluyen que la intensidad de la ZCAS es independiente de la extensión sobre el océano, pudiendo tener actividad convectiva intensa en el continente y no en el océano (y viceversa). Muestran que la actividad convectiva de la región oceánica esta asociada a transientes en latitudes

medias. También indican que la ZCAS presenta un dipolo de precipitación convectiva entre el sudeste de Brasil y el sur de Brasil y Uruguay; principalmente asociada a la actividad convectiva cuando es más intensa en el océano (mostrando la importancia de los transientes en estos casos). Por último, muestran que la persistencia de la ZCAS depende de factores como el ENSO, indicando que fases cálidas favorecen la persistencia de la ZACS oceánica en más de 4 días (opuesto a las fases neutras y frías).

Alvarez et al. (2016) observan la influencia del modo de variabilidad *Madden-Julian Oscillation* (MJO, por sus siglas en inglés) sobre precipitación y temperatura en Sudamérica. En particular sobre Uruguay, encuentran que dependiendo de la fase de la MJO y la temporada del año, existe un vínculo entre la fase de la MJO y temperatura. Siendo que en invierno sobre el litoral oeste de Uruguay las temperaturas son por debajo (encima) de lo normal, son moduladas por las fases de 1, 2 y 3 (5, 6 y 7) de la MJO. En particular sobre Sudamérica, existen pocos trabajos relacionados a escala intraestacional.

Los estudios de Alvarez et al. 2016 y Naumann, 2009 proporcionan un análisis detallado de cómo las diferentes fases de la MJO afectan inicialmente las condiciones de nubosidad y precipitación mediante la radiación de onda larga. Asimismo, destacan cómo estas fases influyen en la temperatura de Sudamérica, revelando una marcada variabilidad espacial. La combinación del impacto de la MJO y la influencia de la ZCAS, como se señala en los estudios de Cerne y Vera (2011) y (Hannart et al. 2015), marcan la importancia de analizar la variabilidad de las olas de calor en Uruguay en diferentes escalas de tiempo.

Otros factores que modulan los cambios de temperatura a escala sinóptica y subestacional, y que pueden tener impacto sobre las olas de calor, son los descensos abruptos o prolongados de la temperatura. Estos están asociados a irrupciones de aire frío y pasajes de frentes. de Oliveira (1986) analiza la ocurrencia de frentes fríos en Sudamérica e identifica un comportamiento latitudinal en cuanto a su ocurrencia a escala anual, encontrando una disminución hacia latitudes menores. A escala mensual, muestran que julio es el mes con mayor pasaje de frentes en particular entre las latitudes 30° y 40°S. Trabajos más recientes, A escala mensual, se observa un aumento de la cantidad de frentes en los meses comprendidos entre mayo y octubre. En cuanto a las teleconexiones con El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), Fedorova et al. (2000) indica que los años en condiciones del El Niño ocurre una mayor cantidad de frentes entre las latitudes 20°S y 40°S en el invierno.

## 1.4. Humedad del suelo

Las condiciones hídricas, especialmente la humedad del suelo, tienen un impacto directo en los balances de energía y agua, lo que a su vez influye en la relación entre la humedad y la temperatura media, y pueden tener o no consecuencia en los extremos de temperatura. El vínculo entre la humedad y la temperatura ha sido investigado por Seneviratne et al. [2010](#) a través del mecanismo de evapotranspiración (ET), mostrando una retroalimentación positiva. Esta retroalimentación implica que una disminución en la humedad conduce a una reducción en la ET, resultando en un aumento del flujo de calor sensible y, como consecuencia, un incremento en las temperaturas. A su vez, las temperaturas más altas inducen a un aumento en la ET, reforzando así una retroalimentación positiva. Los cambios en las temperaturas y la ET aumentan la variabilidad de la temperatura, especialmente durante los meses cálidos cuando la humedad es baja, como se observa en el estudio de Europa realizado por Seneviratne et al. [2006](#). Este aumento en la variabilidad interanual durante los meses cálidos, sugieren los autores, podría dar lugar a la aparición más frecuente de olas de calor en Europa y otras regiones de latitudes medias.

Schumacher et al. [2019](#) analiza datos de reanálisis para las 'Megaolas' de calor europeas de 2003 y 2010, revelando que el calor sensible advechado desde áreas secas puede desencadenar aumentos abruptos de temperatura, fortaleciendo la retroalimentación entre la ET y la temperatura. Según este trabajo, cerca del 30 % del calor sensible fue advechado de zonas con sequías.

Otro estudio que respalda esta noción es el realizado por Mueller y Seneviratne, [2012](#), el cual examina la conexión entre la escasez de humedad en la superficie y la frecuencia de días extremadamente calurosos a nivel global. Este estudio revela que numerosas regiones del mundo muestran una conexión significativa entre la cantidad de días calurosos durante el mes más cálido y los déficits de precipitación anteriores. En áreas como Sudamérica, la Península Ibérica y el Este de Australia, la probabilidad de experimentar más días calurosos después de períodos de escasez de precipitación aumenta 70 %, mientras que en Norteamérica y Europa del Este esta probabilidad supera el 60 %. Estos hallazgos sugieren que los efectos de la relación entre la humedad del suelo y la temperatura se manifiestan en una escala geográfica más amplia de lo que se suele suponer.

Dado los antecedentes, sería de sumo interés para el país contar con una caracterización actualizada de los eventos extremos de temperatura en particular de las olas de calor. Esto incluye conocer los patrones sinópticos y los modos de variabilidad que están asociados a estos eventos para poder mejorar su comprensión y predictibilidad.

Por esta razón, se plantean los objetivos mencionados en la siguiente sección.

## 1.5. Patrones Sinópticos de Circulación

Esta sección profundiza en las dinámicas vinculadas a las OCG a través del análisis de los patrones de circulación a escala diaria, comúnmente conocidos como Patrones Sinópticos de Circulación (PS).

Según Huth et al. [2008](#), las regiones donde se han desarrollado y aplicado los PS abarcan Europa, América del Norte, el sur de América del Sur, Sudáfrica, Australia con Nueva Zelanda y el Ártico. El interés por los PS ha surgido en aquellas regiones donde la variabilidad sinóptica cotidiana desempeña un papel crucial, es decir, en las latitudes medias y altas. Este interés ha motivado la exploración del análisis de los PS asociados a las OCG. La evolución de las clasificaciones basadas en los PS, ha experimentado avances significativos gracias a los adelantos tecnológicos, especialmente con el aumento de la capacidad de cómputo y la disponibilidad de servidores destinados a estos fines. En este contexto, una mejor comprensión de los Patrones Sinópticos son la base para mejorar la predictibilidad de las OCG.

En el estudio realizado por Olmo et al. [2022](#), se utilizan los PS para evaluar las precipitaciones durante los períodos de transición entre la estación seca y húmeda, así como entre la estación húmeda y seca, en los modelos pertenecientes a la Sexta Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6 por sus siglas en inglés). Es una iniciativa internacional que involucra a la comunidad científica del clima, siendo su objetivo principal mejorar la comprensión de los modelos climáticos y proporcionar proyecciones climáticas basadas en diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero.

Olmo et al. [2022](#) opta por utilizar el campo de vientos a 850 hPa en lugar de la presión al nivel del mar. Se lleva a cabo un análisis para el periodo comprendido entre 1981 y 2014 en la región delimitada por 10°N a 30°S y 90°W a 30°W, que corresponde a la región tropical de Sudamérica.

Tencer et al. [2016](#) analizan la relación entre la ocurrencia de eventos de precipitación intensa y temperaturas extremas en el sureste de Sudamérica (SESA) durante el período 1961-2000, así como su vínculo con los PS asociada a estos eventos. Para definir los PS, utilizan la altura de geopotencial en 500hPa (Z500). Se observó que la ocurrencia de noches cálidas aumenta significativamente la probabilidad de eventos de precipitación intensa al día siguiente o en los días siguientes.

Los eventos combinados están asociados de manera significativa con un PS caracterizado por una anomalía negativa sobre el Océano Pacífico y un centro positivo de Z500 sobre el Atlántico, aproximadamente a 40°S. Las lluvias extremas también ocurren con más frecuencia de lo esperado después de días cálidos, cuando hay un centro de anomalías negativas de Z500 en la punta suroeste del continente y una anomalía positiva sobre el Atlántico que induce un flujo anómalo del noroeste sobre la región.

La frecuencia de eventos de precipitación intensa disminuye con la ocurrencia de noches frías durante la temporada cálida en la mayor parte de la región estudiada y también después de un día frío. Más de dos tercios de los días de precipitación intensa y fríos ocurren cuando hay un sistema de alta presión ubicado al sur del continente, intensificando el flujo del este-sureste responsable de la advección de humedad.

En este trabajo también se evaluó la habilidad para simular temperaturas y eventos extremos de precipitación de distintos modelos climáticos. En general, se encontró una buena relación entre las simulaciones y la relación estadística observada entre los extremos en la región. Los modelos logran simular un aumento en la probabilidad de ocurrencia de lluvias intensas durante noches cálidas, así como una inhibición de la precipitación durante noches frías. Sin embargo, tuvieron dificultades para capturar el patrón espacial de la distribución conjunta de eventos extremos de temperatura y precipitación.

El trabajo de Bettolli et al. [2010](#) es de los primeros que analiza PS en el Sudeste de Sudamérica de manera combinada en dos niveles de presión en 500hPa y 1000hPa, utilizando la altura de geopotencial como variable para definir los PS. A su vez, vincula los eventos de precipitación en 4 estaciones meteorológicas de la Pampa Húmeda con los PS, discriminando en 4 grupos distintos de precipitación de acuerdo a los umbrales alcanzados en el acumulado diario. El dominio para definir los PS es el comprendido entre los 15°S y 60°S de latitud y los 30°W a 90°W de longitud, con una resolución de 2.5° tanto de latitud como longitud y utilizando los datos de reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al. [2018](#)). Los autores aplican K-means para para la determinación de los clusters y aplican previamente PCA para disminuir la dimensionalidad del problema. Toman los campos diarios como variables y los puntos de la cuadrícula como observaciones. Los primeros seis PC representan el 80.7 por ciento y el 83.5 por ciento de la varianza en los niveles de 1000 y 500 hPa, respectivamente, utilizando en ambos niveles estos datos como entrada para el análisis de clúster. Para determinar el número óptimo de clúster en cada nivel, se utiliza el estadístico pseudo-F. Esta elección se fundamenta en el análisis llevado a cabo por Milligan y Cooper, [1985](#), quienes realizaron una evaluación de más de 30 métodos para determinar el número óptimo de clústeres en un conjunto de datos, determinando que el estadístico pseudo-F es uno de los pro-

cedimientos más efectivos. Este trabajo destaca que su análisis podría considerarse como el primer paso en una clasificación jerárquica de estructuras y variables a través de la cual se puede explicar la ocurrencia de precipitación o la falta de ella en la región estudiada.

Según Lee et al. 2023 los PS se utilizan cada vez más para la predicción a escala subestacional y estacional, para el análisis de la variabilidad y cambio climático. Sin embargo, una limitación que encuentra es que la mayoría de los estudios de PS se definen para el invierno únicamente. En su trabajo normaliza la variación diaria de la altura geopotencial en 100hPa y utilizan un análisis PCA y funciones ortogonales empíricas (EOF) combinado con agrupaciones de K-means para definir un nuevo conjunto de PS de América del Norte durante todo el año. Los patrones definidos y la metodología se pueden ver en: <https://simonleewx.com/north-american-weather-regimes/>. Utiliza la altura geopotencial media diaria de 500 hPa de ERA5 con una resolución de 1.5° en el dominio 180-30°W, 20-80°N. Las anomalías se calculan con respecto a una climatología diaria con un suavizado de 60 días y eliminando la tendencia promedio del área en Z500. Antes del cálculo del régimen, las anomalías se filtran con un filtro de paso bajo de 10 días, luego se normalizan mediante la desviación estándar promedio del área para cada día calendario (suavizada con una media móvil de 60 días). Se aplican PCA y se retienen los 12 primeros componentes y se agrupa para k=4, con el método de K-means. Luego, a cada día se asigna a uno de los cuatro grupos en función de la distancia euclidiana a cada uno de los centroides, más una clase "sin régimen" cuando la distancia supera un umbral establecido. Los regímenes se definen desde el 1 de enero de 1979 hasta el 31 de diciembre de 2022. Como resultados, se cuantifican las anomalías de temperatura y precipitación asociadas a cada PS. También cuantifican las tendencias históricas en la frecuencia de los PS desde 1979, encontrando una disminución en la frecuencia anual en uno de los PS (vaguada del Pacífico) y un aumento en la frecuencia en el verano del PS asociado al anticiclón sobre Groenlandia.

Arizmendi et al. 2022 utiliza la técnica de PS en la región que abarca las latitudes subtropicales de América del Sur y lo hacen en base a el campo de presión a nivel del mar centrado en Uruguay. Analizan los cambios en la frecuencia de ocurrencia en los PS para diferentes fases de ENSO. Además de analizar los vínculos estadísticos con otros modos de variabilidad global como el SAM, la PDO y TSA. En particular, realizan el análisis para cada estación del año y analizan el impacto de los PS en la precipitación de Uruguay. Según los autores es la primera vez que se utilizan los PS y se vinculan con datos observados en Uruguay.

Dentro de los antecedentes aplicados a otras áreas de investigación, en particular en las energías renovables, se encuentra el trabajo de Grams et al. 2017. Este traba-

jo vincula los PS con la generación de energías renovables no convencionales (solar y eólica) en todos los países de Europa. El objetivo planteado es poder mejorar la comprensión del impacto que tienen los PS en el sector eléctrico y poder mejorar la predicción y la expansión de las energías renovables en Europa. Utilizan el enfoque estándar (ya mencionado) mediante EOF y agrupación por medio de k-means. El análisis EOF se realiza en la anomalía de altura geopotencial con un filtro pasa bajo de 10 días (utilizando una media móvil de 90 días como climatología de referencia) a 500 hPa. El dominio seleccionado es el comprendido entre 80°W y 40°E y los 30°N y 90°N. Los datos utilizados son del reanálisis de ERA-Interim, con una resolución horizontal de 1° y se utilizan los datos cada 6hs para promediar el valor medio de cada día de la altura de geopotencial en 500hPa. Como resultado, logran diferenciar 7 PS para todo el año y determinan el factor de carga (FC) para cada país asociados a cada PS. El FC es el porcentaje de generación respecto a la potencia instalada en cada parque eólico o cada granja solar. También encuentran que la demanda eléctrica de cada país de los analizados en Europa tiene una correspondencia con cada uno de los 7 PS determinados.

## **1.6. Objetivo**

El objetivo general de este trabajo es definir y caracterizar las olas de calor que impactan en Uruguay durante todo el año, poder determinar su variabilidad espacial y temporal así como también analizar los procesos físicos responsables de su ocurrencia.

### **1.6.1. Objetivos específicos**

1. Definir las olas de calor y las olas de calor generalizadas para Uruguay. Realizar una caracterización rigurosa de las olas en relación a su variabilidad temporal, tendencia, duración, intensidad y frecuencia.
2. Buscar vínculos entre la variabilidad interanual de la ocurrencia de las olas de calor generalizadas y los índices de circulación global y las condiciones hidrológicas.
3. Identificar y analizar los patrones sinópticos asociados a las olas de calor generalizadas.

## 1.7. Estructura de la tesis

Este trabajo está compuesto de siete capítulos. En el primero, se realiza una introducción a los temas planteados en el desarrollo de la tesis y se presentan los objetivos del trabajo. El capítulo dos describe los conjuntos de datos que se van a utilizar para lograr los objetivos de la tesis. En el capítulo tres se analizan los datos observados, dada la relevancia que tiene, se realiza un cuidadoso control de calidad y se analizan los datos faltantes. También, se analizan las series de temperaturas y sus tendencias finalizando con una síntesis del capítulo.

El cuarto capítulo define las olas de calor y las olas de calor generalizadas para Uruguay. En las siguientes secciones del capítulo, se caracterizan las olas mediante su duración, frecuencia, intensidad y tendencias. Por último, se hace un síntesis del capítulo.

En el quinto capítulo, se analiza el vínculo de las olas de calor generalizadas con los índices de circulación global y condiciones hídricas a escala interanual. Se construyen los índices para definir las condiciones hídricas. Se analizan los resultados y se hace una síntesis.

El sexto capítulo analiza los patrones sinópticos asociados a las olas de calor generalizadas a escala diaria. Comienza describiendo la metodología empleada para definir los patrones sinópticos, luego son determinados, se describen y caracterizan los patrones sinópticos y se analiza su vínculo asociado a las olas de calor generalizadas.

El último capítulo está compuesto por las conclusiones finales y se plantean los trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Datos

### 2.1. Datos observados de temperatura

Para esta tesis se cuenta con datos diarios de Temperatura Máxima ( $T_x$ ) y Temperatura Mínima ( $T_n$ ) de 11 estaciones meteorológicas distribuidas en Uruguay. El criterio para seleccionar las estaciones se basa en la necesidad de contar con series extensas, digitalizadas y con la mayor información y calidad que sea posible. Diez de las estaciones pertenecen al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) y una al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Estas series, o gran parte de ellas, se generaron a partir del trabajo de doctorado Renom Molina (2009) y en el marco del proyecto CLARIS-LPB 2010. Si bien algunas estaciones meteorológicas cuentan con información desde comienzos del siglo XX, es a partir de 1950 que las 11 estaciones presentan un período común de información disponible. Los datos se encuentran digitalizados, con previos controles de calidad y una distribución espacial que cubre a todo el país como se muestran en la figura 2.1. La tabla 2.1 describe sus códigos ante la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la procedencia y la referencia geográfica de las mismas.

Se comenzó el estudio utilizando las series disponibles hasta finales de 2009. Posteriormente, se extendió el período de análisis hasta 2014 mediante una solicitud de datos al INUMET. De esta manera, se conformó una base de datos que incluye información de las once estaciones meteorológicas, abarcando los años entre 1950 y 2014. Específicamente, se consideró el periodo comprendido entre 01/01/1950 al 10/10/2014 como el intervalo de análisis para este trabajo.

Nombre	Código OMM	Procedencia	Latitud [°]	Longitud [°]	Altura [m]
Artigas	86330	Inumet	-30,40	-56,51	120,4
Carrasco	86580	Inumet	-34,86	-56,01	32,9
Estanzuela	—	INIA	-34,45	-57,84	80,0
Melo	86440	Inumet	-32,37	-54,19	100,4
Mercedes	86490	Inumet	-33,25	-58,07	17,0
Paso de los Toros	86460	Inumet	-32,80	-56,52	75,5
Paysandú	86430	Inumet	-32,35	-58,04	61,1
Prado	86585	Inumet	-34,86	-56,21	16,3
Rivera	83953	Inumet	-30,90	-55,54	241,9
Rocha	86565	Inumet	-34,49	-54,31	18,2
Salto	86360	Inumet	-31,43	-57,98	41,0

**Tabla 2.1:** Procedencia, código OMM y datos geográficos de las estaciones meteorológicas consideradas.



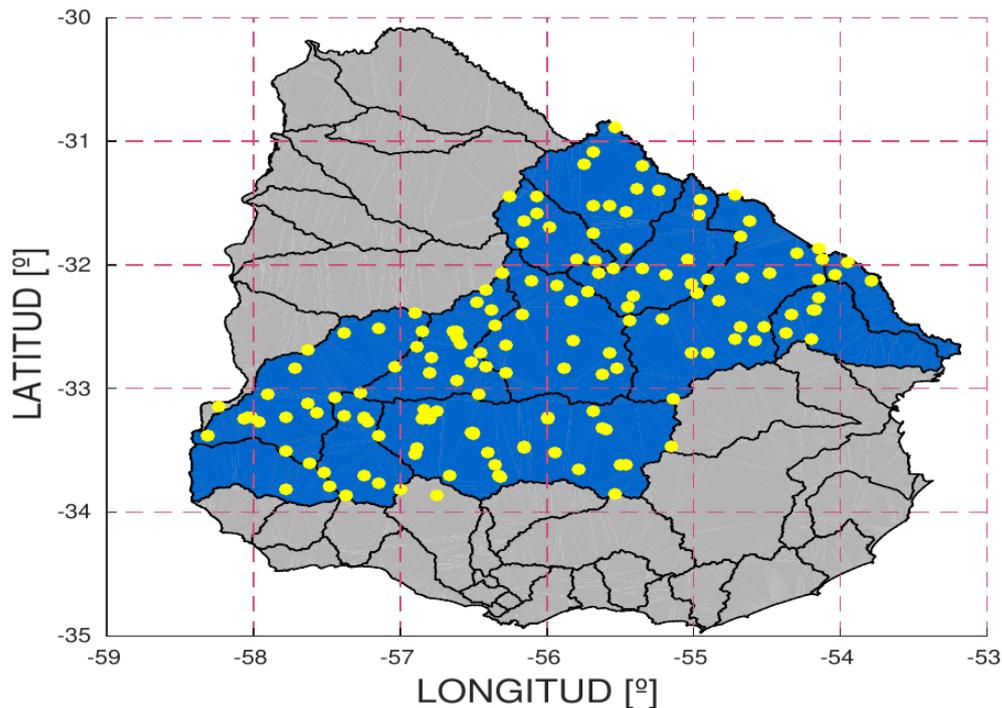
**Figura 2.1:** Ubicación geográfica de las estaciones.

## 2.2. Datos observados de precipitación

En el capítulo 4 se analiza si existe algún vínculo entre las Olas de Calor Generalizadas y sus características de intensidad, duración y frecuencias, con las condiciones hídricas e índices de circulación general. Por tal motivo, se requieren series de precipitación en concordancia con el período de estudio definido para las olas de calor. Para ser consistentes y definir los índices hidrológicos, se buscan series observadas y largas, lo cual es muy restrictivo. La Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas

(UTE), cuenta con datos desde 1963 para el promedio de la cuenca del Río Negro a escala mensual. Se solicitaron estas series a la división de Presas y Embalses de la UTE, las cuales fueron provistas en el período 1963 a 2014.

En la figura 2.2 se puede ver la distribución de los pluviómetros y la cuenca que representan. Si bien no abarcan a todo el país, se pueden considerar como un buen proxy para definir la condición hídrica reinante en términos generales para Uruguay.



**Figura 2.2:** Ubicación geográfica de los pluviómetros de la red de UTE. Tomada del convenio UTE-FING-UdelaR para el pronóstico de variables relevantes para la gestión de sistema eléctrico (Resolución: R18.-1166).

### 2.3. Modos de variabilidad climáticos

En el capítulo 5 se utilizan índices de circulación general para vincularlos con las Olas de Calor Generalizadas. Estos índices están disponibles en NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, [s.f.](#) Se seleccionan dado que son índices ya utilizados y validados para una región centrada en Uruguay por Arizmendi et al. [2022](#) y se consideran una buena selección inicial de índices. A continuación se describen aspectos generales de los índices.

El primer índice utilizado es el fenómeno de El Niño (**ENSO**, del inglés: *El Niño* -

*Southern Oscillation*). Se utiliza el índice de El Niño en la región 3.4, definida por las latitudes [5N-5S] y longitudes [170-120W], Trenberth, 1997 y National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2023.

Tanto este índice, como los que se describen a continuación, son considerados por los vínculos que presentan con las Tx y Tn. Siendo el principal motivo del trabajo reciente de Arizmendi et al. 2022 que demuestra un vínculo entre los patrones sinópticos y los índices seleccionados. Los patrones sinópticos asociados a las Olas de Calor Generalizadas se analizan en el capítulo 5.

La Oscilación Decadal del Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation*, **PDO** por sus siglas en inglés), está basado en el método de componentes principales y considera la anomalía mensual de temperatura del mar sobre el Océano Pacífico norte en la región 20°N hasta el polo. La PDO se describe a menudo como un patrón de variabilidad climática del Pacífico de larga duración (varios años, entre 5 y 10) similar a ENSO N. Mantua, 1999 y N. J. Mantua y Hare, 2002b.

El Índice del Atlántico Sur Tropical (*Tropical Southern Atlantic Index*, **TSA** por sus siglas en inglés), se define como la anomalía del promedio de la temperatura de la superficie del mar a escala mensual en la región [0°-20S] de latitud y longitud [10E-30W], Servain, 1991.

El último índice considerado, es el Modo Anular del Sur (*Southern Annular Mode*, **SAM** por sus siglas en inglés), también conocido como la Oscilación Antártica (*Antarctic Oscillation*). Este es el principal modo de variabilidad en la circulación atmosférica del Hemisferio Sur para escalas mensuales. Este índice representa la diferencia normalizada de la presión reducida al nivel medio del mar (pnm) entre 40<sup>a</sup> y 70<sup>a</sup>S, Gong y Wang, 1999, y tiene un alto impacto en el Hemisferio Sur, Marshall, 2003, Nan y Li, 2003 y Fogt y Marshall, 2020.

## 2.4. Datos de reanálisis

En términos generales, los datos de reanálisis son conjuntos de datos de que se han producido mediante la utilización de modelos de circulación de la atmósfera y diversas fuentes de datos de observación disponible. Estos modelos permiten obtener datos en grillas regulares de muchas variables meteorológicas como la temperatura, la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la radiación solar, entre otras variables, así como también datos en altura.

Para este trabajo se utilizan datos de reanálisis atmosféricos para identificar y analizar los patrones asociados a las olas de calor que se presentan en el capítulo 5. En particular, se utilizaron datos del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF, por sus siglas en inglés), los datos de reanálisis de ERA-Interim Dee et al. (2011) de resolución de un grado por un grado. Los datos son extraídos del ECMWF a través de rutinas que emplean la librería *ecmwfapi*, facilitando la obtención masiva de datos. Estas rutinas están programadas en el lenguaje *Python*.

Se obtuvieron las siguientes variables:

- SLP- Presión en superficie.
- Altura de geopotencial en 300mb (z300).
- Altura de geopotencial en 500mb (z500).

El período disponible de los datos de reanálisis de ERA- Interim es de 1979 a 2019. Para estar en concordancia con los datos observados de Tx y Tn, se analizan los patrones atmosféricos y oceánicos asociados a las olas de calor en el período común comprendido entre 1979 y 2014. El dominio comprendido va desde las latitudes: -20°S a -50°S y longitudes 280° a 320° con una resolución de grilla de 1°x1° en promedio diario.

## Capítulo 3

# Análisis de temperaturas máximas y mínimas observadas

En este capítulo se realiza un exhaustivo control de calidad de los datos observados de temperaturas, comenzando con un análisis de datos faltantes, seguido un análisis de las series diarias de temperaturas máximas (Tx) y mínimas (Tn) describiendo aspectos estadísticos generales como análisis de los percentiles, el ciclo anual y sus distribuciones de probabilidades por décadas, por último se analizan las tendencias de las series de temperaturas para cada estación meteorológica.

### 3.1. Control de calidad

Con la actualización de las series de las 11 estaciones hasta el año 2014, se hace necesario realizar un nuevo control de calidad. De los datos proporcionados por el INUMET se identificaron 3 registros vacíos y sin información (sin valor de temperatura, ni registro de datos faltantes), que a los efectos de éste trabajo se los categorizó como datos faltantes.

El primer control de calidad de las series diarias se llevó a cabo siguiendo el mismo protocolo establecido en Renom Molina (2009) y de Mello (2013). Para este proceso, se empleó la librería RclimDex (Zhang, Yang et al. (2004)), la cual opera dentro del entorno de programación R (R Core Team (2021)). Esta librería genera diversas hojas de cálculo con datos que deben ser revisados según los criterios establecidos por el usuario. Estos criterios abarcan desde valores improbables (por ejemplo, una temperatura máxima menor que la temperatura mínima) hasta valores que exceden un umbral de dos, tres, etc. desviaciones estándar (definidas por el usuario) con respecto a las

climatologías. En este estudio, se optó por establecer un umbral de tres desviaciones estándar para determinar posibles errores.

En una segunda instancia, se calcularon las diferencias interdiarias de Tx y Tn para las once estaciones. Se identificaron como potenciales errores los datos que difieren en más de tres desviaciones estándar de dichas series.

En base a las metodologías implementadas, se identificaron 591 registros con potencial de error. Para llevar a cabo el análisis espacial correspondiente, se desarrolló una rutina en MATLAB específicamente para este estudio. Esta rutina, o programa, tiene la capacidad de analizar y visualizar los casos identificados. Primero, identifica las fechas en las hojas de cálculo de salida, tanto del análisis de RclimDex como de las diferencias interdiarias detectadas en cada estación. Luego, presenta la información de todas las estaciones para cada fecha en mapas, lo que proporciona una representación espacial y georreferenciada del potencial error.

Para dicho análisis, se visualizan las temperaturas Tx y Tn del día a analizar y del día anterior, ambos casos georreferenciadas las temperaturas e indicado en rojo el potencial error. Luego en una segunda figura, se grafican de igual manera el día analizado y el día posterior, contemplando así tanto la variabilidad diaria como la espacial de los potenciales errores.

Los datos son visualizados como se muestra en la figura 3.1, se puede observar los valores de Tn y Tx en las posiciones geográficas de las estaciones meteorológicas. Del total de datos a revisar (591), 114 fueron seleccionados por presentar alguna inconsistencia que justifique su supervisión en los registros del Inumet. Siendo el principal motivo la inconsistencia espacial con las estaciones cercanas y posibles errores de tipeo a la hora de la digitalización.

Se mantuvieron múltiples contactos hasta finales de 2016, durante los cuales se fueron verificando en la medida de las posibilidades del INUMET los datos dudosos. En la tabla 3.1, se presenta para cada estación la cantidad de registros que fueron enviados para su revisión, aquellos que pudieron ser verificados en las libretas y los que aún quedan pendientes de revisión.

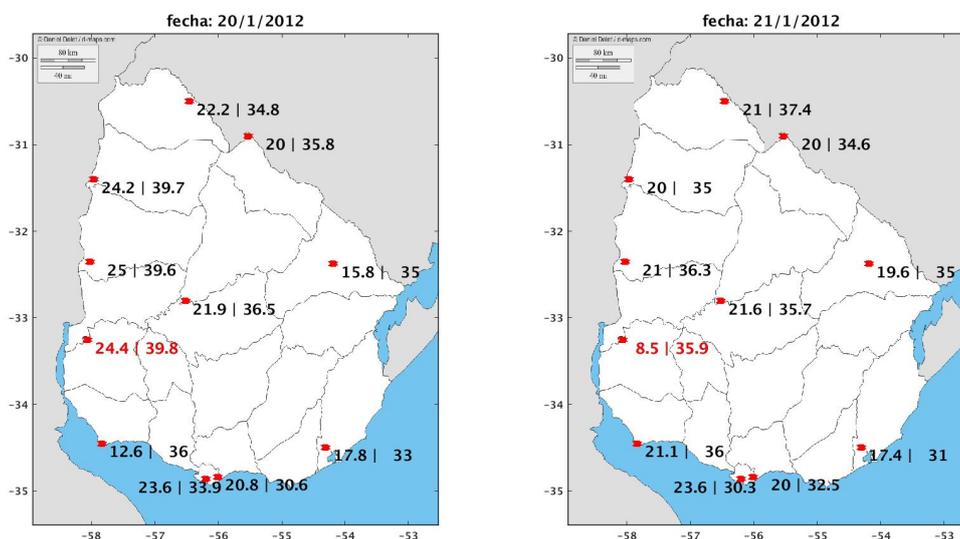
La estación que presentó más potenciales errores fue Prado con 25 registros, seguida de Mercedes con 19 y Paso de los Toros con 17. La Estanzuela es la única estación que no presenta datos a ser revisados, manteniendo una consistencia con los análisis anteriores.

De los datos aún pendientes de revisión, únicamente 8 corresponden al período 2010-2014, que es el período en el que se amplió la base de datos. Hasta la fecha, se han

revisado 43 casos, lo que equivale al 38 % de los datos identificados. De estos casos revisados, se encontró que 9 correspondían a registros correctos según los librillos, mientras que en 34 registros se identificaron errores de digitalización, los cuales fueron corregidos utilizando los valores proporcionados por el INUMET. Esto representa un 0.092 % del total de los datos. Si calculamos los porcentajes basados en los 43 casos revisados, se obtiene una tasa de error del 21 %. Este resultado indica un buen desempeño del control de calidad de los datos implementado hasta el momento. Estas correcciones y el intercambio con el INUMET contribuyen al mejoramiento de la calidad de los datos observados y benefician a ambas instituciones.

A modo de ejemplo, en la figura 3.1 se puede observar que el 21/01/2012 la  $T_n$  registrada fue de  $8,5^{\circ}\text{C}$  en Mercedes siendo que todas las demás estaciones presentan temperaturas en el entorno de los  $20^{\circ}\text{C}$ . Este se trata de uno de los casos revisados donde se encontró que el dato corresponde a  $18,5^{\circ}\text{C}$ , modificando la base de datos. En los 71 casos que no se pudieron verificar, se mantienen los datos proporcionados por el Inumet y se analiza si esos datos inciden en el análisis de esta tesis.

Con respecto a los datos que no se pudieron verificar por el Inumet a la fecha, y dado que se trataba de datos dudosos y no de errores graves, se procedió a continuar con los valores registrados originalmente, estando a la espera de futuras confirmaciones por parte del INUMET.



**Figura 3.1:** Ejemplo análisis de la fecha 21/01/2012.

La base de datos obtenida, además de ser la base para esta tesis, se utilizó para el proyecto ANII Hernández Banadik et al. (2021).

<b>Nombre</b>	<b>A revisar en libretas</b>	<b>Revisados</b>	<b>Pendientes</b>
<b>Artigas</b>	7	0	7
<b>Carrasco</b>	12	4	8
<b>Estanzuela</b>	0	0	0
<b>Melo</b>	10	5	5
<b>Mercedes</b>	19	17	2
<b>Paso de los Toros</b>	17	11	6
<b>Paysandú</b>	8	6	2
<b>Prado</b>	25	0	25
<b>Rivera</b>	6	0	6
<b>Rocha</b>	2	0	2
<b>Salto</b>	8	0	8
<b>Total</b>	<b>114</b>	<b>43</b>	<b>71</b>

**Tabla 3.1:** Cantidad de datos identificados para ser revisados, cantidad de datos que se pudieron revisar en el Inumet y datos pendientes a revisar.

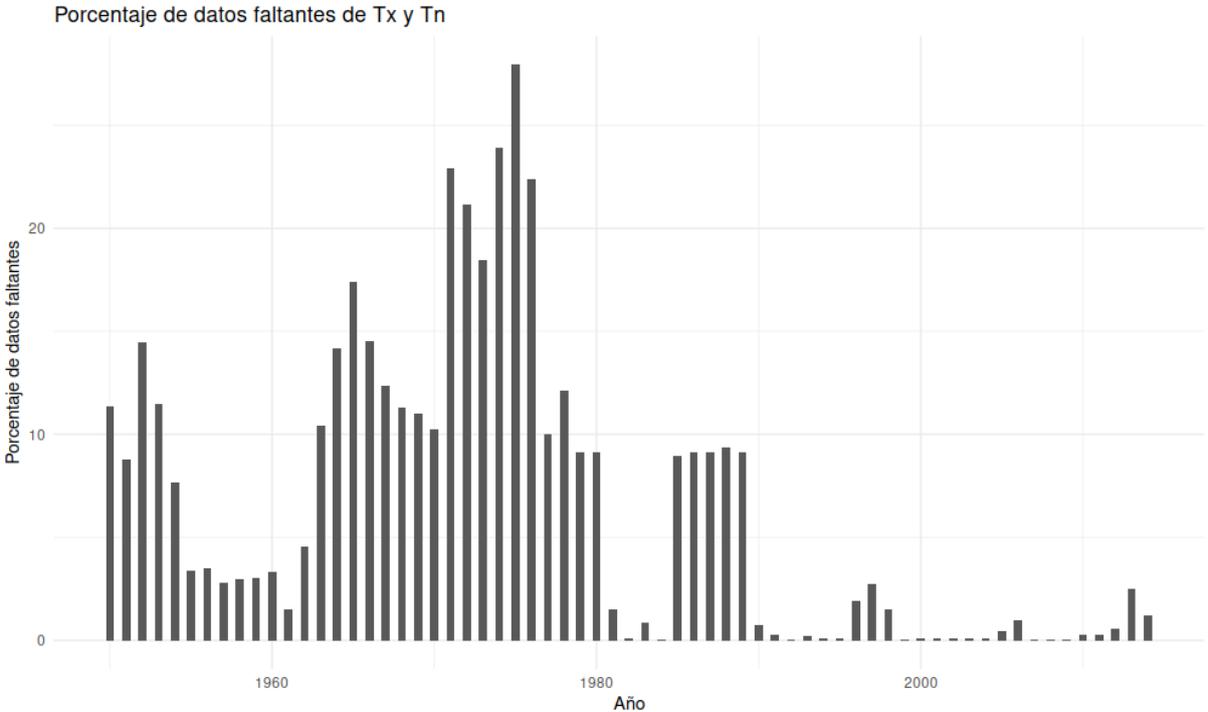
## 3.2. Datos faltantes

En esta sección se analizan los datos faltantes que aparecen en las series. En las tablas 3.2 y 3.3 se muestra el porcentaje de datos faltantes por estación. Observamos que hay 4 estaciones (Artigas, Melo, Prado, Rivera) en las que los días sin datos superan el 10 %, y en Artigas más que el 20 %, mientras que en el resto de las estaciones la cantidad de datos faltantes no supera el 5 % en el periodo.

Complementariamente, se gráfica la distribución temporal de los datos faltantes en función del tiempo para ambas variables (figuras A.1 y A.2 del anexo 1). No se observan grandes discrepancias entre el total de datos faltantes entre temperaturas máximas y mínimas para cada estación meteorológica. Se puede observar que las 4 estaciones que presentan mayor porcentaje de datos faltantes, concentran los faltantes en períodos prolongados de tiempo. Artigas, debido a que permaneció cerrada, permanece sin registros entre los años 1963 y 1976 (14 años), siendo el período de registros faltantes más largo de las series, faltando los registros para las series de Tx y Tn en el mismo período. Lo mismo ocurre con la estación de Melo que concentra la mayoría de los datos faltantes en dos períodos, uno entre los años 1951 y 1954 y otro entre 1971 y 1976, sumando un total de 10 años. La estación de Prado tiene un período de 8 años con datos faltantes entre 1974 y 1981. El período de años sin registros más cercano en el tiempo lo presenta la estación de Rivera con 6 años entre 1985 y 1990.

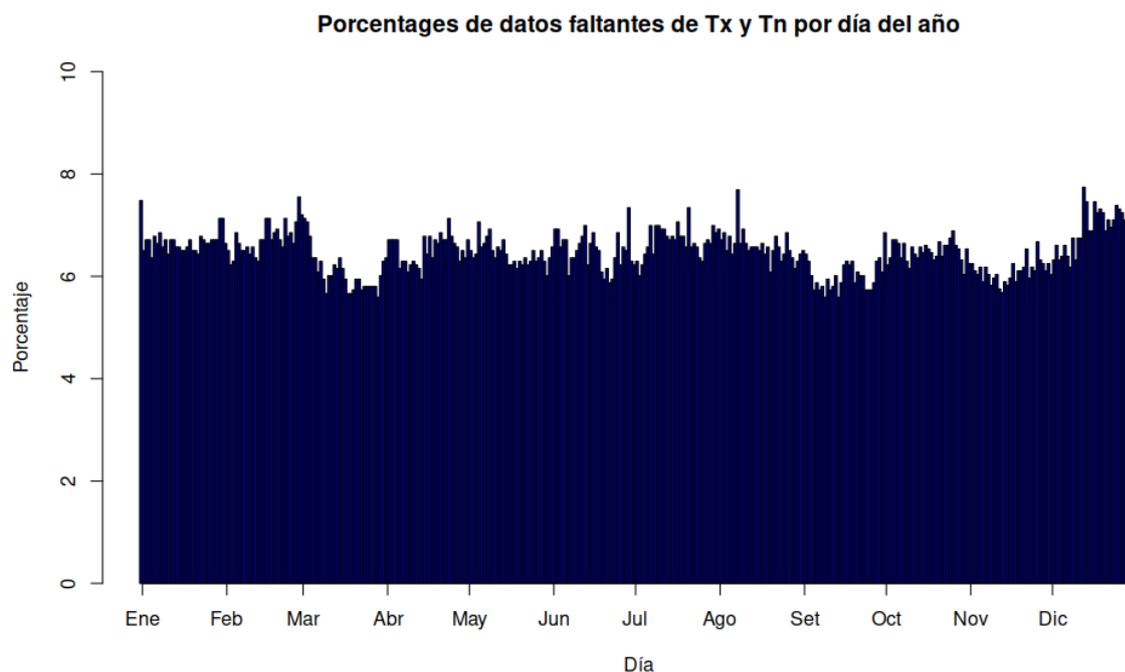
Es de particular interés para este trabajo analizar los casos donde la ocurrencia de los datos faltantes se da al mismo tiempo en varias estaciones meteorológicas. Dado

que se cuenta con 11 estaciones y dos variables analizadas (Tx y Tn), cada día cuenta con 22 observaciones, siendo el día que presenta mayor cantidad de datos faltantes el 08/08/2014 con un total de 15 registros ausentes de los 22 (68%). Luego, hay un período en julio del 1964 que abarca del 11 al 31 que tiene 10 registros faltantes, los días 19 y 30 de ese mismo período son los dos únicos casos donde faltan 11 valores.



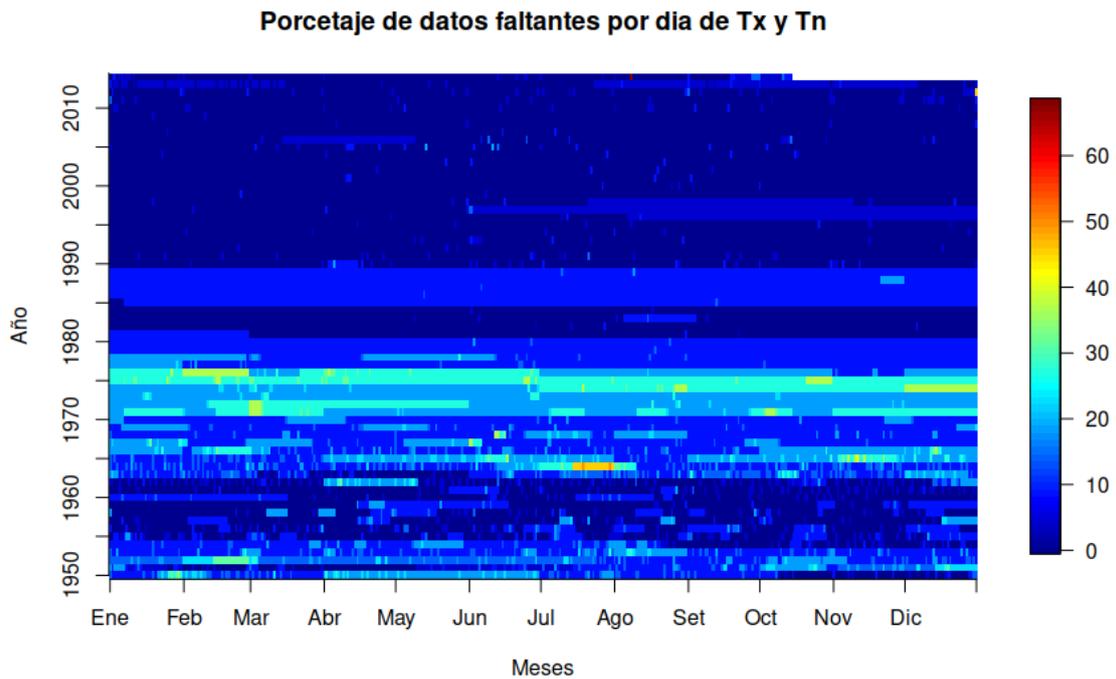
**Figura 3.2:** Porcentaje de datos faltantes de Tx y Tn por año

A continuación, se hace un análisis de la cantidad de datos faltantes por año (figura 3.2). Se puede apreciar que el período de mayor cantidad de faltantes es el comprendido entre los años 1971 y 1976 que superan el 15% de datos faltantes (a excepción del año 1973 con 18%), junto con el año 1965 que también supera el 15%. Las décadas del 60 y 70 presentan el período con la mayor cantidad de faltantes. Es importante destacar que cuando faltan 5 de los 22 registros, esto equivale a un 22.7% de datos faltantes, mientras que 4 registros representan un 18.2%. Además, en términos generales, los faltantes durante períodos prolongados de tiempo se concentran en una estación meteorológica y abarcan ambas variables. Estos períodos suelen coincidir con el cierre de una o varias estaciones meteorológicas. También es importante observar la distribución diaria de los datos faltantes en el ciclo anual (desde el 1 de enero al 31 de diciembre), con el objetivo de poder analizar si existe alguna ventana dentro del ciclo anual que tenga un mayor porcentaje de faltantes. Para esto, se grafica el porcentaje de datos faltantes para cada día del ciclo anual, el cual se presenta en el gráfico 3.3. En el mismo, se puede apreciar que todos los valores están en el rango entre 5.6% y 8% y no se presenta períodos de datos faltantes dentro del ciclo anual.



