



# Universidad Nacional del Sur

Departamento de Geografía y Turismo

TESIS DE DOCTOR EN GEOGRAFÍA

## ***Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región***

**Vanina Solange Aliaga**

**Bahía Blanca**

**Argentina**

**2018**

## **Prefacio**

Este trabajo se presenta como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Geografía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido previamente presentado para la obtención de otro título en esta universidad u otra. La misma contiene los resultados de investigaciones realizadas en el ámbito del Departamento de Geografía y Turismo durante el período comprendido desde el 1 de abril de 2013 y el 30 de enero de 2018, bajo la dirección de la Dra. María Cintia Piccolo y el Dr. Gerardo M.E. Perillo.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ...../...../....., mereciendo la calificación de.....(.....)

*A mi familia*

## **Agradecimientos**

*Deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han facilitado y extendido su apoyo para la realización de esta Tesis Doctoral. En primer lugar a mis directores, los Dres. M. Cintia Piccolo y Gerardo M.E. Perillo por su dirección, constante apoyo y por brindarme posibilidades de progreso en mi carrera profesional. Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), el Instituto Argentino de Oceanografía (IADO) y al Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur por la posibilidad de realizar mis estudios de postgrado mediante una Beca de Postgrado.*

*Al personal técnico, administrativo e investigadores del IADO y del Departamento de Geografía y Turismo. También quiero agradecer a las instituciones que colaboraron con aportes de datos fundamentales para la realización de esta investigación: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Universidad Nacional de Lujan (UNLu), Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON), Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN3038, con el apoyo de US National Science Foundation (Grant GEO-1128040), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto Nacional del Agua (INA), Instituto Geográfico Nacional (IGN) y Servicio Meteorológico Nacional (SMN).*

*En especial, agradezco a mis compañeros y amigos del Instituto Argentino de Oceanografía y de la Universidad Nacional del Sur, por su ayuda y compañerismo durante todo este tiempo. Josefina, Belen, Federico y Ernesto han marcado cada día de este trabajo, gracias. A mi gran familia, mis padres, mis hermanos, mi novio y sobrinos por su cariño y sostén constante.*

*Vanina Solange Aliaga*

## RESUMEN

En la presente tesis se realizó un estudio en toda la Región Pampeana, Argentina, con el objetivo de zonificar su extensa superficie según sus características climáticas permitiendo conocer la variabilidad climática y su relación con las características espacio-temporales de las lagunas superficiales. Inicialmente se realizó una clasificación del clima en la Región Pampeana durante el período 1960-2010. Este análisis se basó en series mensuales de distintos parámetros meteorológicos, así como de altitud media. Se realizaron tres clasificaciones climáticas para toda la región. En primer lugar con la precipitación, en la cual se obtuvieron seis subregiones definidas. Luego se realizó una clasificación considerando la precipitación y la temperatura del aire, de las cuales se obtuvieron siete áreas climáticas homogéneas. La tercera regionalización consideró estos dos últimos parámetros más la velocidad del viento, humedad relativa y altitud. En este caso se obtuvieron ocho subregiones, las cuales modificaron las obtenidas en el primer análisis.

Posteriormente se estudió la variabilidad climática de 50 años de datos con el objeto de describirla en las ocho subregiones obtenidas en la tercera clasificación. Con respecto a la precipitación se observa una tendencia positiva en la mayoría de las subregiones, las anomalías positivas son más grandes que las negativas, además las positivas disminuyen hacia el Sur de la Región Pampeana. En general, los eventos secos fueron más frecuentes en la región centro-Norte, en el Noreste de Buenos Aires y en el Sureste de las provincias de La Pampa. Por otro lado, los eventos húmedos fueron más frecuentes en las subregiones suroccidental y Noreste de la provincia de Buenos Aires y en la zona centro-Norte de la Pampa. En ambos casos, la intensidad y la duración del evento tuvieron una relación inversa, es decir, cuando el evento fue de corta duración, fue más intensa de acuerdo con Índice Estandarizado de Precipitación. En relación a los eventos ENSO se observaron distintas respuestas entre las subregiones.

En cuanto a la temperatura del aire se observa una leve tendencia positiva del aumento de la temperatura media durante el período de estudio. En cuanto a las anomalías, entre las subregiones se observan mayores coincidencias en las negativas que en las positivas. A diferencia de la precipitación y la temperatura del aire, la humedad no mostro tendencias positivas en ningún grupo, incluso se observa cierta inclinación a una disminución de la

humedad media algunas subregiones. La velocidad media del viento en la Región Pampeana no representa las diferentes intensidades medias. Considerando sobre todo, que las subregiones de mayor y menor velocidades medias son contiguas, con una velocidad media de 12 y 21 km/h respectivamente. La dirección del viento también es variable. En el norte de la Región Pampeana las mayores frecuencias en dirección Este, Noreste y Sudeste. Mientras que en el centro no hay una dirección predominante. Hacia el Oeste y Sur se observó un dominio de viento Norte y Noreste.

A partir de estas determinaciones se evaluó la variabilidad espacio temporal de las lagunas ante eventos de diversa pluviometría. Para ello se realizó un estudio multi-anual durante el período 2002-2003, 2006 y 2008-2009 mediante el uso de imágenes satelitales Landsat TM de cada subregión climática pampeana. Se obtuvieron el número de cuerpo de área y superficie de agua en cada área estudiada durante períodos secos, húmedos y normales. Además se clasificaron las lagunas según su superficie. Se observó una clara relación entre la variabilidad de las precipitaciones y la variación espacio temporal de las lagunas, sin embargo, en algunas subregiones fue más notable que en otras.

En todas las subregiones identificadas se observaron respuestas a los eventos húmedos y secos, pero esta variación no es el único factor generador de los cambios observados en las lagunas. Otros agentes además de la variabilidad climática acentúan o mitigan los cambios en la hidrología superficial. Se observó que los efectos de los períodos húmedos son de mayor intensidad, la cual puede contabilizarse en el número de lagunas y su superficie total. Sus extensiones y disposiciones espacio temporal están ligados al origen de las lagunas, su topografía, hidrología y geomorfología actual. Esto muestra la riqueza en cuanto a la heterogeneidad de la Región Pampeana en muchos aspectos que deben ser considerados en estudios regionales.

## **ABSTRACT**

In the present thesis, a study was carried out in the whole Pampean Region, Argentina, with the objective of zoning its extensive surface according to its climatic characteristics allowing to know the climatic variability and its relation with the spatiotemporal characteristics of the surface lagoons. Initially, a climate classification was carried out in the Pampean Region during the 1960-2010 period. This analysis was based on monthly series of different meteorological parameters, as well as average altitude. Three climatic classifications were made for the entire region. First with precipitation, in which six defined subregions were obtained. Then a classification was made considering the precipitation and the air temperature, of which seven homogeneous climatic areas were obtained. The third regionalization considered these last two parameters with the addition of wind speed, relative humidity and altitude. In this case, eight subregions were obtained, which modified those obtained in the first analysis.

Subsequently, the climatic variability of 50 years of data was studied in order to describe it in the eight subregions obtained in the third classification. With regard to precipitation, a positive trend is observed in most of the subregions, positive anomalies are larger than negative ones, and positive ones decrease towards the South of the Pampean Region. In general, dry events were more frequent in the central-northern region, in the northeast of Buenos Aires and in the southeast of the provinces of La Pampa. On the other hand, wet events were more frequent in the southwestern and northeastern subregions of the province of Buenos Aires and in the central-northern zone of the Pampa. In both cases, the intensity and duration of the event had an inverse relationship, that is, when the event was of short duration, it was more intense according to the Standardized Precipitation Index. In relation to the ENSO events, different responses were observed among the subregions.

As for air temperature, a slight positive trend of the increase in mean temperature during the study period is observed. The anomalies among the subregions, there are more coincidences in the negative ones than in the positive ones. Unlike precipitation and air temperature, humidity did not show positive trends in any group, even a certain inclination to a decrease in average humidity is observed in some subregions. The average wind speed in the Pampean Region does not represent the different average intensities. Considering above all, that the subregions of higher and lower average speeds are contiguous, with an average

speed of 12 and 21 km / h, respectively. The wind direction is also variable. In the north of the Pampean Region, the highest frequencies are east, northeast and southeast. While in the center there is no predominant direction. Towards the West and South there was a North and Northeast wind domain.

Based on these determinations, the temporal space variability of the shallow lakes was evaluated in the presence of different rainfall events. A multi-annual study was carried out during the period 2002-2003, 2006 and 2008-2009 through the use of Landsat TM satellite images from each Pampean climatic subregion. The number of lakes and surface of the water in each studied area were obtained during dry, humid and normal periods. In addition, the lakes were classified according to their surface. There was a clear relationship between the variability of rainfall and the spatiotemporal variation of the lakes, however, in some subregions it was more noticeable than in others.

In all the identified subregions, responses to wet and dry events were observed, but this variation is not the only factor generating the changes observed in the lakes. Other agents besides climatic variability accentuate or mitigate changes in surface hydrology. It was observed that the effects of wet periods are of greater intensity, which can be accounted for in the number of lakes and their total surface area. Its extensions and temporary space arrangements are linked to the origin of the lakes, their topography, hydrology and current geomorphology. This shows the wealth in terms of the heterogeneity of the Pampean Region in many aspects that should be considered in regional studies.