**Figura 3.3:** Porcentaje de datos faltantes de Tx y Tn por día

Para una mejor visualización se presentan los datos en la figura 3.4, donde cada fila corresponde a un año y las columnas son los 365 días del año. La paleta de colores abarca todo el rango de porcentajes donde se puede apreciar que desde la década de los años 80 los datos faltantes son bajos y del orden del 4 %. Desde 1970 al 1979, se observan los valores más altos que superan el 20 %. También se observan los primeros 5 años con valores del orden del 10 %. Cabe mencionar que los años en los cuales las estaciones permanecieron cerradas se consideran como cualquier otro dato faltante.



**Figura 3.4:** Distribución del porcentaje de datos faltantes de todas las series de Tx y Tn para cada día del año.

En base a los resultados obtenidos, se considera adecuado el uso de las series Tx y Tn de las 11 estaciones para los propósitos de este trabajo.

### **3.3. Análisis de las series de temperaturas y tendencias**

En esta sección se describen los conceptos generales de las series de Tx y Tn. Se abordarán temas relativos al comportamiento general, buscando dar un contexto a las variables que van a definir las olas de calor, dado que estas serán el punto de partida para su definición. En particular, se analizarán las tendencias de temperaturas de Tx y Tn utilizadas en este trabajo, así como también se describen las principales características estadísticas de los datos.

### 3.3.1. Estadísticos, percentiles, ciclo anual y distribución de probabilidades

Las tablas 3.2 y 3.3 resumen por estación meteorológica los valores máximos y mínimos absolutos de cada serie (Max y Min), los valores medios (Med), los percentiles 25, 50 (mediana) y 75 (P25, P50 y P75, respectivamente). También se muestran los datos faltantes (NA) y su porcentaje (% NA). Los datos faltantes ya fueron analizados en la sección anterior, a continuación se comentan los estadísticos de las tablas.

En cuanto a los valores máximos de Tx se destaca la estación de Rivera con un registro de 43°C el día 27/12/1952. En el resto de las estaciones los registros de Tx para esa fecha superaron los 36°C, siendo que ese día en todas las estaciones se superaron el P75. El máximo absoluto de Tx en Rivera es el registro que data de más años. Le sigue el registro de Paysandú en 1975, seguido del registro de Salto en 1986. El resto de los máximos se dió a partir de 1999. Los mínimos de Tx presentan un comportamiento homogéneo que varía en un rango entre 4.0°C y 6.0°C.

	ART	CAR	EST	MEL	MER	PdT	PAY	PRA	RIV	ROC	SAL
<b>Min</b>	6.0	5.5	4.0	4.3	5.0	5.2	4.8	6.2	4.2	6.2	5.0
<b>P25</b>	20.6	16.4	16.8	19.0	18.6	18.4	19.0	16.6	19.0	17.2	19.4
<b>P50</b>	25.6	21.2	21.8	23.6	23.8	23.6	24.0	21.4	24.0	21.4	24.7
<b>Med</b>	25.3	21.1	21.7	23.5	23.7	23.4	23.9	21.4	23.7	21.5	24.5
<b>P75</b>	30.2	25.4	26.6	28.0	28.6	28.2	29.0	25.9	28.5	25.7	29.5
<b>Max</b>	41.4	40.8	40.2	41.3	41.7	41.6	42.0	40.4	43.0	41.5	42.2
<b>NA</b>	4766	318	1	4053	463	1171	91	3148	2767	479	64
<b>% NA</b>	20.1	1.3	0	17.1	2.0	4.9	0.4	13.3	11.7	2.0	0.3

**Tabla 3.2:** Tx: Máximos, mínimos, percentiles y datos faltantes

Los valores medios y el P50 de las Tx se encuentra entre los valores de 21.4°C y los 25.6°C, notando un gradiente latitudinal que se incrementa hacia las estaciones del norte de Uruguay. Se destaca que los valores de P50 y la media de cada estación no varía en más de 0.3°C. Cuando la media y el P50 son iguales implica que la distribución de los datos es simétrica y no presenta sesgos. Sobre los P25 y P75, se observa el mismo gradiente latitudinal mencionado para las medias y P50. Los valores del P75 varían desde los 30.2°C en Artigas a 25.4°C en Carrasco, con un rango de 4.8°C. El P25 varía entre 20.6°C y 16.4°C, con un rango de 4.2°C.

Cuando analizamos los valores mínimos de Tn se destaca la estación de Melo con el registro más bajo de -11.0°C el día 14/06/1967, notando que en todas las estaciones los registros de Tn para esa fecha fueron inferiores a los -3.0°C, salvo Rocha que registra un mínimo de 1.2°C y el día siguiente registró Rocha -5.8°C. Ese día todas las

estaciones se encontraron por debajo del P25 de cada estación. El mínimo valor de Tn en Melo es el registro que data de más años pero los días 14 y 15 de junio de 1967 se registraron los mínimos absolutos en 7 de las 11 estaciones (Melo, Carrasco, Estazuela, Paysandú, Prado, Rivera y Rocha). El mínimo absoluto más reciente lo presenta Salto el 09/06/2012 con  $-5.6^{\circ}\text{C}$ . Los mínimos de Tn presentan un comportamiento homogéneo que varía entre  $-11.0^{\circ}\text{C}$  y  $-3.6^{\circ}\text{C}$ , con un rango de  $7.4^{\circ}\text{C}$ .

Los valores medios y el P50 de las Tn se encuentran entre los  $14.4^{\circ}\text{C}$  y los  $11.3^{\circ}\text{C}$ , presentando también un gradiente latitudinal que se incrementa hacia las estaciones del norte de Uruguay, pero de menor magnitud. Para las Tn las diferencias entre el P50 y la media (de cada estación) varían en algunos casos en  $0.9^{\circ}\text{C}$ , siendo mayores a las variaciones como tenían las Tx de  $0.3^{\circ}\text{C}$ . Esto implica que en los casos donde las diferencias son cercanas a  $1^{\circ}\text{C}$ , como el caso de Artigas, la distribución de los datos presentan una asimetría pequeña. Esto puede estar vinculado a algún factor como la orografía donde se encuentra la estación meteorológica o la altura de las mismas. Se aclara que Artigas es la segunda más alta con 120 metros sobre el nivel del mar de las 11 estaciones consideradas en este trabajo.

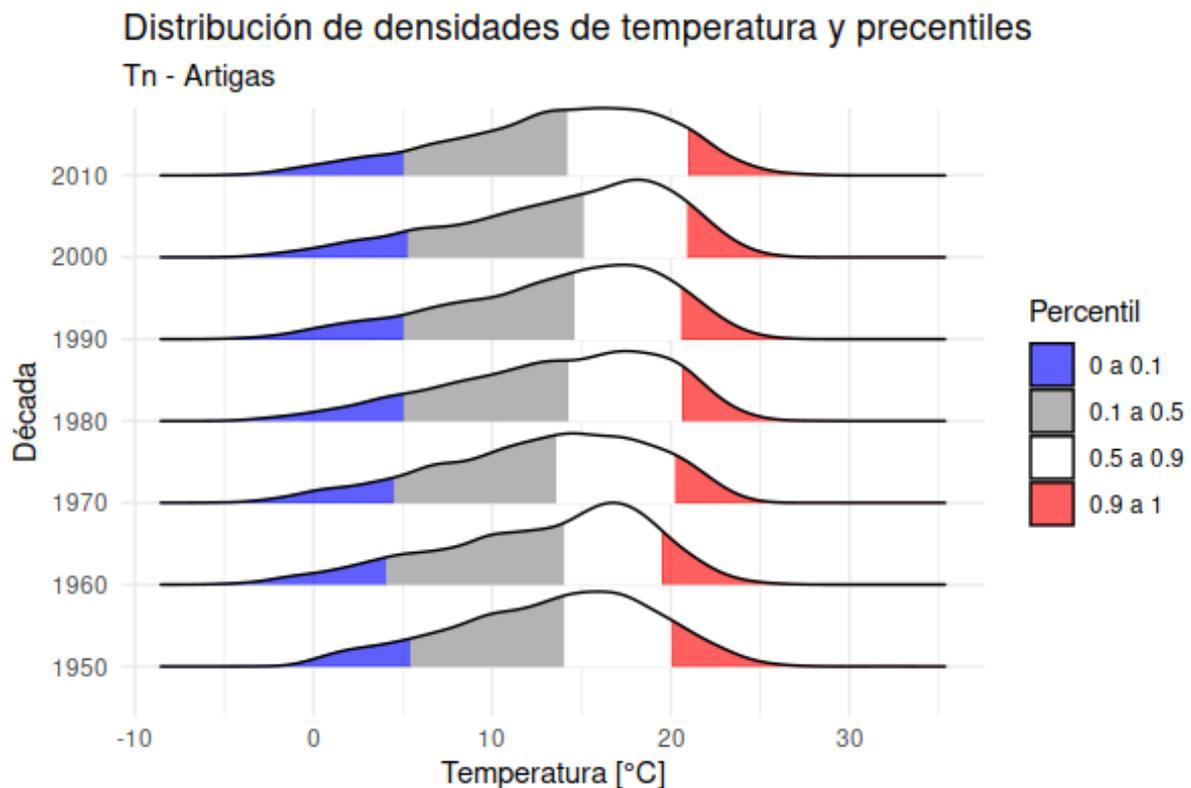
	<b>ART</b>	<b>CAR</b>	<b>EST</b>	<b>MEL</b>	<b>MER</b>	<b>PdT</b>	<b>PAY</b>	<b>PRA</b>	<b>RIV</b>	<b>ROC</b>	<b>SAL</b>
<b>Min</b>	-5.2	-7.4	-4.4	-11.0	-8.0	-3.6	-6.7	-5.6	-5.0	-5.8	-5.6
<b>P25</b>	9.6	8.2	7.8	7.0	7.1	8.3	8.0	8.8	8.8	7.2	8.4
<b>P50</b>	14.4	12.2	11.9	11.8	12.0	13.0	13.0	12.9	13.0	11.6	13.1
<b>Med</b>	13.5	12.1	11.7	11.2	11.5	12.4	12.3	12.7	12.6	11.3	12.6
<b>P75</b>	18.0	16.2	16.0	16.0	16.4	17.0	17.0	16.8	16.9	15.5	17.2
<b>Max</b>	32.0	26.0	26.7	26.4	29.5	28.0	28.5	27.6	26.9	26.0	29.0
<b>NA</b>	4852	312	1	3409	646	1052	73	3140	2481	373	76
<b>% NA</b>	20.5	1.3	0	14.4	2.7	4.4	0.3	13.3	10.5	1.6	0.3

**Tabla 3.3:** Tn: Máximos, mínimos, percentiles y datos faltantes

Sobre los P25 y P75 de Tn, se mantiene el gradiente latitudinal ya mencionado. Los valores del P75 van desde  $18.0^{\circ}\text{C}$  en Artigas y de  $15.5^{\circ}\text{C}$  en Rocha, con un rango de  $2.5^{\circ}\text{C}$ , siendo valores menores para este percentil que en las Tx. Los registros del P25 varían entre  $9.6^{\circ}\text{C}$  - también en Artigas - y  $7.0^{\circ}\text{C}$  en Melo, con un rango de  $2.6^{\circ}\text{C}$ . Para ambos percentiles (P25 y P75) se observa un menor rango de variación que en las Tx.

Dado que las Tn presentan un sesgo o asimetría previamente mencionados, se procede a graficar la distribución de probabilidades. Estos gráficos ilustran cómo se distribuyen las probabilidades de los diferentes valores de la variable analizada, lo que ayuda a comprender la probabilidad de que la variable tome un valor específico. Además, permiten identificar la presencia de sesgos y determinar en qué rango de valores se concentran. En la figura 3.5 se muestra la distribución de densidades de Tn de la esta-

ción Artigas y se separan por décadas. También se agrega una escala de colores con rangos de percentiles, de 0 a 10 (de 0 a 0.1, en azul), del percentil 10 al 50 (de 0.1 a 0.5, en gris), el percentil 50 al 90 (de 0.5 a 0.9, en blanco) y por último el percentil 90 al 100 (de 0.9 a 1.0, en rojo). Es pertinente introducir el concepto de curtosis para el análisis de las distribuciones. La curtosis es una medida que representa qué tan 'puntiaguda' o 'aplanada' es la forma de la distribución de los datos. Curtosis alta: los datos están agrupados fuertemente alrededor del promedio/mediana. Curtosis baja: los datos están más dispersos y no están tan concentrados alrededor del promedio/mediana.



**Figura 3.5:** Densidad de Tn de la estación Artigas por décadas.

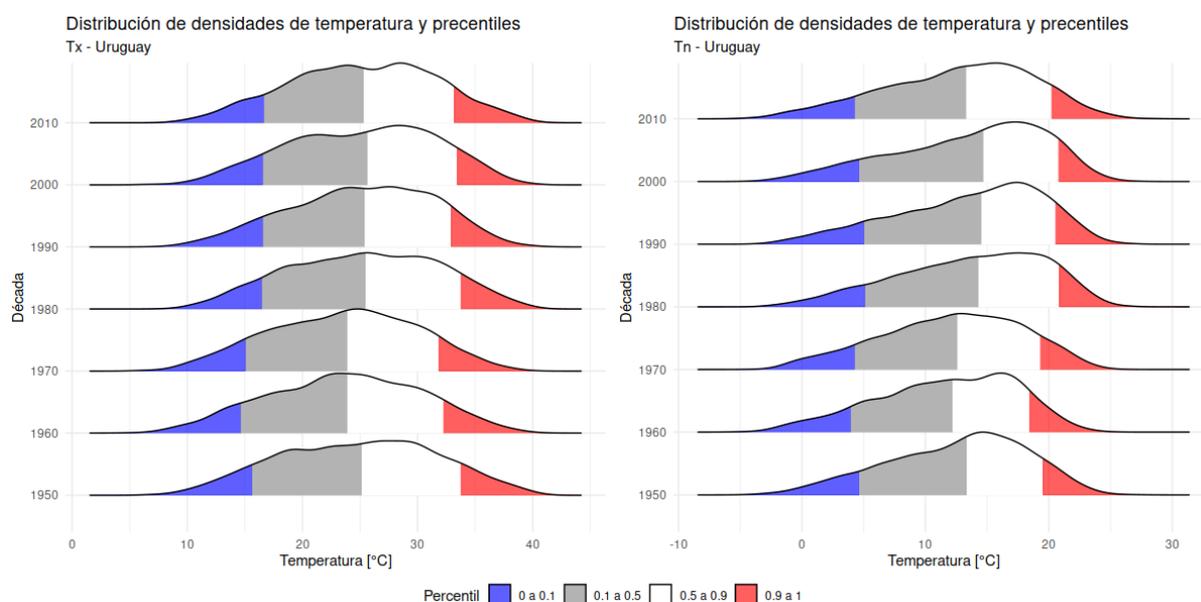
Como primer apreciación a la figura 3.5 cabe mencionar y tener presente que, la última década está subrepresentada, ya que los datos disponibles son hasta el 2014 y queda representada solo por 5 años. Las décadas de los 60' y 70' también son subrepresentadas por la falta de datos en Artigas ya que permanece sin registros entre los años 1963 y 1976. Posterior al año 1976, la serie de Artigas no presenta datos faltantes que sean por períodos significativos.

Si se deja de lado las décadas subrepresentadas se puede observar, en todas las décadas, una curtosis alta de los valores superiores al P50 y una curtosis baja para los valores inferiores al P50, constatando una asimetría, 'colas más largas' hacia los valores más bajos de Tn. También se puede ver que existen cambios en las distribuciones

por décadas. Las décadas de los 1960 y del 2000 presenta una mayor acumulación de los datos entre los percentiles 50 y 90. Si solo se consideran las series completas a partir de 1980, se puede observar una tendencia al alza en los valores del P90 (entre 1980 y 2000) y de todos los percentiles en general.

Como paso siguiente en la comprensión de los datos que van a definir las olas de calor, se generan gráficos iguales a los de las distribuciones de probabilidades mostradas anteriormente para Artigas, pero en este caso se considera el promedio de temperatura diaria de todas las estaciones meteorológicas disponibles, tanto de Tx como de Tn, las que denominaremos temperatura media diaria de Tx y Tn de todo el Uruguay (Tx-Uruguay y Tn-Uruguay). En la figura 3.6 se puede apreciar en términos generales que las Tn presentan colas más largas hacia los valores más bajos. Si comparamos las Tx y Tn por década, se puede observar que en todas las décadas las Tn también presentan colas más largas hacia los valores más bajos, entendiendo que este es un comportamiento general en la Tn.

También se pueden observar en la figura 3.6, variaciones en los percentiles 10, 50 y en particular el percentil 90, tanto para Tx como para Tn. Las décadas de los 60' y 70' son las únicas que presentan un corrimiento hacia valores más bajos y se observa el cambio en todos los percentiles mostrados. Las Tx tienen un comportamiento más homogéneo en los percentiles (salvo las décadas recién comentadas). Las Tn, en particular el percentil 90, (a excepción de los 60' y 70'), presentan un corrimiento hacia valores más cálidos.



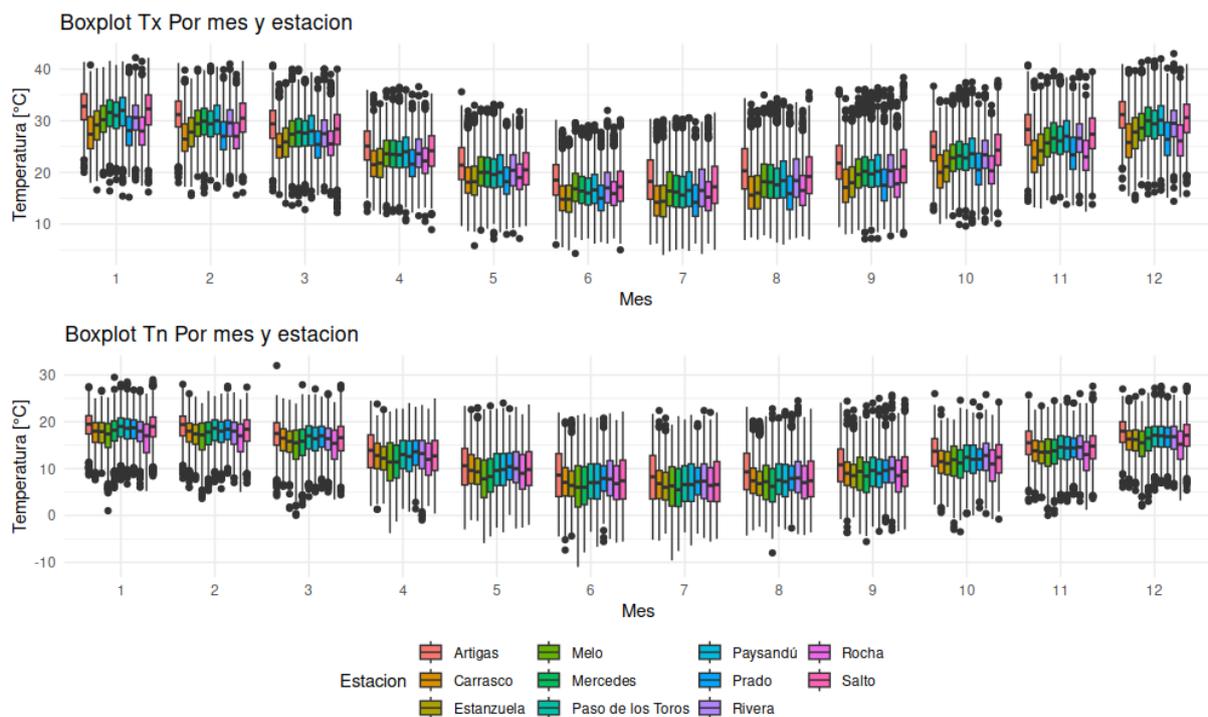
**Figura 3.6:** Densidad de Tx-Uruguay y Tn-Uruguay por décadas.

Este análisis debe complementarse con los resultados de los datos faltantes y consi-

derar la posibilidad de que períodos con desviaciones, como las encontradas en las décadas de los 60 y 70, generen un desequilibrio en los datos asociado a los gradientes de temperaturas mencionados anteriormente. Para esto se realizan boxplot de las  $T_x$  y  $T_n$  por estación meteorológica y por mes del año en la figura 3.7. Los boxplot, o también conocidos como diagramas de caja, presentan en la línea media el valor de la mediana o cuantil 50 (P50 ó Q50). Los bordes de las cajas representan los cuartiles 25 (Q25) y 75 (Q75). Los límites inferiores (superior) se determinan como  $L_{inf}=Q_{25}-1.5*[Q_{75}-Q_{25}]$  y límite superior como  $L_{sup}=Q_{75}+1.5*[Q_{75}-Q_{25}]$ . Por último, los valores que sobrepasan estos límites son considerados como datos atípicos, y están representados por puntos. Cada caja de color distinto representa una estación meteorológica.

Tanto en los estadísticos de las series de la tablas 3.2 y 3.3, como en los resultados de los boxplot, se puede observar que la estación de Artigas presenta valores de entre uno y cuatro grados por encima de las demás estaciones en todos los umbrales y períodos analizados. Esta diferencia, sumado al período de datos faltantes de Artigas en las décadas de los 60' y 70', pueden ser la causa de las variaciones en las distribución comentadas en la figura 3.6 en estas décadas.

Los boxplot de la figura 3.7 permiten caracterizar el ciclo anual que presentan las  $T_x$  y  $T_n$  a escala mensual. Se puede observar una leve diferencia entre el descenso y aumento de las  $T_x$  y  $T_n$ . Durante los meses de marzo a junio, se presenta una pendiente negativa más pronunciada (otoño) en comparación a los meses de agosto a diciembre donde la pendiente es positiva y menor. Esta tendencia es más notable en el caso de las temperaturas máximas y es un comportamiento también observado en los trabajos de Renom Molina, 2009 y de Mello, 2013.



**Figura 3.7:** Boxplot de Tx y Tn por mes y por estación meteorológica.

Para analizar la variabilidad a escala mensual, se observa en las cajas de los boxplot que abarca los Q25 a Q75 como una medida de la dispersión o variabilidad. Las Tn presentan una máxima variabilidad mensual entre 7°C y 4°C, según la estación meteorológica en los meses más fríos comprendidos entre mayo y agosto. Mientras que en los meses cálidos de noviembre a febrero, la variabilidad disminuye a valores entre 3°C y 5°C. La variabilidad observada en los meses de invierno se aleja de la idea que las estaciones de primavera y otoño serían las de mayor variabilidad por ser estaciones intermedias de transición. Las Tx presentan un comportamiento más uniforme entre los meses cálidos y los fríos, observando mayor variabilidad entre las estaciones meteorológicas.

### 3.4. Tendencias de Tx y Tn

A continuación se analizan las tendencias lineales en las series de Tx y Tn. En los análisis anteriores, se han observado pautas que indican un corrimiento en las últimas décadas de los valores de P50 y P90 hacia valores más altos. Para los objetivos propuestos es fundamental conocer si las series que serán la base para determinar las olas de calor, tiene o no tendencias. Existen varias formas de analizar la tendencia en las series de datos, algunos métodos de los más comunes y aplicado en las Ciencias

de la Atmósfera son:

a. Media móvil: La cual calcula la media móvil de un cierto número de datos consecutivos para suavizar las fluctuaciones y resaltar la tendencia subyacente, usualmente se toman 10 años (ejemplo de Mello, [2013](#) en el análisis de variabilidad de las series centenarias de Tn).

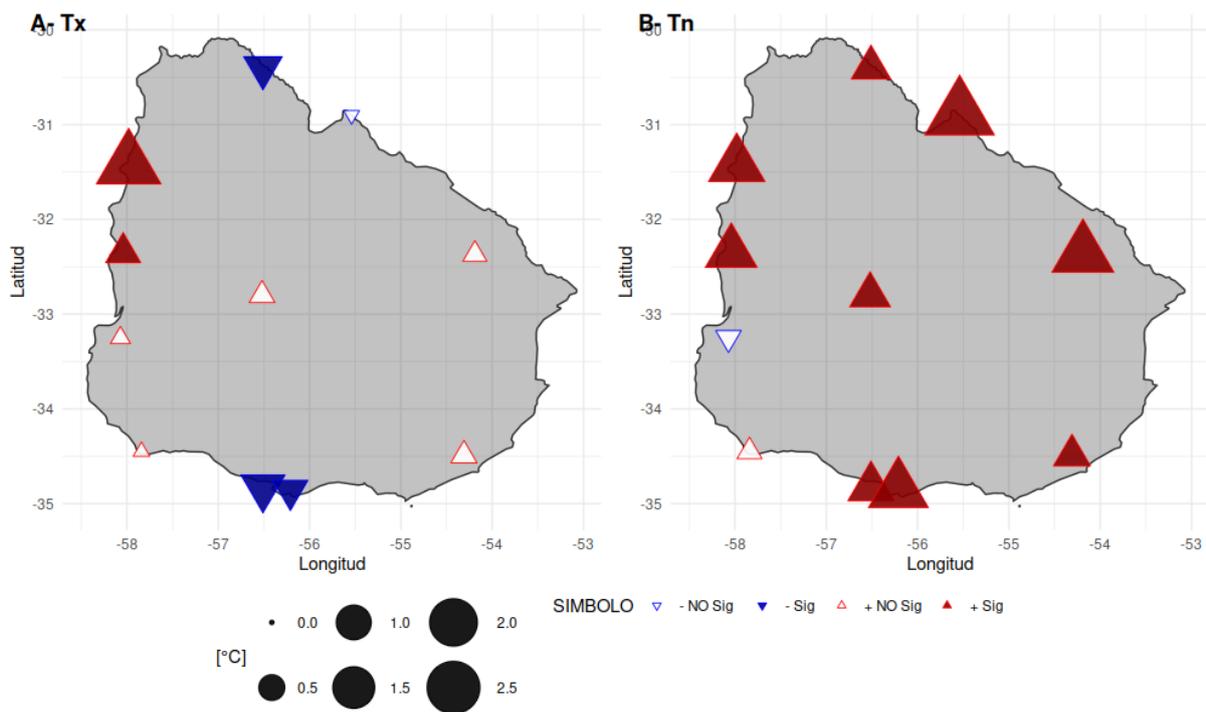
b. Regresión lineal: Realiza un análisis de regresión para ajustar una línea recta a los datos, lo que te permitirá estimar la dirección y la pendiente de la tendencia (ejemplo Balay D'Agosto, [2023](#)).

c. Exponencial suavizada: Este método da más peso a los datos más recientes y menos peso a los datos antiguos, lo que ayuda a capturar tendencias a corto plazo (ejemplo Álvarez Fernández et al. [2023](#)).

d. Análisis de series temporales: ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), (ejemplo Mukadi y González-García, [2021](#)).

Para este trabajo se realiza un análisis de tendencia ajustando un modelo de regresión lineal para la temperatura en todo el período y para cada estación (método b). La significancia estadística se evaluó aplicando el test de Student con nivel de confianza 95 % (Wilks, [2011](#)).

En la figura [3.8](#) se muestran espacialmente los resultados obtenidos del cálculo de las tendencias lineales de temperaturas diarias para todas las series de Tx y Tn. Estos gráficos muestran la tendencia indicando mediante un triángulo apuntando hacia arriba si se trata de una tendencia positiva (y color rojo), y un triángulo apuntando hacia abajo si la tendencia es negativa (y color azul). Si el relleno es sólido indica que es significativa al 95 % con el test de Student. El tamaño de los triángulos representa la cantidad de grados celsius que aumenta o disminuye en el período de análisis, es decir, °/65 años (1950 - 2014, 65 años).



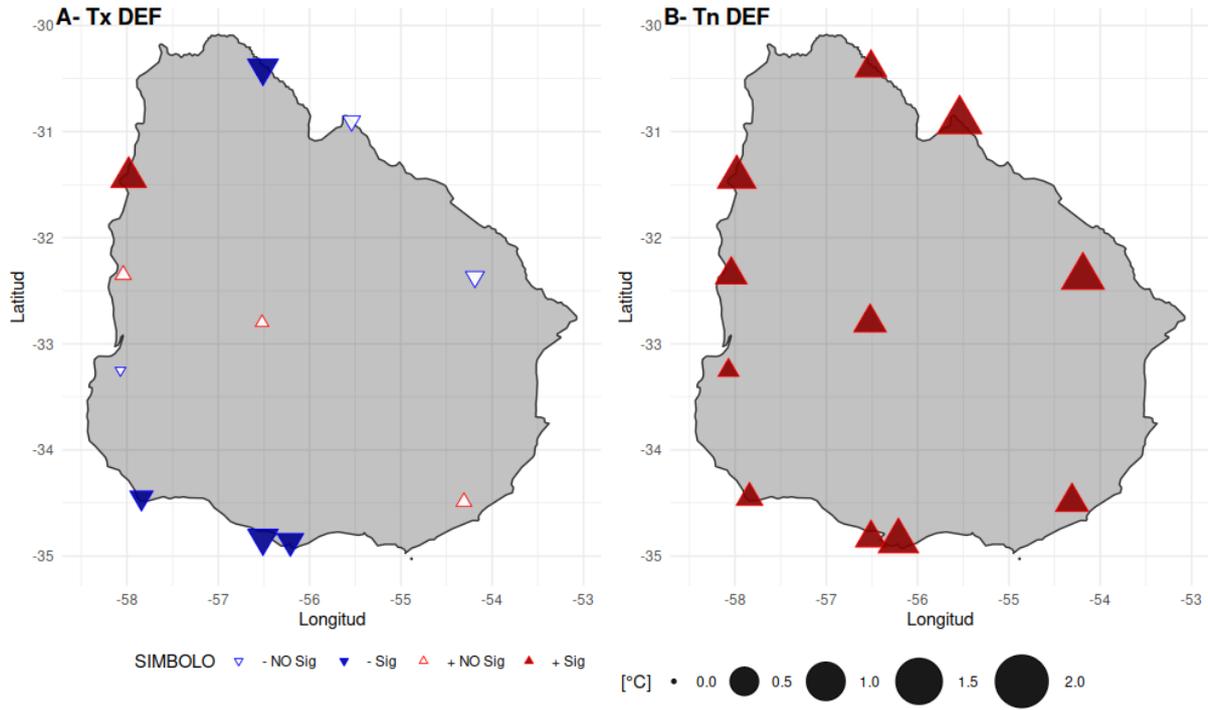
**Figura 3.8:** Mapas de tendencias y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn

Los resultados de la figura 3.8 marcan una diferencia entre las tendencias de las Tx y Tn, donde se puede observar que las Tn presentan una tendencia positiva y significativa en 9 de las 11 estaciones meteorológicas, siendo Rivera la que presenta valores más altos en el incremento de la temperatura en 2.4°C en los 65 años de estudio. Estanzuela presenta una tendencia también positiva pero no significativa y la estación de Mercedes es la única que presenta una tendencia negativa pero no significativa con un descenso de 0.2°C. Las Tx presentan 7 estaciones con valores positivos teniendo Paysandú y Salto tendencias significativas con el mayor aumento de las temperaturas en 2.0°. El Norte del país (representado por Artigas y Rivera) y la región metropolitana (Montevideo y Carrasco), muestran una disminución de las temperaturas (Tx y Tn) siendo Rivera la única que no es estadísticamente significativa, Carrasco es la estación que disminuye 0.9°C en los 65 años. Estos resultados son coherentes con los estudios realizados por Renom Molina, 2009 donde se indica una tendencia positiva en las Tn.

Dada la variabilidad en el ciclo anual es importante analizar las tendencias, pero en este caso lo haremos por cada estación del año. Se aplica la misma metodología que en la figura 3.8 considerando los datos de cada estación del año, la figura 3.9 muestra las tendencias para el verano (DEF), 3.10 para el otoño (MAM), 3.11 para el invierno (JJA) y 3.12 para la primavera (SON).

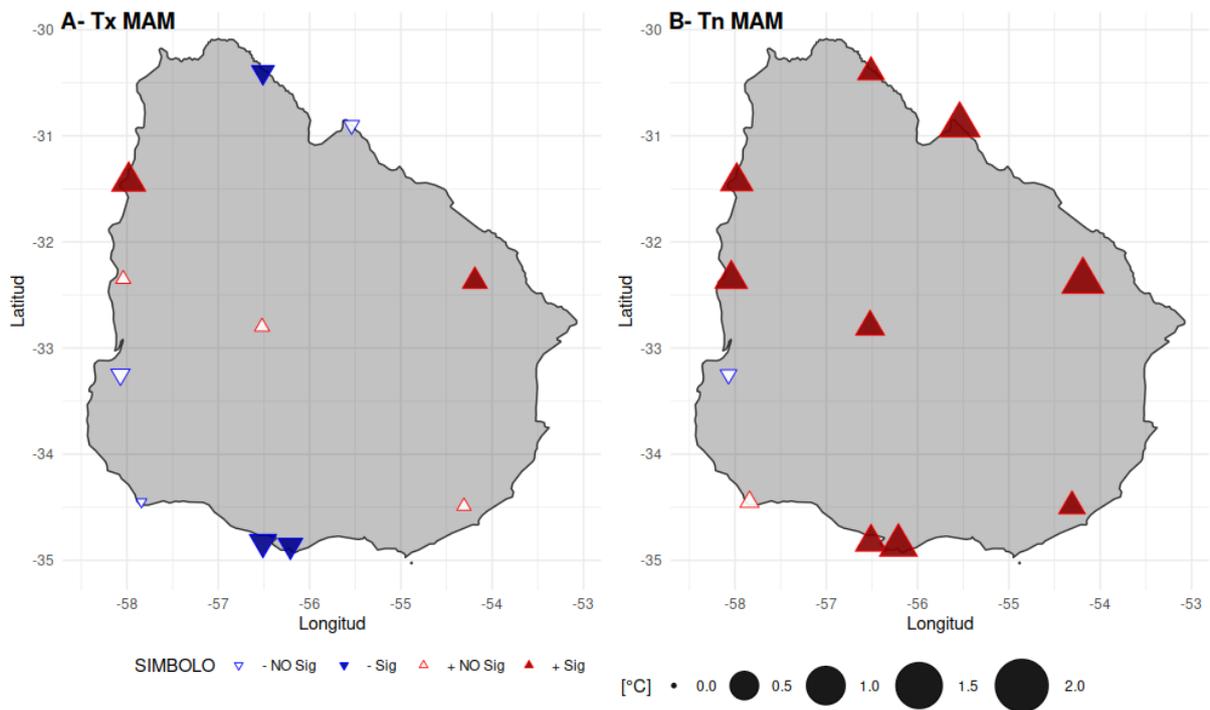
En el verano, figura 3.9, se destaca que en todas las estaciones meteorológicas del país las Tn presentan una tendencia positiva y significativa, variando entre 0.7°C en la

estación de Rivera y  $0.1^{\circ}\text{C}$  en la estación de Mercedes. Las Tx presentan una diferenciación más que al considerar todo el año. Siete estaciones marcan una disminución de las temperaturas y cuatro un aumento de las mismas siendo solo Salto quien presenta una tendencia positiva y significativa con un valor de  $0.4^{\circ}\text{C}$ . Artigas presenta una tendencia negativa de  $0.3^{\circ}\text{C}$ , siendo la tendencia negativa mas grande. Se observa una tendencia negativa y significativa en la región del suroeste del país.



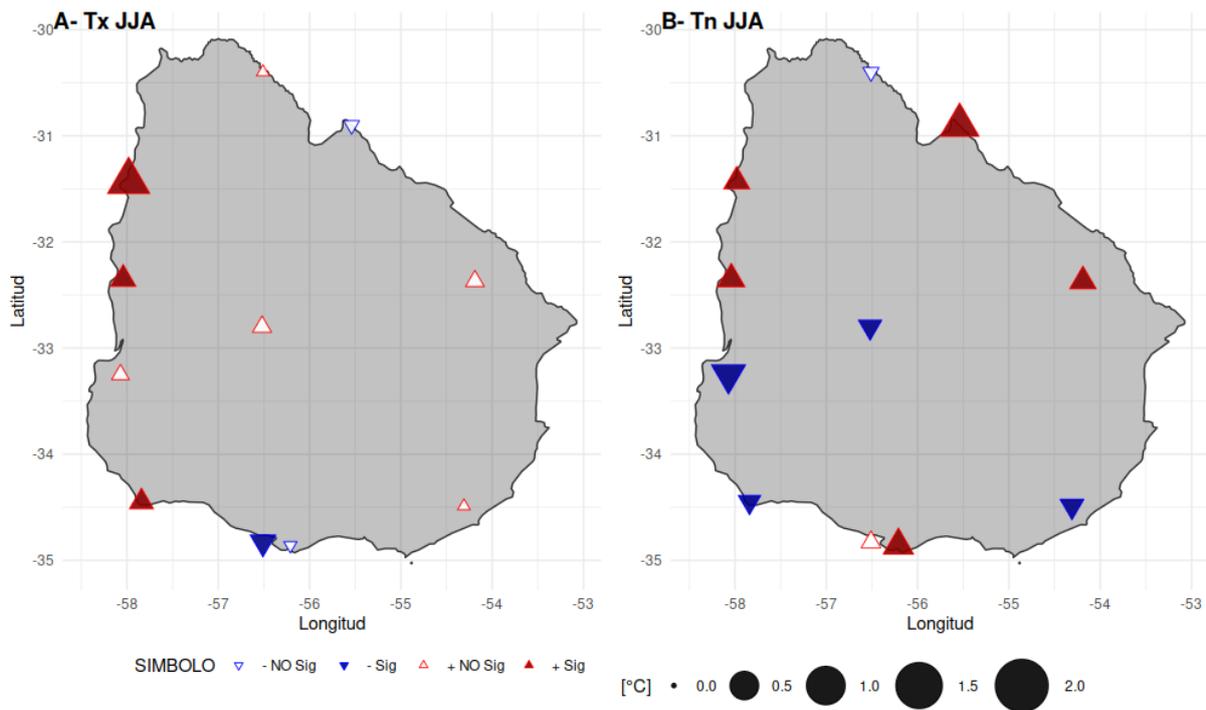
**Figura 3.9:** Mapas de tendencias para el verano (Diciembre, Enero y Febrero - DEF ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn

Al analizar el otoño (figura 3.10) se observa que las Tn presentan el mismo comportamiento espacial que el caso de todo el año, siendo que presenta valores más bajos en cuanto al aumento en  $^{\circ}\text{C}$  en los 65 años,  $0.6^{\circ}\text{C}$  para Rivera y Melo, mientras que Mercedes presenta una tendencia negativa no significativa de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Las Tx de MAM tienen el mismo patrón espacial que en el verano, salvo la estación de Melo que cambia, de una tenencia negativa no significativa a una tendencia positiva y significativa. Salto es la tendencia positiva y significativa mas alta con  $0.4^{\circ}\text{C}$  mientras que en Carrasco la tendencia es negativa y significativa con  $0.2^{\circ}\text{C}$ .



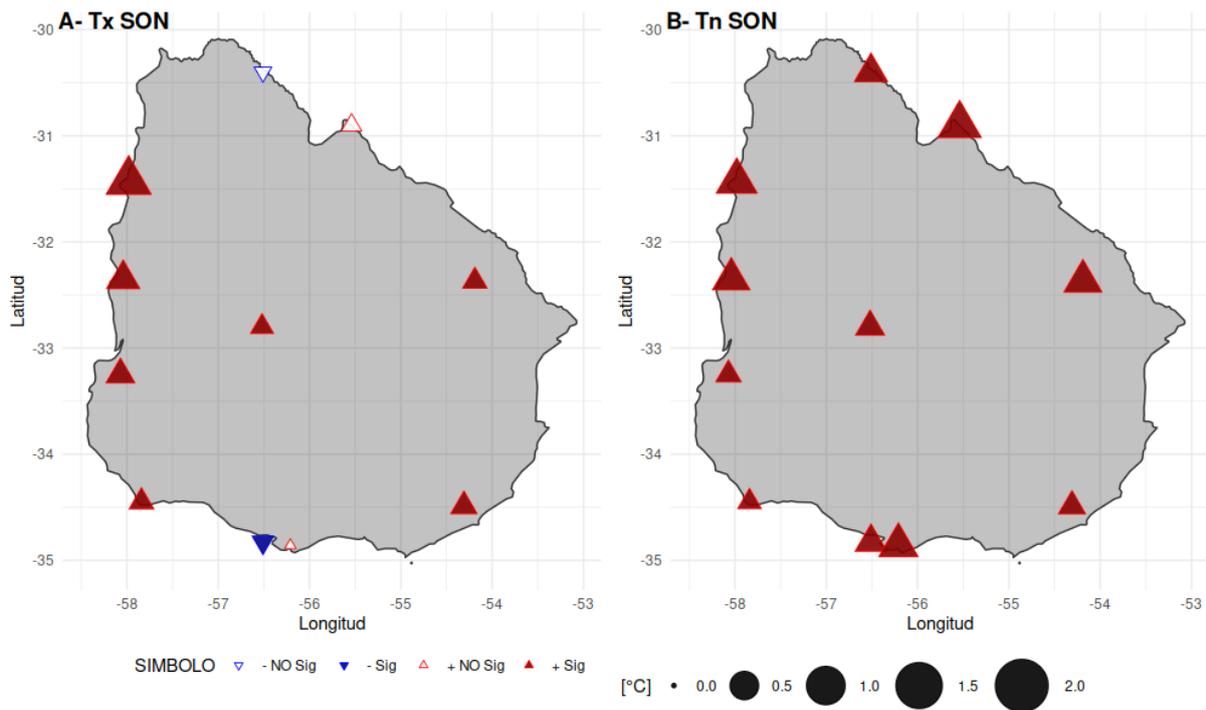
**Figura 3.10:** Mapas de tendencias para el otoño (marzo, abril y mayo - MAM ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn

El invierno (figura 3.11) presenta un patrón espacial más heterogéneo en lo relativo a las Tn, donde las estaciones de Artigas, Paso de los Toros (0.1°C), Mercedes (0.4°C), Estanzuela (0.1°C) y Rocha (0.2°C) tienen una disminución significativa salvo Artigas que no es significativa (0.05°C). El resto de las estaciones marcan una tendencia positiva y significativa salvo la estación de Carrasco, siendo Rivera la mayor tendencia con un aumento de 0.5°C. En el invierno, de las Tx solo se destaca Salto con un valor de 0.6°C en aumento y significativo.



**Figura 3.11:** Mapas de tendencias para el invierno (junio, julio y agosto - JJA ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn

Por último, la primavera (figura 3.12) muestra la mayor homogeneidad espacial en las Tx y Tn. Todas las Tn presentan un incremento de las temperaturas con significancia estadística. El máximo valor lo presenta Rivera con 0.7°C. En las Tx, si bien Prado y Artigas presentan una tendencias negativa solo Prado es significativa (0.1°C). De las 9 estaciones restantes, todas presentan tendencias positivas siendo Rivera y Carrasco no significativas. La tendencia más alta la presenta Salto con 0.7°C.



**Figura 3.12:** Mapas de tendencias para el primavera (setiembre, octubre y noviembre - SON ) y su significancia estadística al 95 % para: a) de Tx y b) Tn

Otros estudios como Renom Molina, 2009 y de Mello, 2013 aplican el test de Sen Sen, 1968 para el análisis de tendencias. En el segundo trabajo solo se analizan las tendencias para las Tn teniendo presente que las series en ese estudio abarcan hasta el año 2009. Es importante mencionar que los resultados obtenidos son consistentes con estos dos trabajos ya que las series fueron heredadas, a pesar de que se extendieron como se comentó en la sección de Datos Observados.

Por último, cabe resaltar que dentro del análisis de las tendencias en (Renom Molina, 2009) se constató el 'salto climático' de 1976 que afectó la ocurrencia de eventos extremos de temperatura, el cual estaría relacionado también con un cambio en la dinámica de El Niño. Este cambio puede estar influenciado según N. J. Mantua y Hare, 2002b por la Oscilación Décadal del Pacífico, que en el año 1976 cambia a fase positiva.

### 3.5. Síntesis del capítulo

En esta sección, se ha logrado obtener una base de datos que fue ampliada y cubre el período de 1950 a 2014. Como primer paso, se llevó a cabo un control de calidad de las series, identificando un volumen de información para revisión que fue proporcionado a las instituciones correspondientes. Se pudo diagnosticar la presencia de datos

faltantes y los períodos de cierre de algunas estaciones. Además, se determinó que la distribución de los datos faltantes en el ciclo diario de las temperaturas (tanto de Tx como de Tn) no representa un obstáculo para este trabajo, ya que se encontró que todos los valores del ciclo diario están dentro del rango entre 5.6 % y 8 %. Es importante destacar que las dos primeras décadas de las series muestran un mayor porcentaje de datos faltantes, los cuales deben tenerse en cuenta al comparar resultados entre las primeras y últimas décadas.

En cuanto a las temperaturas, tanto Tx como Tn, se logró caracterizar y analizar los estadísticos básicos, incluyendo la media, mediana, percentiles 10, 25, 75 y 90, así como los valores máximos y mínimos absolutos de cada serie. En relación con las distribuciones de probabilidades, se puede observar que, en términos generales, las Tn muestran colas más largas hacia los valores más bajos de temperatura, mientras que este comportamiento no se evidencia en las Tx. Únicamente las décadas de los 60 y 70 presentan un desplazamiento de los percentiles 10, 50 y 90 hacia valores más bajos de temperatura, tanto para Tx como para Tn. Por otro lado, las Tn, especialmente el percentil 90 (exceptuando los años 60 y 70), muestran un desplazamiento hacia valores más cálidos en las últimas décadas. Se observa que las Tn presentan una mayor variabilidad mensual durante los meses más fríos (MJJA), mientras que esta variabilidad disminuye en los meses más cálidos (NDEF). En cuanto a las Tx, muestran un comportamiento más uniforme entre los meses cálidos, aunque se observa una mayor variabilidad entre las estaciones meteorológicas.