## ÍNDICE

- Prefacio 2
- Dedicatoria 3
- Agradecimientos 4
- Resumen 5
- Abstract 7

### Capítulo 1.

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1. Introducción	12
1.1. Objetivos e hipótesis de trabajo	17
1.2. Área de estudio	19

### Capítulo 2.

<b>CLASIFICACIÓN DEL CLIMA PAMPEAANO SEGÚN LA PRECIPITACIÓN</b>	<b>22</b>
2.1. Introducción	22
2.2. Método de trabajo	24
2.2.1. Información meteorológica	24
2.2.2. Análisis de datos	25
2.3 Resultados	29
2.3.1. Formación de subregiones	29
2.3.2. Variabilidad subregional de la precipitación	33
2.3.3. Variación de la precipitación media mensual y anual por períodos climáticos	41
2.3.4. Definición de subregiones pluviométricas	43
2.4. Conclusiones	46

### Capítulo 3.

<b>CLASIFICACIÓN DEL CLIMA PAMPEAANO SEGÚN PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DEL AIRE</b>	<b>49</b>
3.1. Introducción	49
3.2. Método de trabajo	52
3.3. Resultados	54
3.3.1. Análisis de agrupamiento	54
3.3.2. Variabilidad climática subregional	60
3.4. Conclusiones	66

<b>Capítulo 4.</b>	
<b>CLASIFICACION CLIMATICA PROPUESTA DE LA REGION PAMEPANA</b>	<b>68</b>
4.1. Introducción	68
4.2. Método de trabajo	70
4.2.1. Datos	70
4.2.2. Análisis de datos	70
4.3. Resultados	71
4.3.1 Análisis de agrupamiento	71
4.3.2 Caracterización climática de la Región Pampeana	74
4.3.3. Definición de subregiones climáticas de la Región Pampeana	79
4.4. Conclusiones	83
<b>Capítulo 5.</b>	
<b>VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LAS SUBREGIONES PAMPEANAS</b>	<b>84</b>
5.1. Introducción	84
5.2. Metodología	87
5.3. Resultados	88
5.3.1. Precipitación	88
5.3.2. Temperatura del aire	103
5.3.3. Humedad relativa	109
5.3.4. Velocidad y dirección del viento	109
5.4 Conclusiones	117
<b>Capítulo 6.</b>	
<b>VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LAS LAGUNAS PAMPEANAS</b>	<b>120</b>
6.1. Introducción	120
6.2. Metodología	122
6.3. Resultados	124
6.3.1. Características topográficas e hidrográficas	124
6.3.2. Características del suelo	131
6.3.3. Dinámica espacio-temporal de las lagunas pampeanas	139
6.4. Conclusiones	154
<b>Capítulo 7.</b>	
<b>CONCLUSIONES FINALES</b>	<b>156</b>

<b>REFERENCIAS</b>	<b>160</b>
<b>ANEXO</b>	<b>181</b>

Anexo 2.1. Datos utilizados de las estaciones en las clasificaciones de los Capítulos 2, 3 y 4.

Anexo 3.1. Pruebas de homogeneidad en la precipitación y la temperatura del aire en cada grupo.

Anexo 4.1. Características de la dirección del viento decádica en las estaciones estudiadas.

Anexo 6.1. Imágenes satelitales analizadas para el estudio de la respuesta espacial de las lagunas.

Anexo 6.2. Correcciones geométricas y radiométricas a las imágenes Landsat TM.

Anexo 6.3. Regiones ambientales pampeanas

Anexo 6.4. Triángulo de textura de suelos

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

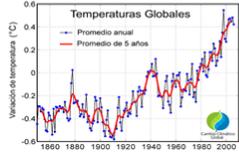
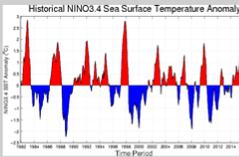
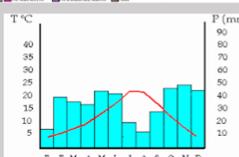
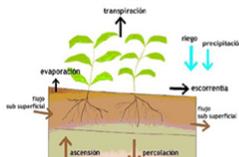
Las diferenciaciones espaciales forman parte de los desafíos más importantes de la geografía, siendo la *región* una de las escalas más utilizadas. Las regiones naturales son percibidas como espacios diferenciados por sus características y estructuras definidas, como llanuras, clima o su biogeografía, entre otras. De esta manera se define a una *región homogénea* como el ámbito continuo o uniforme en el que cada una de sus partes muestra características en común, lo que permite evidenciar continuidades, similitudes y diferencias espaciales de determinados fenómenos (Gasca Zamora, 2009).

Desde el punto de vista territorial, el concepto de región posee un carácter polisémico, por la multiplicidad de contenidos; polivalente, por la diversidad de valores asignados (sociales, económico, político, etc.); y multiescalar por las diferentes resoluciones espaciales (Cuervo, 2003). La geografía identifica regiones homogéneas mediante el análisis espacial de asociaciones de variables hasta llegar a cierta especificidad, permitiendo explicar patrones de distribución así como la extensión que guardan determinados fenómenos. Por lo tanto, la *región* se comporta como objeto de estudio y la *regionalización* como el ejercicio de clasificación y representación de atributos (Gasca Zamora, 2009).

El clima ha sido utilizado ampliamente como un elemento de diferenciación espacial. En la elaboración de divisiones regionales, el clima define la distribución forestal, la biodiversidad, cultivos agrícolas e incluso poblaciones humanas (Olcina Cantos, 1996). Las clasificaciones pueden responder a las propiedades de los elementos climáticos, desde una disciplina climática estrictamente; o bien, formar parte de las que consideran a los elementos climáticos como criterio para caracterizar una región. Es decir, basándose no en los elementos en sí, sino en los procesos que los relacionan (Olcina Cantos, 1996). Este es uno de los aportes más importantes que la Geografía Regional puede brindar a las clasificaciones espaciales.