Las tendencias analizadas marcan un aumento de las temperaturas para las Tn, donde se presenta una tendencia positiva y significativa en 9 de las estaciones, siendo Rivera la que presenta el valor más alto con un incremento de 2.4°C en los 65 años del estudio. Las Tx presentan 7 estaciones con valores positivos con Paysandú y Salto con tendencias significativas, el mayor aumento es de 2.0° en Salto. Al ver las tendencias por estación del año, se nota un marcado aumento de las Tn en primavera y verano (siendo todas las estaciones meteorológicas significativas). En invierno, solo 6 estaciones muestran una tendencia positiva en las Tn. Por otro lado, en primavera, se observa la mayor cantidad de estaciones con una tendencia positiva para las Tx, con 9 de ellas mostrando tendencias positivas, de las cuales 8 son estadísticamente significativas. Le sigue el invierno, con 8 estaciones, aunque solo 3 de ellas son significativas. Tanto el verano como el otoño presentan 6 estaciones con una tendencia negativa, aunque de menor significancia en general.

# Capítulo 4

## Olas de calor

Existen diferentes enfoques para definir olas de calor, en general hay consenso en considerar que una ola de calor es un período de tiempo en el que se registran temperaturas altas y persistentes en una región determinada. A continuación, se describen algunos de los enfoques clásicos y utilizados para definir una ola de calor.

El primer enfoque se basa en el valor de la temperatura (Tx, Tn o ambas), en general a escala diaria y que se da en una determinada región. En estos casos generalmente se considera como ola de calor cuando se registran tres o más días consecutivos con temperaturas superiores a cierto valor. Rusticucci et al. 2016 definen tres tipos de olas de calor, aquellas con una sucesión de 3 o más días con: (1) Temperaturas mínimas por encima del percentil 90; (2) Temperaturas máximas por encima del percentil 90 y (3) la ocurrencia conjunta de Temperaturas Máximas y Mínimas por encima de sus percentiles 90.

Coronato, 2022a, toma la misma definición de Rusticucci et al. 2016 pero considerando solo la Tx y toma el percentil 90 para definir olas de calor intensas y el percentil 75 para definir las olas de calor simples. Realiza el estudio para la estación cálida (definida como setiembre a febrero) y para calcular el percentil 75/90 considera una media móvil centrada de 5 días de los datos diarios de Tx.

Otros autores como Zhang et al. 2011 definen como eventos cálidos a periodos de más de 6 días que superan un umbral definido, utilizando para su estudio, índices definidos por el Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI), por sus siglas en ingles (<https://etccdi.pacificclimate.org/list27indices.shtml>) que depende del *World Climate Research Programme* (WCRP).

En general, los enfoques para definir una ola de calor varían según la región y las condiciones climáticas de cada lugar. También suelen centrarse en una época del año,

usualmente el verano o los meses más cálidos, en donde se define un único umbral para todo el período. Un ejemplo cercano a Uruguay es la definición de olas de calor que adopta el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina “Resumen estadístico y cronológico de las Olas de Calor en la ciudad de Buenos Aires”, [2016](#). Se consideran los percentiles 90 de las series de Tx y Tn de los datos diarios, para los meses comprendidos entre octubre y marzo (semestre cálido en el hemisferio sur). Los umbrales para la ciudad de Buenos Aires definidos son: 22.0°C y 32.3°C (para Tn y Tx respectivamente), definiendo como ola de calor cuando dichos umbrales se superan por 3 o más días consecutivos.

Izquierdo et al. [2012](#) define a las olas de calor en la Meceta Central Española cuando las Tx y Tn superan por dos o más días los percentiles 90 de las series de anomalías, donde para calcular las anomalías resta a cada día el valor medio de los valores de la serie. Los datos para este trabajo van desde 1961 a 2010 (50 años), calculando la anomalía diaria con solo 50 datos para cada día del año. Los autores consideran que dos olas de calor separadas por solo un día conforman el mismo evento de ola de calor.

Otro enfoque es el basado en índices de calor. Este enfoque por lo general tiene en cuenta la humedad del aire además de la temperatura. Se usa principalmente para evaluar el confort térmico y el impacto en el cuerpo humano o los animales. Un ejemplo de esto es la merma en la producción de leche y carne como lo plantean Arias et al. [2008](#) que utilizan índices como el ITH (Índice de Temperatura y Humedad) que se define como:  $ITH = 0.81 \cdot T + HR \cdot (T - 14.4) / 46.4$ , donde T es la temperatura del aire y HR la humedad relativa. Dicho índice categoriza el estrés del ganado según los autores en cuatro categorías: (1) No hay estrés calórico ( $ITH \leq 74$ ); (2) Leve estrés calórico (ITH entre 75 y 79); (3) Estrés calórico grave (80 a 83), y (4) Estrés calórico muy grave ( $ITH \geq 84$ ). Dependiendo del tipo de estrés que se encuentre el ganado los autores identifican las respuestas o impactos sobre ellos, dando recomendaciones y medidas de mitigación en cada caso. Trabajos enfocados en fenómenos fenológicos o biológicos como Kyselý, [2010](#) y Shocket et al. [2020](#) utilizan umbrales de temperatura que persisten varios días y por ejemplo dan lugar a condiciones de proliferación de mosquitos, varios días en rangos de temperatura entre 23° y 26°C.

Es importante que la definición esté dada por los datos de Tx y Tn observados, dado que en la literatura existen trabajos que indican que los datos grillados o de reanálisis subestiman los eventos extremos, un ejemplo de esto son los trabajos de: Bürger et al. [2013](#) para Norte América, Dereczynski et al. [2020](#) para América del Sur y recientemente Gouveia et al. [2022](#) utiliza un método de inferencia bayesiano para evaluar las incertidumbres involucradas.

En la siguiente sección se definen las olas de calor para este trabajo y los índices que

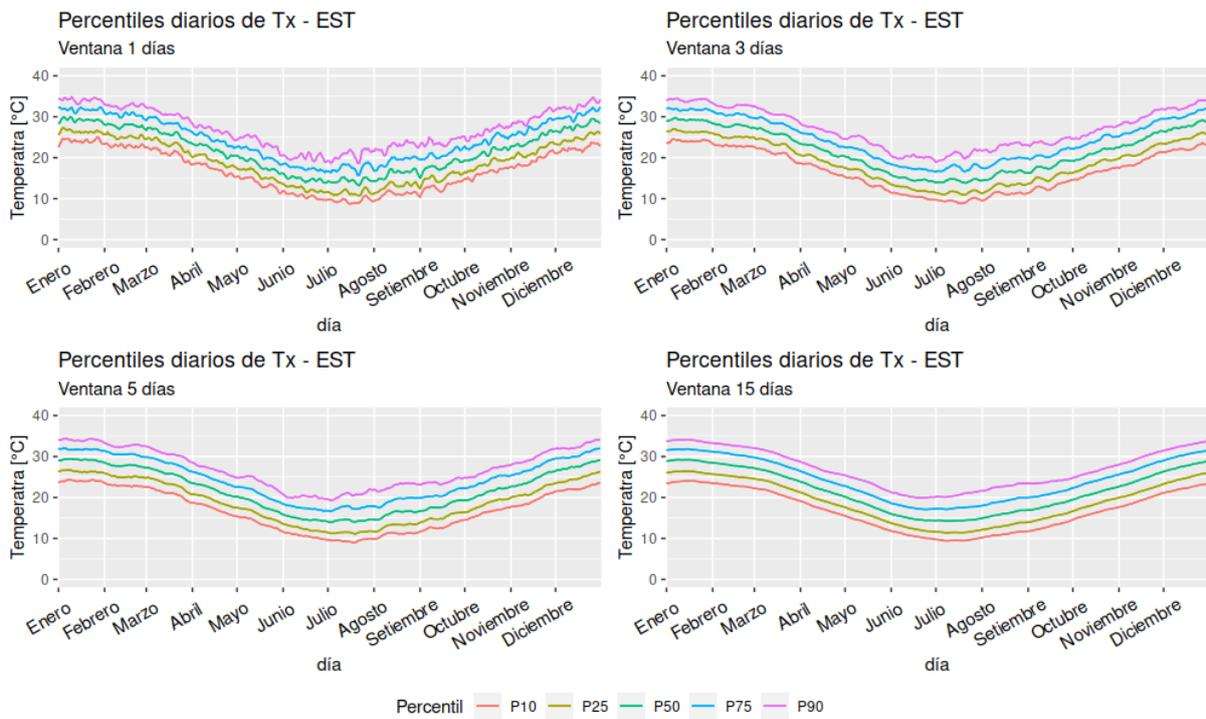
se usarán para caracterizar estos eventos.

## 4.1. Definición de Ola de Calor

Como ya se mencionó, hay varios enfoques para definir las olas de calor. En este trabajo se busca una definición de olas de calor aplicable en todo el año y no solo para un período o estación particular del año, también se busca un equilibrio entre los diferentes enfoques. Se definen las olas de calor únicamente en base a las  $T_x$  y  $T_n$ .

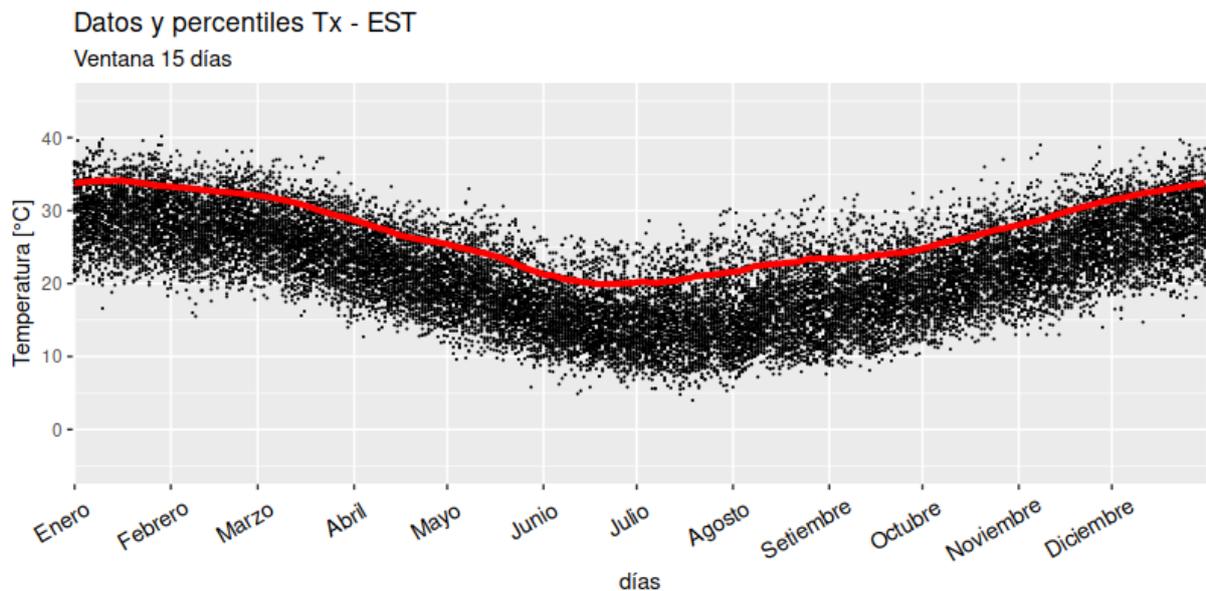
Se considerará como umbral diario para definir las olas de calor el percentil 90 de las series de  $T_x$  y  $T_n$  (un valor por día del año). Calculamos, para independizarnos del ciclo anual de las temperaturas para cada estación meteorológica, dos serie de 365 valores correspondientes desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre, que definirán los umbrales diarios a utilizar (no considerando los 29 de febrero). El percentil 90 de  $T_x/T_n$ , para cada día del año y estación meteorológica, se define como el percentil 90 de cada fecha con una ventana móvil centrada en el día de  $\pm 15$  días, teniendo como objetivo suavizar las series.

Se analizaron distintas alternativas para la selección óptima de la ventana, se exploraron ventanas móviles centradas de  $\pm 1$  (3 días), 3 (7 días), 5 (11 días), 7 (14 días), 10 (21 días) y 15 (31 días) y se grafican los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90 a paso diario de  $T_x$  y  $T_n$  para todas las estaciones meteorológicas. El motivo para graficar estos percentiles se debe a poder ver las dispersiones y variabilidad dentro del ciclo anual, y su concordancia con los resultados de la sección anterior. Se asume que cuanto más alto es el percentil (teniendo menos datos) las series puedan presentar un comportamiento más ruidoso. En la figura 4.1 se muestra como ejemplo estos percentiles suavizados por las ventanas de 1, 3, 5 y 15, para el caso de la Estanzuela y para las  $T_x$ . La selección de las ventanas mostradas tienen el propósito de evidenciar la necesidad de suavizar las series dada la variabilidad que presentan, en el entendido que dos días consecutivos (y en cualquier época del año) no puede variar su percentil climatológico en  $2^\circ\text{C}$  como se observa para la ventana de 1 día. Observando en la figura 4.1 que todos los percentiles se suavizan con una ventana de 15 días, incluido el percentil 90. Este comportamiento se notó en las 11 estaciones meteorológicas para las dos variables  $T_x$  y  $T_n$  (los 21 gráficos análogos no se muestran pero están disponibles). Dado el comportamiento suavizado del percentil 90 en todas las estaciones meteorológicas, se decide adoptar la ventana 15 días como la ventana óptima para definir las climatologías diarias de los percentiles 90 para  $T_x$  y  $T_n$  en cada estación meteorológica.

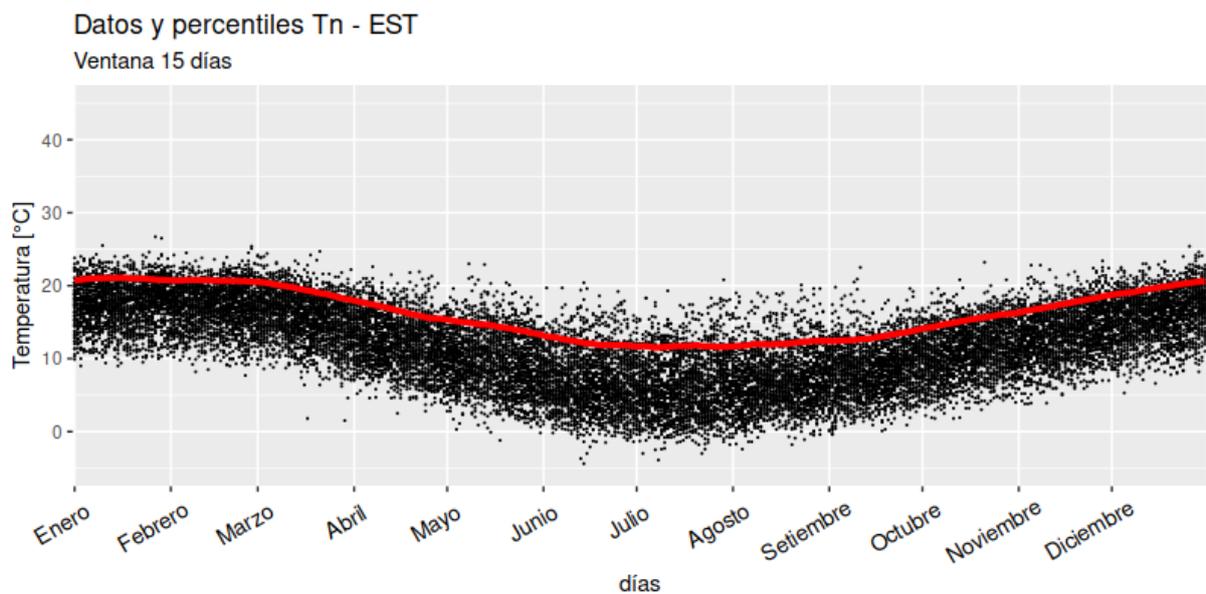


**Figura 4.1:** Percentil: 10 (P10), 25 (P25), 50 (P50), 75 (P75) y 90 (P90) de las Tx en la estación meteorológica Estanzuela, para ventanas móvil de 1, 3, 5 y 15 días.

A continuación se muestran los percentiles 90 para Tx y Tn en la Estanzuela (líneas rojas) y los valores registrados para cada día del año, figuras 4.2 y 4.3. Se puede observar en términos generales que los valores de Tn, y más marcado para Tx, presentan una mayor dispersión de los datos entre los meses de marzo a setiembre, con el mismo comportamiento para el resto de las estaciones.



**Figura 4.2:** Percentiles 90 de las Tx (línea roja) en la estación meteorológica Estanzuela (EST) para la ventana móvil de 15 días y datos observados en cada día (puntos negros).



**Figura 4.3:** Percentiles 90 de las Tn (línea roja) en la estación meteorológica Estanzuela (EST) para la ventana móvil de 15 días y datos observados en cada día (puntos negros).

Una vez establecida la climatología diaria del percentil 90 (P90), se consideran olas de calor a los eventos que persisten durante al menos tres días consecutivos, con las Tx y Tn diarias iguales o superiores al P90 de las climatologías diarias. Para brindar cierta flexibilidad en la definición, se permite que, dentro de una ventana de tres días consecutivos e internos a la ola de calor, no se cumpla una de las seis condiciones requeridas (tres días para Tx y tres días para Tn).

La metodología para identificar las olas de calor en una estación meteorológica se describe de la siguiente manera. En primer lugar, se generan series diarias que registran el número de días en los que las Tx y Tn igualan o superan el P90 para cada día del período analizado, pudiendo ser cero, uno o dos días. En segundo lugar, se procede a examinar la serie generada, definiendo como días con ola de calor aquellos en los que tres días consecutivos acumulan un total de cinco o seis condiciones de este tipo.

Esto permite, como máximo, que puedan darse olas de duración de 4, 5 y 6 días donde dos días internos a las olas cumplen 1 de las dos condiciones exigidas para cada día, separados por dos días que si cumplen las 2 condiciones. Las olas de duración de 7, 8 y 9 días consecutivos pueden tener como máximo 3 días cumpliendo una condición, también separados por dos días que cumplen las 2 condiciones. Por cada 3 días que se extiende la ola aumenta una condición de flexibilidad.

La intensidad de las olas de calor (IOC) se define como el excedente entre las Tx y Tn respecto al P90, acumulado durante todos los días de las olas análogo a Kyselý, 2010 y Coronato, 2022b. El IOC se puede asociar a factores biológicos como por ejemplo: la

fenología, el estrés térmico de los hogares y las infraestructuras, como también en la salud, combinando la intensidad y persistencia de las olas. Para separar la intensidad y persistencia se definen dos índices: la duración de la ola de calor (DOC), como el número de días del evento, y la intensidad de la ola de calor normalizada (IOC<sub>n</sub>), como IOC normalizado por DOC. Por último, se define la frecuencia de ocurrencia de las olas de calor (FOC) como el número de eventos (o días con eventos) en un período de tiempo.

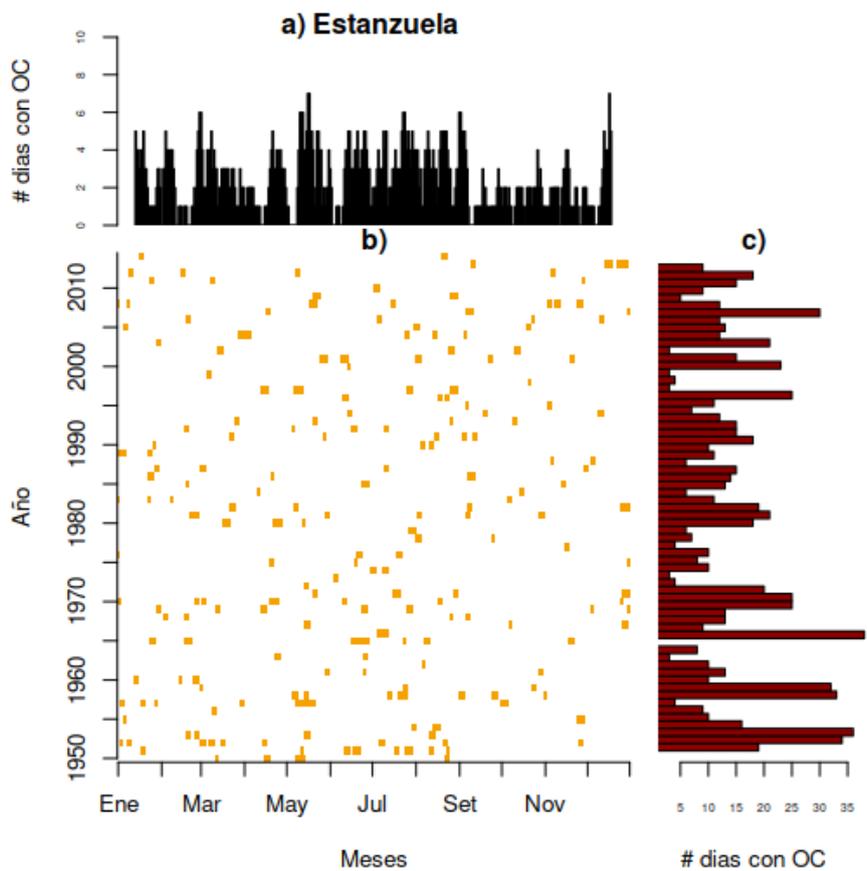
#### 4.1.1. Olas de Calor por estación meteorológica.

En esta sección cubriremos aspectos como la cantidad de olas en cada estación meteorológica, las duraciones máximas alcanzadas (DOC), las tendencias en la cantidad de olas por año y por estación meteorológica, la cantidad de años libres de olas de calor y los años con mayor cantidad de olas de calor.

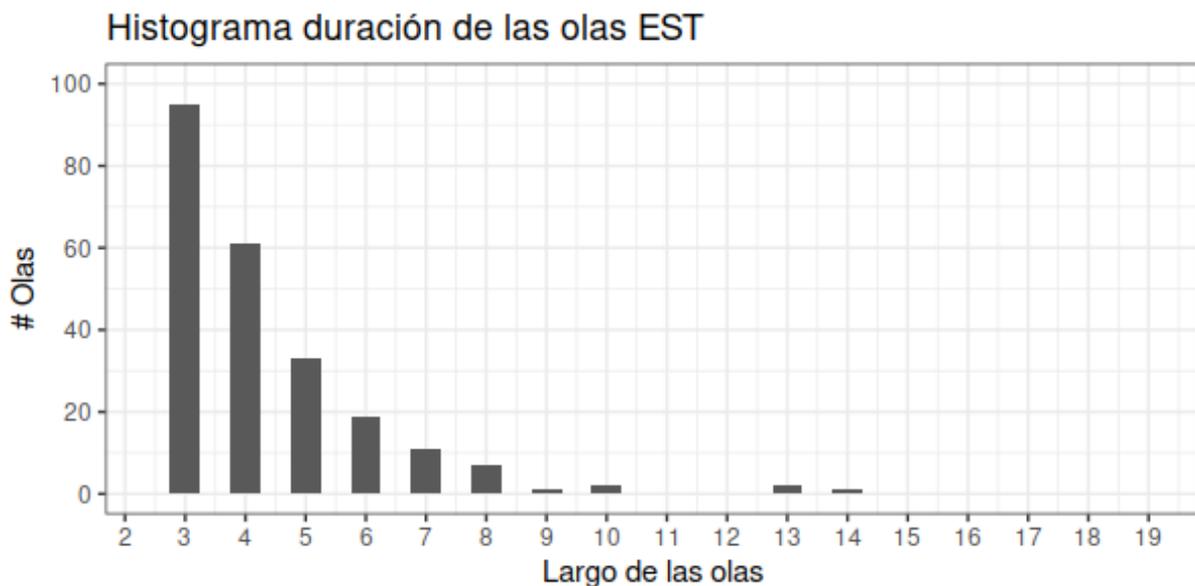
En cuanto a la cantidad de olas registradas en cada estación meteorológica durante los 65 años del estudio, sobresalen Salto y Estanzuela, superando las 200 olas de calor. Salto es la que presenta la mayor cantidad, con 210 olas en total durante este período (un promedio de 3 olas por año), seguida de cerca por Melo, con 206 olas. Otras estaciones destacadas incluyen Paysandú, Rivera y Mercedes, con 191, 177 y 175 olas respectivamente, seguidas por Artigas, Paso de los Toros y Carrasco, con 160, 158 y 155. Por otro lado, Prado registró 150 olas, Rocha 138, mientras que Melo se distanció del grupo con solo 95 olas de calor.

Si consideramos los 65 años de estudio, en promedio sería entre 3 y 4 olas por año en términos generales. Sin embargo, la realidad marca que la distribución de las olas no es homogénea ni temporal ni espacialmente (en referencia a las distintas estaciones meteorológicas) aspecto que será analizado en esta sección.

Para poder conocer el comportamiento de las olas, se realizan gráficos para cada una de las estaciones meteorológicas análogos a la figura 4.4. En la figura central b) se muestra la distribución de las olas, cada fila corresponde a un año del período y cada columna corresponde a un día del año (del 1 de enero al 31 de diciembre). De esta manera, se puede visualizar en color naranja los días con ola de calor, pudiéndose distinguir el largo de las olas, los períodos de mayor ocurrencia en años o meses del año. En a) simplemente se cuantifican la cantidad de veces que ocurrieron olas de calor para cada día del año, permitiendo ver si existe un período, ya sea meses o estaciones del año donde ocurren en mayor o menor cantidad. En c) se gráfica para cada año la cantidad de días con ola de calor que ocurrieron. Se toma este criterio dado que la cantidad de olas de calor por años y su tendencia se muestran en la figura 4.6. De manera complementaria se gráfica los histogramas de la ocurrencia de olas en función de su largo, figura 4.5. Las figuras análogas a las 4.4 y 4.5 se encuentran en el anexo 1.



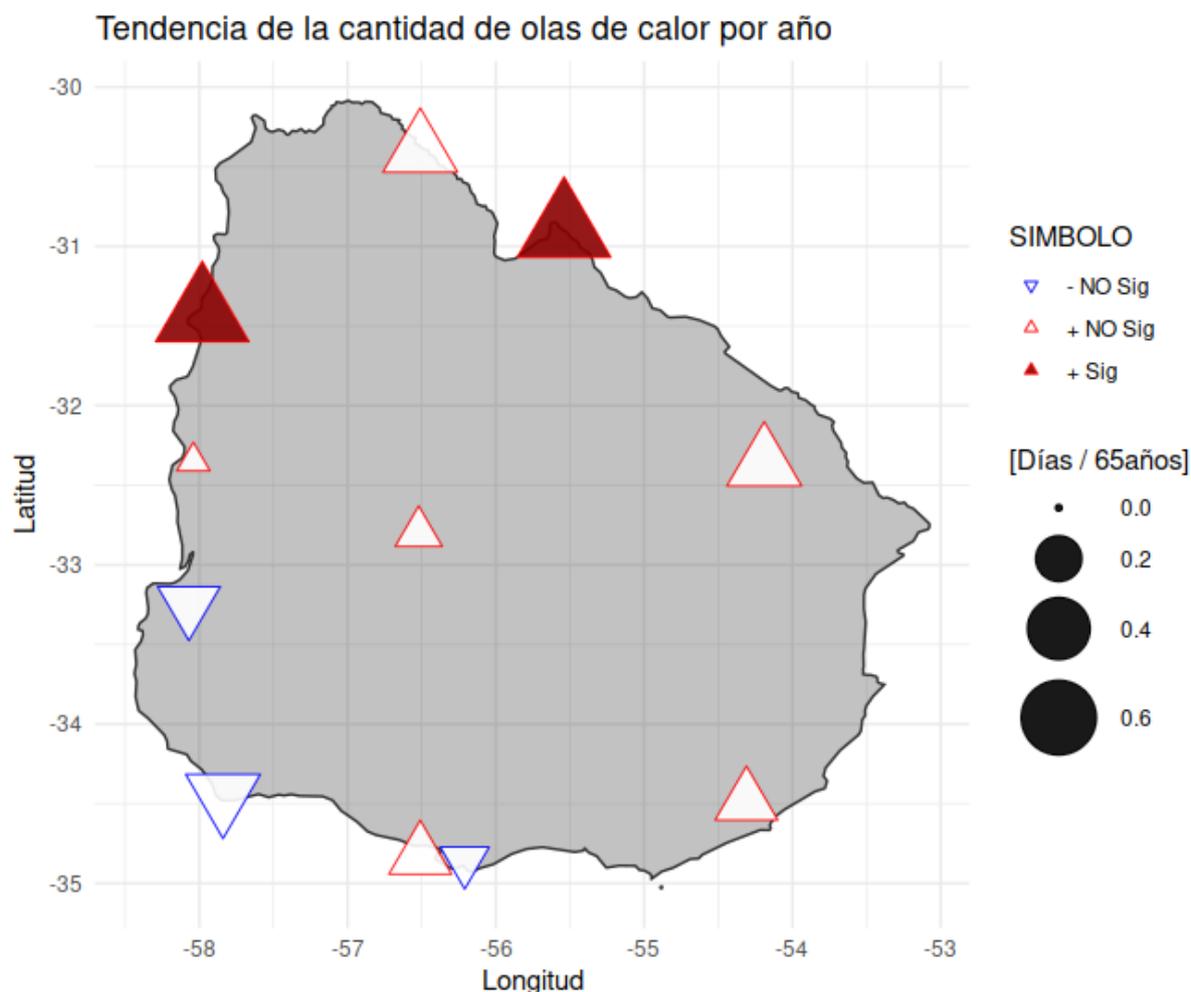
**Figura 4.4:** Olas de calor en la Estandzuela. a) Cantidad ( ) de días con olas de calor en la marcha anual. b) Distribución de las olas de calor. c) Cantidad ( ) de días con ola de calor que ocurrieron por año.



**Figura 4.5:** Histograma duración de las olas de calor para Estandzuela

Se grafica en la figura 4.6 un mapa con las tendencias de la cantidad de olas de calor

al año de cada estación meteorológica. Se puede observar que desde el Río Negro hacia el norte es donde hay una tendencia al aumento de la cantidad de olas de calor por año. Solo dos estaciones presentan resultados significativos al 5 % Salto y Rivera. Como resultado primario, se destaca que el aumento en la cantidad de olas de calor por estación meteorológica se centra en las estaciones al norte del Río Negro.



**Figura 4.6:** Tendencia anual de la cantidad de olas de calor al año, con significancia estadística al 5 %.

A continuación se describen las principales características de las olas de calor para cada estación meteorológica.

En **Artigas** los años con mayor ocurrencia de olas de calor fueron el 2002 y 2012, cada uno con 7 olas, y se observan 18 años sin registros de olas de calor, de los cuales 14 corresponden a períodos de cierre de dicha estación. La ola de calor más prolongada registrada en Artigas ocurrió del 20/02/1953 al 09/03/1953, abarcando un total de 18 días consecutivos, lo que la convierte en la ola de calor más larga registrada en todas las estaciones meteorológicas. La segunda ola más extensa en Artigas ocurrió durante

el invierno del 11/06/2005, con una duración de 11 días. Al analizar las tendencias en la ocurrencia de la cantidad de olas por año, se observa una tendencia ligeramente positiva de 0.3 olas durante el período de 65 años, aunque no resulta significativa al 5 % (se aplica la misma metodología utilizada para el cálculo de tendencias en la sección 2.5.2).

En **Carrasco** se registraron 155 olas de calor en todo el período, donde los años 2001 y 1970 son los años con mayor cantidad de olas ocurridas, con 7 olas cada uno y se presentan 9 años sin registros de olas. La ola más larga se dió entre el 17/06/1965 y el 29/06/1965 con 13 días. El análisis de tendencia de la cantidad de olas de calor no marca una tendencia significativa al 5 % y presenta un incremento de 0.2 olas en los 65 años. El período de junio a setiembre es el que se concentran la mayor cantidad de días con ola de calor, y las décadas de los años 60 es la década en que se observan las olas más largas (figura 1.2 del Anexo 1). Los largos de las olas para esta estación se concentran en las olas de 3 y 4 días.

**Estanzuela** es de las estaciones con mayor cantidad de olas ocurridas con 206. La ola más larga es de 14 días donde ocurrió entre el 16/06/1965 y el 29/06/1965 (coincidiendo con Carrasco). Le siguen dos olas de 10 días en mayo del 1957 y marzo de 2004. Los años con mayor ocurrencia de olas son 1952 con 9 olas y 1951 con 8 olas, el año 1964 es el único año que no hay registro de olas en la Estanzuela. Esta estación presenta una tendencia negativa (no significativa al 5 %) con una disminución de -0.4 olas. Las dos primeras décadas son las que concentran mayor cantidad de olas de calor y tienden a ser un poco más largas en términos generales. Cabe destacar que setiembre y noviembre son los meses del año donde hay menor cantidad de días con olas y aumentan en el invierno. El histograma de duración de las olas indica que las de 3 y 4 días también son las más ocurrentes.

**Melo** es la estación con menor cantidad de olas con 95 registradas en todo el período. Presenta 23 años sin registro de olas (10 años por cierre), y los años con mayor cantidad de ocurrencia de olas son el 2001 y 2002 con 7 olas en cada año. La ola de calor más larga comenzó el 25/01/1990 y tuvo una duración de 14 días. La ocurrencia de olas por año marca una tendencia no significativa de +0.29 olas en el período. El histograma de ocurrencia concentra las olas en duraciones de 3 y 4 días presentando largos variados en las restantes olas. Las olas más largas se concentran entre enero y mayo en las décadas de los 80 y 90. Del 2000 en adelante se observa una mayor frecuencia de olas de calor en esta estación.

En **Mercedes** se registraron 172 olas. El año con mayor cantidad de olas fue el 2006 con 7 registros y tiene 6 años sin ocurrencia de olas. Las más largas registradas fueron de 13 días y comenzaron el 06/03/1952 y el 16/06/1965 (también registrada en

Estanzuela y Carrasco). La tendencia de olas por año no es significativa indicando una disminución de 0.19 olas en el período. Se observa una mayor concentración de días con olas entre junio y agosto y se observa una leve disminución en la ocurrencia de olas entre las décadas del 70 y los 90. La mayor concentración de las olas presentan largos de 3, 4 y 5 días, siendo la estación que presenta mayor cantidad de olas de 5 días.

**Paso de los Toros** cuenta con 158 olas en su registro para todo el período. Los años que presentan más olas de calor son 1994, 2001 y 2002 con 6 olas en cada año y tiene 8 años sin registros de olas. La ola más larga se dió el 25/02/1970 y duró 13 días. La tendencia en la cantidad de olas por año tampoco es significativa y aumenta +0.17 olas en los 65 años. En cuanto a los días de olas de calor por año, se observa un aumento a partir del 2000.

**Paysandú** tiene un total de 191 olas de calor, donde los años con más olas son el 2012 con 8 olas y el año 1953 con 7. Presenta 4 años sin registros de olas y las más largas de 11 días comenzaron en 06/08/1953 y 20/04/1980. La tendencia en las olas por año tampoco es significativa y tiene un valor de 0.04 olas por el período. A partir del 2000 al igual que Paso de los Toros, se observa un incremento en la cantidad de días con ola de calor por año. Se nota una mayor cantidad de días con olas de calor entre los meses de junio y agosto pero no muy marcada.

**Prado** tiene registradas 150 olas. Durante 14 años, no se registraron olas de calor, de los cuales 8 años correspondieron a períodos en los que la estación estuvo cerrada. Los años con más olas son 1951 con 9 olas y 1970 con 8. La ola más larga que registró Prado fue de 12 días y comenzó el 18/06/1965 (también registrada en Mercedes y Carrasco). La tendencia de olas por año es negativa y no significativa con -0.11 olas. Analizando las olas de calor entre los años 1950 y 1970 (previo al cierre), las mismas se concentraron entre enero y agosto siendo más largas. Luego de su reapertura en 1980, se observa un comportamiento homogéneo en el ciclo anual.

En **Rivera** se registraron 177 olas de calor, donde 13 años no presentan olas (6 años por cierre). Los años con mas cantidad de olas de calor son 2000, 2005 y 2012 con 8 olas de calor en cada año. La ola más larga registrada es de 12 días y comenzó el 26/01/1990 (en concordancia con Melo). Rivera es una de las dos estaciones que presenta una tendencia positiva y significativa al 5% con un valor de 0.51 olas en el período. Presenta un marcado aumento en la cantidad de olas y de días con olas de calor entre los 1990 y el fin del período de estudio. Los meses de julio y agosto muestran un leve aumento de días con olas de calor.

**Rocha** registra 138 olas y 9 años sin registros de olas. La más larga de 11 días comien-

za el 16/06/1965 (en concordancia con Mercedes, Carrasco y Prado). El año con más olas fue el 2001 con 7 eventos con tendencia positiva y no significativa en la cantidad de olas por año. Al igual que Prado, entre los años 1950 y 1970 las olas de calor se concentraron entre enero y agosto. Luego, a partir de 1980 se observa un comportamiento homogéneo en el ciclo anual.

Por último, la estación de **Salto** tiene registradas 210 olas en su histórico. La ola más larga se dio el 10/02/1989 con 11 días. El año con mayor cantidad de olas de calor fue 1994 con 9 olas, seguido de 1989 con 8 olas y se encontraron 8 años sin registros de olas de calor. Al igual que Rivera, esta estación presenta una tendencia significativa y positiva, marcando un aumento de las olas de calor en +0.49 olas. A partir de 1975 se observa un incremento de las olas y de los días con ola de calor al año, como también un aumento en el largo de las olas.

En general, las olas de calor más prolongadas ocurren entre los meses de marzo y setiembre, con la excepción de Rivera, Melo y Artigas. Es en esta última estación donde se registró la ola de calor más extensa, que se inició en febrero y culminó en marzo

Para proporcionar una pauta sobre los valores de temperaturas alcanzados durante una ola de calor, se pueden clasificar según el verano (DEF) e invierno (JJA), así como también según la ubicación geográfica en el norte y sur del país, teniendo en cuenta el gradiente de temperatura mencionado en el capítulo anterior. Una ola de calor en verano en el norte del país afecta a regiones cercanas a las estaciones de Artigas, Salto y Rivera, donde las Tx superan los 37°C y las Tn exceden los 23°C. En invierno, las Tx deben superar los 28°C y las Tn los 17°C en esta región. En el sur del país, considerando las estaciones de Carrasco, Prado, Estanzuela y Rocha, se observan percentiles más bajos de temperaturas. Durante el verano, las olas de calor deben elevar las Tx por encima de los 31°C y las Tn por encima de los 21°C. En invierno, en estas zonas más al sur, las Tx se mantienen alrededor de los 21°C, mientras que las Tn deben superar los 13°C.

## **4.2. Olas de Calor Generalizadas (OCG)**

El impacto de las olas de calor depende de varios factores, en particular queremos centrar el análisis en olas de calor que tengan un impacto a escala país. Por tal motivo en la siguiente sección definimos y desarrollamos la metodología que define las Olas de Calor Generalizadas (OCG).

### **4.2.1. Definición de OCG**

Existen varios criterios para abordar la representación espacial de las olas de calor, como ya se comentó en la introducción de este capítulo, hay enfoques que promedian los valores de varias estaciones meteorológicas (ejemplo Izquierdo et al. 2012). En particular para este trabajo y teniendo presente las diferencias de umbrales que se comentaron al final de capítulo anterior, entre el norte y el sur del país, es que se opta por una definición que contemple estas diferencias.

Se define como OCG cuando ocurren al mismo tiempo olas de calor en el 75 % de las estaciones meteorológicas con datos. Se debe cumplir la condición por al menos 3 días consecutivos como en las olas de calor. De esta manera se logra respetar los umbrales de cada punto del país contemplando las diferencias climatológicas. El 75 % se toma como criterio dado que si contemplamos los datos faltantes en términos generales, no superan el 20 %. Esto permite, que si asumimos que no están disponibles el 20 % de las estaciones meteorológicas, tengamos datos en 9 de las 11 estaciones meteorológicas. Si contamos con datos de 9 estaciones meteorológicas, el 75 % de estas, es decir, 7 estaciones, presentarán olas de calor. Al considerar cualquier combinación entre estas estaciones, se logra representar al menos a más de la mitad del país de esta manera.

Para el cálculo de las OCG, primero se define el porcentaje de datos disponibles para cada día de las series. En segundo lugar, se determina el umbral del 75 % de las series disponibles redondeando al entero más cercano. De esta manera, se define la cantidad de estaciones meteorológicas necesarias con ola de calor para definir una OCG. En tercer lugar, se computa para cada día la cantidad de olas de calor por estación meteorológica y se verifica si supera la condición impuesta. Por último, con la serie que cumple las condiciones se filtran los casos de uno y dos días, quedando así determinado los casos que cumplen por 3 o más días la condición de OCG.

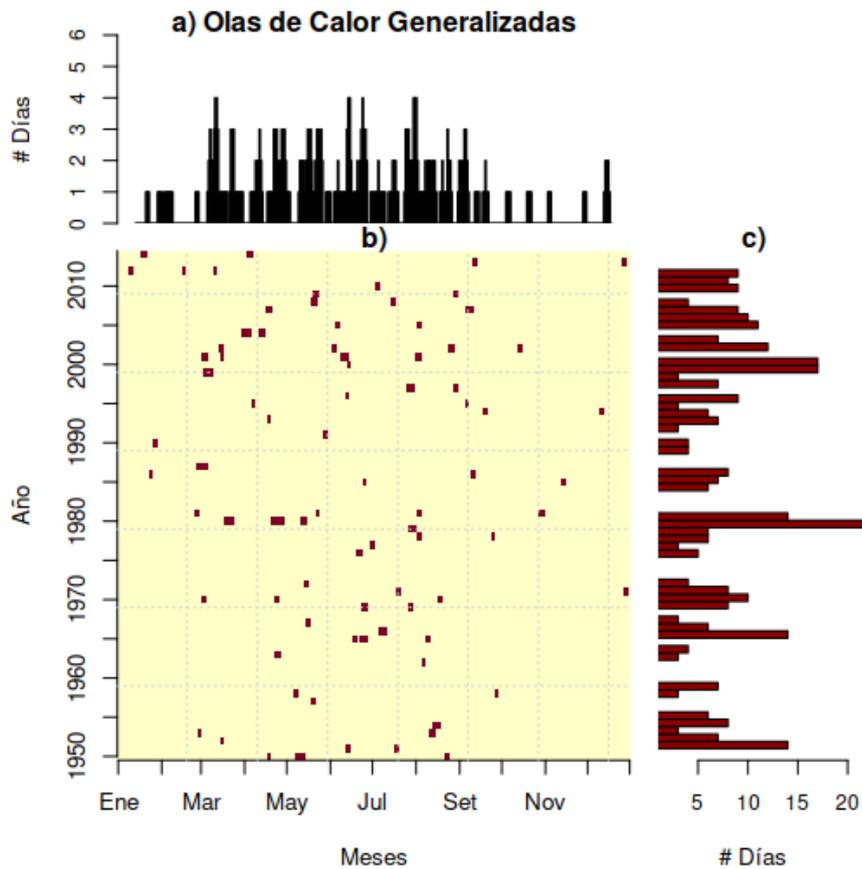
### **4.2.2. Caracterización de las OCG**

Utilizando la metodología para la definición de OCG, se registran 82 OCG en Uruguay en todo el período. Se cuantifica el porcentaje de datos que representan estos eventos extremos de temperatura siendo un 1.45 % de los datos. Dado lo anterior, se determina efectivamente que se trata de eventos extremos de baja probabilidad de ocurrencia pero que tiene un gran impacto como ya se mencionó. Para proporcionar un punto de referencia, el porcentaje de datos con ola de calor por estación varía entre 2.0 % en la estación de Melo y 4.3 % en la Estanzuela, (Artigas 3.3 %, Carrasco 2.9 %, Mercedes 3.4 %, Paso de los Toros 3.2 %, Paysandú 3.8 %, Prado 3.1 %, Rivera 3.5 %, Rocha

2.5 % y Salto 4.2 %), con un promedio general del 3.3 % entre todas las estaciones meteorológicas. También, se exploraron las OCG con un porcentaje inferior al 75 %, considerando el 50 %, como se detalla en el Anexo 1.

En primera instancia, se grafica las OCG para tener una primera impresión de las mismas 4.7. Al igual que 4.4 se grafica en la figura central b) la distribución de las OCG, cada fila corresponde a un año del período y cada columna corresponde a un día del año (del 1 de enero al 31 de diciembre). De esta manera, se pueden visualizar en color rojo los días con OCG, pudiéndose distinguir el largo de las olas, los períodos de mayor ocurrencia en años o meses del año, etc. En a) simplemente se cuantifican la cantidad de veces que ocurrieron OCG para cada día del año, permitiendo ver si existe un período, ya sea meses o estaciones del año donde ocurren en mayor o menor cantidad de OCG. En c) se grafica para cada año la cantidad de días con OCG que ocurrieron.