La regionalización climática es una herramienta que habilita la organización de observaciones en grupos, reduciendo la cantidad de datos a analizar y facilitando la subdivisión del clima regional (Díaz y Mormeneo, 2002). Como rama de la Geografía Física, la Climatología se comporta como elemento de división de unidades espaciales, lo cual requiere

de la definición de escalas de trabajo y términos propios según la extensión territorial y los mecanismos atmosféricos a considerar. Existen escalas definidas por los procesos físicos dominantes, ya sean atmosféricos o topográficos (Pédelaborde, 1970), otras según su extensión territorial (Oke, 1992), o a procesos físicos y de la biósfera (Strahler y Strahler, 1997). Según la escala pueden reconocerse espacios a nivel de *Ámbitos* (intertropical o de latitud medias y altas); *Zonas* o *Bandas* (según el sistema de vientos, es decir de sistemas de alta o baja presión); *Dominios* (según el régimen térmico, desde ecuatorial a glacial); *Región*; *Clima local* y *Microclima* (Olcina Cantos, 1996). De acuerdo a la naturaleza de los datos utilizados y a la extensión del área de estudio, en esta tesis se consideraron las escalas zonal, regional y local (Figura 1.1).

	ESCALA	DIMENSIONES	VARIACIONES DOMINANTES	ANÁLISIS
ESCALAS CONSIDERADAS EN ESTE ESTUDIO	GLOBAL	Espacial: miles de km <sup>2</sup> .	Estructura vertical de la atmósfera. Balance global de radiación	Cambio Climático 
	ZONAL	Temporal: cientos de años.	Variación de los centros de acción atmosféricos. Grandes cinturones de vientos.	ENSO 
	REGIONAL	Espacial: cientos de km <sup>2</sup> .	Variaciones latitudinales de precipitación y temperatura	Tipificación climática 
	LOCAL	Temporal: decenas de años.	Variaciones de los parámetros meteorológicos locales y orográficos.	Climograma 
	MICROLOCAL	Espacial: cientos de metros. Temporal: año a meses.	Variaciones diarias Diferencias micro topográficas.	Balance hídrico Del suelo 

**Figura 1.1.** Escalas climáticas de análisis espacial. Elaboración propia en base a estudios de Pédelaborde (1970), Oke (1992), Scheider (1996) y Strahler y Strahler (1997).

Existe una estrecha relación entre las escalas de análisis y los niveles de complejidad de la información. El clima regional no puede analizarse como un sistema aislado. Éste se ve afectado por las condiciones globales del balance de energía en la tierra así como también de las condiciones zonales representadas por los centros de acción meteorológicos próximos a ella. A su vez, las condiciones locales (topografía, cercanía al mar, etc.) se comportan como modificadoras de los climas regionales debido al reemplazo de superficies naturales por espacios construidos, afectando a los procesos que ocurren en la atmósfera (García, 2009).

La delimitación de áreas o regiones climáticas facilita además el estudio de su variabilidad dentro de un espacio concreto. La variabilidad climática se refiere a las variaciones del estado medio del clima, tales como la ocurrencia de eventos extremos, en todas las escalas temporales y espaciales. Las variaciones estacionales, interanuales o decádicas tiene consecuencias importantes en una región, como la Región Pampeana, caracterizada por llanuras, clima templado y suelos fértiles, que son el sostén de numerosas actividades sociales y económicas. El efecto de la variabilidad climática sobre la producción agrícola, define los probables cambios en el uso de la tierra. Una de las consecuencias más notables se observa en la variación del rendimiento de los suelos entre períodos pasados y escenarios climáticos futuros (Magrin *et al.*, 2007). Otra de las circunstancias que surgen de la variabilidad climática son las periódicas inundaciones que afectan áreas rurales (sembrados, hacienda y viviendas) y zonas urbanas, con graves consecuencias en la economía regional (Taboada *et al.*, 2009).

Las regionalizaciones climáticas han sido motivo de numerosos estudios a nivel mundial en distintas escalas, por medio de diversas técnicas y con múltiples finalidades y objetivos. A pesar del auge de la utilización de *Modelos Climáticos Globales* (MCG) aplicados a grandes regiones, la utilización de datos climáticos *in situ* diarios y mensuales continúan mostrando una descripción más acertada y representativa del clima a escala local y regional. Algunos estudios han combinado la dinámica de los modelos globales para complementar o comparar con los datos obtenidos *in situ*. Los resultados muestran que algunos MCG captan la tendencia climática y que las regionalizaciones son aceptables para capturar el patrón zonal del clima cuando hay un número insuficiente de observaciones de precipitaciones o no están disponibles (Badr *et al.*, 2016; Adi *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2017). Aunque también se ha comprobado que los pronósticos estacionales dinámicos son propensos a sesgos espaciales sistemáticos debidos a imperfecciones en el modelo climático. Esto puede suceder cuando el

MCG desplaza o no resuelve las barreras geográficas, incluso si la predicción de la dinámica a gran escala es exacta (Regonda *et al.*, 2016).

En los últimos años continúan siendo útiles las regionalizaciones con datos climáticos medidos en países y regiones que tienen a su disposición estos registros. Se destacan regionalizaciones basadas en el comportamiento de las precipitaciones (Comrie y Glenn, 1998; Razieli *et al.*, 2008; Terzer *et al.*, 2013; Fazel *et al.*, 2017), en el régimen térmico (Chaves y Jaramillo, 1998; Kenawy *et al.*, 2013; Stewart *et al.*, 2014), aquellos que combinan distintas variables climáticas (Zheng *et al.*, 2010, Zheng *et al.*, 2013, Eludoyin *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2014) y otros que consideran también las condiciones topográficas (Pineda Martínez *et al.*, 2007; Almazroui *et al.*, 2015). Los métodos de análisis para la regionalización se basan en general en técnicas estadísticas y matemáticas, como el análisis de cluster (o conglomerados), variograma, análisis de componentes principales o factorial, correlación, etc. (Alijani *et al.*, 2008; Abatzoglou *et al.*, 2009; Conroy y Overpeck, 2011; Alobaidi *et al.*, 2017; Nojarov, 2017). Estas regionalizaciones han permitido caracterizar las subregiones climáticas en grandes extensiones como China, Nigeria, Irán, África, Arabia Saudita, entre otros, para poder ofrecer un conocimiento de las condiciones climáticas a escala subregional (Yin *et al.*, 2011; Kozjek *et al.*, 2017) y también obtener una comparación de regionalizaciones obtenidas con estudios previos que permitan ver la evolución y cambios en la distribución espacial en cada una (Zheng *et al.*, 2013; Eludoyin *et al.*, 2014; Zhang y Yan, 2014).

En Argentina se han realizado estudios que se centran en la reconstrucción paleoclimática y la descripción de climas actuales de ciertas regiones y su relación con sistemas y recursos disponibles actualmente, principalmente relacionados a los suelos y su productividad (Magrin *et al.*, 2005; Magrin *et al.*, 2009). Sin embargo, la totalidad del territorio ha sido estudiado en conjunto con otros países del cono sur de Sudamérica, donde se destacan trabajos que estudian posibles escenarios de eventos extremos, el efecto ENSO en la región, la variabilidad y cambio climático (Hoffmann *et al.*, 1997; Minetti y Vargas, 1998; Vincent *et al.*, 2005; Barros *et al.*, 2008; Magrin *et al.*, 2009; Grimm, 2011; Barros *et al.*, 2015; Tedeschi *et al.*, 2016). A escala nacional se realizaron estudios en los que se divide el territorio en eco regiones según las condiciones de flora, fauna, topográficas y físicas que predominan (Burkart *et al.*, 1999; Brown *et al.*, 2006; Lorda *et al.*, 2008; Morello *et al.*, 2012). A escala regional se destacan algunas clasificaciones climáticas en la región del Chaco árido, en el sur de la

provincia de Córdoba y en la provincia de San Luis, que permitieron describir la variabilidad espacial de las condiciones climáticas, clasificación de zonas áridas y a su vez determinar la influencia de los eventos ENSO en dicha variación (Minetti *et al.*, 1998; Rotondo y Seyler, 2001; Bertón y Echeverría, 2002; Karlin, 2012).

De las numerosas regiones en Argentina, la Pampeana se encuentra entre las más investigadas. La predominancia de llanuras, suelos fértiles, el nivel de productividad agrícola ganadera e industrial, así como el dominio de climas templados, la convierten en una de las regiones de mayor interés socioeconómico. La misma ha sido estudiada a través de índices agroclimáticos (Damario y Pascale, 1988), la relación de la variabilidad climática con eventos ENSO (Sierra *et al.*, 1994; 1995; Magrin *et al.*, 1998; Barros *et al.*, 2006; Fernández Long *et al.*, 2011), los riesgos productivos frente al clima, obstáculos y expectativas en relación con el uso actual y potencial de la información climática (Moschini *et al.*, 2000; Bartolomé *et al.*, 2004) y también ha sido zonificada según la respuesta de ecosistemas a oscilaciones climáticas (Gandini *et al.*, 2014).

Una de las principales características de la Región Pampeana argentina es la presencia de un gran número de lagunas, mayormente someras, que han sido afectadas por la variabilidad climática en las últimas décadas (Quirós *et al.*, 2002, 2006; Bohn *et al.*, 2011, 2012). Estos cuerpos de agua cumplen funciones ambientales claves debido a que constituyen un hábitat singular para la flora y fauna característica de los humedales. Al mismo tiempo, sirven de moderadores del régimen fluvial que almacenan el exceso hídrico y también cumplen un papel importante en las actividades pecuarias y turísticas (Geraldini *et al.*, 2011). Las lagunas proveen información valiosa acerca de los patrones y mecanismos de respuesta de los sistemas acuáticos a la variación del clima (Williamson *et al.*, 2008; Adrian *et al.*, 2009). El área y el volumen de agua de las lagunas presentan variaciones importantes en respuesta a eventos climáticos estacionales. Estos pueden producirse mediante tormentas u oscilaciones interanuales como consecuencia de las fluctuaciones estacionales.