Los años con mayor cantidad de ocurrencias de OCG son 1981, 2001 y 2002 con cuatro OCG cada uno. Le siguen los años 1950, 1965, 1970, 1980 y 2012 con tres OCG. Luego se registraron 18 años con dos OCG y 19 con solamente una OCG. Los años libres de OCG son relevantes ya que pueden dar la pauta de mecanismos o factores que inhiben la ocurrencia de las OCG. Los años libres de OCG son: 1955, 1966, 1959, 1960, 1961, 1964, 1968, 1973, 1974, 1975, 1982, 1983, 1984, 1988, 1989, 1992, 1998, 2003, 2006 y 2011.

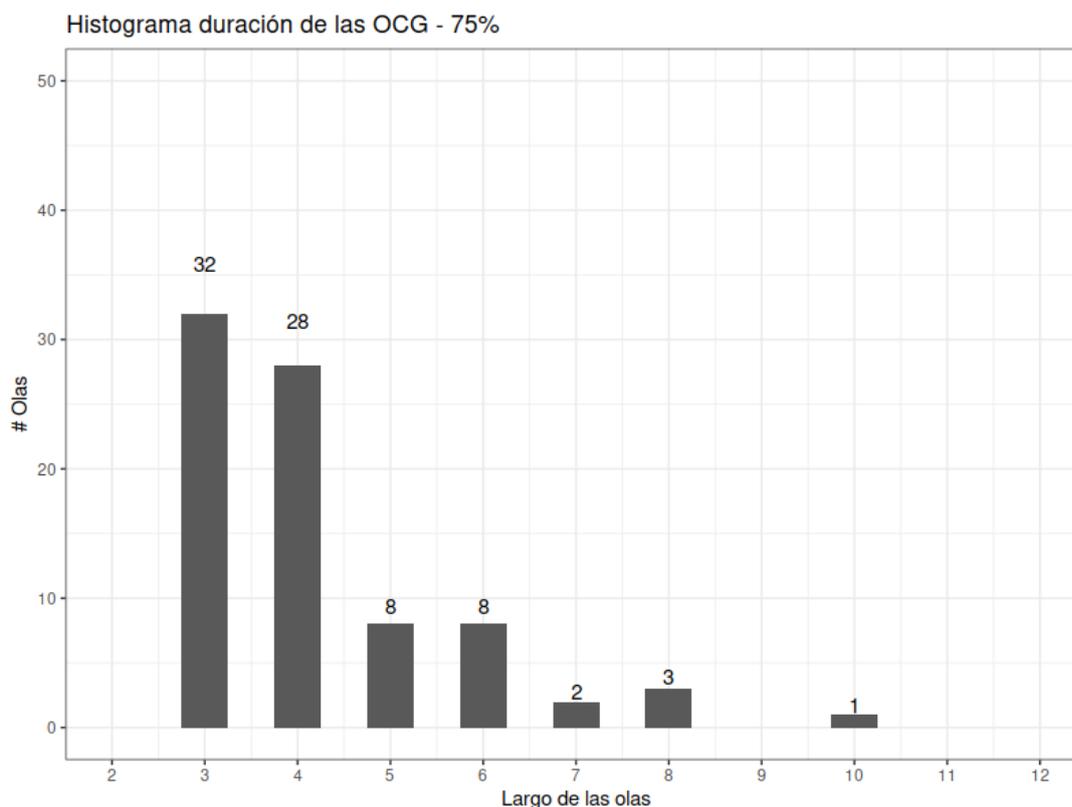


**Figura 4.7:** Olas de calor generalizadas. a) Cantidad (#) de días con olas de calor en la marcha anual. b) Distribución de las olas de calor. c) Cantidad (#) de días con ola de calor que ocurrieron por año.

En todo el período se observa que el otoño (MAM) y el invierno (JJA) concentran la mayor cantidad de días con OCG (figura 4.7 a)). Se cuantifican las OCG registradas por estación del año, asignando la ocurrencia a la primer fecha de la OCG. Se encuentra que en el verano (DEF) se registraron 11 OCG, en MAM 28, en JJA 33 y en primavera (SON) 10 OCG. Se constata que la mayor ocurrencia de OCG se centra en otoño y en invierno.

### 4.2.3. Duración de las OCG

Se define la duración de las OCG (D-OCG o largo de la ola) como el número de días consecutivos que dura el evento. Se presenta un histograma de D-OCG en la figura 4.8. Se destaca que la OCG más prolongada registrada durante todo el período de análisis ocurrió desde el 20/04/1980 hasta el 29/04/1980, abarcando un total de diez días. No se identifican OCG que duren 9 días, y se registran tres OCG de 8 días de duración que comenzaron el 07/05/1950, 26/02/1987 y 30/03/2004 respectivamente.



**Figura 4.8:** Histograma de D-OCG.

Para obtener una visión más detallada de la distribución y las variaciones en la duración de las OCG (D-OCG), se sintetiza el promedio de duración de las OCG por década y estación del año (DEF, MAM, JJA y SON), además de considerar todas las estaciones juntas, denominado 'año completo' (AñoC).

Se promedia la duración de todas las OCG y se determina que el promedio de D-OCG es de 4.02 días. En la tabla 4.1, se observa que las décadas del 2000 y 1980 son las que presentan una mayor duración de las olas. Destaca especialmente la década del 2000, no solo por su mayor duración promedio, sino también por tener la mayor cantidad de OCG, con 19 eventos registrados. Al calcular el promedio de la duración de las OCG para las estaciones del año, se obtiene 3.7 días para DEF, 4.4 días para MAM, 4.0 días para JJA y 3.7 días para SON. Estos resultados indican que el otoño es la estación del año con las OCG más prolongadas en términos generales.

En el verano (DEF), se observa una D-OCG bastante homogénea, con un ligero aumento en la década de 1980. En otoño (MAM), se registra el promedio más largo en la duración de las OCG, destacándose la década de 1980 con una duración promedio de 6.3 días, casi dos días más que el promedio general para esta estación (a pesar de que solo hubo 4 OCG en ese período). Por otro lado, el invierno presenta poca variabilidad en el largo de las OCG. Por último, en la primavera (SON) se observa un

marcado aumento en el largo de las OCG en la última década y media. .

<b>Década</b>	<b>AñoC</b>	<b>DEF</b>	<b>MAM</b>	<b>JJA</b>	<b>SON</b>
<b>1950</b>	3.6 (12)	3.0 (1)	4.2 (5)	4.2 (5)	3.0 (1)
<b>1960</b>	4.0 (9)	– (–)	3.5 (2)	4.4 (7)	– (–)
<b>1970</b>	3.7 (11)	4.0 (1)	3.7 (3)	4.0 (6)	3.0 (1)
<b>1980</b>	4.5 (12)	4.6 (3)	6.3 (4)	3.5 (2)	3.6 (3)
<b>1990</b>	3.8 (11)	3.5 (2)	4.3 (4)	4.0 (3)	3.5 (2)
<b>2000</b>	4.7 (19)	– (–)	4.9 (8)	4.1 (9)	5.0 (2)
<b>2010 (*)</b>	3.9 (8)	3.5 (4)	4.0 (2)	4.0 (1)	4.0 (1)

**Tabla 4.1:** Largo medio de las OCG discretizadas por década y por estación de año. En paréntesis se agrega la cantidad de OCG que componen el promedio. Los casos donde no hay registros se indican con: –. (\*) década no completa (2010-2014)

Se observa que la década de 1960 carece de registros de OCG tanto en DEF como en SON, al igual que la década de 2000, que no presenta OCG en DEF. Este patrón de comportamiento se identificó durante el análisis de las olas de calor en las estaciones meteorológicas individuales.

#### **4.2.4. Tendencia y frecuencia de las OCG**

Se analiza la tendencia lineal de la serie de la ocurrencia de OCG por año, encontrando un aumento de 0.42 OCG en los 65 años. La significancia estadística al 5 % no es significativa aplicando la misma metodología de tendencias a las series Tx y Tn, como también, a la ocurrencia de olas por estación meteorológica. Se repite el cálculo para la cantidad de días al año con OCG obteniendo resultados similares, con un aumento de .095 días en el período, siendo este aumento no significativo al 5 %.

Dado que las tendencias lineales no arrojan resultados significativos, se procede a analizar la frecuencia de las OCG por estación del año y por década. Algunos aspectos fueron mencionados durante el análisis de la duración de las OCG en la sección anterior, resaltando también el aumento en la cantidad de OCG en la década del 2000, con un total de 19 casos. Además, los 5 años que abarcan la década de 2010 muestran 8 OCG, lo cual es un valor considerablemente alto en comparación con las demás décadas completas, que tienen un promedio de 10 OCG en 10 años.

La primavera y verano son las estaciones del año que tienen una menor frecuencia de OCG, ambas estaciones presentan décadas sin registros como ya se mencionó. El otoño presenta en promedio 4 OCG, encontrando que la década del 2000 presenta 8 registros de OCG. Lo mismo ocurre en el invierno que registra un promedio de 4.7 OCG y la década del 2000 se registraron 9 OCG.

#### 4.2.5. Intensidad de las OCG

La intensidad de las Olas de Calor Generalizadas (IOCG) se define como el exceso de Tx y Tn sobre el P90, acumulado durante todos los días de las olas análogo a Kyselý, 2010 y Coronato, 2022b.

Para el caso de las OCG, se define el Índice de OCG (IOCG) como el promedio de todos los acumulados por cada ola de calor individual que forma parte de la OCG. Para distinguir entre la intensidad y la duración de la OCG, se establece la Intensidad Normalizada de la Ola de Calor Generalizada (IOCGn), que es el IOCG normalizado por la duración de la OCG (D-OCG). Además, se define la Anomalía Máxima Alcanzada por la OCG (ImaxOCG) como el valor más alto que supera el percentil 90 de todas las temperaturas registradas durante la OCG, sin distinguir entre las Tx y Tn.

La IOCGn más alta se registró con un valor de 5.9°C con una OCG de 4 días que comenzó el 10/09/2013, donde también se registró el ImaxOCG con un valor de 11,7°C, siendo la OCG más intensa según los dos índices de intensidad seleccionados. Para dimensionar, se resumen los valores de temperatura máximos alcanzados, siendo 38.4°C en Salto el 13/09 para Tx y 23.4°C en Prado el 11/09. Los promedios de Tx y Tn de la OCG son 32.6°C y 18.0°C.

Se analizan las tendencias lineales por año de ImaxOCG y IOCGn. Al igual que en casos anteriores, no se encontraron tendencias significativas al 5% para ninguno de los dos índices. Por este motivo, se procede a realizar el mismo estudio, pero esta vez dividiendo los datos por década y estación del año, cuyos resultados se resumen en la tabla 4.2. Para tomar como referencia, el promedio de las 82 OCG es de 3.2°C en el caso de IOCGn y de 7.2 para el ImaxOCG. La primavera tiene el promedio más alto de ambos índices con valores de 3.7°C y 8.1 (IOCGn e ImaxOCG, respectivamente) y el verano, los valores más bajos con 2.4°C y 6.0°C (idem primavera). Las dos estaciones restantes presentan valores cercanos a los promedios. Recordemos que otoño e invierno son las estaciones con mayor cantidad de OCG, y en particular cabe la aclaración de que la década de 2010 en primavera esta representada únicamente por la OCG más intensa de todo el período (y la década está representada por 5 años). Al analizar el año completo (AñoC), las OCG de la década de 1950 y 1990, son las más intensas (en ambos índices) y también por estación del año.

Década	AñoC	DEF	MAM	JJA	SON
1950	3.5 (7.4)	2.8 (6.3)	3.3 (7.0)	3.6 (7.4)	4.6 (9.6)
1960	3.1 (7.0)	– (–)	2.7 (6.2)	3.1 (7.2)	– (–)
1970	2.9 (6.7)	2.6 (6.2)	3.1 (7.7)	2.9 (6.6)	2.0 (4.5)
1980	3.0 (6.2)	2.1 (5.6)	3.5 (7.7)	2.8 (6.1)	3.2 (6.6)
1990	3.6 (7.4)	2.7 (5.9)	3.5 (7.1)	3.8 (7.6)	4.4 (9.0)
2000	3.4 (7.8)	– (–)	3.5 (7.7)	3.4 (7.7)	3.1 (8.8)
2010 (*)	2.9 (7.1)	2.3 (6.3)	2.6 (5.9)	2.7 (7.3)	5.8 (11.7)

**Tabla 4.2:** Intensidad media de las OCG discretizadas por década y por estación de año. Los valores indican el promedio las IOCGn de cada período. En paréntesis, se agrega el promedio de I<sub>max</sub>OCG. Los casos donde no hay registros se indican con: –. (\*): década no completa (2010-2014).

Como último análisis, se promedian los índices de intensidad en función del largo de las OCG buscando alguna singularidad, tabla 4.3. Por cantidad de casos se comparan los largos de 3 y 4 días, notando un pequeño aumento en ambos índices en función del largo.

Largo	I <sub>max</sub> OCG	IOCGn	# OCG
3	6.6	3.0	32
4	7.6	3.4	28
5	7.4	3.5	8
6	8.5	3.5	8
7	6.9	2.9	2
8	6.6	2.8	3
10	7.3	3.4	1

**Tabla 4.3:** Promedio de las intensidades I<sub>max</sub>OCG y IOCGn según largo de las olas. Se agrega la cantidad de OCG para cada largo en la columna #OCG

### 4.3. Síntesis del capítulo

En este capítulo se define las olas de calor y las OCG contemplando los distintos enfoques de la literatura y cubriendo los objetivos planteados. En particular, se concibe una definición que permite analizar las olas en todo el año y no solo para la estación fría o cálida. También, contempla los diferentes percentiles respetando los gradientes térmicos entre las distintas estaciones meteorológicas. Del análisis de las tendencias por estación meteorológica, se destaca una tendencia positiva en la cantidad de olas de calor al norte del país (solo siendo significativas al 5 % en Rivera y Salto).

Se describe la metodología para determinar las OCG y se definen índices para caracterizarlas. Esto permitió detectar la ocurrencia de 82 OCG en los 65 años analizados

que representan el 1.45 % de los datos. De los 65 años, 20 no presentan OCG. Se encontró que en la década de los 1960 en SON y DEF no se registraron OCG y tampoco en DEF del 2000. Las estaciones del año que presentan mayor cantidad de OCG son JJA con 33, seguido de MAM con 28, 11 en DEF y 10 en SON. La década del 2000 presentó 19 OCG, siendo la década con mayor ocurrencia, al igual que la década con mayor D-OCG. Las OCG más intensas se dieron en las décadas de 1950 y 1990. Las tendencias lineales por año de la cantidad de OCG, de la D-OCG, y los índices de intensidad  $I_{maxOCG}$  y  $IOCG_n$ , no presentan tendencias significativas al 5 %.

La OCG más larga comenzó el 20/04/1980 y tuvo fin el 29/04/1980 registrándose OCG por diez días. La más intensa comenzó el 10/09/2013 y duró 4 días, registrando valores de  $IOCG_n$  e  $I_{maxOCG}$  de  $11,7^{\circ}C$  y  $5,9^{\circ}C$  respectivamente. Se registraron valores máximos de temperatura de  $38,4^{\circ}C$  en Salto el 13/09 para  $T_x$  y de  $23,4^{\circ}C$  en Prado el 11/09 para  $T_n$ . Los promedios de  $T_x$  y  $T_n$  durante la OCG fueron de  $32,6^{\circ}C$  y  $18,0^{\circ}C$ , respectivamente.

En el anexo 2 se presentan en dos tablas las 82 OCG, indicando la fecha de inicio, fecha de fin, D-OCG (largo),  $IOCG_n$  y  $I_{maxOCG}$ , tablas [B.1](#) y [B.2](#).

## Capítulo 5

# OCG, índices de circulación y condiciones hídricas.

En este capítulo se analizan las correlaciones a escala mensual entre las OCG y los índices definidos en la sección anterior. Se buscan relaciones entre: D-OCG (duración o largo de las OCG), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG) y los índices de circulación y la condición hídrica de Uruguay a distintas escalas temporales. En los meses con más de una OCG, los índices se construirán promediando los mismos, y las olas que empiecen en un mes y terminen en el siguiente se asignarán al mes de inicio de la OCG.

En la literatura existen muchos índices para determinar el estado hídrico en una región. Penalba y Rivera, [2015](#) analizan varios índices con el objetivo de obtener el más adecuado para el análisis de sequías en el sur de Sudamérica. Los índices analizados son el índice de precipitación estandarizado (IPE ó SPI, por sus siglas en ingles), el índice de falta de precipitación, el índice deciles, el índice de sequía efectivo, el porcentaje de la precipitación normal y el Z-Score. Evalúan cinco criterios para la comparación de los índices, como su sensibilidad, dimensionalidad, transparencia y flexibilidad. Mediante el análisis de sus propiedades estadísticas y una evaluación del comportamiento espacio-temporal, se obtuvo que el IPE es el índice más adecuado para el estudio y monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Para este trabajo se usa el IPE para determinar la condición hidrológica de Uruguay utilizando los datos ya descriptos de precipitación mensual provistos por UTE.

Se determina el SPI para las escalas de 1, 2, 3 y 6 meses denominados SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, los cuales representan la condición hidrológica de 1, 2, 3 ó 6 meses hacia atrás a la fecha de su cálculo. Por ejemplo, el SPI3 de julio del año 2010, representa la condición hidrológica de los meses mayo, junio y julio de 2010. El cálculo se rea-

liza mediante la metodología Guttman, 1999 donde indica que la estandarización es necesaria para poder comparar distintas regiones y estaciones del año. Este artículo describe el efecto sobre los valores del SPI calculados a partir de diferentes modelos de probabilidad, y concluye que la confiabilidad del SPI depende del tamaño de la muestra.

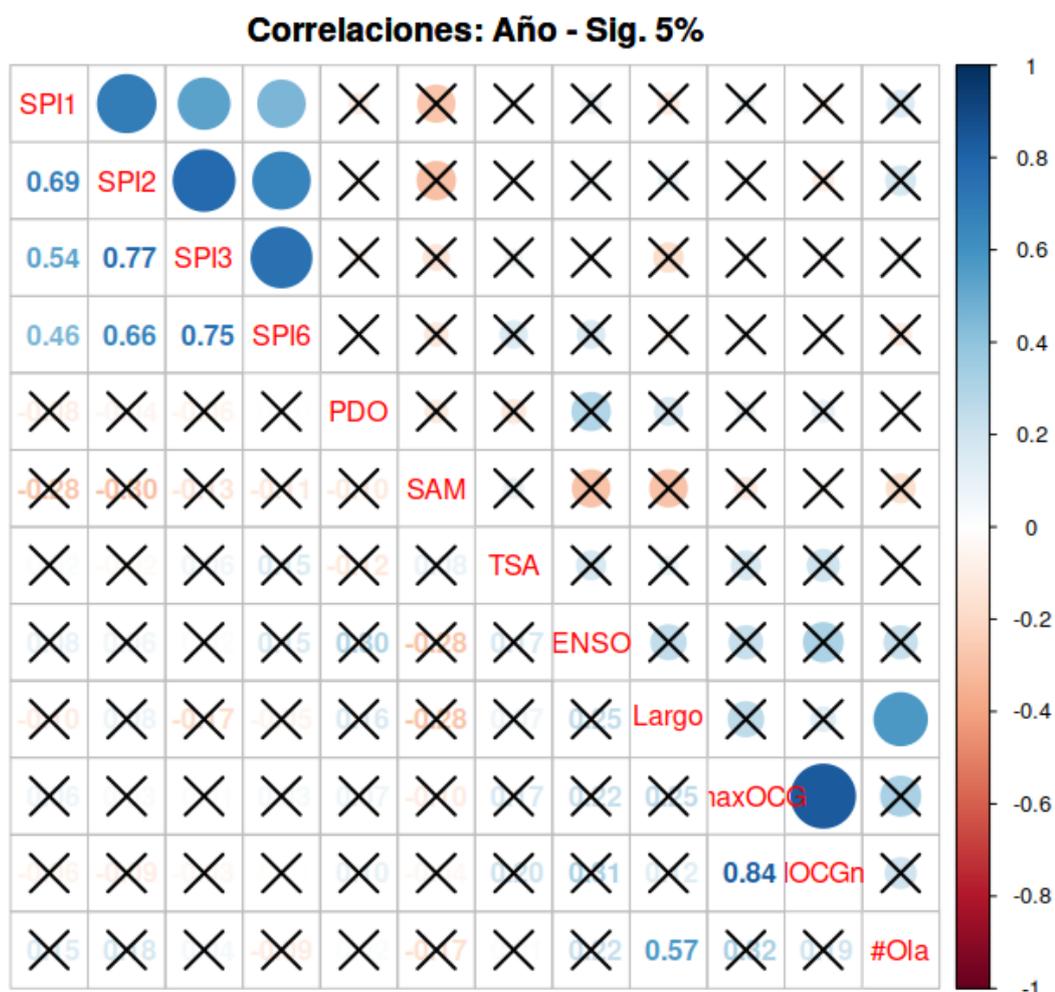
Un SPI bajo indica generalmente condiciones de sequía, ya que implica un déficit de precipitación. La interpretación más común del SPI en términos de sequía es la siguiente: cuando el SPI es negativo entre 0 y -1: Condiciones de humedad cercanas a la normalidad. SPI entre -1 y -2: Sequía leve. SPI entre -2 y -3: Sequía moderada. SPI menor a -3: Sequía severa o extrema. Para los SPI positivos, si SPI esta entre 0 y 1: Condiciones de humedad cercanas a la normalidad. SPI entre 1 y 2: Exceso de precipitación leve. SPI entre 2 y 3: Exceso de precipitación moderado. SPI mayor a 3: Exceso de precipitación severo o extremo.

## 5.1. Análisis de los resultados

Luego de ser determinados a escala mensual los índices de: largo de las OCG, IOCGn, I<sub>max</sub>OCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (#OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, se generan las correlaciones de Pearson a escala mensual (mes a mes) entre todas las variables con un nivel de significancia estadística al 5 %. Luego, se repite el análisis pero solo considerando los meses de cada estación del año en: DEF, MAM, JJA y SON. Es importante destacar que durante todo el período analizado, el número total de OCG es de 70. Las estaciones del año con el mayor número de registros son JJA, con 28 OCG, seguidas de MAM con 23, DEF con 10 y SON con 9 OCG. Estas disparidades en las proporciones de olas entre las estaciones del año podrían tener repercusiones en los resultados subsiguientes. Si bien la cantidad de casos es baja (70 OCG), la cantidad de observaciones (meses) abarca desde 1963 (comienzo de las series de precipitación) hasta octubre de 2014 con una frecuencia mensual, lo que conlleva a 622 observaciones.

El análisis de todo el período se ve en la figura 5.1. No presenta ninguna correlación significativa entre los índices de las OCG y los índices de circulación y de las condiciones hidrológicas. Dentro de los resultados estadísticamente significativos, se encuentra la correlación de 0.84 entre IOCGn y I<sub>max</sub>OCG. Si bien estos dos índices se enfocan en características distintas de la intensidad de las OCG, presentan un estrecho vínculo entre si y se refleja en su correlación. La correlación positiva implica que OCG más intensas en el promedio de todo el periodo de la OCG, tienden a ser las que alcanzan

puntualmente los registros más altos de anomalía. Otra correlación significativa se observa entre el largo de las OCG por mes y la #OCG. El valor es de 0.57, mostrando que la #OCG y el largo está correlacionado, dando la pauta que cuanto mayor cantidad de OCG, más largas suelen ser. También se observa que los cuatro índices hidrológicos están correlacionados entre si, con valores del orden del 70 % entre índices consecutivos (entre SPI1 y SPI2 correlaciones de 0.69, entre SPI2 y SPI3 de 0.77 y SPI3 y SPI6 de 0.77), mientras que entre el SPI1 y el SPI6 la correlación es de 0.46. Estos vínculos o correlaciones encontrados, se compararán con los resultados análogos en las distintas estaciones del año, viendo si se modifican o refuerzan.



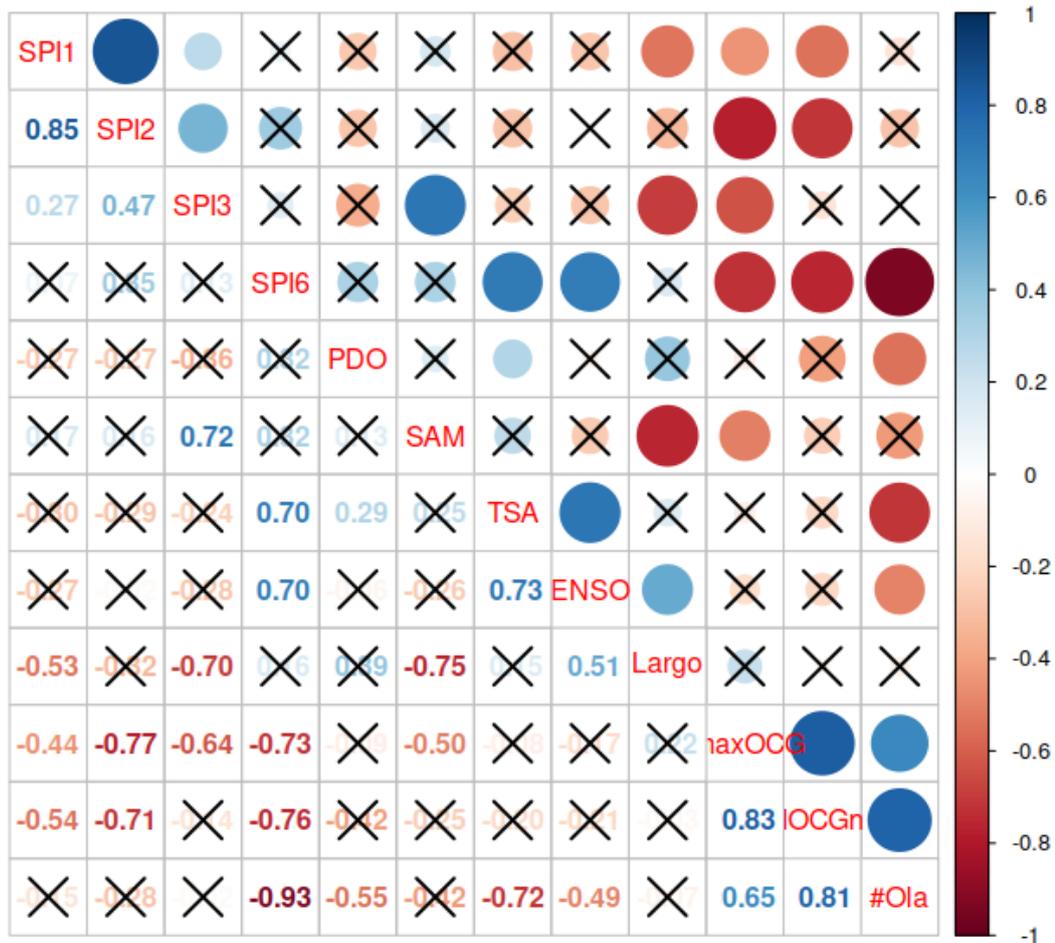
**Figura 5.1:** Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, IaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5%. Para todo el año.

### 5.1.1. Verano (DEF)

En el verano (ver figura 5.2) se encuentran varias correlaciones significativas. Índices como el largo de la OCG están correlacionadas fuertemente con el SAM (-0.75) y con el SPI3 (-0.73), al igual que con SPI1 pero con valores mas bajos. La #OCG esta correlacionada con SPI6 y con la TSA (0.72). El I<sub>max</sub>OCG se correlaciona con el SAM (-0.5) y con todos los SPI entre -0.73 (SPI6) y -0.44 (SPI1). El IOCG<sub>n</sub> se correlaciona con SPI6 (-0.76) y SPI2 (-0.71). Es importante recordar que para la estación de verano contamos con 11 casos, a continuación se detallan estas correlaciones con sus implicancias.

La correlación negativa entre los valores de SPI, con la duración e intensidad de las OCG, implica que si hay un déficit hídrico, las OCG son más largas e intensas, acorde a la retroalimentación positiva entre los extremos de temperatura y la humedad del suelo mencionada en la sección anterior. Las correlaciones más fuertes están asociadas a la escala más larga de 6 meses y en particular con la cantidad de OCG y la intensidad (puntual y media). Siendo este resultado un aspecto a destacar en DEF.

### Correlaciones: DEF - Sig. 5%



**Figura 5.2:** Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5%. Para la estación del año DEF.

Por otro lado, la correlación con el SAM implica que valores negativos del SAM (fase negativa) están asociados a un aumento de largo y de la intensidad máxima alcanzada por las OCG. La fase negativa del SAM favorece que los sistemas de bajas presiones se corran hacia el norte. Para poder determinar con mayor claridad, es necesario trabajar a escala diaria distinguiendo los patrones sinópticos asociados a los eventos, los cuales será analizados en el siguiente capítulo.

El ENSO esta correlacionado con valores de 0.51 con el largo y en -0.49 con #OCG. La #OCG va acorde con el hecho de que, durante la fase negativa del ENSO (La Niña) en el período DEF, se asocia a una menor cantidad de precipitaciones en Uruguay lo que refuerza los índices SPI (consistente con Cai et al. 2020). Los resultados sugieren que la fase positiva del ENSO (El Niño) tiende a tener OCG mas largas y en menor cantidad. Por otro lado, en la fase negativa (La Niña) presenta mayor cantidad de OCG

y más cortas.

Con respecto a la TSA, solo se encuentra correlacionada negativamente con #OCG en -0.72. Según Robledo et al. 2020 existe una covariabilidad positiva entre la TSA y precipitaciones en el centro-este de Argentina. Este resultado también se encuentra para Uruguay reflejándose para el SPI6, donde tiene una correlación entre la TSA y el SPI6 de 0.70. Por lo tanto, la retroalimentación positiva entre los extremos de temperatura y la humedad del suelo, podría tener efecto en el aumento en la #OCG.

Otros resultados estadísticamente significativos en DEF son la correlación de 0.83 entre IOCGn e ImaxOCG. Se observa a diferencia del caso anterior (toda la serie), que los cuatro índices hidrológicos solo están correlacionados entre sí para SPI1, SPI2 y SPI3, con valores de 0.85 entre SPI1 y SPI2 y correlaciones de 0.47 entre SPI2 y SPI3, mostrando una mayor correlación en verano entre SPI1 y SPI2 que al considerar todo el año. Entre los índices de las OCG, se encuentra una correlación entre IOCGn e ImaxOCG de 0.84, similar a la comparación con todo el año. El largo de las OCG y la cantidad pierden la correlación que presentaban para todo el período, pudiendo ser el ENSO un factor determinante en este sentido, dado que muestra correlaciones negativas ente el largo y la cantidad de OCG.

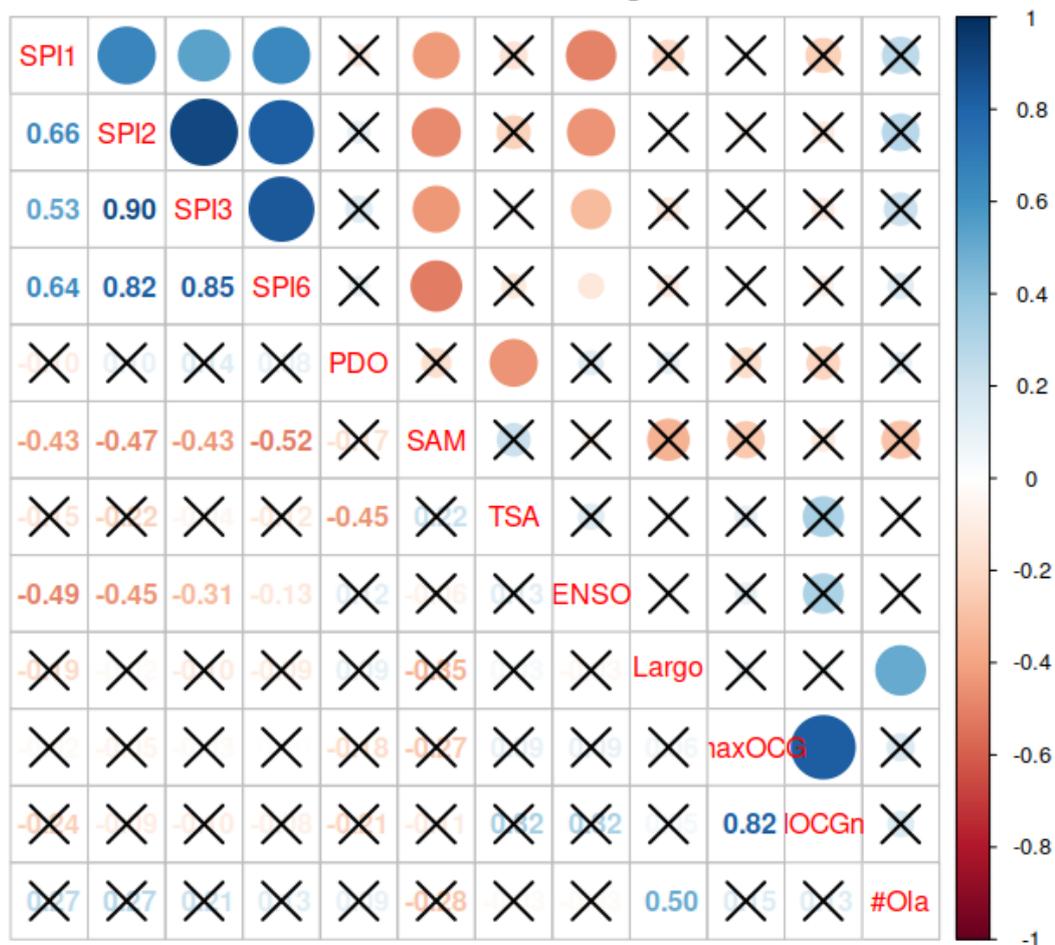
Como análisis complementario y buscando covariabilidades entre los índices de circulación y las OCG, L'Heureux y Thompson, 2006 analizan la varianza explicada entre el SAM y el ENSO en verano, encontrando que es del 25 %. Esta cifra indica que si se explica el 25 % de la varianza ( $R^2 = 0.25$ ), la raíz cuadrada de  $R^2$ , equivale al coeficiente de correlación de Pearson que sería de 0.5. Por lo tanto, el SAM y el ENSO presentan una correlación en módulo de 0.5. Sin embargo, este valor no determina el signo de la correlación. Para ello, los autores generan mapas de correlación entre el ENSO y la estructura del SAM. Los resultados muestran que la correlación es negativa siendo de -0.5. La combinación de los modos de variabilidad SAM y ENSO en verano puede influir en escenarios que refuerzan o no las correlaciones encontradas. Durante las condiciones de La Niña (fase negativa del ENSO), que se caracterizan por un aumento en la frecuencia y una disminución en la duración de las OCG, junto con una fase positiva de SAM (que resulta en OCG más cortas y menos intensas), podría dar lugar a que se combinen ambas señales para generar OCG más frecuentes, menos intensas y de menor duración. El escenario opuesto es la covariabilidad entre del ENSO positivo (El Niño) y fase negativa del SAM, lo que dando lugar a OCG más largas, menos frecuentes y más intensas.

### 5.1.2. Otoño (MAM)

El otoño junto con el invierno son las 2 estaciones que presentan mayor cantidad de casos de OCG, sin embargo en MAM (5.3) no se encuentra ninguna correlación significativa entre las OCG y los índices seleccionados. Dentro de los resultados estadísticamente significativos, se encuentra la correlación de 0.82 entre IOCGn e I<sub>max</sub>OCG. Además, el largo de las OCG por mes y la #OCG se correlacionan con un valor de 0.52. También se observa en MAM que los cuatro índices hidrológicos están correlacionados (entre SPI1 y SPI2 correlaciones de 0.66, entre SPI2 y SPI3 de 0.90 y SPI3 y SPI6 de 0.85). Estas correlaciones muestran un vínculo más intenso entre las escalas más largas al comparar con el caso donde se considera toda la serie.

La falta de correlaciones en el trimestre MAM, a pesar de ser el segundo trimestre con mayor cantidad de OCG (28), y considerando lo discutido en el capítulo 2.4.2 sobre la tendencia de temperaturas mínimas (positivas y significativas en casi todas las regiones del país), no proporciona una explicación para el número de OCG. Por lo tanto, es necesario continuar con el análisis, y una opción es el estudio de los patrones sinópticos que se analizan en el siguiente capítulo.

### Correlaciones: MAM - Sig. 5%



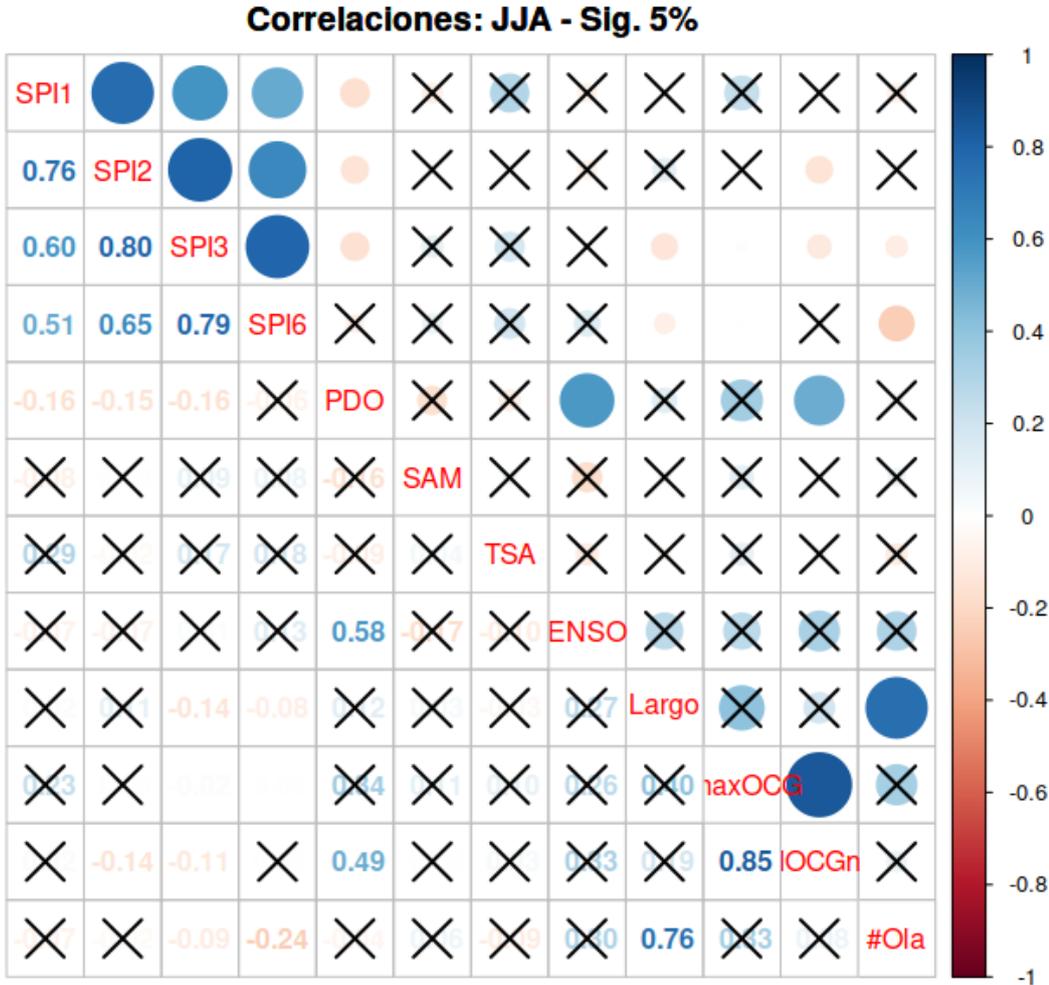
**Figura 5.3:** Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, ImaxOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5%. Para la estación del año MAM.

### 5.1.3. Invierno (JJA)

Para el invierno, tanto el largo de la OCG como #OCG están correlacionadas negativamente con los SPI6 y SPI3 a valores muy bajos. Esta correlación negativa entre los valores de SPI con la #OCG, al igual que en verano, sugiere también que un déficit de precipitaciones se relaciona con una mayor frecuencia de OCG, pero de poca relevancia. El ImaxOCG y la IOCGn también están correlacionados en menor medida con el SPI6.

En cuanto a los índices de circulación, solo la PDO esta correlacionada en +0.49 con la IOCGn (5.4). Este resultado no presenta antecedentes en la literatura consultada. Si analizamos el impacto de la señal de el ENSO en la región, y en particular en Uruguay,

la figura 1.4.b presenta en JJA anomalías positivas de temperaturas en la fase positiva de ENSO, sugiriendo que, promedios medios de temperaturas por encima de lo normal en el trimestre no se reflejan en las OCG (frecuencia, duración e intensidad).



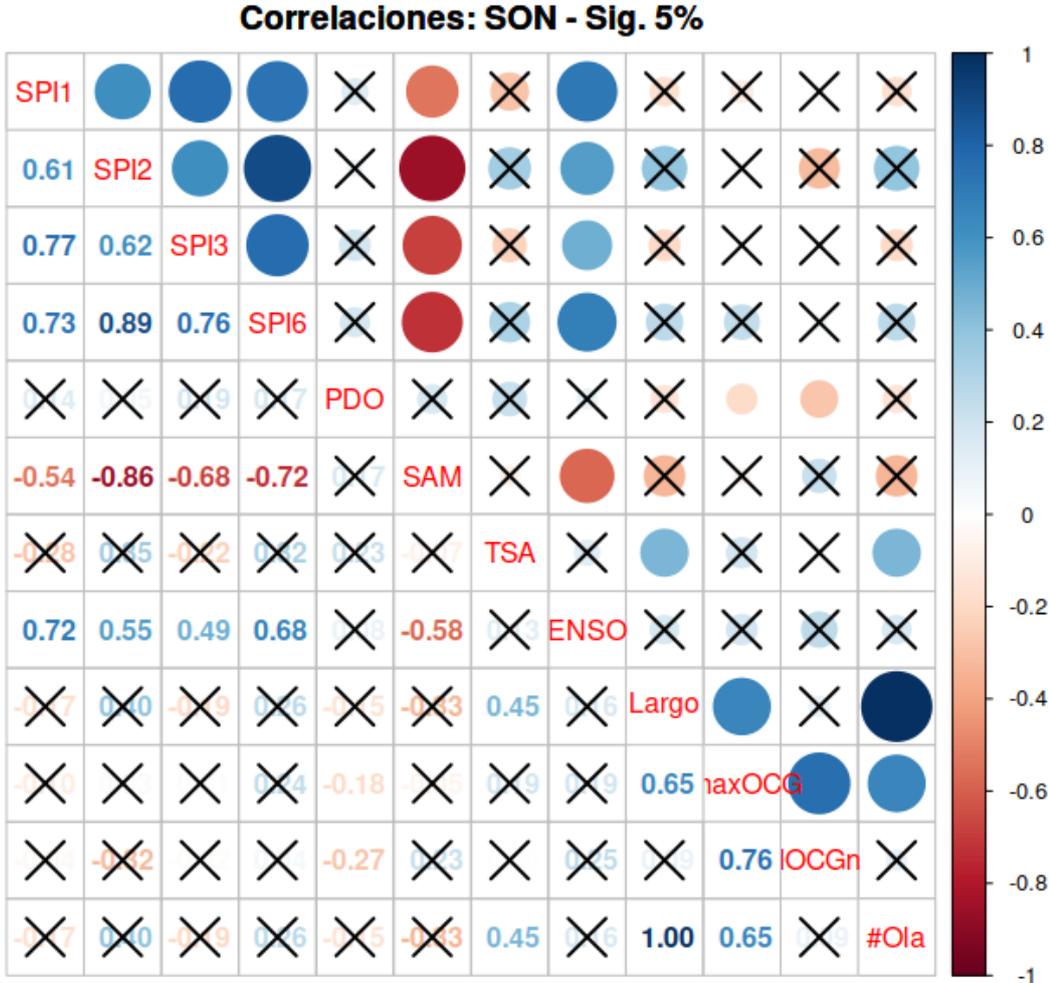
**Figura 5.4:** Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, Ima-xOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5%. Para la estación del año JJA.

**5.1.4. Primavera (SON)**

En SON, figura 5.5, se destaca que no hay ningún vínculo con la condición hidrológica a ninguna escala temporal. La cantidad de olas y el largo de las OCG esta correlacionada con la TSA en +0.45 para ambas variables. Esta correlación esta en discordancia con el trabajo de Robledo et al. 2020, a diferencia de lo que sucede en DEF.

La intensidad de las OCG, según ambos índices, muestra una correlación negativa con

la PDO y de valores bajos (-0.27). Este resultado sugiere que en Uruguay la intensidad de las OCG tiende a disminuir cuando la PDO alcanza valores negativos. Este resultado se encuentra en concordancia en Collazo et al. 2017, donde se observó que durante la fase positiva de la PDO, se registra una disminución en las temperaturas máximas en la región durante la primavera (y también verano), debido a un aumento en la frecuencia de los extremos fríos y una reducción de los cálidos.



**Figura 5.5:** Correlación de Pearson cruzada entre: largo de las OCG (Largo), IOCGn, Ima-xOCG, la cantidad de ocurrencia de OCG en el mes (OCG), ENSO, PDO, TSA y SAM, SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6, con un nivel de significancia estadística al 5%. Para la estación del año SON.

## 5.2. Síntesis del capítulo

Con respecto a las correlaciones a escala mensual durante todo el año entre las OCG y los índices seleccionados, se encontró que no hay un vínculo significativo, pero al

analizar por estación: DEF, MAM, JJA y SON, aparecen vínculos significativos al 5 %.