Mientras algunos cuerpos de agua han aumentado en volumen, otros han experimentado una disminución como consecuencia de los efectos combinados de la sequía, cambios en los parámetros del clima y actividades humanas (Bates *et al.*, 2008). Sin embargo, en los últimos años se ha intensificado el estudio de los recursos hídricos frente a la constante demanda de sus servicios ecosistémicos (Williamson *et al.*, 2008). En este caso, al tratarse de

una región de gran valor socio – económico, son de suma necesidad los estudios en el cual se analice los cambios de estos cuerpos lagunares. El recurso agua es un elemento vital para todas las actividades que se realizan en la zona. Dada la amplitud de la zona de estudio, es imprescindible el empleo de imágenes satelitales como herramientas en el estudio espacio – temporal de los recursos hídricos (Turner *et al.*, 2014; Dube *et al.*, 2015; Bohn *et al.*, 2016). Además, compensan la dificultad de acceso a ellas, permitiendo la sistematización de los datos obtenidos.

Las condiciones climáticas varían dentro de una región y es esencial para las actividades de planificación conocer dicha variación. Este conocimiento permitiría distinguir las diferencias en el patrón y la magnitud de la variabilidad climática espacial en la región de estudio. Dado que el uso de varios tipos y número de variables puede conducir a diferentes límites en los climas subregionales, es útil analizar el clima considerando las mismas de forma individual y grupal y conocer las que representan mejor el clima regional.

En la presente tesis se realiza un estudio de la Región Pampeana en toda su extensión, con el objetivo de zonificar esta amplia superficie según sus características climáticas y su relación con las características espacio-temporales de las lagunas superficiales de la Región Pampeana. En un ambiente tan extenso como variable y de gran importancia a nivel nacional, este estudio resulta fundamental como base para el posterior desarrollo de un plan de gestión del recurso hídrico y de planes de prevención de inundaciones y sequías. El conocimiento de los recursos hídricos es fundamental para el óptimo manejo del mismo.

### **1.1 Objetivos e hipótesis de trabajo**

El objetivo general de la investigación es *analizar la respuesta espacio – temporal de las lagunas de la Región Pampeana a la variabilidad climática. Para ello, se determinan subregiones climáticas del área de estudio.*

Para este fin se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- ❖ Caracterizar la Región Pampeana en subregiones según el comportamiento de la precipitación y de la temperatura del aire (período 1960-2010).

- ❖ Zonificar climáticamente la Región Pampeana sumando más variables atmosféricas y topográficas (período 1960-2010).
- ❖ Elaborar recursos cartográficos de distribución espacial de las subregiones climáticas identificadas en la Región Pampeana, a partir de la utilización de Sistemas de Información Geográfica.
- ❖ Analizar la variabilidad climática en cada subregión climática e identificar períodos y eventos climáticos extremos.
- ❖ Evaluar patrones de cambio en el número y extensiones areales de lagunas en cada subregión en relación a la variabilidad climática.

La hipótesis de trabajo de la siguiente investigación es la siguiente:

*La heterogeneidad climática en la Región Pampeana Argentina permite identificar diferentes subregiones climáticas según los elementos del clima que se analicen. La variabilidad climática afecta a las lagunas someras que se localizan en ella, en su número y extensión areal según la subregión Pampeana en la que se encuentren.*

Para cumplir con estos objetivos y verificar las hipótesis de trabajo se dividió la tesis en 7 capítulos en los cuales:

En el *Capítulo 1* se describe la temática general y la importancia de su investigación, además se presentan los objetivos y las hipótesis del trabajo, como así también la descripción del área de estudio;

En el *Capítulo 2* se realiza un estudio de las características climáticas de la Región Pampeana según la precipitación (1960-2010);

En el *Capítulo 3* se realiza un estudio de las características climáticas de la Región Pampeana según la precipitación y temperatura del aire (1960-2010);

En el *Capítulo 4* se amplía el análisis climático al considerar otros parámetros meteorológicos y topográficos, obteniendo una clasificación y caracterización más completa de los climas que presenta la Región Pampeana (1960-2010);

En el *Capítulo 5* se estudia la variabilidad climática propia en cada subregión obtenida en los resultados del Capítulo 4. Se identifican así los eventos extremos para cada subregión (1960-2010);

En el *Capítulo 6* se obtiene una muestra de la variación espacio – temporal de las lagunas en cada subregión para un período extremo de sequía e inundaciones;

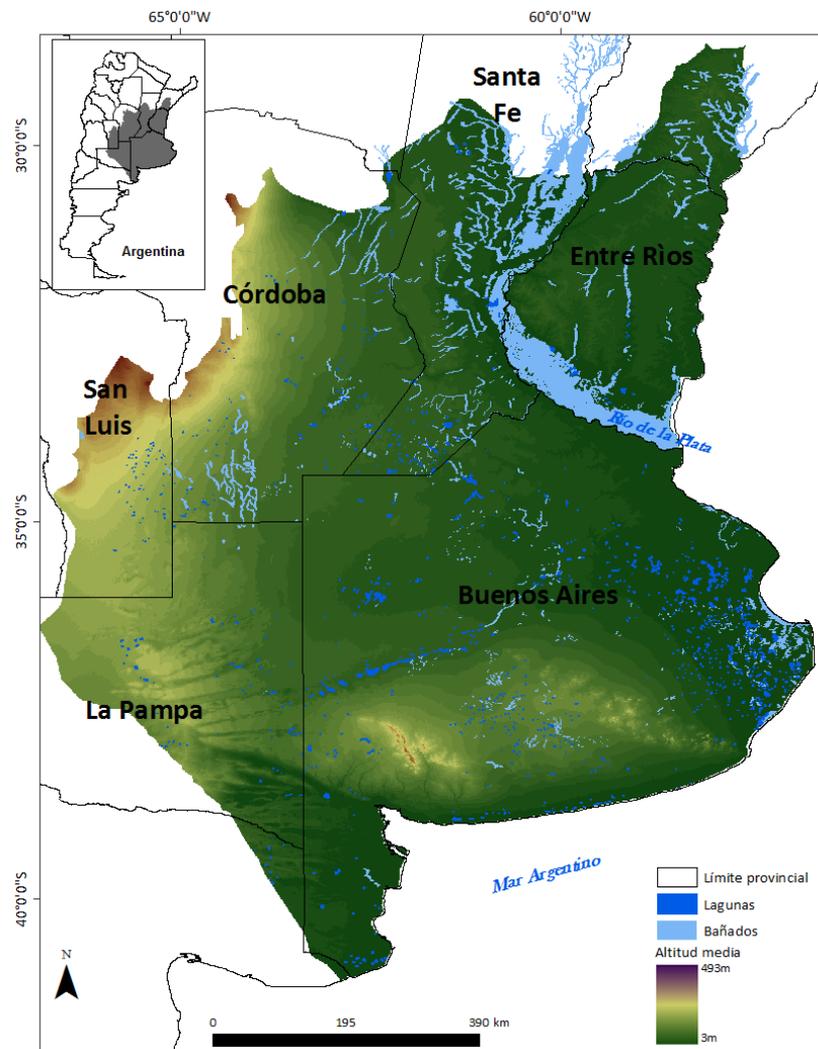
Finalmente en el *Capítulo 7* se presentan las conclusiones finales del trabajo desarrollado.

## **1.2 Área de estudio**

El área de estudio corresponde a la Región Pampeana, Argentina definida por Labraga *et al.* (2011). Constituye el paisaje más productivo del país con una superficie aproximada de 613.532 km<sup>2</sup>. Además, una de las características distintivas de la Región Pampeana argentina, es su gran dimensión latitudinal y longitudinal aportándole importantes matices. Ésta incluye el extremo sur de la provincia Corrientes, el centro y sur de las provincias de Santa Fe, Córdoba y San Luis, el centro – este de la provincia de La Pampa y las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires (Figura 1.2). La misma se extiende sobre una zona predominantemente llana con presencia de sierras en el sudoeste (Sistema de Ventania, ~ 1240 msnm) y centro (Sistema de Tandilia, ~ 500 msnm) de la provincia de Buenos Aires y en el oeste de la región en la provincia de Córdoba (Sierras Pampeanas, ~ 1668 msnm (Figura 1.2). La misma está compuesta por las regiones fitogeográficas argentinas de la Pampa y el Espinal (Cabrera, 1976), las cuales sufren extensos períodos de sequía o exceso de lluvia que afectan la disponibilidad de los recursos hídricos e impactan sobre la productividad de los sistemas agropecuarios y diversas actividades humanas.

Este *clima* pampeano es el resultado de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de su atmósfera en esa región. Dentro de los cuales, la temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y el viento se comportan como elementos del *tiempo*, mientras que la precipitación es el *fenómeno meteorológico* relacionado a dicho estado de tiempo (Celemín, 1984). A nivel regional el clima se define como templado-húmedo. Las precipitaciones disminuyen desde el noreste (1000 mm) hacia el sudeste (400 mm). Las temperaturas medias anuales decrecen en sentido norte-sur, mientras que la continentalidad del clima aumenta de este a oeste, provocando variaciones en los regímenes de temperatura.

El valor medio máximo es 20,6 °C y el mínimo medio de 10,1 °C. Es frecuente la ocurrencia de extensos períodos de sequía y excesos hídricos que afectan la disponibilidad de agua e impactan sobre diversas actividades humanas, en especial sobre la productividad de los sistemas agropecuarios (Labraga *et al.*, 2011).