En DEF la correlación más significativa es en la escala de 6 meses respecto al índice de precipitación, especialmente entre el SPI6 con la cantidad de OCG y también con su intensidad. Se evidencia que el déficit a largo plazo de precipitaciones se traduce en un incremento tanto en la cantidad como en la intensidad de las OCG, y viceversa. La correlación con el SAM sugiere que valores negativos del SAM están vinculados con OCG más largas e intensas, pero para comprender mejor estos efectos se necesita un análisis complementario de los patrones sinópticos asociados. La fase positiva del ENSO (El Niño) tiende a favorecer OCG más largas y en menor cantidad. Por otro lado, la fase negativa (La Niña) presenta mayor cantidad de OCG y más cortas. El estudio de L'Heureux y Thompson, [2006](#) examina la relación entre el SAM y el ENSO durante el verano y encuentran una correlación negativa de -0.5. Durante La Niña, con una fase positiva de SAM, las OCG son más frecuentes pero menos intensas y cortas. En contraste, durante El Niño y una fase negativa de SAM, las OCG son más largas, menos frecuentes y más intensas debido a la combinación de ambos índices.

Para el trimestre JJA, el largo de la OCG y #OCG están correlacionadas negativamente con los SPI3 y SPI6, implicando que si hay un déficit de precipitación, las OCG ocurren en mayor cantidad y duración (y viceversa). En cuanto a los índices de circulación, solo la PDO está correlacionada con la intensidad media de las OCG. La señal de el ENSO en Uruguay marca anomalías positivas de temperaturas en la fase positiva para este trimestre, dando la pauta que promedios medios de temperaturas por encima de lo normal en el trimestre no se reflejan en las frecuencia, duración o intensidad de las OCG.

Con respecto a las estaciones intermedias, MAM no presenta ninguna correlación significativa a pesar de ser el segundo trimestre con mayor cantidad de OCG (28). Y SON no presenta vínculos con el estado hidrológico, pero la intensidad en sus dos índices, está correlacionada negativamente con la PDO.

En resumen, los índices de SPI analizados muestran vínculos significativos con las OCG en DEF, no presentando correlaciones en las restantes estaciones. Los distintos índices de circulación muestran correlaciones variadas con la cantidad y características de intensidad y duración de las OCG en Uruguay, evidenciando la complejidad de los factores que influyen en su comportamiento y que no son captados a escala interanual. Si a estos resultados les sumamos que MAM y JJA son los períodos con mayor cantidad de OCG, dan la pauta que aún quedan varios aspectos a explorar. En la siguiente sección se pretende mejorar la comprensión de las OCG, explorando y profundizando en los Patrones Sinópticos asociados a ellas en la escala sinóptica.

# Capítulo 6

## Patrones Sinópticos de Circulación

En este capítulo se describe la metodología y los resultados para la determinación de los PS que favorecen las OCG.

Con los antecedentes mencionados en el capítulo 1.5, se evidencia que la determinación de los PS puede construirse mediante distintas variables, entre ellas están el campo de presión en superficie, la altura de geopotencial en 500hPa o 1000hPa (o ambas como el caso de Bettolli et al. 2010). Dependiendo de los objetivos y de la región de estudio, cada variable tendrá sus ventajas y/o desventajas. El escenario ideal es evaluar a todas las variables recién mencionadas. Dado el alcance de este trabajo, se considera que la presión en superficie es la mejor alternativa para comenzar, dejando para trabajos futuros la complementariedad con la altura de geopotencial en 500hPa y 1000hPa.

El dominio para definir los PS considerado va desde los 20°S a 50°S de latitud y entre los 80°W y 40°W de longitud con una resolución de 1°x1°, conformando un dominio de 40x30 puntos por 36 años (de 1979 a 2014, por disponibilidad de ERA-Interim) y 365 días.

La primera etapa es conformar la base de datos diarios de Presión en Superficie, de ahora en más SLP, por sus siglas en inglés. Los datos se descargan mediante rutinas programadas en código *Python* (Dee et al. 2011). Para determinar el campo medio de SLP de cada día, se promedian los cuatro valores de ese día y por punto del dominio de las horas: 00, 06, 12 y 18GMT. Para la conversión a datos diarios, se usó el Software “Climate Data Operators (CDO)”, 2023. Los archivos generados tienen un tamaño por variable de 740MB y en formato NetCDF. De esta manera se conforma la base de datos diarios de Presión en superficie que se utilizara para definir los PS.

El segundo paso es calcular la climatología diaria de SLP y determinar las anomalías

de SLP, con el objetivo de desestacionalizar los datos del ciclo anual, logrando de esta manera independizarnos del ciclo anual. La climatología diaria se determina en CDO considerando una ventana centrada de 15 días, mismo largo que se uso para determinar los percentiles de las OC de la sección 3.3.1. Luego se calcula la media para cada fecha del año, proporcionando un campo de presión único para cada día del año, conformando la climatología diaria. Luego para determinar las anomalías diarias, se le resta la climatología correspondiente a cada fecha.

El siguiente paso es reducir la dimensionalidad del problema mediante el PCA que es una técnica estadística utilizada para analizar la variabilidad y patrones en un conjunto de datos espaciales. En el contexto de datos espaciales y temporales, el PCA puede aplicarse para entender la estructura de la variabilidad tanto en el espacio como en el tiempo.

La expresión matemática que describe cómo se puede descomponer una serie de datos  $X(x, y, t)$ , donde  $x, y$  identifican un campo espacial y  $t$  representa el tiempo, en una combinación de Componentes Principales (CP) y Funciones Ortogonales Empíricas (EOF). Los CP ( $X_{CP}(t)$ ) son las proyecciones temporales que describen cómo la variabilidad en los datos cambia a lo largo del tiempo. Cada CP representa una serie temporal de la variabilidad. Las EOF ( $EOF(x, y)$ ) son las funciones espaciales ortogonales entre sí que representan patrones espaciales de variabilidad. Estas funciones son estructuras espaciales que muestran cómo la variabilidad se distribuye en el espacio. La expresión matemática  $X(x, y, t) = X_{CP}(t) \cdot EOF(x, y)$  indica que la serie de datos completa puede descomponerse multiplicando las proyecciones temporales (CP) por las funciones espaciales (EOF).

Esta descomposición ayuda a entender cómo varía la serie de datos en el tiempo. Cada CP y EOF explica un porcentaje de la varianza total de las series originales. Esto significa que los primeros CP y EOF explican la mayor parte de la variabilidad, a medida que se avanza la contribución disminuye de cada par de CP y EOF, pero conociendo la varianza acumulada uno puede decidir cuantos EOF y CP retiene para reemplazar por la serie original. De esta manera se disminuye la dimensionalidad de los datos.

A continuación, y previo a definir los clusters, se rotan los EOF para lograr una mayor interpretación física a los datos previo a realizar el análisis de cluster. El motivo de rotar los EOF es proyectar los EOF sobre el campo de los datos reales para obtener una mayor representación física. Sin embargo, la pérdida de ortogonalidad puede generar problemas en la medida en que esos procesos físicos subyacentes no sean independientes. De esta manera, el primer componente principal puede representar un modo importante de variabilidad o proceso físico, pero también podría incluir algunos aspectos de otros modos o procesos correlacionados. Por lo tanto, el ACP puede resultar en

la combinación de varios procesos físicos distintos en un solo componente principal.

Existen varios procedimientos para rotar los EOF, algunos de los métodos más comunes son: Rotación Varimax y Rotación Quartimax. El método Varimax es una técnica de rotación ampliamente utilizada, busca maximizar la varianza de los cuadrados de los pesos o coeficientes que multiplican los EOF para formar las variables observadas. Varimax tiende a producir factores más ortogonales, es decir, menos correlación entre sí. Quartimax es otro método de rotación que busca simplificar la estructura de los coeficientes. Su objetivo principal es redistribuir la varianza total entre los factores de manera más uniforme en lugar de enfocarse en la varianza de los cuadrados de las cargas, como lo hace Varimax. Esto permite cierta correlación entre los factores. Para el cálculo de los PCA rotados, se sigue la metodología descrita por Wilks, 2011 (capítulo 11.2), la cual está implementada en R y disponible en el paquete *GPArotation* Bernaards y Jennrich, 2005.

El Método K-Means es un enfoque no jerárquico ampliamente utilizado para el agrupamiento de datos. A diferencia de los métodos jerárquicos, el K-Means permite la reasignación de observaciones a medida que avanza el análisis. La 'k' en k-Means se refiere al número predefinido de grupos o clústers en los que se agruparán los datos. El algoritmo comienza con una partición aleatoria de los datos en K grupos. El proceso del algoritmo implica calcular centroides para cada clúster, mide las distancias y asigna las observaciones al grupo cuyo centroide esté más cercano. Este proceso se repite hasta que no haya más reasignaciones. Aunque el Método K-Means ofrece la posibilidad de reasignar observaciones, su desventaja radica en la necesidad de especificar previamente el número de grupos. Se sugiere repetir el análisis para varias condiciones iniciales para obtener resultados robustos. El método k-Means se describe en Wilks, 2011 en el capítulo 14.3.1.

Para el análisis de agrupamiento, se utilizó la función `kmeans` del paquete base `stats` en R, que proporciona la implementación del método K-Means. Uno de los inputs a definir es el `nstart`, este parámetro controla cuántas configuraciones iniciales diferentes se deben probar. El algoritmo comienza desde diferentes configuraciones iniciales (resorteandolas) y selecciona la mejor solución en términos de la suma de cuadrados intra-cluster. En este caso, se implementaron 200 configuraciones iniciales. Otro parámetro es el `iter.max`, este parámetro establece el número máximo de iteraciones permitidas para cada ejecución del algoritmo K-Means (para cada condición inicial). Las iteraciones ocurren hasta que los centroides convergen y no se den más cambios en la asignación de grupos. `iter.max` evita que el algoritmo se ejecute indefinidamente, si el algoritmo no converge después de 50 iteraciones, se detendrá. Para conjuntos de datos como en este caso con 13140 observaciones y 20 dimensiones (20 CP consi-

derados), se recomienda por defecto probar con valores de  $nstart$  entre 50 o 100 y de  $iter.max$  de 100. Para este estudio se consideró un  $nstart$  de 200 y un  $iter.max$  de 50.

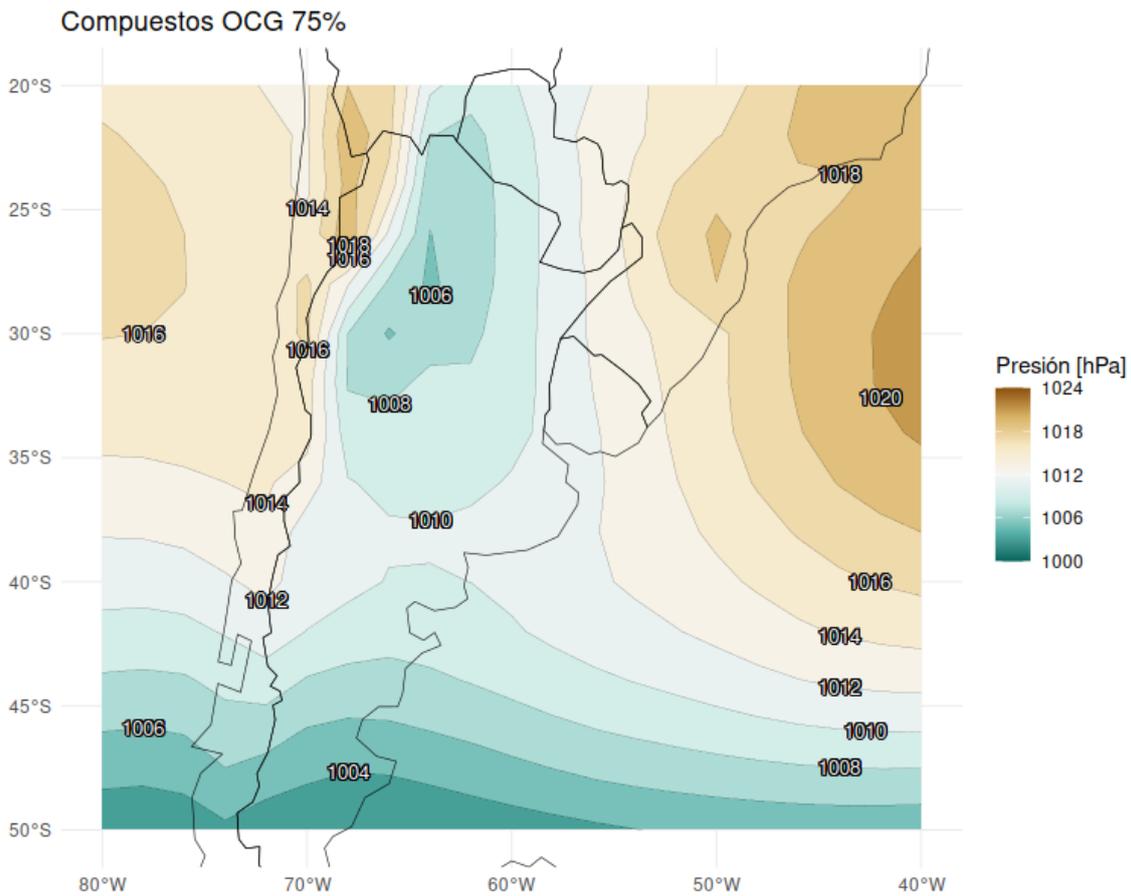
Para la determinación del número óptimo de clústers se utilizó la metodología empleada por Bettolli et al. 2010 mediante el estadístico pseudo-F.

$$\text{pseudo-F} = \frac{A(n - k)}{W(k - 1)}$$

Donde  $A$  y  $W$  son la suma de distancias al cuadrado entre clústeres y dentro de cada clúster (respectivamente),  $n$  es el número de objetos a clasificar (campos diarios) y  $k$  es el número de clústeres. En general, la estadística pseudo-F muestra valores altos para  $k$  pequeños (cuando  $A$  es alto y  $W$  es pequeño), disminuyendo a medida que  $k$  aumenta. Para establecer el número de clústeres sugerido por el método, se realizó un agrupamiento progresivo, con  $k$  variando de 2 a 20.

En la siguiente sección se describen los resultados y detalles al aplicar la metodología propuesta y las consideraciones en la determinación de los PS que favorecen las OCG.

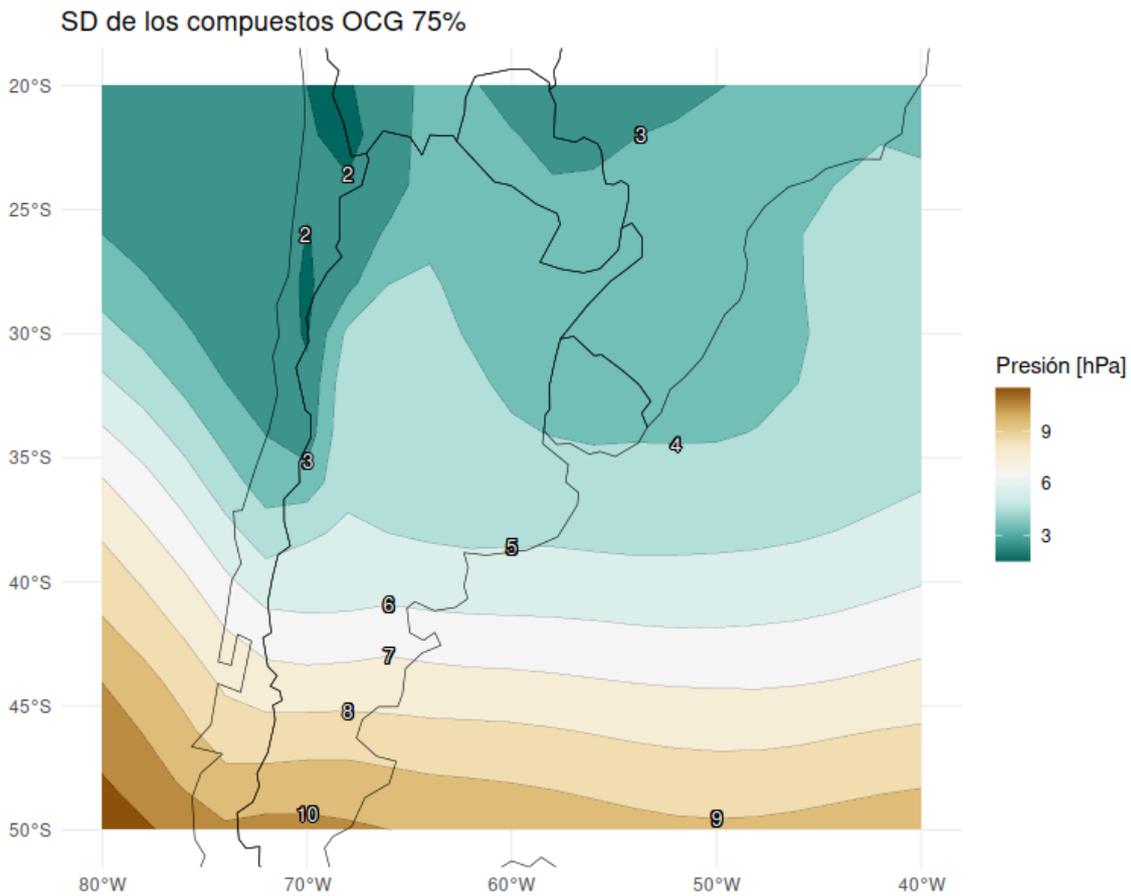
Para comenzar a entender las configuraciones sinópticas asociadas a las OCG se realiza un análisis de *composites* o compuestos. Esta primera aproximación se basa en, conocidos los eventos de OCG, ver que pasó en esos días con OCG. En este caso, se seleccionan y combinan datos de los días con OCG para los campos de SLP en su valor medio. De esta manera, se obtiene la figura 6.1 con los composites de SLP y su desviación estándar que se muestra en la figura 6.2.



**Figura 6.1:** Composite de los días de con OCG para SLP.

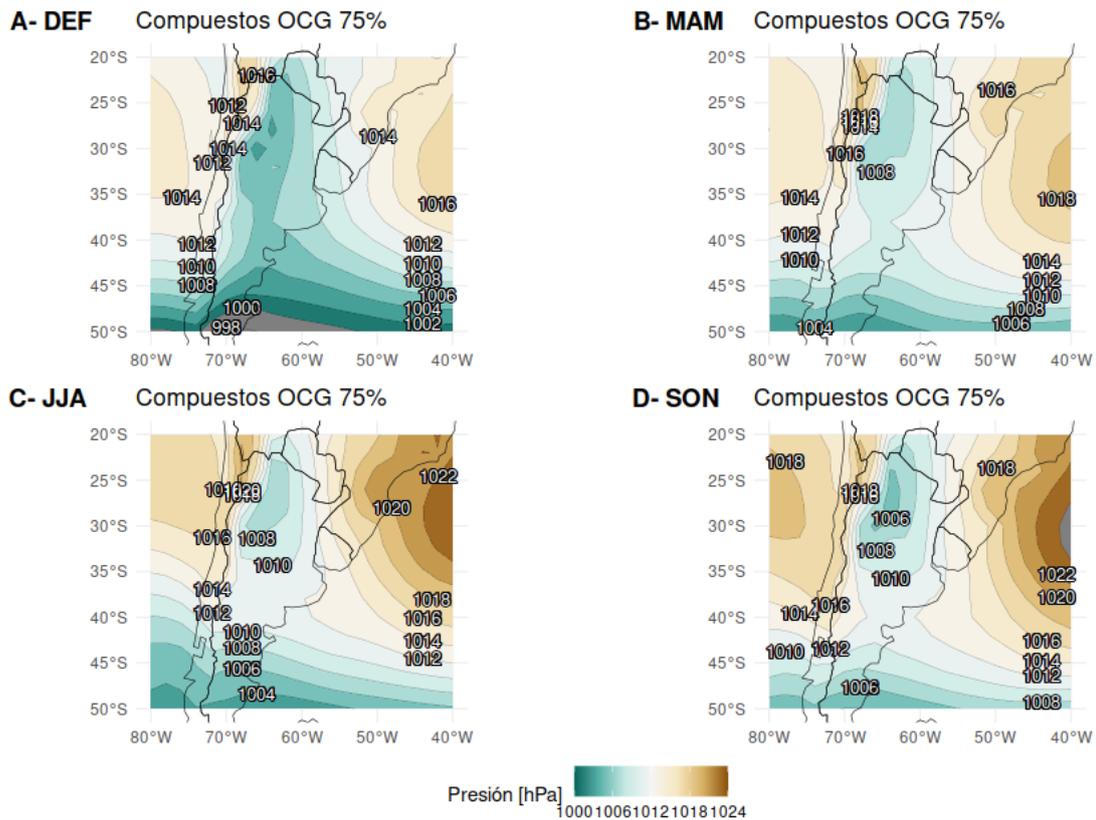
En 6.1 se puede observar una configuración sinóptica que favorece una componente predominante de viento del norte. Compuesta por un Anticiclón (o altas presiones) con su centro de 1021hPa en 40°W y 30°S y una baja de 1006hPa en 65°W y 25°S, lo que favorece la advección cálida hacia Uruguay. También se observa otra alta presión en el Océano Pacífico, de menor orden (1016hPa) centrada en 80°W y 25°S. En latitudes más altas del dominio (entre 50°S y 40°S), se observa una prevalencia de bajas presiones del orden de los 1006hPa. Este método es un enfoque clásico para tener una primera aproximación, dando lugar a comentar que esta configuración esta compuesta por días con OCG de distintas estaciones del año y en proporciones distintas.

En cuanto a las SD (6.2) se observa en las regiones donde se encuentran la alta y baja presión, valores de SD inferiores a 5hPa, dando la pauta de ser una configuración predominante y estable en las OCG, lo que es consistente con advección de aire más cálido del norte. También se observa un comportamiento latitudinal entre los 40°S y 50°S con valores que decrecen hacia el ecuador de 10 a 5hPa. A continuación se repite el procedimiento separando en las 4 estaciones del año y se muestran en la figura 6.3.



**Figura 6.2:** Desviación estándar (SD) de los composite de los días de con OCG para SLP.

Al separar por estación del año los composites (figura 6.3), se puede apreciar que para el invierno y primavera (JJA y SON, respectivamente) el anticiclón ubicado en el Oc. Atlántico, con su centro en 40°W y 30°S pasa a ser más intenso, cambiando de 1021hPa a 1023hPa o más. En los dos casos el sistema de bajas presiones se encuentra en valores de 1006 a 1008hPa. En el verano (DEF), se observa una expansión y desplazamiento de la región de bajas presiones al sur (centrándose en 30°S y 72°W) y tomando valores mínimos entre 1002 y 1004hPa. Este comportamiento es consistente con los cambios normales de la circulación durante el verano en esta región, donde estos sistemas se desplazan hacia el sur. En otoño (MAM) es el caso más similar al composite 6.1.



**Figura 6.3:** Composite de los días de con OCG para SLP por estación del año. A) Verano (DEF), B) Otoño (MAM), C) Invierno (JJA) y D) Primavera (SON)

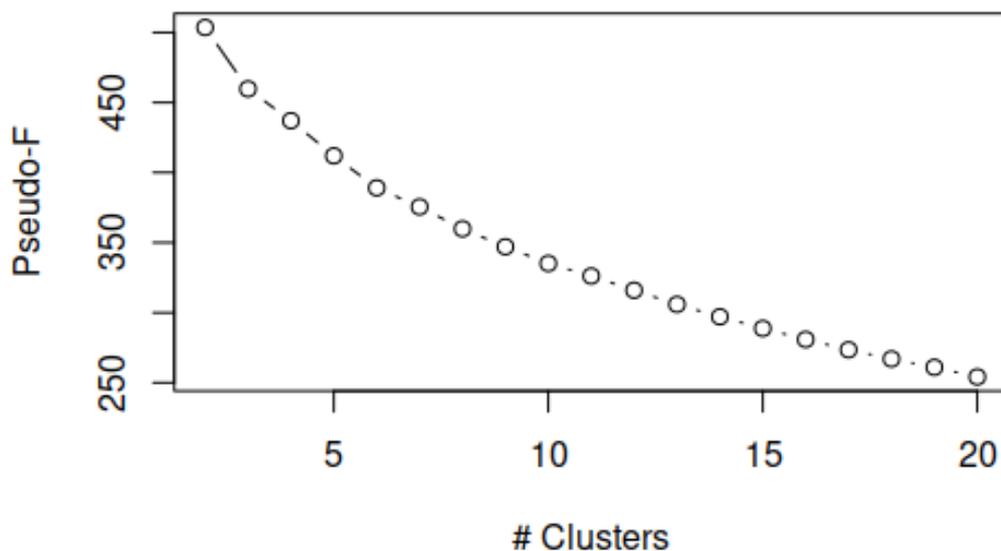
## 6.1. Determinación y descripción de los patrones sinópticos

Hasta ahora se realizó un análisis condicionado a los eventos de OCG. A continuación se utiliza la metodología descrita en la sección anterior para generar los PS en base a la metodología de k-means descrita. A modo de esquematizar el procedimiento de construcción de los PS, se parte de las anomalías diarias de los campos de SLP y se hace un ACP para reducir la dimensionalidad del problema. Los resultados indican que los 20 primeros CP y EOF reúnen el 99 % de la varianza explicada, los cuales son tomados como conjunto de datos para determinar los PS.

Previo al cálculo de los PS mediante k-means, se rotan o proyectan sobre los datos reales a los 20 CP con el objetivo de mejorar la interpretación física de los PS. Se utilizan los métodos ya descritos de Varimax y Quartimax. Los resultados se muestran

en el Anexo 2, el primer EOF sin rotar (conservando el 39 % de la varianza) se muestra en la figura C.1, el primer EOF rotado mediante Varimax se muestra en C.2 y rotado por Quartimax en C.3. Ambas rotaciones presentan un campo muy similar para ambas metodologías. El EOF 1 se puede asociar a un sistema de bajas presiones entre las latitudes 35°S y 45°S posterior a la Cordillera de los Andes. Garreaud, 2000 presenta un modelo conceptual de una incursión de aire frío sobre América del Sur asociado a un sistema de bajas presiones en latitudes de 40°S similares al EOF 1. Los autores presentan que su modelo conceptual es aplicable a episodios en invierno y verano. El EOF 1 no rotado presenta una estructura esférica y los dos EOF rotados se asemejan a los patrones descritos por Garreaud, 2000 en la irrupción de masas de aire frías en Sudamérica. Por este motivo, se optó por determinar los PS mediante k-means en base a los campos rotados por Varimax, ya que, entre las dos metodologías, Varimax conserva una mejor ortonormalidad entre los componentes rotados.

Con los EOF ya rotados se procede a determinar los PS mediante k-means. Para predefinir el número óptimo de clústeres se utiliza el pseudo-F variando el k entre 2 y 20 clusters y graficando los resultados en 6.4, se observa una pequeña ganancia al incorporar cada clúster hasta el clúster 20, no permitiendo tomar una decisión como se observa en Bettolli et al. 2010 mediante este criterio.



**Figura 6.4:** Gráfico del Pseudo-F para k entre 2 y 20.

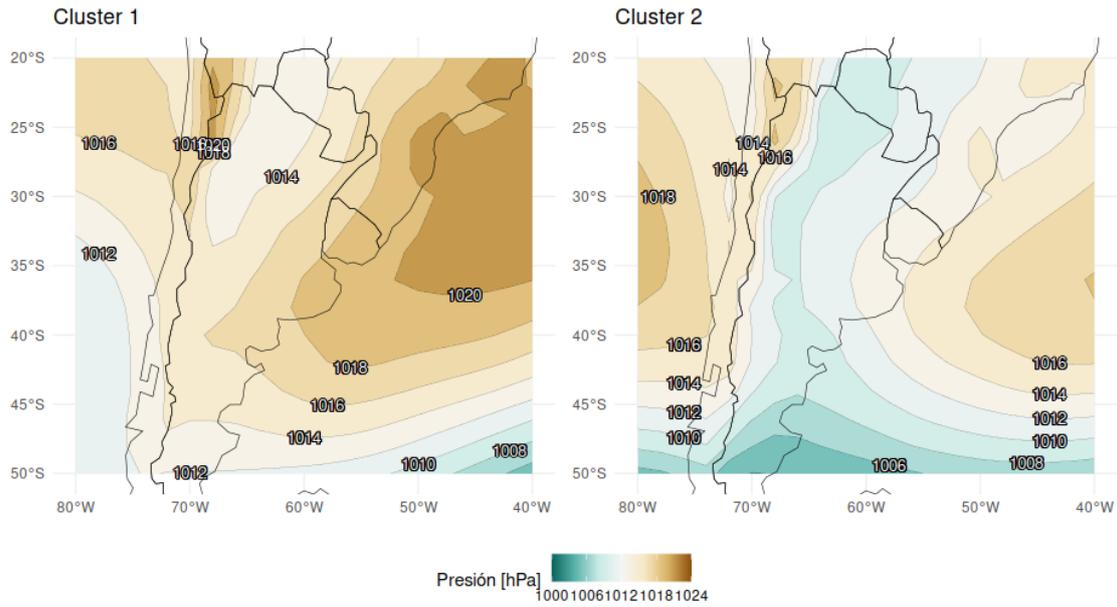
De todos modos, el pseudo-F nos garantiza que al incluir más clústeres, los grupos se

separan más entre ellos y se vinculan mejor entre sí. Por lo tanto, para determinar el número de clústers óptimo, se consideran los antecedentes en la región donde los trabajos ya mencionados varían entre 5 y 10 clusters, variando los períodos de estudio desde una estación hasta todo el año. Trabajos como el de Tencer et al. 2016 utilizan 10 PS para determinar los PS para todo el año, siendo este número óptimo de PS a considerar. Cabe aclarar que también se exploraron los casos de 7, 8 y 9 clústeres, los que se comentaran más adelante.

De esta manera, se le asigna a cada día del período de análisis un PS asociado de los 10 establecidos. A continuación se describen los 10 PS mediante sus composites de SLP para cada uno de los clústers definidos. En la figura 6.5 se muestran el Clúster 1 (PS-1, de ahora en adelante) y el Clúster 2 (PS-2).

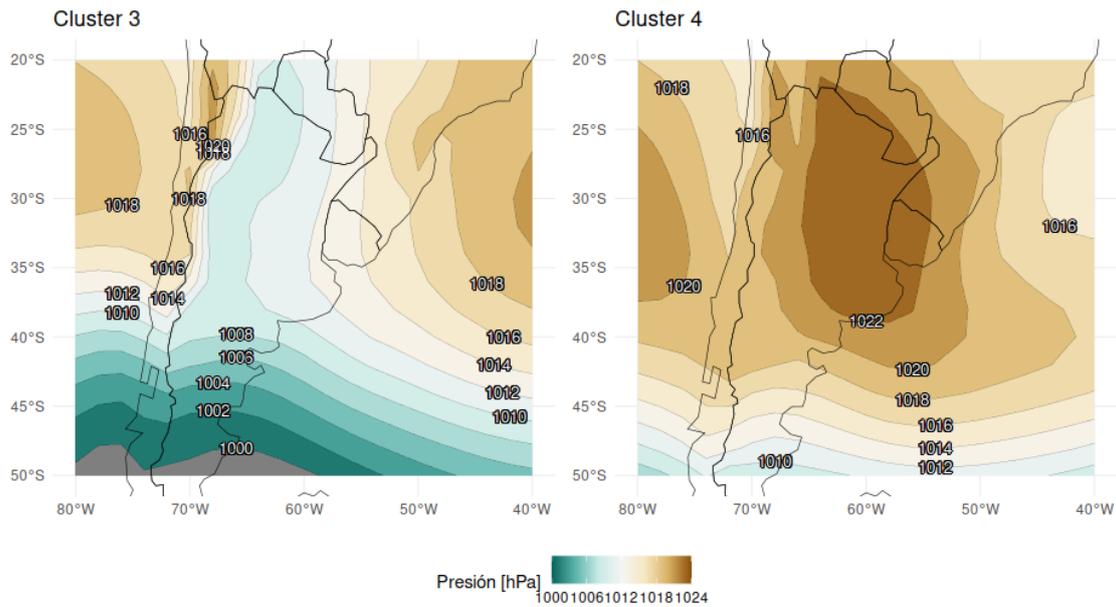
El PS-1 se caracteriza por un sistema de altas presiones centrado en  $40^{\circ}\text{W}$  y  $30^{\circ}\text{S}$  con un valor de 1020hPa. En el norte Argentino se observan presiones normales del orden de 1013hPa, dando como resultado una prevalencia de los vientos del noreste (NE). También se observa una baja presión al oeste de Sudamerica sobre el Atlántico en los  $40^{\circ}\text{S}$ .

En el PS-2 se observa un sistema de altas presiones en el Atlántico centrado entre  $35^{\circ}$  y  $40^{\circ}\text{S}$ , y  $40^{\circ}\text{W}$  con un valor máximo de 1020hPa. Se observa otra alta presión en el Pacífico de 1018hPa a la misma latitud y centrada en los  $80^{\circ}\text{W}$ . Del lado este de la cordillera de los Andes, y extendiéndose desde Paraguay hasta los  $45^{\circ}\text{S}$ , se observan baja presión con valores entre 1008 y 1010hPa. Esta configuración favorece también los vientos del NE.



**Figura 6.5:** Patrón sinóptico asociado al cluster 1 (PS-1) (izq.) y patrón sinóptico asociado al cluster 2 (PS-2) (der.).

La figura 6.6 muestra el Cluster 3 (PS-3) y el Cluster 4 (PS-4). El PS-3 presenta un sistema de altas presiones en el Atlántico centrado a 30° y en 40°W con un valor máximo de 1020hPa. Presenta otra alta presión en el Pacífico de 1018hPa a los 80°W a las mismas latitudes. Al costado este de la cordillera, también presenta bajas presiones con valores entre 1008 y 1010hPa al igual del PS-2. Presenta un patrón similar al PS-2 con el sistema de altas presiones del Atlántico más hacia el norte. En las latitudes más altas, presenta valores más bajos de presión que el PS-2. Esta configuración favorece vientos con componente N (a diferencia del PS-2 con componente NE).

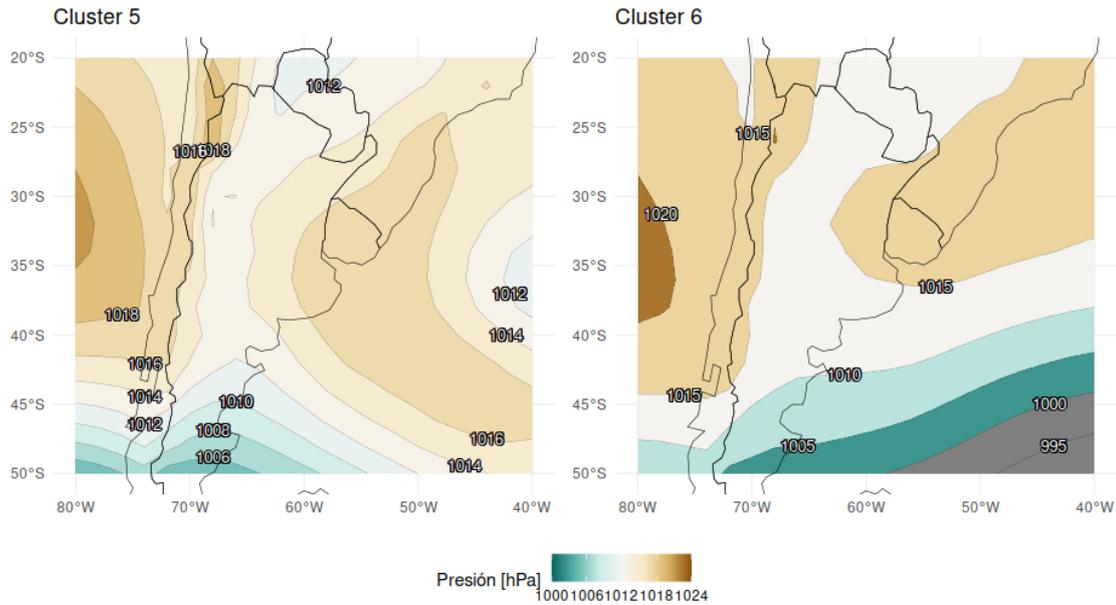


**Figura 6.6:** Patrón sinóptico asociado al clúster 3 (PS-3) (izq.) y patrón sinóptico asociado al cluster 4 (PS-4) (der.).

El PS-4 6.6 muestra un gran y marcado sistema de altas presiones situado en el continente, con su centro en los 60°W y entre los 20° y 40°S con un valor de 1022hPa. Dada la posición del sistema de altas presiones, gran parte de Uruguay se encuentra cubierta por su centro, donde prevalecerán las condiciones de vientos calmos, salvo la región este de Uruguay donde hay un leve componente sur de los vientos medios.

En la figura 6.7 se muestra el Clúster 5 (PS-5) y el Clúster 6 (PS-6). El PS-5 se caracteriza por un sistema de altas presiones sobre el Pacífico en 80°W y 35°S con un valor de 1020hPa. En el Atlántico, se observa un sistema de bajas presiones centrado en 40°W y entre los 40° y 35°S con un valor de 1000hPa. Sobre todo el territorio uruguayo se encuentra condiciones de altas presiones homogéneas, lo que da condiciones calmas de viento.

El PS-6 esta caracterizado por un sistema de altas presiones centrado en el Pacífico en los 80°W y 35°S con un valor de 1020hPa, un sistema débil de altas presiones en los 50°W y 30°S de 1015hPa que se extiende hacia el NE, y al sur este del dominio se encuentra un sistema de bajas presiones en los 40°W y 50°S de 995hPa. Dada esta configuración sinóptica, prevalecen los vientos calmos en todo Uruguay.

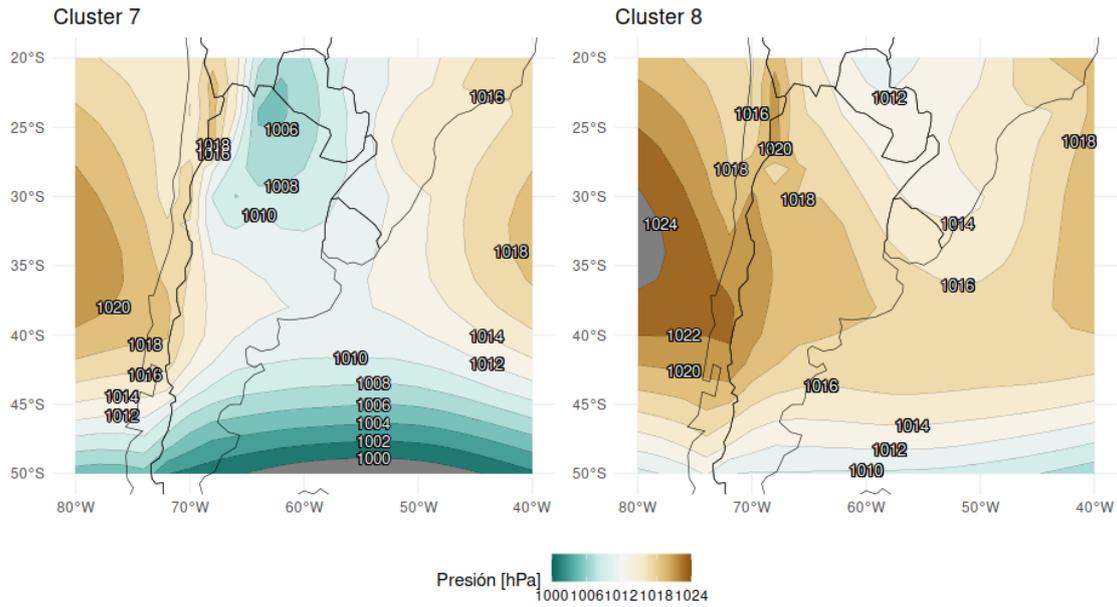


**Figura 6.7:** Patrón sinóptico asociado al clúster 5 (PS-5) (izq.) y patrón sinóptico asociado al clúster 6 (PS-6) (der.).

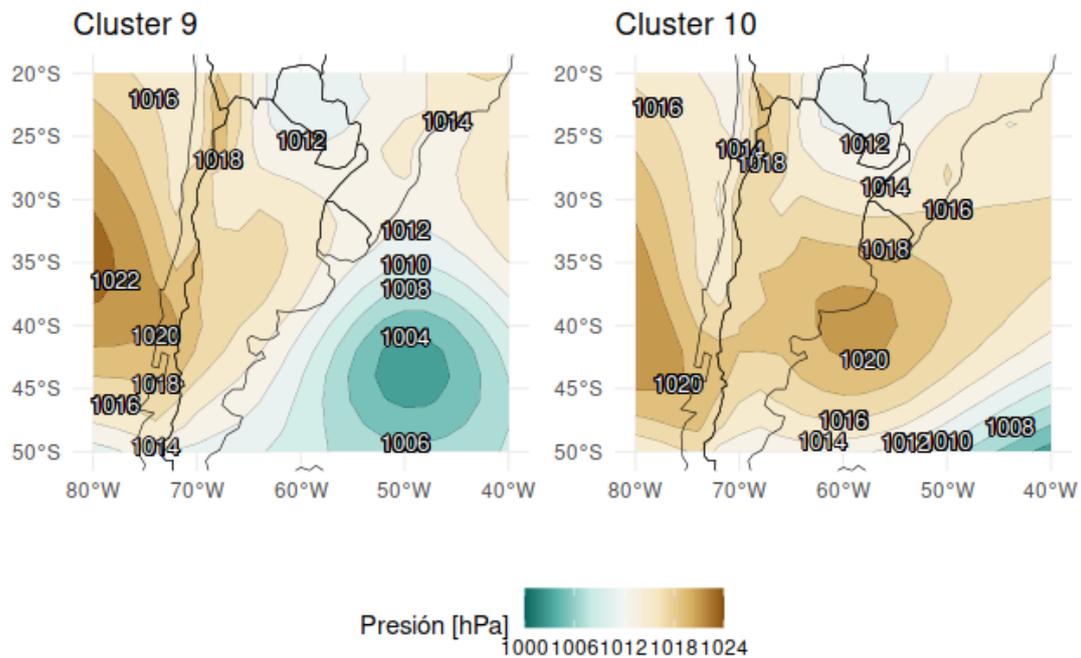
Los PS-7 y PS-8 asociados al clúster 7 y 8 respectivamente se muestran en 6.8. En el PS-7 se observan dos sistemas de altas presiones, uno sobre el Atlántico y otro sobre el Pacífico. El del Pacífico se encuentra centrado en 80°W y entre los 30° y 40°S con un valor de 1022hPa. El del Atlántico se centra en los 40°W y entre los 30° y los 35°S con un valor de 1018hPa. Sobre el continente hay un sistema de bajas presiones centrado en 65°W y los 25°S con un valor de 1006hPa. Al sur del dominio, entre los 40° y 70°W y los 50°S se encuentra un sistema de bajas presiones de 1000hPa. Este PS presenta un viento de componente predominante del N.

En el PS-8 se destaca un intenso sistema de altas presiones en el Pacífico ubicado en los 80°W y entre los 30° y 35°S con un valor de 1024hPa. También se ubica un sistema de bajas presiones en 60°W y 20°S que se extiende hasta el N de Uruguay. Esta configuración favorece vientos con componente sureste.

Los dos últimos dos PS correspondientes a los clúster 9 y 10 (PS-9 y PS-10) se muestran en la figura 6.9.



**Figura 6.8:** Patrón sinóptico asociado al clúster 7 (PS-7) (izq.) y patrón sinóptico asociado al clúster 8 (PS-8) (der.).



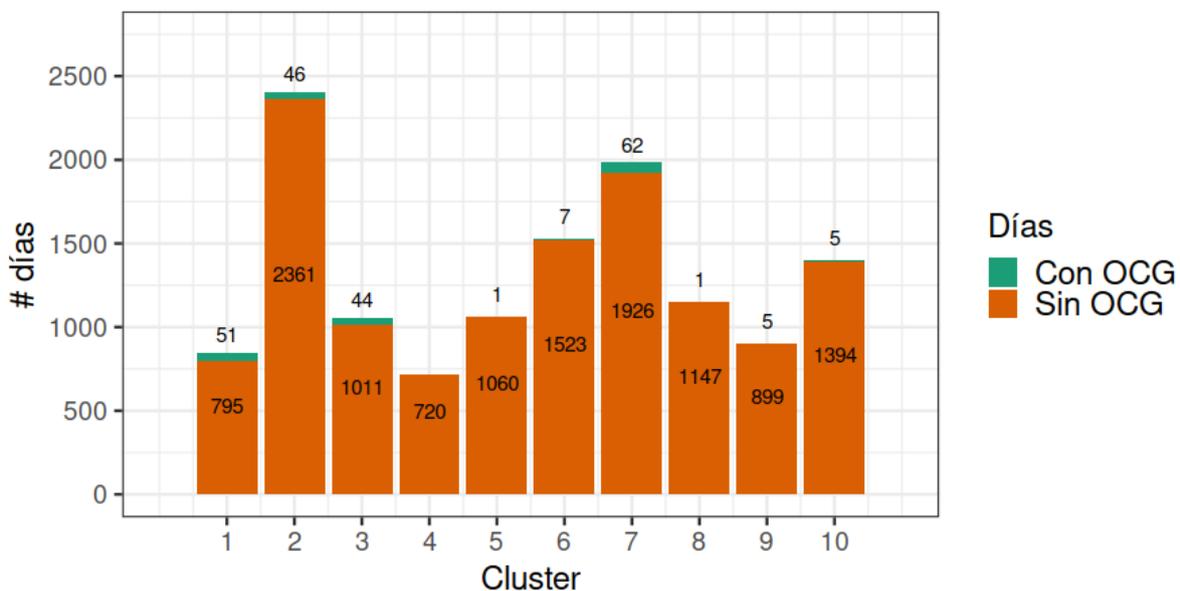
**Figura 6.9:** Patrón sinóptico asociado al clúster 9 (PS-9) (izq.) y patrón sinóptico asociado al clúster 10 (PS-10) (der.).

El PS-9 representa una sistema de bajas presiones en el Atlántico al SE de Uruguay centrado en 50°W y 45°S con un valor en su centro de 1004hPa. Sobre el Pacífico, se encuentra una alta de 1022hPa situada en los 80°W y 35°S. Esta configuración sinóptica esta favoreciendo los vientos del suroeste.

El último PS a describir es el asociado al clúster 10, el mismo presenta un sistema de altas presiones centrado de 60°W y 40°S junto con un sistema de bajas presiones centrado en Paraguay de 1010hPa, lo que genera condiciones de vientos predominantes del sector este.

## 6.2. Distribución de los patrones sinópticos y vínculo con las OCG

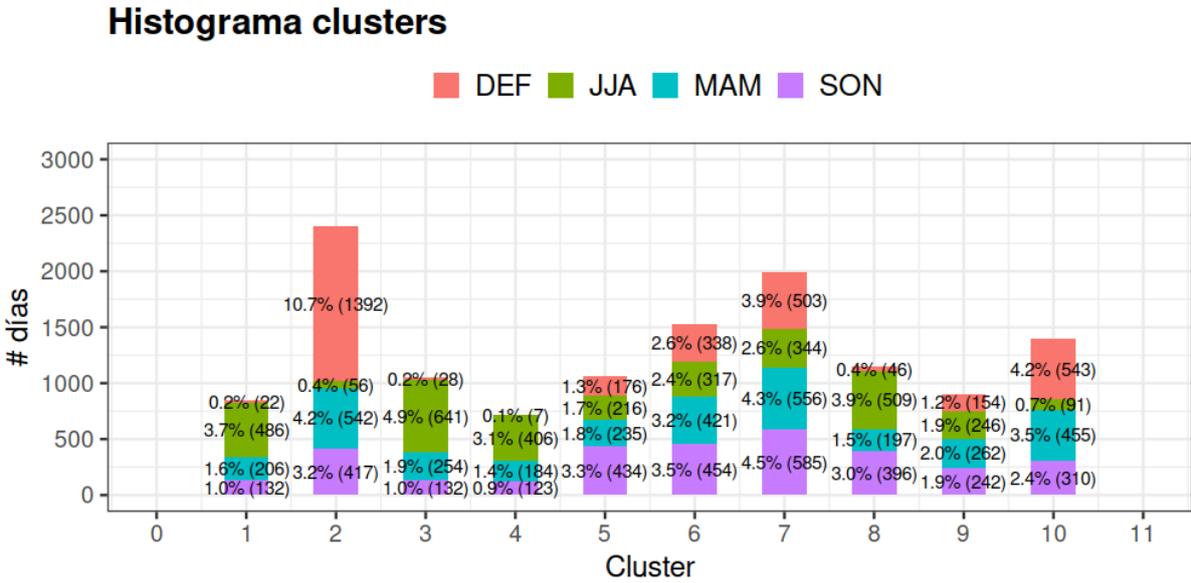
Como paso siguiente a la determinación de los 10 PS, se analiza como es la distribución entre los PS definidos. Se realiza un histograma por PS o clúster y se discretizan los días que tienen ocurrencia de OCG. Los resultados se observan en la figura 6.10. Se puede apreciar que los clúster con mayor porcentaje de datos es el PS-2 que concentra un 18.4 % de los datos, seguido por el PS-7 con 15.3 %, el PS-6 con el 11.6 % y el PS-10 con 10.7 %, el resto de los PS- oscilan entre el 9.8 % (PS-3) y el menor porcentaje lo tiene el PS-4 con el 5.5 % de los datos. Sobre los PS que tienen días con OCG, se concentran principalmente en 4 PS. El que presenta más días con OCG es el PS-7 con 62 días de OCG, luego lo sigue el PS-1 con 51 días y los PS-2 y PS-3 tienen 46 y 44 casos respectivamente. El PS-4 es el único que no presenta días con OCG. El resto de los PS presentan pocos días con OCG, 7 días para el PS-6 y los restantes presentan 5 y 1 día con OCG. Los cuatro PS que se definieron con un mayor número de días con OCG, todos ellos presentan componente del viento con dirección norte o noreste.



**Figura 6.10:** Histograma de la cantidad ( ) de días en cada PS o clúster, discretizando en cada clúster los días que presenta OCG.

A continuación se discrimina los PS por estación del año DEF, MAM, JJA y SON. Los resultados se muestran en la figura 6.11. Se puede observar que el PS-1 es un PS mayormente de invierno con el 57.9 % de los datos. Los PS-3, PS-4 y PS-8 son tam-

bién patrones mayormente de invierno El PS-2 concentra el 58.3 % de los datos en el verano. Luego, los PS-5, PS-6, PS-7 y PS-9 son casi proporcionales en todas las estaciones del año con algunas diferencias menores. El PS-10 es mayoritariamente de verano y otoño.

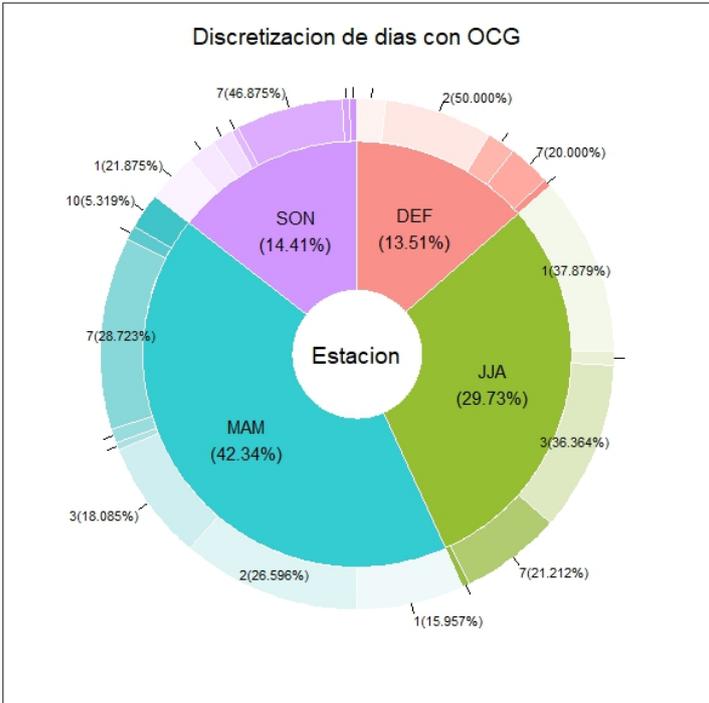


**Figura 6.11:** Histograma de la cantidad (#) de días en cada PS discretizando por estación del año.

Dado el desequilibrio en la cantidad de días en cada PS, así como en la cantidad de días con y sin OCG, resulta crucial complementar el análisis calculando los porcentajes correspondientes para cada estación del año. De esta manera, se puede comprender qué PS es más característico o frecuente en cada estación, así como determinar qué estación del año predomina dentro de cada PS. Es importante tener en cuenta también el desequilibrio entre los días con y sin OCG dentro de cada PS, ya que la distribución de días por PS puede no reflejar las mismas proporciones en los días con OCG.

Los 4 PS que presentan más días con OCG son el PS-1, PS-2, PS-3 y PS-7. El PS-1 y el PS-3 son mayoritariamente de invierno, el PS-2 de verano y el PS-7 es el que presenta mayor distribución entre las estaciones del año. Para continuar con el análisis se grafica un diagrama de torta de los días con OCG discretizando por estación del año y PS. Los resultados se pueden observar en 6.12 En DEF el PS-2 capta el 50 % de los casos seguido del PS-7 con el 20 %. En SON se tiene que el 46.9 % de los días son del PS-7 acompañado del PS-1 con un 21.9 %. En JJA se destacan el PS-1 y PS-3 con 37.9 % y 36.4 %, seguido del PS-7 con el 21.7 %. Para MAM el PS-7 es el que tiene más porcentaje con 28.7 %, seguido del PS-2 con 26.6 %, 18 % el PS-3 y el PS-1 con el 16.0 %. Estos valores también se resumen en la tabla 6.13.

Para definir, cual o cuales, son los PS característicos en cada estación del año, se considera primero la distribución de días sin considera si ocurrieron o no OCG y luego se analiza la distribución de los días con OCG. Del 25 % de los datos que pertenecen a DEF el 10.7 % corresponden al PS-2, seguidos por un 3.9 % del PS-7. Al considerar el porcentaje con OCG (ya mencionado en esta sección) el 50 % de los casos corresponden al PS-2. Lo que permite inferir que si consideramos el porcentaje de datos DEF (condicionado o no por las OCG), este semestre es caracterizado principalmente por el PS-2. Al analizar MAM, el PS-2 del 25 % reúne el 4.2 % de los datos seguido de el PS-7 con un 4.3 %, el resto se divide homogéneamente entre todos los demás PS, si consideramos la suma días con OCG en esos PS suman 53 %, lo que nos lleva a considerar que MAM es caracterizado pos los PS-2 y PS-7. Siendo el PS-2 el más destacado en los dos trimestres (MAM y DEF).



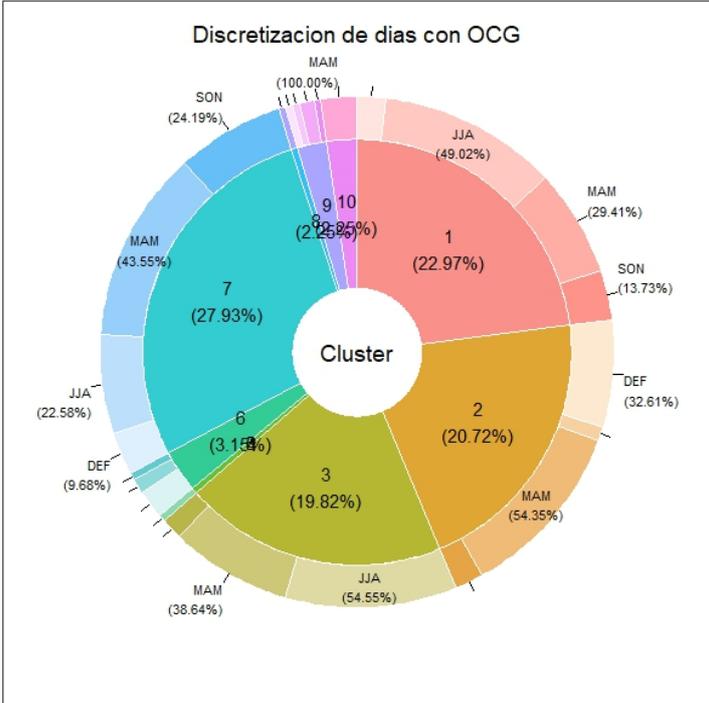
**Figura 6.12:** Gráfico de torta del porcentaje de días con OCG discretizando por estación del año y PS.

En JJA del 25 %, 4.9 % son del PS-3 y un 3.7 % al PS-1, el PS-7 tiene un 2.6 %. Pero el 74 % de los días con OCG pertenecen al PS-1 y PS-3 con 38 % y 36 % respectivamente, siendo considerados como PS característicos de JJA. SON tiene un 4.5 % de los datos en el PS-7, el PS-2 el 3.2 % y los PS-1 y P2-2 con 1.0 % cada uno (del 25 %) y la distribución con OCG es del 47 % para el PS-7 y 22 % para el PS-1. Con estos datos es que definimos el PS-7 como el característico de SON, teniendo presente que el PS-7 presenta días con OCG en todas las estaciones pero en menor medida.

En síntesis, DEF es asociado principalmente al PS-2, SON al PS-7 (únicos trimestres con un solo PS asociado y con menor cantidad de OCG registradas). El trimestre MAM a los PS-7 y PS-2 (ambos compartidos con SON y DEF, respectivamente). Y JJA al los PS-3 y PS-1 (ambos PS exclusivos del invierno).

Clúster	DEF	JJA	MAM	SON
1	4	25	15	7
2	15	2	25	4
3	0	24	17	3
4	0	0	0	0
5	0	0	1	0
6	4	0	2	1
7	6	14	27	15
8	0	0	0	1
9	1	1	2	1
10	0	0	5	0

(a)



(b)

**Figura 6.13:** (a) Cantidad de días con OCG discretizando por estación del año y PS. (b) Gráfico de torta del porcentaje de días con OCG discretizando por estación del año y PS.

### **6.3. Análisis de estabilidad de los patrones sinópticos en las OCG**

El propósito es examinar cómo se comportan los PS durante los días de una OCG y analizar las transiciones internas de cada OCG. Se observa en términos generales, que los PS mantienen y/o repiten en cada OCG. A modo de ejemplo, la OCG que ocurrió entre el 18/03/1980 al 24/03/1980 presenta 3 días consecutivos del PS-2 y 4 días también consecutivos del PS-7 (PS característicos de MAM). La OCG del 26/02/1987 al 5/03/1987 presenta 7 (de los 8 días) en el PS-2 y un día solo al PS-10 (sexto día). Esto demuestra una dispersión pero dentro de los PS característicos de cada estación del año, principalmente en las OCG más cortas, notando que cuanto más largas presentan mayor cambio de PS. Un caso particular es la OCG más extensa, y con mayor potencial de cambios en los PS, ocurrió entre el 20/04/1980 y el 29/04/1980, transitó todos los PS asociados a las OCG incluyendo el PS-10, lo que fue la variación máxima de 5 PS dentro de una misma OCG. Los resultados de los PS dentro de las OCG se presentan en el Anexo 3 las OCG junto con los PS asociados a cada día de la ola, detallando los PS de las 50 OCG dentro del período analizado en esta sección.

En este trabajo se exploraron cantidades de PS menores al  $k = 10$  fijado. Al reducir el número  $k$  de clústers o PS, se pasaba de tener 4 PS con viento predominante del N y NE (que son los 4 PS que presentan la mayor cantidad de OCG), a tener 2 o 3 PS dependiendo del  $k$  explorado. Al momento de tomar la decisión del  $k = 10$ , se consideró como mejor opción tener más de un PS que contenga días con OCG ya que uno de los objetivos es determinar los PS asociados a las OCG. Además, este criterio es reversible, ya que algunos estudios optan por agrupar los PS según similitudes o discrepancias entre ellos, tal como lo muestra el trabajo de Lee et al. [2023](#), que realiza este proceso para caracterizar los PS que no se agrupan con los PS más frecuentes de su estudio, definiendo un PS como '*No regime*'. Los PS que presentan OCG (PS-1, PS-2, PS-3 y PS-7) pueden ser reagrupados en un solo PS por sus similitudes espaciales, lo que daría como resultado una estabilidad de PS en los días de cada OCG.

### **6.4. Análisis de los patrones sinópticos asociados a las OCG por estación del año.**

El último análisis que se realiza en este capítulo es explorar cuál es la diferencia entre los días con OCG y los que no lo son dentro de cada PS. Para esto se filtran los días

con OCG por PS y se analizan las diferencias de los casos con OCG y sin OCG. Luego se compara si las diferencias son significativas mediante el T-test con una significancia del 10 % Wilks, 2011. El análisis se separa por estación del año y en cada estación se analizan los PS involucrados acordes a la caracterización de la sección 5.3.2.

Las variables comprendidas en este análisis son SLP, z500 y z300 . SLP, z500 y z300 son variables atmosféricas que proporcionan información sobre el estado de la atmósfera en diferentes niveles verticales. La elección de estas variables es poder identificar las diferencias en la circulación de la atmósfera de manera tridimensional. La variable z500 es una medida de la altura en la atmósfera a una presión específica, en particular en 500hPa, que está aproximadamente a la mitad de la atmósfera. z300 representa un nivel más alto y es utilizada para analizar la atmósfera alta. Ambas variables proporcionan información sobre la estructura vertical de la atmósfera y es útil para analizar la circulación atmosférica de manera integral. Las áreas de altos valores de z500 (o z300) generalmente están asociadas con la presencia de un anticiclón en la atmósfera media (o alta) y viceversa, pero para ciclones en los niveles correspondientes. Su valor se mide en metros [m] y generalmente esta vinculado con a la temperatura media de esa capa de atmósfera, temperaturas medias más altas, implican z más altos.

En latitudes medias de 35°S a 40°S, la altura de geopotencial en 500hPa toma valores del orden de 5400 y 5500 metros y puede variar según la ubicación, las condiciones meteorológicas específicas y la época del año. Las variaciones típicas pueden ser desde cincuenta a cientos de metros dependiendo de las condiciones de la atmósfera. Para z300 los valores medios rondan los 9000m a 10000m con variaciones superiores a z500 pero del mismo orden.

A continuación se analizaran las diferencias de los PS característicos y enmarcados en cada estación del año.

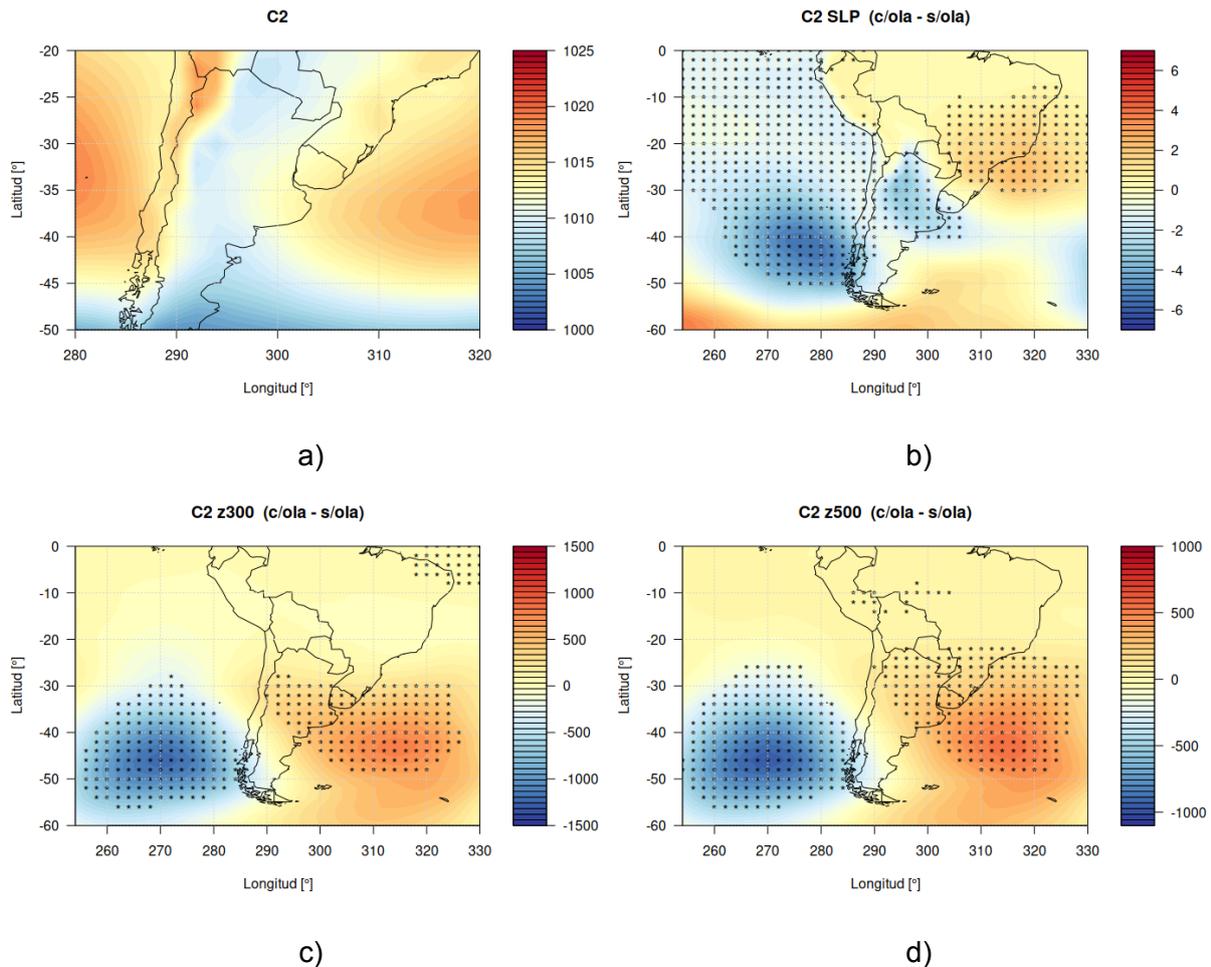
#### **6.4.0.1. Verano (DEF)**

El verano fue caracterizado por el PS-2, en la figura 6.14 se muestran para el PS-2 (C2 indicado en la figura), los composite del PS-2 (a); la diferencia de SLP del PS-2 de los días con OCG y sin OCG en hPa (b); la diferencia de z300 del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-2 de los días con OCG y sin OCG en metros (d). Donde los puntos negros de b), c) y d) indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.

El PS-2 se destaca por vientos del noreste y es determinado por la presencia de un sistema de alta presión en el Atlántico, ubicado entre 35° y 40°S, y 320° de longitud. En

el lado este de la cordillera de los Andes, desde Paraguay hasta los 45°S, se identifica una área de bajas presiones (6.14.a). Al comparar los campos de SLP con y sin OCG (6.14.b) se observa que las diferencias más importantes son tres (con valores significativos). La primera es una región más positiva de presiones al NE de Uruguay, lo que implica que la alta presión del Atlántico se encuentra más intensa y desplazada al norte de su posición original. Por otro lado el área de bajas presiones al este de la cordillera presenta valores más bajos de presión, indicando una intensificación de ese sistema de bajas presiones. Esta configuración sinóptica favorece que los vientos tengan una componente más norte (y no noreste) e intensificada en su módulo, lo que permite una mayor advección de aire cálido del norte y favorece la ocurrencia de OCG.

El último aspecto destacado es que se observa un área con menores presiones y significativas que abarcan gran parte del océano Pacífico. Los valores más bajos se ubican entre los 40°S y 50°S. Esta diferencia podría estar asociada a la correlación encontrada con el SAM y las OCG en DEF en el capítulo 4.3.1, donde se sugiere que valores negativos del SAM están vinculados con OCG más largas e intensas. El SAM podría ser el factor que influya en estas bajas presiones.



**Figura 6.14:** Composite del PS-2 (a). Diferencia de SLP del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-2 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.

Con respecto a los niveles altos y medios z300 y z500 (6.14.c y 6.14.d respectivamente), se observan dos regiones que presentan diferencias significativas en ambos niveles y coincidentes espacialmente. Una región que abarca el norte argentino, Uruguay y se extiende hacia el Atlántico con diferencias positiva del orden de los 500m (aproximadamente un 10 % más de sus valores típicos) y diferencias negativas centradas en los 45°S y 270° W con un valor negativo también del orden de los 800m (aproximadamente un 8 % menos de sus valores típicos). Si bien se trata de diferencias respecto a los campos de z300 y z500 (no mostrados), dan la pauta que en niveles medios y altos las diferencias de los días con OCG, están vinculadas a una diferencia que promueve una circulación anticiclónica en el Atlántico y ciclónica entre los 45°S y 270° W.

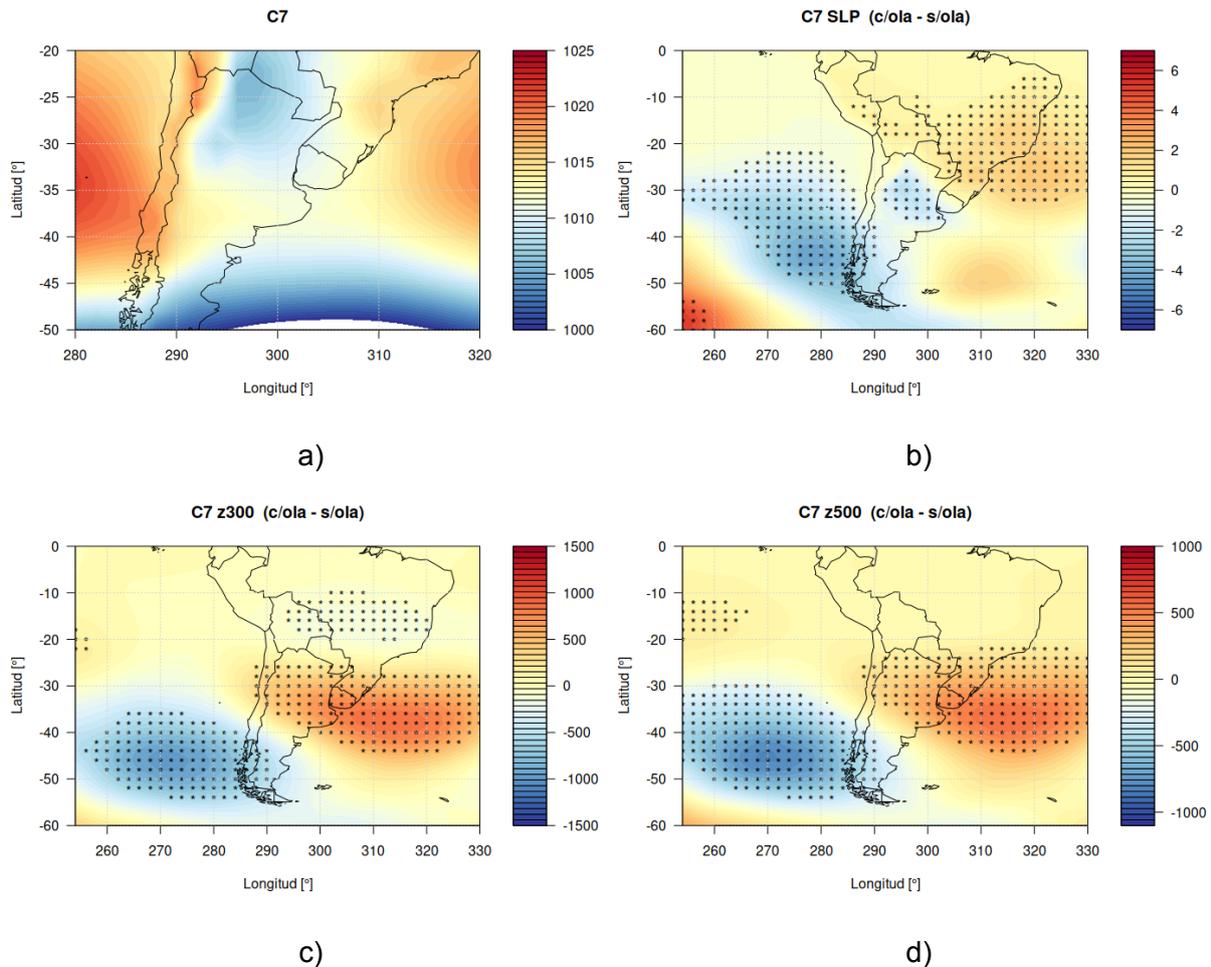
#### 6.4.0.2. Otoño (MAM)

Con respecto al otoño los PS característicos son el PS-2 y el PS-7. El PS-2 es compartido con el verano, de las 28 OCG de MAM 10 pertenecen a las primeras 3 décadas y 18 a las 3 últimas (más los 5 años de 2010 a 2014), en el análisis de tendencia de temperaturas (sección 2.4.2) se observó que MAM presenta una tendencia significativa de las  $T_n$ , motivos que podrían estar asociado a la mayor ocurrencia de OCG en las últimas décadas, un análisis complementario y sugerido para trabajos futuros, podría ser analizar las tendencias de la cantidad de días del PS-2 en MAM.

De los dos PS involucrados en MAM, resta analizar el PS-7 que se muestra en la figura 6.15.a (idem. 6.14 para PS-7). En el PS-7, se identifican dos sistemas de altas presiones, uno sobre el Pacífico localizado en  $280^\circ$  W de longitud y entre los  $30^\circ$  y  $40^\circ$  S. Mientras que el otro sistema es en el Atlántico y se centra en  $320^\circ$  W de longitud y entre los  $30^\circ$  a  $35^\circ$  S. Sobre Paraguay y al hacia el norte de Argentina se observa un sistema de bajas presiones.

De las diferencias encontradas para SLP se destaca un fortalecimiento del sistema de altas presiones del Atlántico y hacia el norte de Uruguay y un debilitamiento significativo de la alta del Pacífico. La baja se intensifica sobre el norte argentino. Tanto la intensificación de la alta del Atlántico como el fortalecimiento de la baja sobre el norte argentino refuerzan el viento del norte. En cuanto a los niveles medios y altos de la atmósfera se encuentra el mismo comportamiento espacial que en el PS-2 pero más confinado en la latitud, la magnitud de la diferencias son de valores similares.

Los dos PS de MAM presentan pocas diferencias en los días con OCG y los que no tienen. Si bien tienen diferencias en los patrones en superficie, las mismas no justifican un análisis diferencial, pudiendo ser reunidas en un mismo PS.



**Figura 6.15:** Composite del PS-7 (a). Diferencia de SLP del PS-7 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-7 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-7 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.

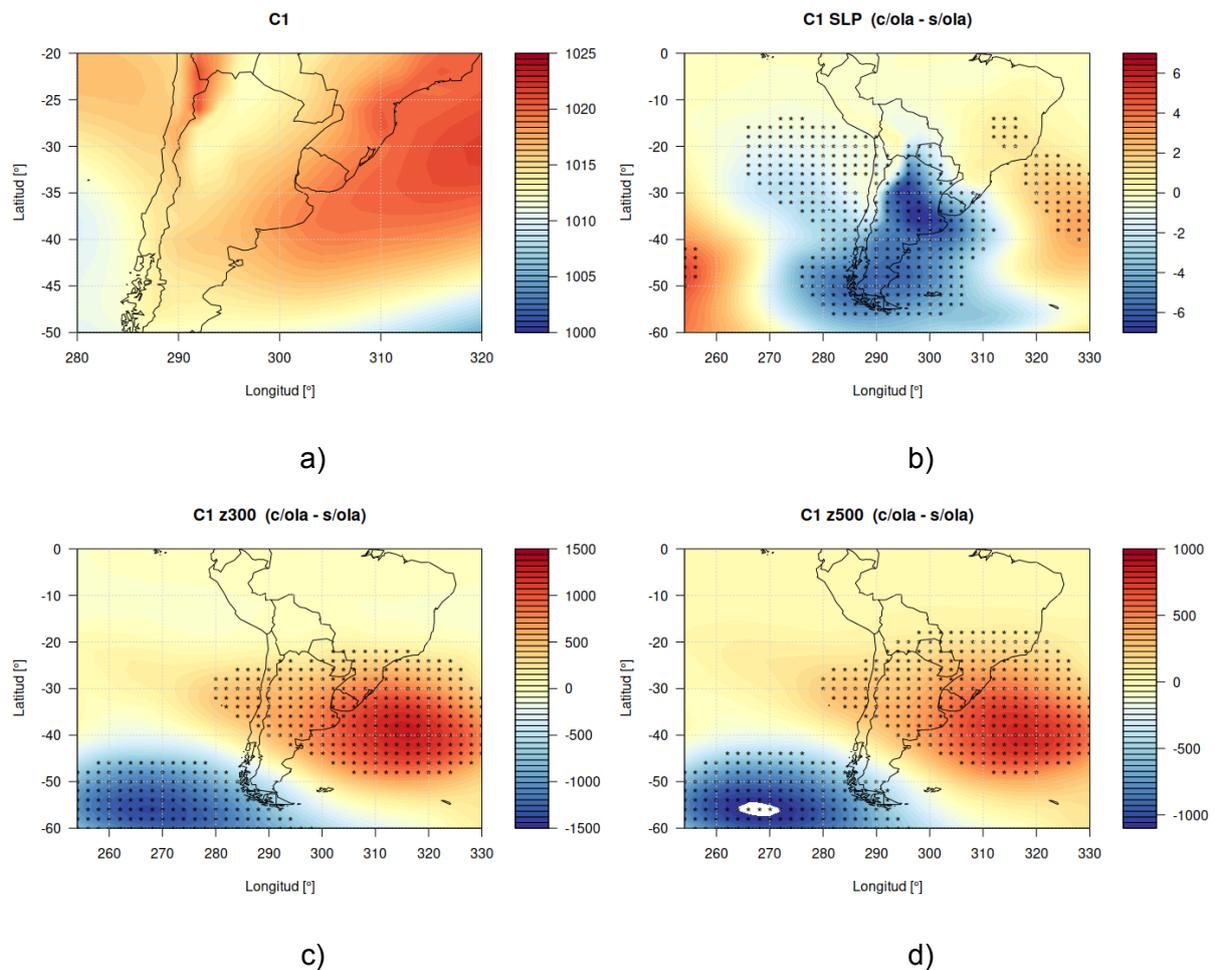
### 6.4.0.3. Invierno (JJA)

En el invierno se definieron como predominantes el PS-1 y el PS-3, para los cuales se realiza el mismo análisis que con los PS anteriores. Las figuras 6.16 y 6.17 presentan los resultados similares a los casos anteriores.

El PS-1 se caracteriza por un sistema de altas presiones intenso y centrado en 30°S y 320° W de longitud. En el norte Argentino se observan presiones normales del orden de 1013hPa. Dando como resultado una prevalencia de los vientos del noreste.

En relación a las diferencias de SLP (ver Figura 6.16.b), se destacan las principales disparidades entre los casos con y sin ocurrencia de OCG en el norte de Argentina y Uruguay, marcando un descenso de la presión de hasta 6 hPa. Además, se observa

un fortalecimiento del anticiclón del Atlántico, con un aumento de la presión de 2 a 3 hPa.

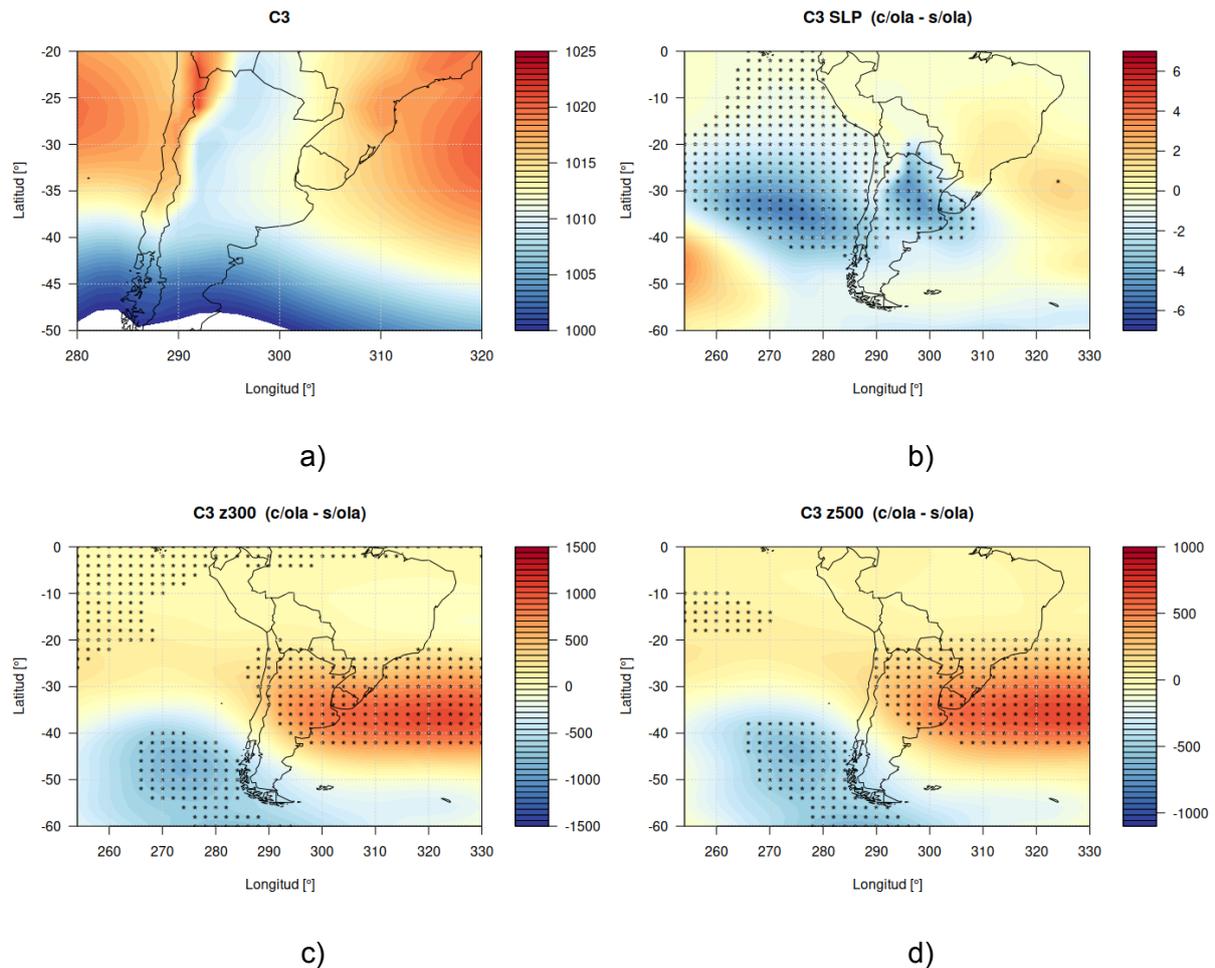


**Figura 6.16:** Composite del PS-1 (a). Diferencia de SLP del PS-1 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-1 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-1 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.

Estas diferencias, al igual que en los otros dos PS ya analizados refuerzan el viento del norte. En altos niveles (6.16.c y 6.16.d) se observan las mismas regiones con diferencias en el mismo sentido que en el PS-2, pero más intensas en su módulo.

El PS-3, mostrado en la figura 6.17, muestra un sistema de altas presiones en el Atlántico, centrado alrededor de los 30°S y 320° W de longitud, así como otra alta presión en el Pacífico, situada en los 280° de longitud y también a los 30°S. En el lado este de la cordillera de los Andes, se observan bajas presiones con valores similares a los del PS-2. Aunque presenta un patrón espacial similar al del PS-2, todos los sistemas parecen desplazados hacia el norte. Además, en las latitudes más altas, las presiones son más bajas en comparación con el PS-2. Esta disposición favorece vientos con compo-

nente norte en Uruguay, en contraste con el PS-2, donde predominan los vientos del noreste.



**Figura 6.17:** Composite del PS-3 (a). Diferencia de SLP del PS-3 de los días con OCG y sin OCG [hPa] (b). Diferencia de z300 del PS-3 de los días con OCG y sin OCG [m] (c). Diferencia de z500 del PS-3 de los días con OCG y sin OCG [m](d). Los puntos negros indican las regiones donde la diferencia es significativa al 10 %.

Las diferencias de SLP 6.17.b son muy marcadas frente a los otros tres PS analizados, en particular el Ps-1 de la misma estación. El alta del Atlántico se mantiene sin cambios significativos, pero si se debilita la región del centro y norte de Argentina y Uruguay. El anticiclón del Pacífico se debilita en gran parte. Entre los 45°S y 60°S no presentan cambios significativos.

Los niveles medios y altos presentan el mismo patrón espacial desplazado hacia el norte y más débiles en módulo, desplazamiento típico de la estación del año. Esta estructura también es muy similar a los bloqueos descritos por Giacosa, 2018 para JJA, donde en dicho trabajo también se destaca que el invierno presenta una mayor cantidad de días con condiciones de bloqueo con respecto al verano, pasando de 35

días con bloqueos (verano) a 239 (invierno).

Dadas las diferencias identificadas entre los dos PS de JJA en los casos con y sin olas de calor, con estructuras diferentes tanto en los composites como en las diferencias en los distintos niveles, es apropiado considerarlos estos dos PS como independientes.

#### **6.4.0.4. Primavera (SON)**

El patrón sinóptico predominante en primavera es el PS-7, el cual se comparte con el otoño, ambas son estaciones intermedias. En el otoño, a diferencia de la primavera, se observa mayoritariamente en todo el país una tendencia positiva en las temperaturas máximas y mínimas (véase la sección 2.4.2). Sin embargo, esta tendencia positiva de las temperaturas no se refleja de manera clara en un aumento o mayor cantidad de OCG.

## **6.5. Síntesis del capítulo**

Como primer resultado de este capítulo, se destaca la revisión bibliográfica que analiza los antecedentes en Uruguay y la región en cuanto a los PS. En segundo lugar, se generó una metodología actualizada que permitió determinar los PS para la región 20°S a 50°S de latitud y los 80°W y 40°W de longitud. Se lograron determinar 10 PS para todo el año.

De los 10 PS se encontró que 4 están asociados a días con OCG. Se encontró que dos de ellos presentan una componente predominante del viento del N y los restantes desde el NE. Se encontraron dos PS que predominan en invierno (PS-1 y PS-3), mientras que el PS-2 es predominante del verano. El PS-7 predomina en otoño con el PS-2 y en primavera el PS-7 es el único definido como predominante. Los PS-2 y PS-7 presentan estructuras y diferencias similares entre sí, pudiendo ser considerados como un solo PS lo que tendría a la primavera, verano y otoños con el mismo PS característico de las OCG. Por otro lado el PS-3, como se comentó en la sección 5.3.4.3, presenta similitudes con el PS-2, pero el PS-3 presenta un comportamiento acorde al invierno en su posición. Lo que tendría como resultado un PS que engloba todo el año conformado por los PS-2, PS-3 y PS-7, y el PS-1 característico y exclusivo del invierno.

Al analizar el comportamiento de los PS dentro de los días de OCG, se encontró en términos generales que los PS se mantienen y/o repiten en cada OCG, y la variabilidad encontrada es principalmente dentro de los PS característicos de su estación del año.

# Capítulo 7

## Conclusiones y consideraciones finales

En este trabajo se logró crear una base de datos diaria de temperaturas máximas y mínimas actualizada y de alta calidad, que abarca el período desde 1950 hasta 2014.

Se definen tanto las Olas de Calor (OC) como las Olas de Calor Generalizadas (OCG), considerando diversos enfoques presentes en la literatura y cumpliendo con los objetivos establecidos. Se ha logrado formular una definición que facilita el análisis de las olas de calor a lo largo de todo el año.

Al examinar las tendencias de las OC por estación meteorológica, se observa una tendencia positiva en el aumento de la frecuencia de OC en el norte del país.

Se identificaron y definieron los índices para caracterizar las OCG. Este análisis reveló la ocurrencia de 82 OCG durante los 65 años analizados, lo que representa el 1.45 % de los datos, considerando a las OCG como eventos extremos. Las estaciones del año que presentan mayor cantidad de OCG son el invierno con 33, seguido de otoño con 28, 11 en verano y 10 en primavera. Las tendencias lineales anuales de la cantidad de OCG, su duración y los índices de intensidad analizados no arrojaron resultados significativos.

Se llevó a cabo un análisis interanual para explorar la relación entre aspectos clave de las OCG, como su intensidad, duración y frecuencia, contra varios índices oceánicos y atmosféricos (ENSO, PDO, TSA, SAM) y del estado hidrológico (SPI1, SPI2, SPI3 y SPI6). Durante el verano, se observa que un déficit a largo plazo de precipitaciones se traduce en un aumento tanto en la cantidad como en la intensidad de las OCG, y viceversa. La correlación con el SAM sugiere que valores negativos de este índice están asociados con OCG más prolongadas e intensas, aunque se necesita un análisis

adicional de los patrones sinópticos asociados para comprender mejor estos efectos.

Otro resultado del verano es que durante la fase positiva del ENSO (El Niño), tiende a favorecer la aparición de OCG más largas y menos frecuentes, mientras que durante La Niña se observa una mayor cantidad de OCG, pero de menor duración. Se encontró que durante La Niña, junto con una fase positiva de SAM, las OCG son más frecuentes pero menos intensas y de menor duración. En contraste, durante El Niño y una fase negativa de SAM, las OCG son más prolongadas, menos frecuentes y más intensas debido a la combinación de ambos índices.

En el invierno, se observa una correlación negativa entre el largo de las OCG y la cantidad de estas con los índices de precipitación estandarizada (SPI3 y SPI6), lo que implica que si hay un déficit de precipitación, las OCG ocurren en mayor cantidad y duración (y viceversa).

Se desarrolló una metodología actualizada que posibilita la determinación de 10 PS para la región comprendida entre los 20°S y 50°S de latitud, y los 80°W y 40°W de longitud. Es relevante destacar que este estudio se encuentra entre los primeros en determinar los PS en el sudeste de Sudamérica a lo largo de todo el año.

De los 10 PS analizados, se encontró que 4 de ellos están asociados a días OCG. Dos de estos presentan una componente predominante del viento del norte, mientras que los otros dos presentan predominancia desde el noreste. Se identificaron dos PS predominantes en invierno (PS-1 y PS-3), mientras que el PS-2 es predominante en verano. Durante el otoño, el PS-7 es predominante junto con el PS-2, y en primavera, el PS-7 es el único definido como predominante.

Es importante continuar este trabajo incorporando más años para entender la variación interanual e interdiaria de las OCG, así como complementar con trabajos de modelación numérica para alcanzar una comprensión más completa de este proceso.

Sería interesante considerar la realización del mismo análisis utilizando los datos de reanálisis ERA5, ya que suceden a ERA-Interim y se mantienen actualizados hasta la fecha. Además, la posibilidad de extender el periodo inicial desde 1979 (inicio de ERA-Interim) hasta 1950 (fecha de inicio de los datos observados de temperaturas máximas y mínimas) añadiría mayor robustez al estudio.

Se puede mejorar el proxy de precipitación utilizado para estimar el estado hidrológico de Uruguay de manera más completa, abarcando todo el país y la región. Además, se podría analizar las categorías de los índices de las OCG, como la intensidad y duración, mediante técnicas predictivas de Aprendizaje Automático. En este sentido, los índices de circulación y estado hidrológico podrían emplearse como predictores, explorando

posibles desfases con los índices de OCG y su capacidad predictiva.

Con respecto a los PS, quedan varios aspectos a profundizar e implementar, por ejemplo se puede aplicar algún análisis sobre las transiciones de los PS dentro de cada OCG.

Hasta el momento, un aspecto que aún no se ha concretado es el desarrollo de un paquete de R que simplifique la determinación de PS a partir de campos diarios de cualquiera de las variables utilizadas para definirlos. Esto garantizaría la reproducibilidad de los resultados y promovería una mayor adopción de estas técnicas en el ámbito académico y profesional.

# Bibliografía

- Agosta, E., y Barrucand, M. (2012). Condiciones medias de invierno y ondas cuasi-estacionarias de Rossby asociadas a la frecuencia invernal de noches frías y cálidas en Argentina subtropical. *Geoacta*, 37(2).
- Alvarez, M. S., Vera, C., Kiladis, G., y Liebmann, B. (2016). Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. *Climate Dynamics*, 46(1-2), 245-262.
- Álvarez Fernández, R., et al. (2023). Estudio comparativo de modelos clásicos de series temporales y métodos de machine learning para la predicción de la temperatura diaria de Gijón.
- Arias, R., Mader, T., y Escobar, P. (2008). Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche. *Archivos de medicina veterinaria*, 40(1), 7-22.
- Arizmendi, F., Trinchin, R., y Barreiro, M. (2022). Weather regimes in subtropical South America and their impacts over Uruguay. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9253-9270.
- Balay D'Agosto, F. (2023). *Caracterización del Régimen Climático de la Isla Rey Jorge (Islas Shetlan del Sur, ANTÁRTIDA)* [Tesis de maestría, Universidad de la República - Uruguay. Facultad de Ciencias].
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., y García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332(6026), 220-224.
- Barrucand, M., Rusticucci, M., y Vargas, W. (2008). Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20).
- Bernaards, C. A., y Jennrich, R. I. (2005). Gradient Projection Algorithms and Software for Arbitrary Rotation Criteria in Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 65, 676-696. <https://doi.org/10.1177/0013164404272507>
- Bettolli, M. L., Penalba, O. C., y Vargas, W. M. (2010). Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-

- producing region in Argentina. *Australian meteorological and oceanographic journal*, 60(1), 37-48.
- Bürger, G., Sobie, S., Cannon, A., Werner, A., y Murdock, T. (2013). Downscaling extremes: An intercomparison of multiple methods for future climate. *Journal of Climate*, 26(10), 3429-3449.
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., et al. (2020). Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215-231.
- Carvalho, L. M., Jones, C., y Liebmann, B. (2002). Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. *Journal of Climate*, 15(17), 2377-2394.
- Cavalcanti, I. F. (2016). *Tempo e clima no Brasil*. Oficina de textos.
- Cerne, S., y Vera, C. (2011). Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2265-2277.
- Climate Data Operators (CDO) [Versión 2.3.0]. (2023).
- Collazo, S., Rusticucci, M., y Barrucand, M. (2017). Predictibilidad estacional de los extremos de temperatura en Argentina a partir de la circulación atmosférica de gran escala. *XXVIII Reunión Científica de la AAGG y III Simposio sobre Inversión y Procesamiento de Señales en Exploración Sísmica (La Plata, 2017)*.
- Coronato, T. (2022a). *Olas de calor estivales en el centro-este de Argentina: de la física a los impactos* [Tesis doctoral, Instituto de Física Rosario].
- Coronato, T. (2022b). *Olas de calor estivales en el centro-este de Argentina: de la física a los impactos* [Tesis doctoral, Instituto de Física Rosario].
- Davies, B. (2024). Recent Blog Posts [Accessed on March 2, 2024. Available at: <https://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/southern-annular-mode/>].
- de Mello, S. (2013). *Estudio climatológico y regionalización de heladas meteorológicas en Uruguay* [Tesis de grado]. Universidad de la República - Uruguay. Facultad de Ciencias / Facultad de Ingeniería.
- de Oliveira, A. S. (1986). *Interações entre sistemas frontais na América do Sul ea convecção da Amazônia* [Tesis doctoral, INPE].
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, d. P., et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
- Dereczynski, C., Chou, S. C., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, P., Tavares, P., Chagas, D., Gomes, J. L., Rodrigues, D. C., y de los Milagros Skansi, M. (2020). Downscaling of climate extremes over South America—Part I: Model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100273.

- Fedorova, N., Carvalho, M. d., y Souza, R. d. S. (2000). Procesos sinóticos en años de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas frontais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 15(2), 57-72.
- Fekete, B. M., Revenga, C., y Todd, M. (2009). 1 The Global Risks Report 2018 13th Edition,[Geneva: World Economic Forum, 2018] [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_GRR18\\_Report.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_GRR18_Report.pdf). *Agricultural Economics*, 31(1), 50-67.
- Fogt, R. L., y Marshall, G. J. (2020). The Southern Annular Mode: variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(4), e652.
- Garreaud, R. (2000). Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, 128(7), 2544-2559.
- Giacosa, G. (2018). *Caracterización de los bloqueos atmosféricos en los Océanos Pacífico Sudeste y Atlántico Sur y su impacto sobre Uruguay* [Tesis doctoral, Universidad de la República - Uruguay. Facultad de Ciencias / Facultad de Ingeniería].
- The Global Risks Report 2023, 18th Edition* [Fecha de acceso: 15 de enero de 2024]. (2023). [www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2023.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf)
- Gong, D., y Wang, S. (1999). Definition of Antarctic oscillation index. *Geophysical research letters*, 26(4), 459-462.
- Gouveia, C. D., Rodrigues Torres, R., Marengo, J. A., y Avila-Diaz, A. (2022). Uncertainties in projections of climate extremes indices in South America via Bayesian inference. *International Journal of Climatology*, 42(14), 7362-7382.
- Grams, C. M., Beerli, R., Pfenninger, S., Staffell, I., y Wernli, H. (2017). Balancing Europe's wind-power output through spatial deployment informed by weather regimes. *Nature climate change*, 7(8), 557-562.
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Hannart, A., Vera, C., Cerne, B., y Otto, F. (2015). Causal influence of anthropogenic forcings on the Argentinian heat wave of December 2013. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), S41-S45.
- Hernández Banadik, M., Álvarez-Castro, I., Da Silva, N., y De Mello, S. (2021). Modelos bayesianos para series diarias: modelado de temperaturas extremas en Uruguay. *Serie Documentos de Trabajo*; 4/21.
- Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., Kyselý, J., y Tveito, O. E. (2008). Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 105-152.

- Izquierdo, A., Manzano, M., Martín, Q., Montero, J., y Salazar, J. (2012). Evolución temporal de las olas de calor en la meseta central española, entre 1961 y 2010. *Sociedad Española de Climatología*, 441-448.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., et al. (2018). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. En *Renewable energy* (Vol1\_146-Vol1\_194). Routledge.
- Kayano, M. T., de Oliveira, C. P., y Andreoli, R. V. (2009). Interannual relations between South American rainfall and tropical sea surface temperature anomalies before and after 1976. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(10), 1439-1448.
- Kosatsky, T. (2005). The 2003 European heat waves. *Eurosurveillance*, 10(7), 3-4.
- Kysely, J. (2010). Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect? *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 30(1), 89-109.
- Lee, S. H., Tippet, M. K., y Polvani, L. M. (2023). A new year-round weather regime classification for North America. *Journal of Climate*, 36(20), 7091-7108.
- 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.
- Ludovic, S. (2023). Global boiling: Heatwave may have cost 0.6pp of GDP [[https://www.allianz.com/en/economic\\_research/insights/publications/specials\\_fmo/global-heatwave-implications.html](https://www.allianz.com/en/economic_research/insights/publications/specials_fmo/global-heatwave-implications.html)].
- Mantua, N. J., y Hare, S. R. (2002a). The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58, 35-44.
- Mantua, N. J., y Hare, S. R. (2002b). The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58, 35-44.
- Mantua, N. (1999). The Pacific Decadal Oscillation. A brief overview for non-specialists. *Encyclopedia of Environmental Change*.
- Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of climate*, 16(24), 4134-4143.
- Milligan, G. W., y Cooper, M. C. (1985). An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika*, 50, 159-179.
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C. R., Counsell, C. W., Dietrich, B. S., Johnston, E. T., Louis, L. V., et al. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature climate change*, 7(7), 501-506.
- Mueller, B., y Seneviratne, S. I. (2012). Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(31), 12398-12403.

- Mukadi, P. M., y González-García, C. (2021). Time series analysis of climatic variables in peninsular Spain. Trends and forecasting models for data between 20th and 21st centuries. *Climate*, 9(7), 119.
- Nan, S., y Li, J. (2003). The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. *Geophysical Research Letters*, 30(24).
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) version 5 Dataset [Climate Prediction Center (CPC)].
- Naumann, G. (2009). *Variabilidad intraestacional de alta y baja frecuencia de la temperatura máxima y mínima diaria en Sudamérica. Estudio de la predictabilidad mediante la entropía condicional* [Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires].
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.f.). *Climate Indices* [Febrero de 2024]. <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>
- Olmo, M. E., Espinoza, J.-C., Bettolli, M. L., Sierra, J. P., Junquas, C., Arias, P., Moron, V., y Balmaceda-Huarte, R. (2022). Circulation patterns and associated rainfall over south tropical South America: GCMs evaluation during the dry-to-wet transition season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(12), e2022JD036468.
- Penalba, O. C., y Rivera, J. A. (2015). Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. *Meteorológica*, 40(2), 33-57.
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. d. S., Rehbein, A., Drumond, A., da Rocha, R. P., y 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.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. d., y Ambrizzi, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista brasileira de meteorologia*, 25, 185-204.
- Renom, M. (2009). *Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad temporal de baja frecuencia y su relación con la circulación de gran escala* [Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires].
- Renom, M., de Mello, S., y Badagian, J. (2014). Extreme Temperature Events: Summer Heat Waves and Frost Days in Uruguay-Southeastern South America, ob-

- served changes during 1950-2009. *Congreso American Meteorological Society 94th Annual Meeting, Atlanta, Georgia, USA.*
- Renom Molina, M. (2009). *Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad temporal de baja frecuencia y su relación con la circulación de gran escala* [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales].
- Resumen estadístico y cronológico de las Olas de Calor en la ciudad de Buenos Aires* [Fecha de Acceso: 13 de noviembre de 2023]. (2016). Servicio Meteorológico Nacional - Argentina. [http://www3.smn.gob.ar/serviciosclimaticos/clima/archivo/OlasdeCalor\\_BuenosAires.pdf](http://www3.smn.gob.ar/serviciosclimaticos/clima/archivo/OlasdeCalor_BuenosAires.pdf)
- Robledo, F., Vera, C., y Penalba, O. (2020). Multi-scale features of the co-variability between global sea surface temperature anomalies and daily extreme rainfall in Argentina. *International Journal of Climatology*, 40(9), 4289-4299.
- Rusticucci, M., Kysely, J., Almeida, G., y Lhotka, O. (2016). Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 679-689.
- Rusticucci, M., y Renom, M. (2008). Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal of Climatology*, 28(8), 1083-1095.
- Rusticucci, M., y Vargas, W. (1995). Synoptic situations related to spells of extreme temperatures over Argentina. *Meteorological Applications*, 2(4), 291-300.
- Schumacher, D. L., Keune, J., Van Heerwaarden, C. C., Vilà-Guerau de Arellano, J., Teuling, A. J., y Miralles, D. G. (2019). Amplification of mega-heatwaves through heat torrents fuelled by upwind drought. *Nature Geoscience*, 12(9), 712-717.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., y Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161.
- Seneviratne, S. I., Lüthi, D., Litschi, M., y Schär, C. (2006). Land–atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443(7108), 205-209.
- Servain, J. (1991). Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C8), 15137-15146.
- Shocket, M. S., Verwillow, A. B., Numazu, M. G., Slamani, H., Cohen, J. M., El Moustaid, F., Rohr, J., Johnson, L. R., y Mordecai, E. A. (2020). Transmission of West Nile and five other temperate mosquito-borne viruses peaks at temperatures between 23 C and 26 C. *Elife*, 9, e58511.

- Suli, S., Barriopedro, D., García-Herrera, R., y Rusticucci, M. (2023). Regionalisation of heat waves in southern South America. *Weather and Climate Extremes*, 40, 100569.
- Tencer, B., Bettolli, M. L., y Rusticucci, M. (2016). Compound temperature and precipitation extreme events in southern South America: associated atmospheric circulation, and simulations by a multi-RCM ensemble. *Climate Research*, 68(2-3), 183-199.
- Thompson, V., Mitchell, D., Hegerl, G. C., Collins, M., Leach, N. J., y Slingo, J. M. (2023). The most at-risk regions in the world for high-impact heatwaves. *Nature Communications*, 14(1), 2152.
- Tollefson, J. (2023). Earth just had its hottest year on record — climate change is to blame. *Springer Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02552-2>
- Trenberth, K. E. (1997). The definition of el nino. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2778.
- Vera, D. C. (2023). *Para el Conicet estamos atravesando “las olas de calor más frescas del resto de nuestras vidas”* [Fecha de acceso: 11 de marzo de 2023]. <https://hoydia.com.ar/informacion-general/para-el-conicet-estamos-atravezando-las-olas-de-calor-intensas-mas-frescas-del-resto-de-nuestras-vidas/>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- Witze, A. (2024). Earth boiled in 2023-will it happen again in 2024? *Nature*.
- Wong, C. (2023). Earth’s hottest month: these charts show what happened in July and what comes next. *Springer Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-03523-3>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., y Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870.
- Zhang, X., Yang, F., et al. (2004). RClmDex (1.0) user manual. *Climate Research Branch Environment Canada*, 22, 13-14.

# APÉNDICES

# **ANEXOS**

# Anexo A

## Gráficos datos faltantes

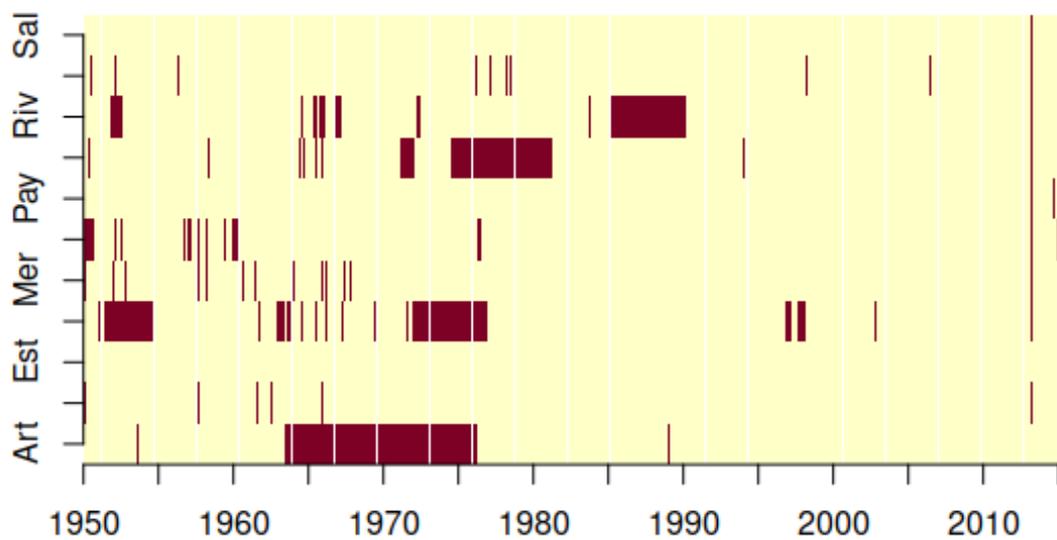
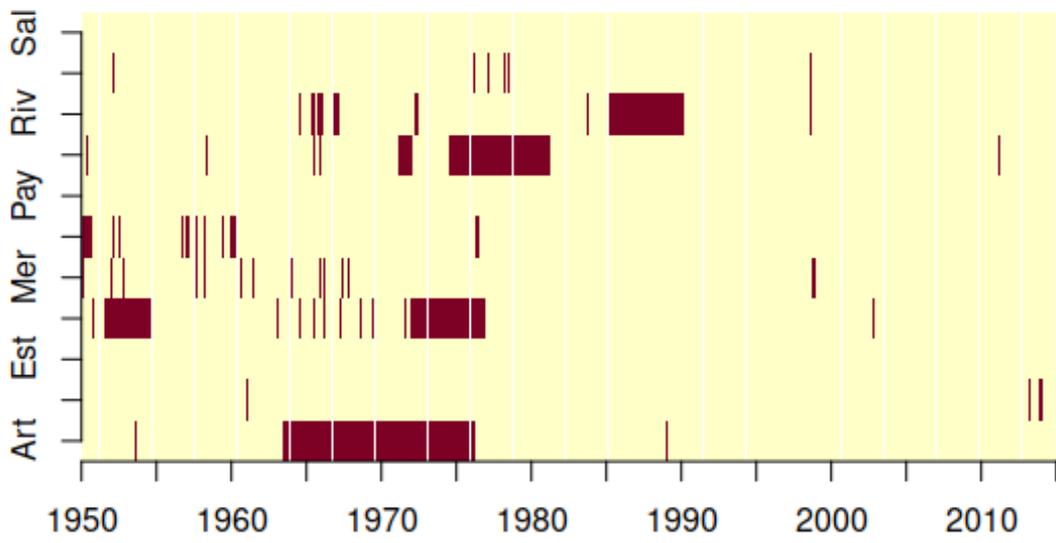


Figura A.1: Datos faltantes de Tx por estación meteorológica.



**Figura A.2:** Datos faltantes de Tn por estación meteorológica.

# Anexo B

## Olas de Calor por estación meteorológica

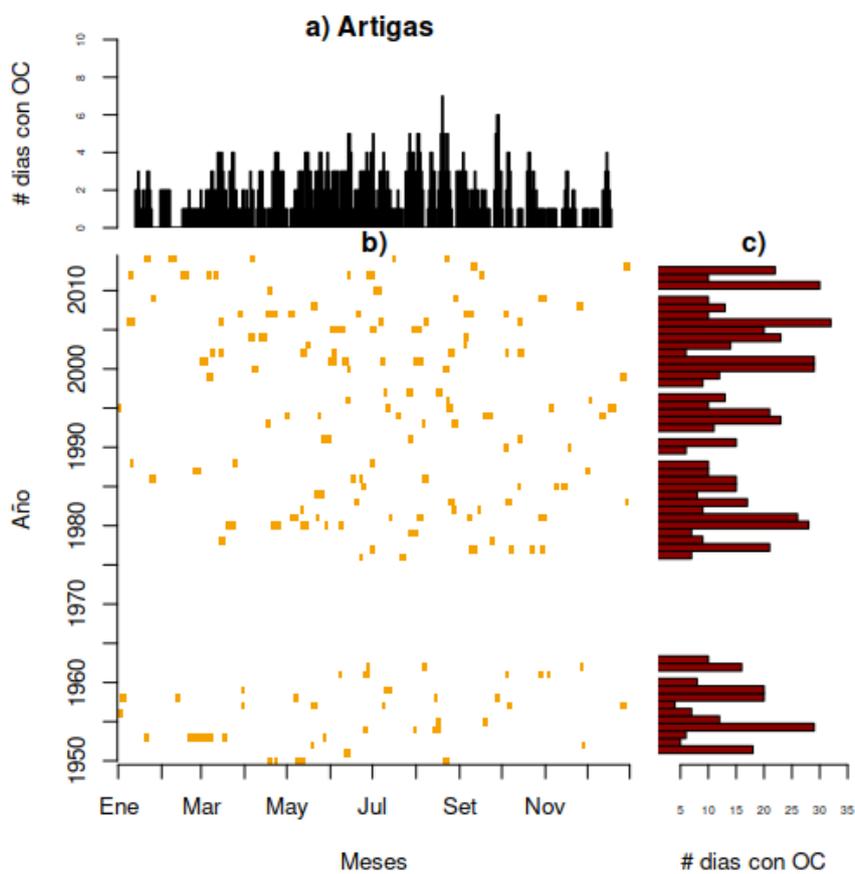
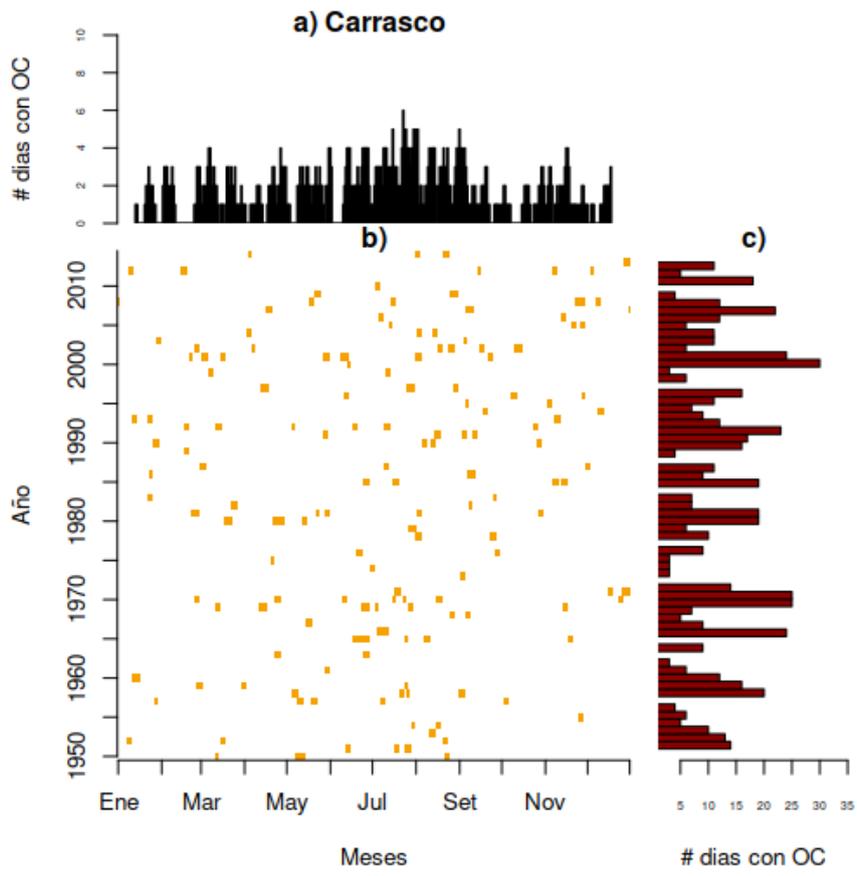
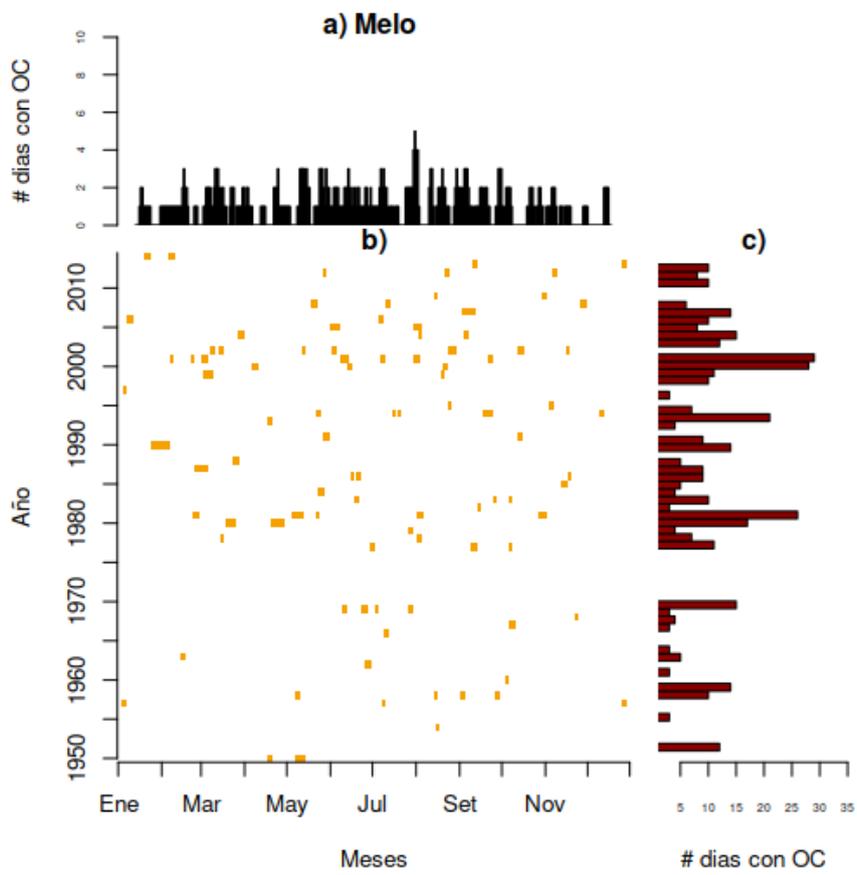


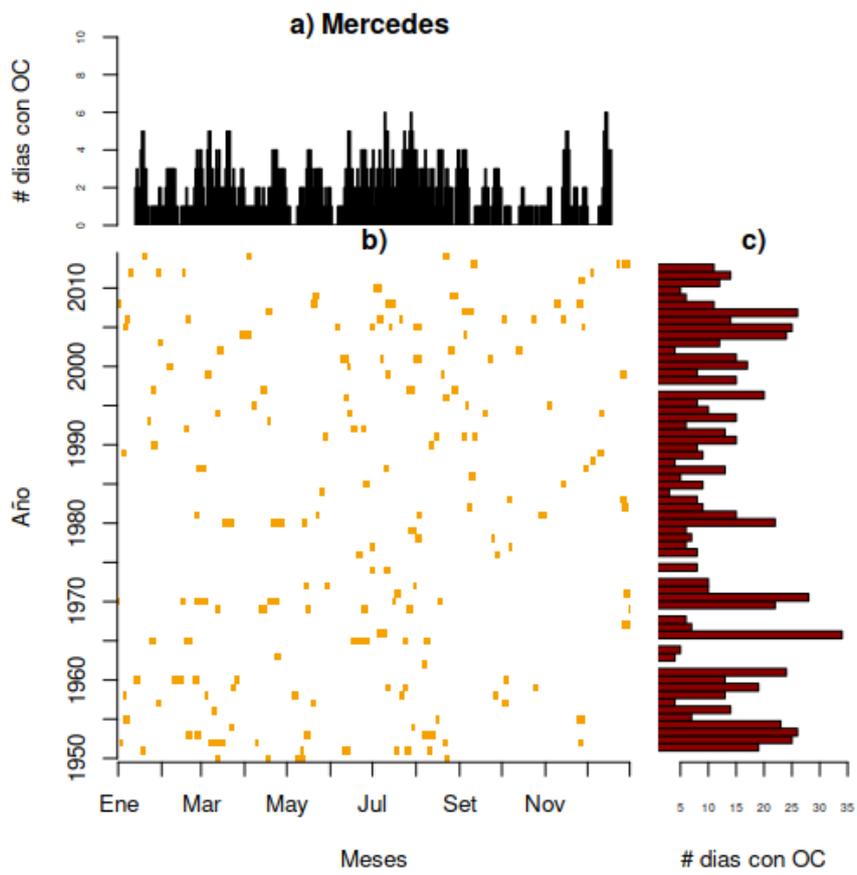
Figura B.1: Olas Artigas.



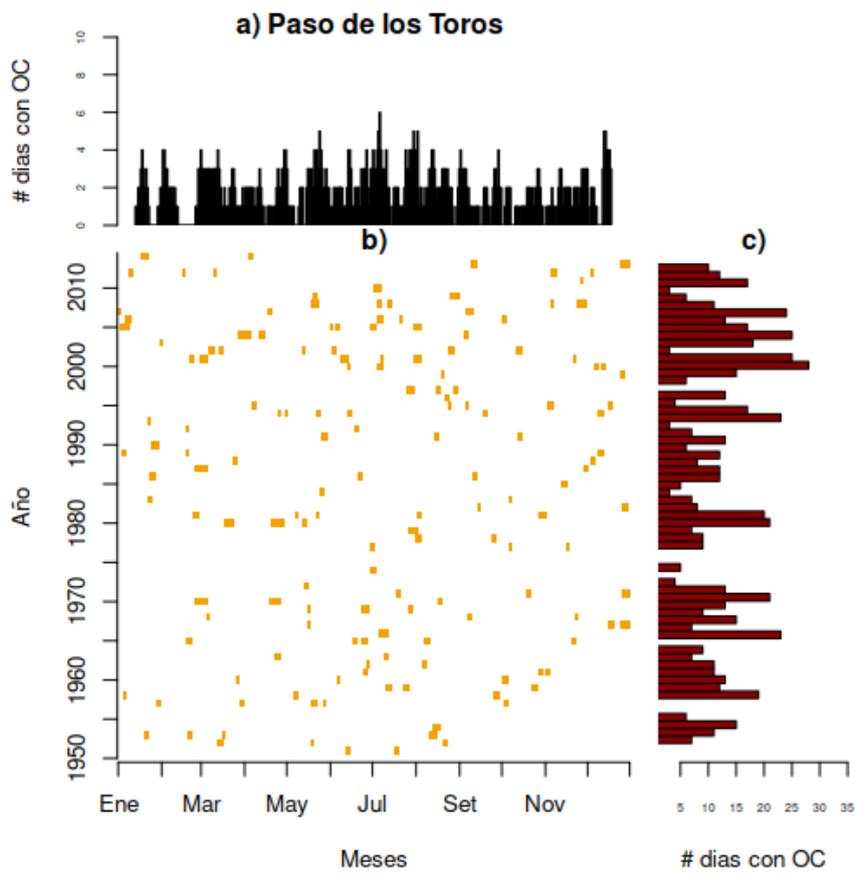
**Figura B.2:** Olas Carrasco.



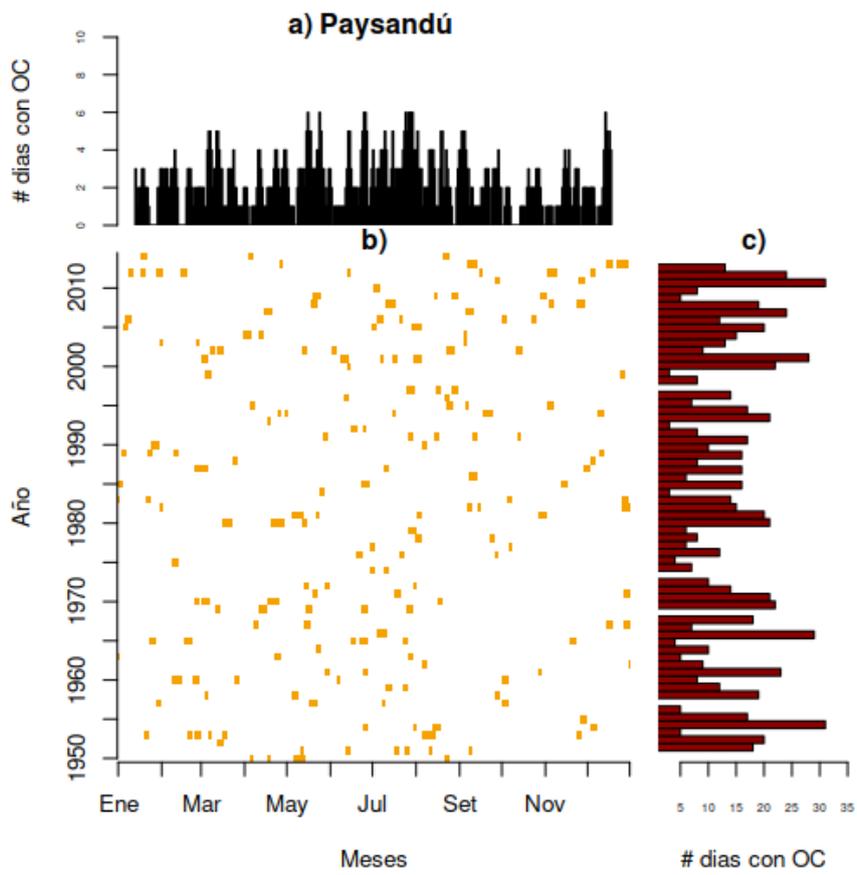
**Figura B.3:** Olan Melo.



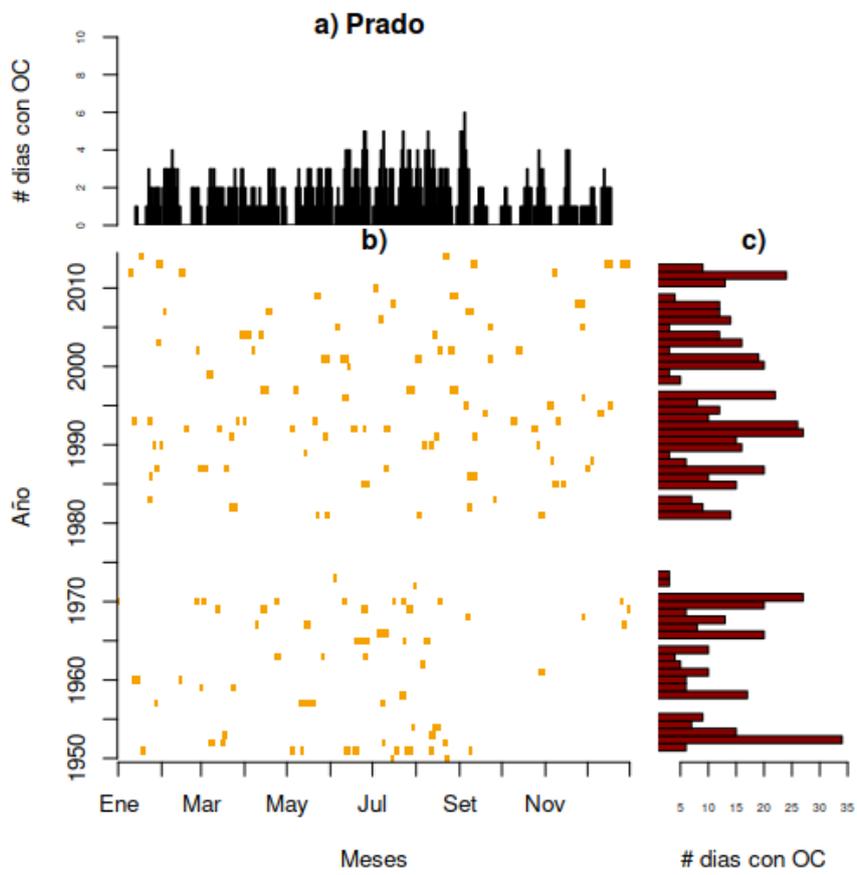
**Figura B.4:** Olas Mercedes.



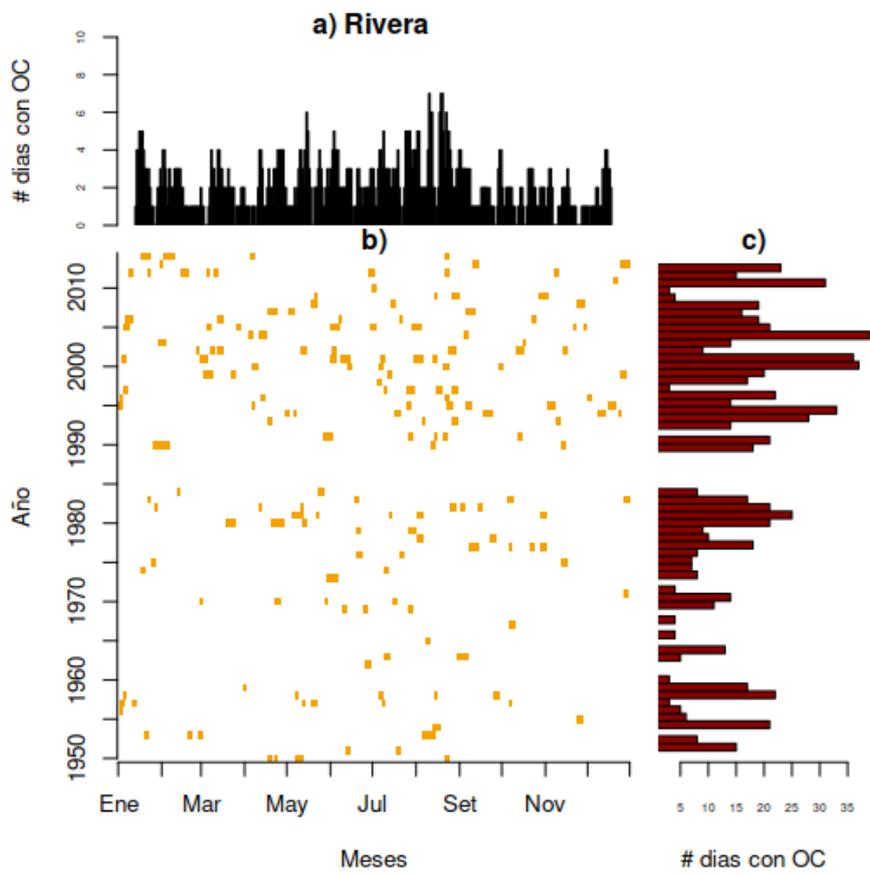
**Figura B.5:** Olas Paso de los Toros.



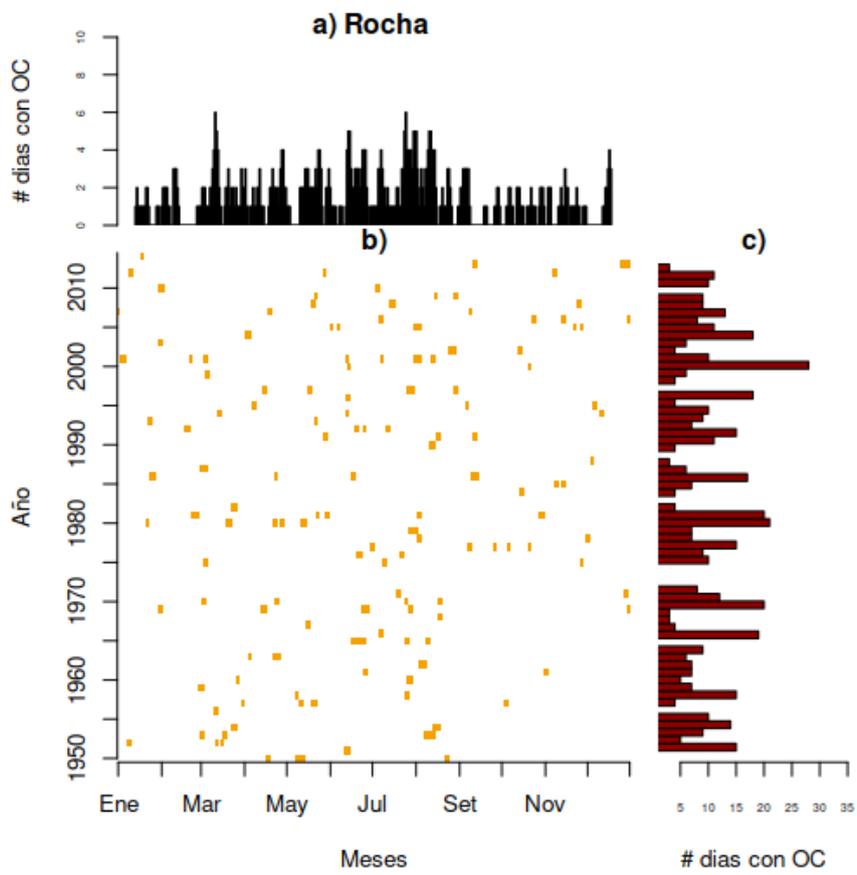
**Figura B.6:** Olas Paysandú.



**Figura B.7:** Olas Prado.



**Figura B.8:** Olas Rivera.



**Figura B.9:** Olas Rocha.

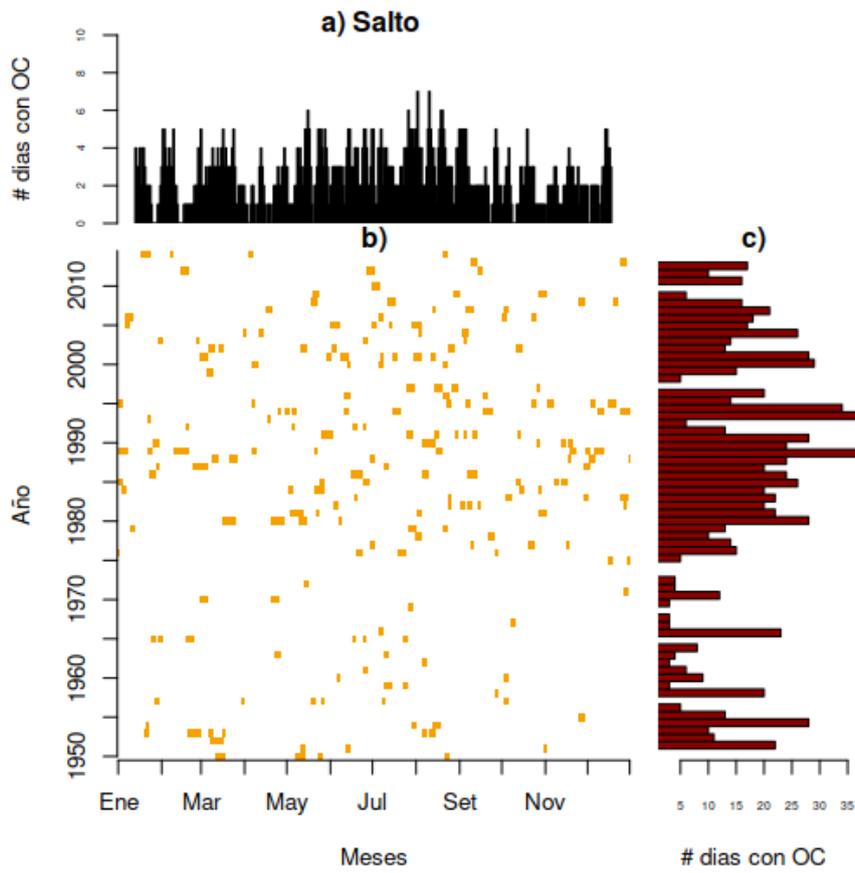


Figura B.10: Olas Salto.

## B.1. Histogramas

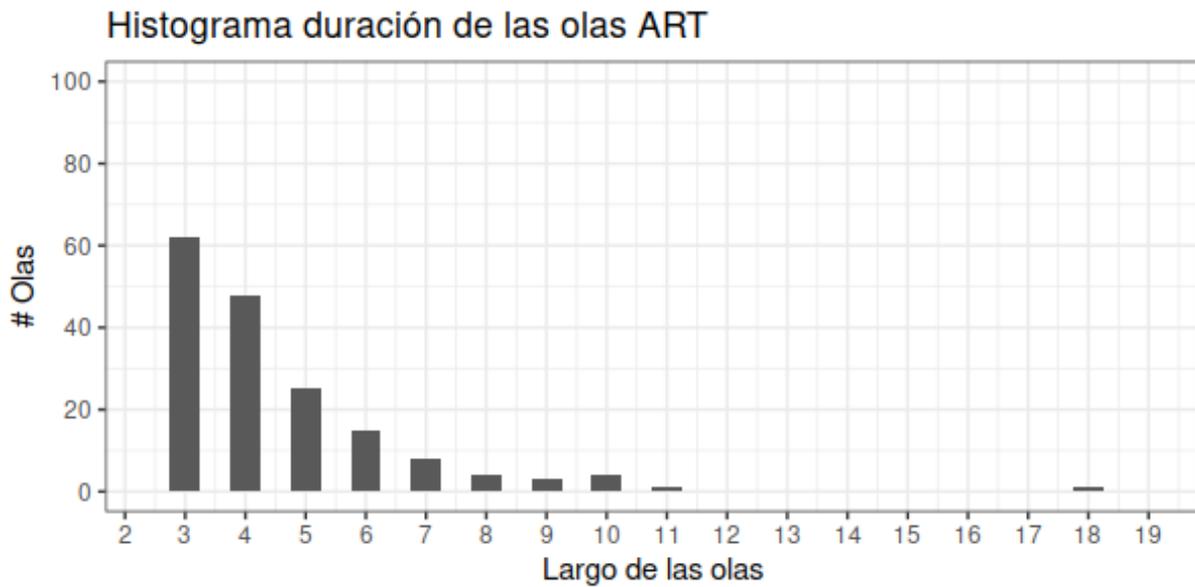
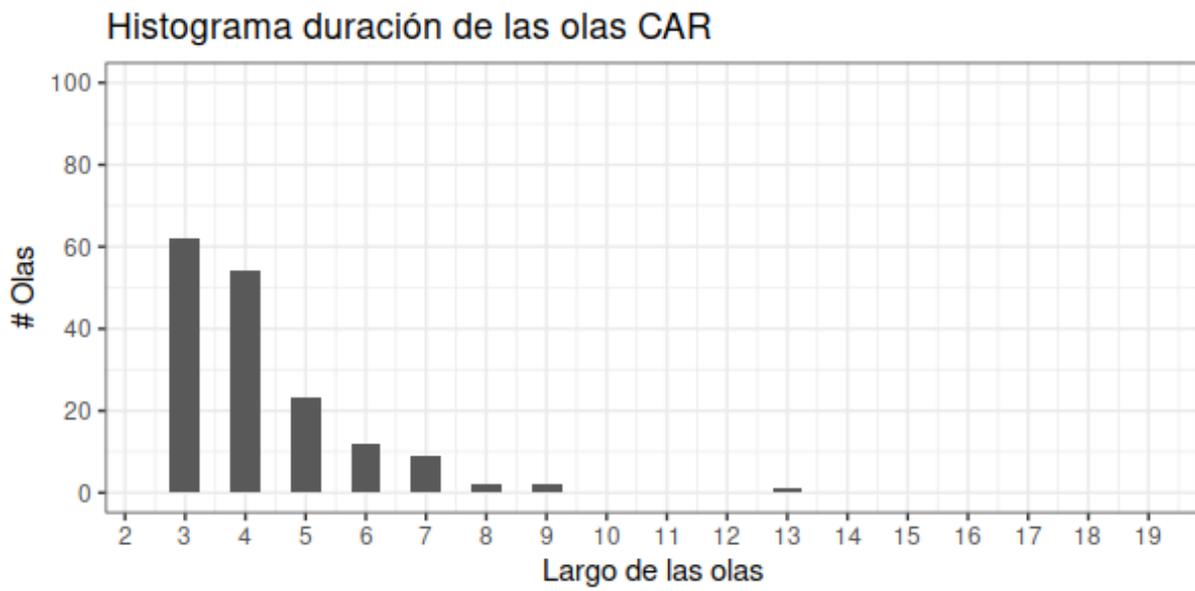
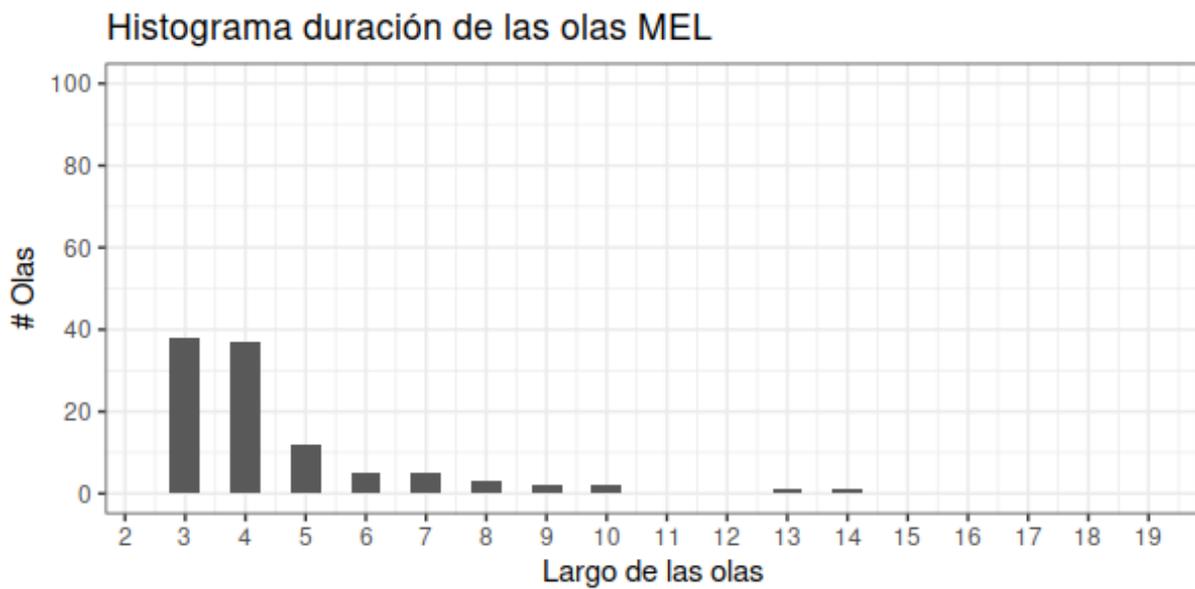


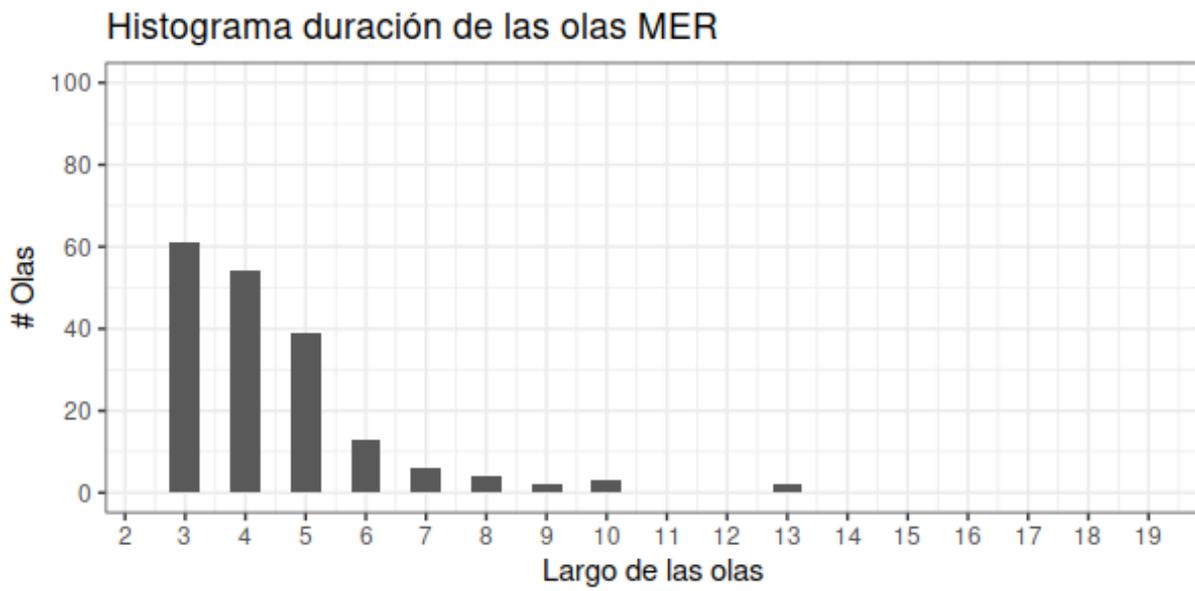
Figura B.11: Olas Artigas.



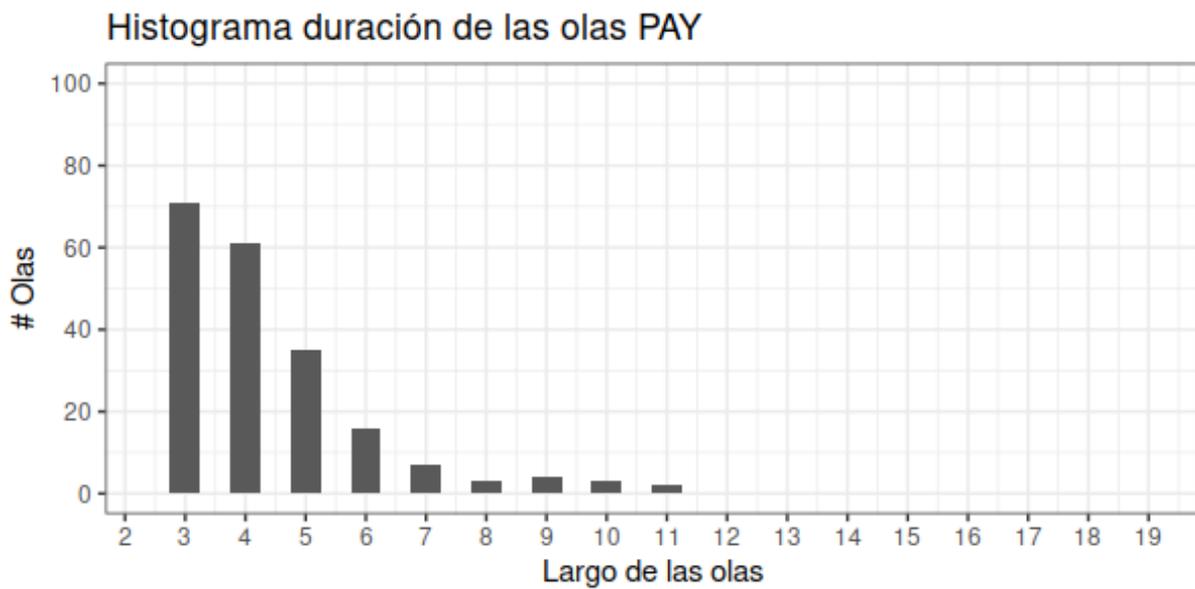
**Figura B.12:** Olas Carrasco.



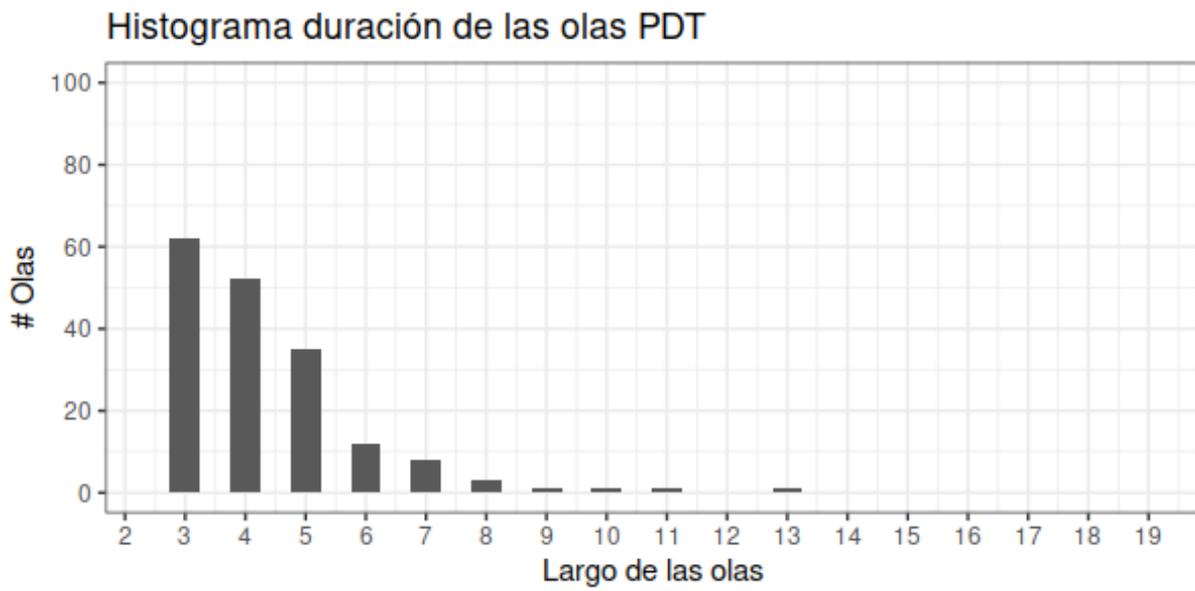
**Figura B.13:** Olas Melo.



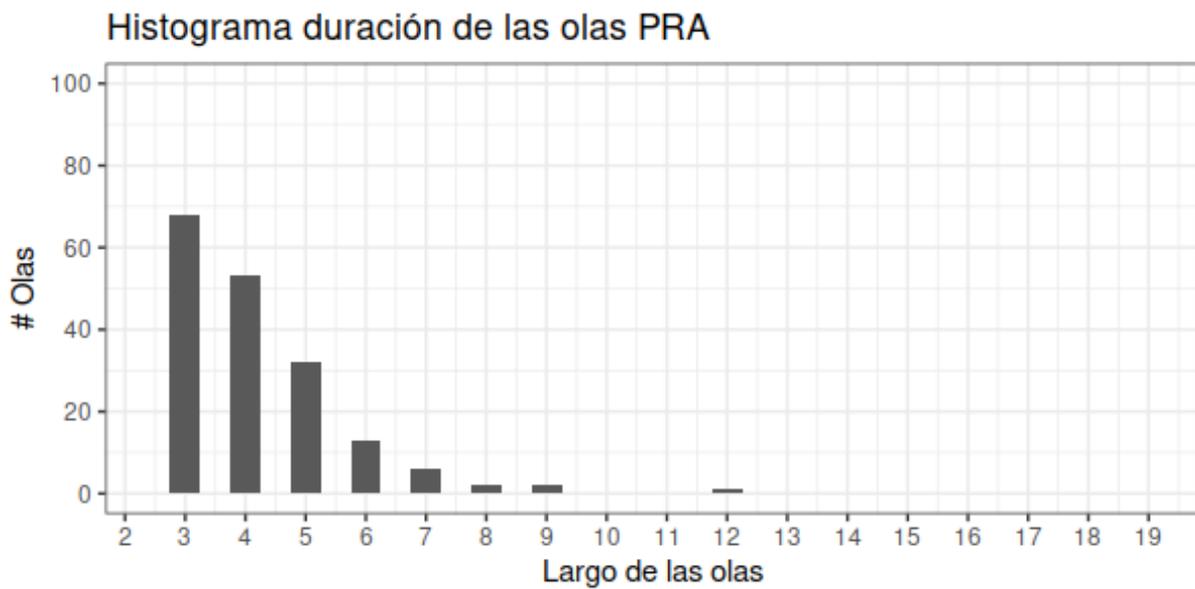
**Figura B.14:** Olas Mercedes.



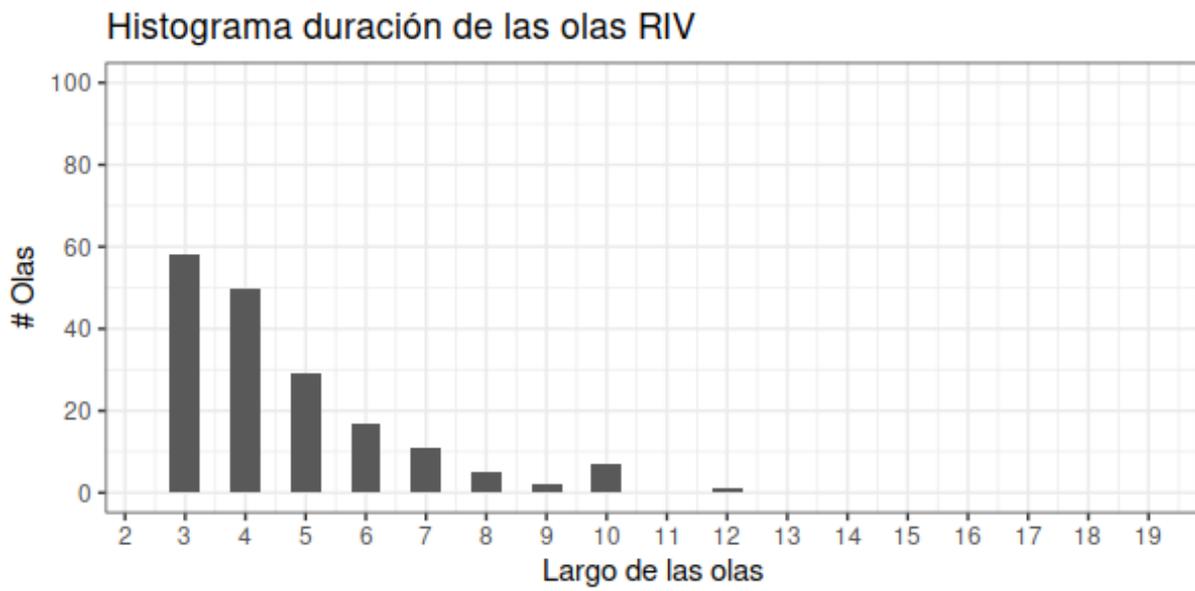
**Figura B.15:** Olas Paso de los Toros.



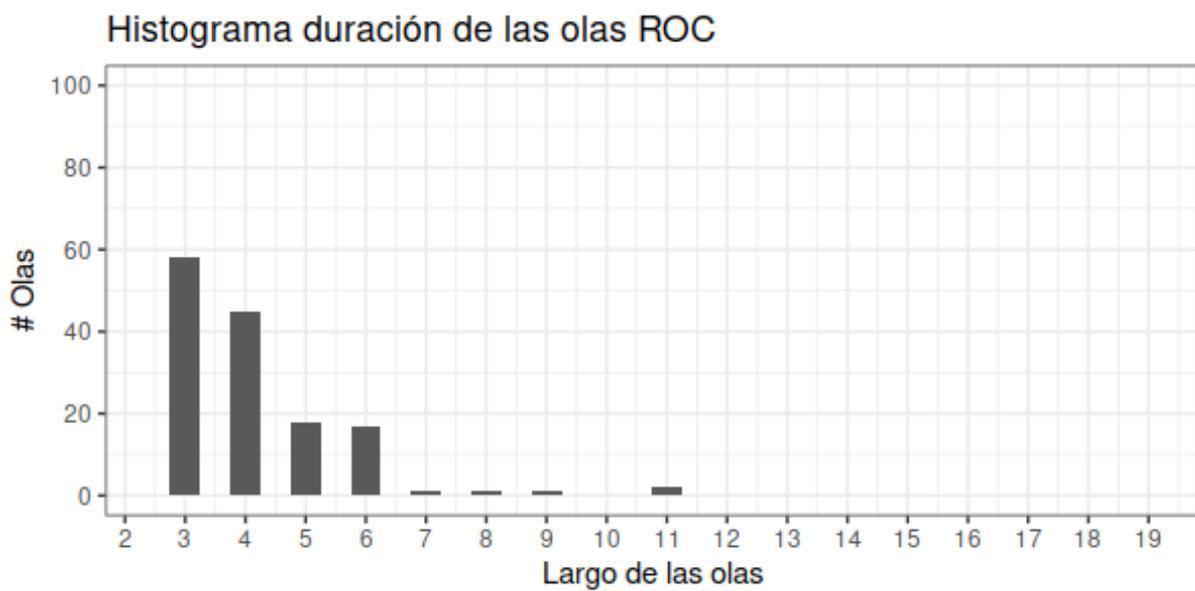
**Figura B.16:** Olas Paysandú.



**Figura B.17:** Olas Prado.



**Figura B.18:** Olas Rivera.



**Figura B.19:** Olas Rocha.

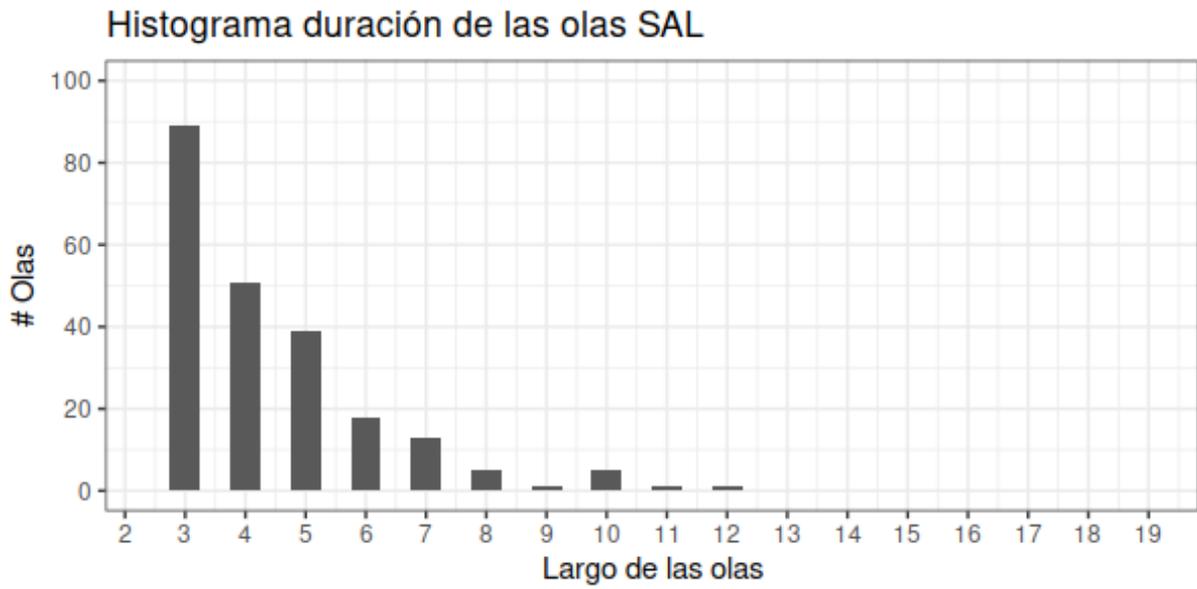


Figura B.20: Olas Salto.

## B.2. OCG al 50 %

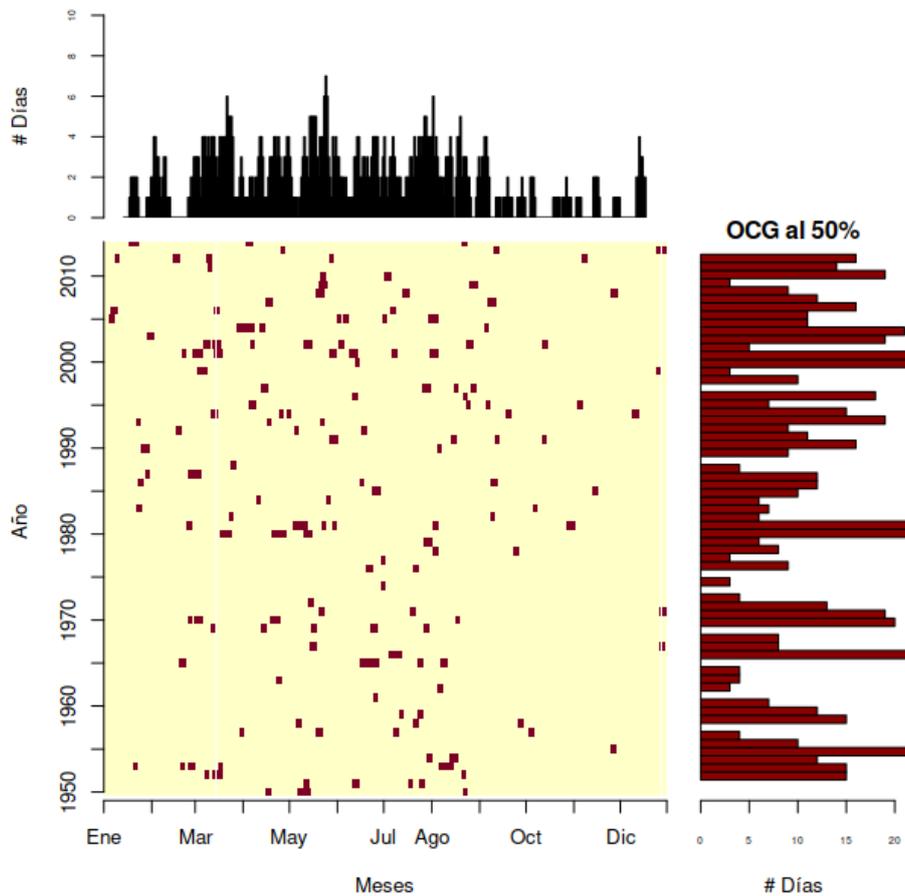


Figura B.21: Ola al 50 %

### **B.3. Lista de OCG y sus índices**

Fecha ini	Fecha fin	Largo	IOCGn	ImaxOCG
1950-04-17	1950-04-19	3.0	2.0	5.7
1950-05-07	1950-05-14	8.0	3.1	6.4
1950-08-22	1950-08-24	3.0	4.1	8.0
1951-06-12	1951-06-15	4.0	4.2	8.2
1951-07-17	1951-07-19	3.0	2.8	5.7
1952-03-15	1952-03-17	3.0	3.5	7.9
1953-02-27	1953-03-01	3.0	2.8	6.3
1953-08-11	1953-08-15	5.0	3.6	7.4
1954-08-13	1954-08-18	6.0	3.2	7.6
1957-05-19	1957-05-21	3.0	3.8	6.9
1958-05-06	1958-05-09	4.0	3.8	8.5
1958-09-26	1958-09-28	3.0	4.7	9.7
1962-08-05	1962-08-07	3.0	3.7	7.6
1963-04-23	1963-04-26	4.0	2.6	5.5
1965-06-17	1965-06-20	4.0	3.1	8.2
1965-06-22	1965-06-27	6.0	2.8	6.9
1965-08-08	1965-08-11	4.0	3.2	7.2
1966-07-06	1966-07-11	6.0	2.8	7.6
1967-05-15	1967-05-17	3.0	2.9	6.9
1969-06-23	1969-06-27	5.0	2.6	6.2
1969-07-27	1969-07-29	3.0	3.5	7.0
1970-03-02	1970-03-04	3.0	2.6	8.3
1970-04-22	1970-04-25	4.0	3.9	8.0
1970-08-17	1970-08-19	3.0	2.5	6.6
1971-07-18	1971-07-21	4.0	2.6	6.0
1971-12-27	1971-12-30	4.0	2.6	6.2
1972-05-13	1972-05-16	4.0	2.9	6.9
1976-06-20	1976-06-24	5.0	3.2	6.4
1977-06-30	1977-07-02	3.0	2.3	4.6
1978-08-02	1978-08-04	3.0	2.1	5.9
1978-09-24	1978-09-26	3.0	2.1	4.5
1979-07-27	1979-08-01	6.0	4.9	10.4
1980-03-18	1980-03-24	7.0	3.7	8.2
1980-04-20	1980-04-29	10.0	3.4	7.3
1980-05-11	1980-05-15	5.0	3.8	8.7
1981-02-25	1981-02-27	3.0	1.9	4.4
1981-05-22	1981-05-24	3.0	3.2	6.6
1981-08-02	1981-08-05	4.0	3.1	6.6
1981-10-28	1981-10-31	4.0	2.4	6.1
1985-06-24	1985-06-26	3.0	2.4	5.6
1985-11-13	1985-11-15	3.0	3.8	7.0

**Tabla B.1:** OCG y sus índices entre 1950 a 1985

Fecha ini	Fecha fin	Largo	IOCGn	ImaxOCG
1986-01-23	1986-01-25	3.0	2.4	6.4
1986-09-09	1986-09-12	4.0	3.4	6.6
1987-02-26	1987-03-05	8.0	2.2	5.9
1990-01-26	1990-01-29	4.0	3.2	6.9
1991-05-27	1991-05-30	4.0	5.3	9.5
1993-04-17	1993-04-19	3.0	3.2	6.6
1994-09-18	1994-09-21	4.0	4.7	9.6
1994-12-10	1994-12-12	3.0	2.3	4.9
1995-04-06	1995-04-08	3.0	3.4	6.5
1995-09-05	1995-09-07	3.0	4.1	8.5
1996-06-12	1996-06-14	3.0	3.6	6.6
1997-07-26	1997-07-31	6.0	3.6	7.6
1997-08-28	1997-08-30	3.0	4.3	8.7
1999-03-03	1999-03-09	7.0	2.1	5.7
2000-06-13	2000-06-15	3.0	3.5	6.8
2001-03-02	2001-03-05	4.0	2.5	5.3
2001-03-15	2001-03-17	3.0	2.0	4.9
2001-06-09	2001-06-14	6.0	2.2	6.5
2001-08-01	2001-08-04	4.0	3.9	7.6
2002-03-14	2002-03-17	4.0	3.5	9.1
2002-06-02	2002-06-05	4.0	3.3	8.1
2002-08-24	2002-08-28	5.0	4.9	10.2
2002-10-12	2002-10-15	4.0	2.6	6.7
2004-03-30	2004-04-06	8.0	3.1	7.5
2004-04-12	2004-04-15	4.0	4.4	10.0
2005-06-05	2005-06-08	4.0	3.2	7.8
2005-08-02	2005-08-04	3.0	3.0	7.0
2007-04-16	2007-04-20	5.0	3.3	6.3
2007-09-06	2007-09-11	6.0	3.6	10.9
2008-05-18	2008-05-23	6.0	5.1	10.2
2008-07-14	2008-07-17	4.0	2.6	6.6
2009-05-20	2009-05-24	5.0	4.1	8.1
2009-08-28	2009-08-31	4.0	3.7	9.2
2010-07-03	2010-07-06	4.0	2.7	7.3
2012-01-09	2012-01-11	3.0	2.4	6.4
2012-02-16	2012-02-18	3.0	2.5	7.2
2012-03-10	2012-03-12	3.0	2.6	5.8
2013-09-10	2013-09-13	4.0	5.9	11.7
2013-12-26	2013-12-29	4.0	2.5	7.2
2014-01-18	2014-01-21	4.0	1.9	4.6
2014-04-03	2014-04-07	5.0	2.7	6.2

**Tabla B.2:** OCG y sus índices entre 1986 y 2014

# Anexo C

## Rotación de EOF mediante Varimax y Quartimax

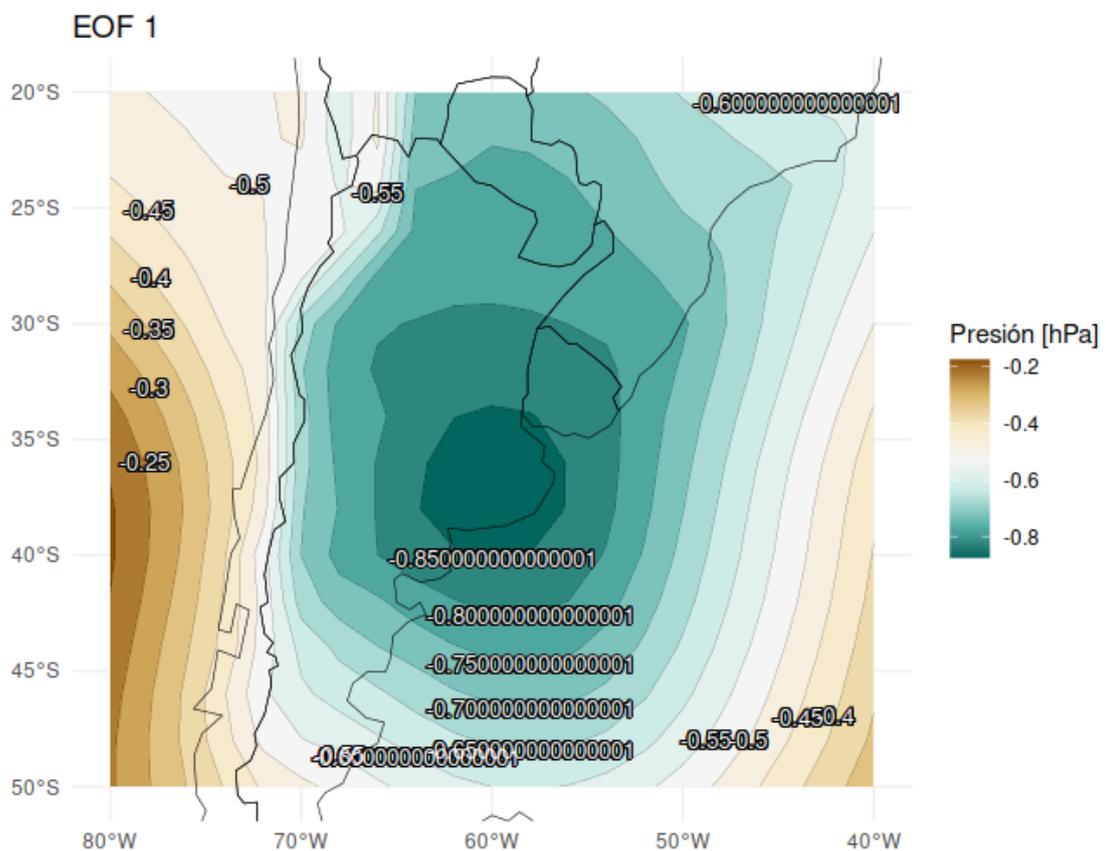
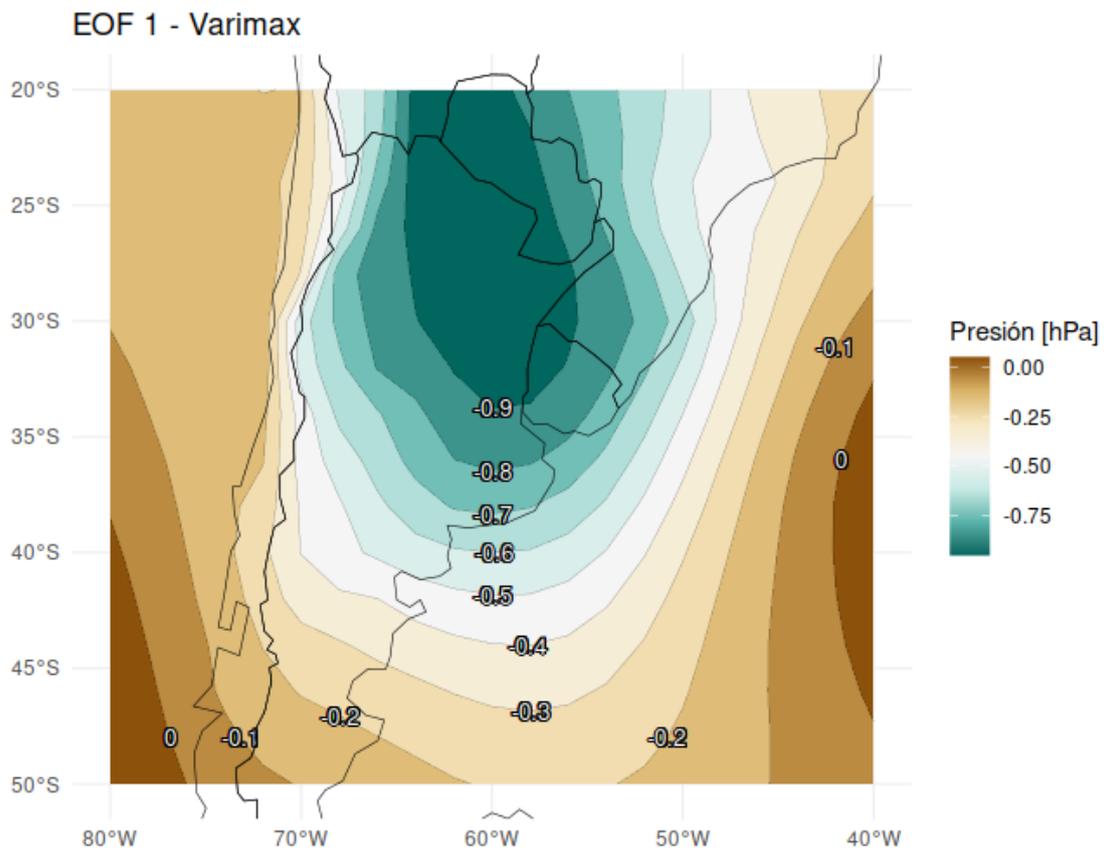
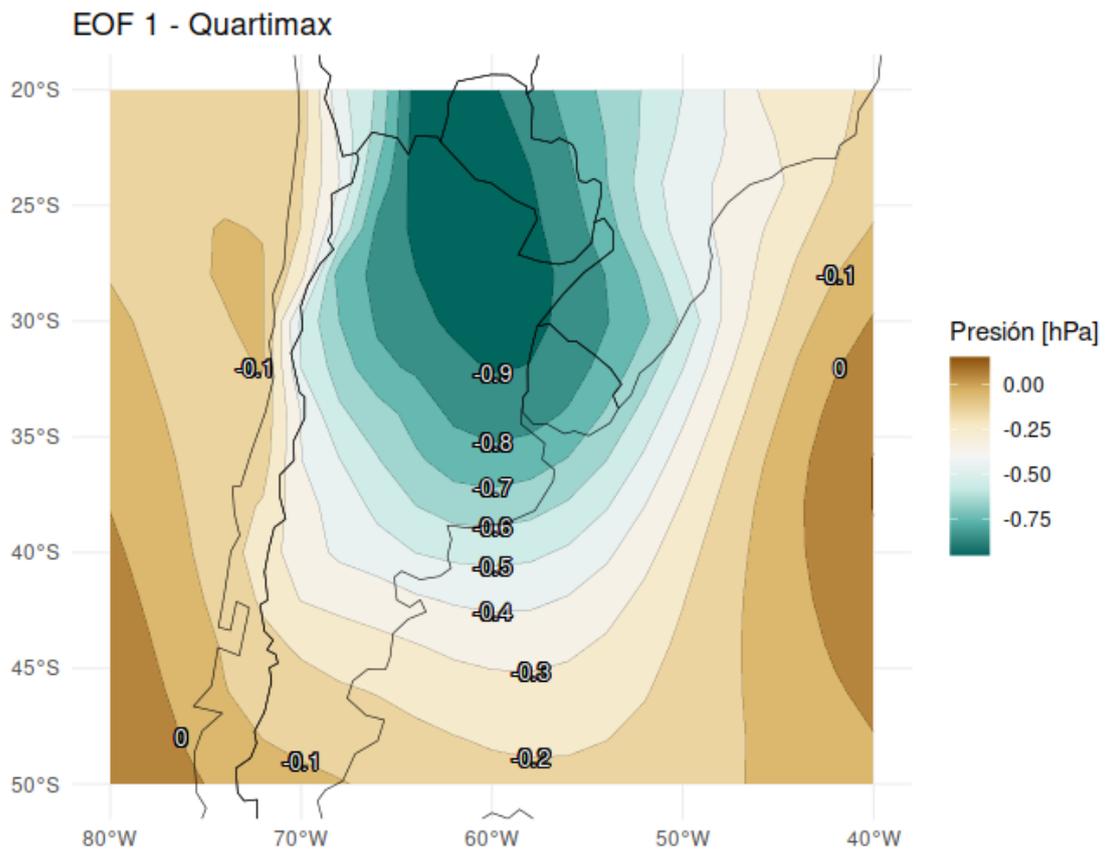


Figura C.1: Primer EOF del PCA (EOF 1)



**Figura C.2:** Primer EOF rotado mediante Varimax



**Figura C.3:** Primer EOF rotado mediante Quartimax

## **Anexo D**

### **PS diarios asociados a cada OCG**

	Día	Mes	Año	Cluster
208	27	7	1979	1
209	28	7	1979	3
210	29	7	1979	3
211	30	7	1979	1
212	31	7	1979	3
213	1	8	1979	3
442	18	3	1980	2
443	19	3	1980	2
444	20	3	1980	2
445	21	3	1980	7
446	22	3	1980	7
447	23	3	1980	7
448	24	3	1980	7
475	20	4	1980	10
476	21	4	1980	1
477	22	4	1980	1
478	23	4	1980	3
479	24	4	1980	10
480	25	4	1980	1
481	26	4	1980	1
482	27	4	1980	3
483	28	4	1980	2
484	29	4	1980	7
496	11	5	1980	3
497	12	5	1980	1
498	13	5	1980	1
499	14	5	1980	2
500	15	5	1980	9
786	25	2	1981	9
787	26	2	1981	6
788	27	2	1981	6
872	22	5	1981	3
873	23	5	1981	3
874	24	5	1981	7
944	2	8	1981	3
945	3	8	1981	3
946	4	8	1981	7
947	5	8	1981	7
1031	28	10	1981	2
1032	29	10	1981	2
1033	30	10	1981	7
1034	31	10	1981	7
2365	24	6	1985	1
2366	25	6	1985	1
2367	26	6	1985	1
2507	13	11	1985	7
2508	14	11	1985	7
2509	15	11	1985	7
2578	23	1	1986	2
2579	24	1	1986	7
2580	25	1	1986	2

**Tabla D.1:** OCG por fechas y clúster (I)

	Día	Mes	Año	Cluster
2807	9	9	1986	1
2808	10	9	1986	1
2809	11	9	1986	3
2810	12	9	1986	7
2977	26	2	1987	2
2978	27	2	1987	2
2979	28	2	1987	2
2980	1	3	1987	2
2981	2	3	1987	2
2982	3	3	1987	10
2983	4	3	1987	2
2984	5	3	1987	2
4041	26	1	1990	2
4042	27	1	1990	7
4043	28	1	1990	2
4044	29	1	1990	2
4527	27	5	1991	3
4528	28	5	1991	3
4529	29	5	1991	3
4530	30	5	1991	7
5217	17	4	1993	3
5218	18	4	1993	7
5219	19	4	1993	7
5736	18	9	1994	1
5737	19	9	1994	7
5738	20	9	1994	3
5739	21	9	1994	7
5819	10	12	1994	2
5820	11	12	1994	2
5821	12	12	1994	2
5936	6	4	1995	7
5937	7	4	1995	3
5938	8	4	1995	3
6088	5	9	1995	1
6089	6	9	1995	1
6090	7	9	1995	7
6368	12	6	1996	1
6369	13	6	1996	1
6370	14	6	1996	1
6777	26	7	1997	3
6778	27	7	1997	3
6779	28	7	1997	1
6780	29	7	1997	1
6781	30	7	1997	7
6782	31	7	1997	7
6810	28	8	1997	2
6811	29	8	1997	7
6812	30	8	1997	7

Tabla D.2. Ejemplo1

	Día	Mes	Año	Cluster
7362	3	3	1999	7
7363	4	3	1999	2
7364	5	3	1999	7
7365	6	3	1999	2
7366	7	3	1999	7
7367	8	3	1999	2
7368	9	3	1999	9
7829	13	6	2000	3
7830	14	6	2000	3
7831	15	6	2000	7
8091	2	3	2001	7
8092	3	3	2001	2
8093	4	3	2001	7
8094	5	3	2001	7
8104	15	3	2001	2
8105	16	3	2001	2
8106	17	3	2001	2
8190	9	6	2001	7
8191	10	6	2001	1
8192	11	6	2001	1
8193	12	6	2001	9
8194	13	6	2001	3
8195	14	6	2001	3
8243	1	8	2001	1
8244	2	8	2001	1
8245	3	8	2001	1
8246	4	8	2001	1
8468	14	3	2002	3
8469	15	3	2002	7
8470	16	3	2002	7
8471	17	3	2002	7
8548	2	6	2002	1
8549	3	6	2002	3
8550	4	6	2002	3
8551	5	6	2002	3
8631	24	8	2002	3
8632	25	8	2002	1
8633	26	8	2002	1
8634	27	8	2002	1
8635	28	8	2002	3
8680	12	10	2002	3
8681	13	10	2002	7
8682	14	10	2002	7
8683	15	10	2002	7
9214	30	3	2004	1
9215	31	3	2004	1
9216	1	4	2004	3
9217	2	4	2004	7
9218	3	4	2004	3
9219	4	4	2004	1
9220	5	4	2004	2
9221	6	4	2004	7

Table D.2: QCC per fechas y clúster (II)

	Día	Mes	Año	Cluster
9227	12	4	2004	3
9228	13	4	2004	7
9229	14	4	2004	7
9230	15	4	2004	7
9646	5	6	2005	7
9647	6	6	2005	3
9648	7	6	2005	7
9649	8	6	2005	7
9704	2	8	2005	3
9705	3	8	2005	3
9706	4	8	2005	7
10326	16	4	2007	1
10327	17	4	2007	2
10328	18	4	2007	2
10329	19	4	2007	2
10330	20	4	2007	7
10469	6	9	2007	2
10470	7	9	2007	2
10471	8	9	2007	1
10472	9	9	2007	1
10473	10	9	2007	9
10474	11	9	2007	7
10723	18	5	2008	1
10724	19	5	2008	1
10725	20	5	2008	1
10726	21	5	2008	1
10727	22	5	2008	1
10728	23	5	2008	5
10780	14	7	2008	1
10781	15	7	2008	1
10782	16	7	2008	1
10783	17	7	2008	3
11090	20	5	2009	3
11091	21	5	2009	7
11092	22	5	2009	3
11093	23	5	2009	6
11094	24	5	2009	6
11190	28	8	2009	2
11191	29	8	2009	3
11192	30	8	2009	7
11193	31	8	2009	7
11499	3	7	2010	1
11500	4	7	2010	3
11501	5	7	2010	1
11502	6	7	2010	3
12054	9	1	2012	2
12055	10	1	2012	7
12056	11	1	2012	7
12092	16	2	2012	1
12093	17	2	2012	1
12094	18	2	2012	1

**Tabla D.4:** OCG por fechas y clúster (III)

	Día	Mes	Año	Cluster
12114	10	3	2012	2
12115	11	3	2012	2
12116	12	3	2012	2
12663	10	9	2013	6
12664	11	9	2013	7
12665	12	9	2013	7
12666	13	9	2013	8
12770	26	12	2013	7
12771	27	12	2013	6
12772	28	12	2013	2
12773	29	12	2013	2
12793	18	1	2014	1
12794	19	1	2014	6
12795	20	1	2014	2
12796	21	1	2014	7
12868	3	4	2014	10
12869	4	4	2014	2
12870	5	4	2014	2
12871	6	4	2014	10
12872	7	4	2014	7

**Tabla D.5:** OCG por fechas y clúster (IV)