**Figura 1.2.** Localización del área de estudio.

La gran llanura pampeana es la región más importante del territorio argentino desde el punto de vista económico, ya que sus características de clima y suelo la transforman en una zona agrícola y ganadera por excelencia. La mayoría de los suelos del área de estudio son adecuados para la agricultura y la ganadería (Viglizzo *et al.* 2001). La vegetación nativa fue regulada principalmente por factores climáticos y edáficos, por el drenaje del suelo y la

producción de cultivos. El pastizal es el tipo de cobertura terrestre predominante (Baldi *et al.*, 2006). Al ser una llanura sin árboles, en ella crecen especialmente cereales y oleaginosas. La economía agrícola se basa en el cultivo del trigo, maíz, lino, avena, cebada, centeno, girasol y soja, además de la explotación de la papa. También se desarrollan en la región la actividad ganadera (Cabrera, 1971; Baldi *et al.*, 2006). Específicamente en la Región Pampeana se han analizado los niveles de productividad que dependen en gran parte de la variabilidad del clima como es el caso de la soja o el contenido de nitrógeno en los suelos de los agro ecosistemas pampeanos (Rossi *et al.*, 2013; Álvarez *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2015).

Los cuerpos de agua predominantes en la llanura pampeana son las lagunas poco profundas. Éstas poseen una dinámica particular de nutrientes. Por su ubicación en zonas de suaves pendientes y suelos fértiles, la carga de nutrientes es generalmente más elevada que en los lagos profundos (Jeppesen *et al.*, 1997). Poseen una dinámica espacio temporal sensible a la variabilidad climática. Son cuerpos de agua someros, altamente fluctuantes en salinidad y tiempo de renovación de agua en función de los ciclos de sequía-inundación característicos de la región. La sucesión de períodos climáticos secos y húmedos, facilitó un importante desarrollo de sistemas de humedales y lagos someros en las áreas más deprimidas (Iriondo, 2004). La variabilidad de la precipitación es cualitativamente significativa y la geomorfología e hidrología influye en la variación espacial de los cuerpos de agua. El régimen pluviométrico tiene la capacidad de alterar estos ecosistemas, siendo la morfometría la variable que muestra mayor dinamismo (Bohn *et al.*, 2011).

La concentración salina permite clasificarlas como lagunas subsalinas y salinas (Ringuelet, 1967) y en algunos casos, como lagunas de agua dulce. Su hidrología se ve afectada por un relieve llano, altamente dependiente de las precipitaciones *in situ* (Quirós *et al.*, 2002). La mayoría de las lagunas pampeanas son de origen natural, por lo que las características geomorfológicas, hidrológicas y climáticas influyen directamente en su localización y distribución (Bohn *et al.*, 2012). Varios estudios demostraron la influencia de eventos húmedos y secos extremos en fases ENSO (Lentini *et al.*, 2001; Scian, 2002; Severov *et al.*, 2004; Scian *et al.*, 2006; Grimm *et al.*, 2009), lo cual afecta a los estados tróficos de las lagunas pampeanas y por lo tanto también a los valiosos servicios ecosistémicos que son muy apreciados y movilizan importantes recursos económicos (Diovisalvi *et al.*, 2015; Izaguirre *et al.*, 2015; Bohn *et al.*, 2016; Alfonso *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2017).

## Capítulo 2

### CLASIFICACIÓN DEL CLIMA PAMPEANO SEGÚN LA PRECIPITACIÓN

#### 2.1 Introducción

La variabilidad de la precipitación cumple un rol predominante en la dinámica de los recursos hídricos en áreas de llanura, afectando directamente a la capacidad de infiltración, la disponibilidad de nutrientes y carbono, suministro de servicios ecosistémicos, productividad primaria, entre otros (Fay *et al.*, 2011; Posada y Schuur, 2011; Yan *et al.*, 2014). Además, es relevante para orientar políticas de ordenamiento del territorio referidas a obras de infraestructura y a diversas actividades económicas que deben ajustarse a las condiciones pluviométricas, como lo son la agricultura, ganadería y turismo (Zhao *et al.*, 2012). La existencia de ciclos naturales en la atmósfera afecta el régimen pluviométrico pampeano durante semanas, meses y décadas. El ejemplo más destacado es El Niño Oscilación Sur (ENSO). Las oscilaciones interanuales de la precipitación se deben principalmente a la variabilidad en el otoño austral y el verano. Esta última es la temporada de máximas lluvias en la mayor parte del continente y de mayor influencia del ENSO en el cono sur de Sudamérica (Grimm, 2011).

La distribución espacio-temporal de las precipitaciones ha sido objeto de estudio en numerosos trabajos que delimitan regiones basándose en métodos de agrupamiento. Entre ellos se destacan los estudios realizados en Perú (Laura y Obando, 2015), México (Ramos Soto, 2011), Colombia (Jaramillo y Chaves, 2000), Estados Unidos (Baeriswyl y Rebetz, 1997), Irán (Modarres, 2006) y Suiza (Marzban y Sandgathe, 2005). En ellos se utilizaron registros mensuales o diarios de precipitación. En la Región Pampeana este conocimiento es fundamental ante importantes consecuencias sociales y económicas del efecto de la variabilidad pluviométrica sobre la producción agropecuaria. Su impacto se expresa en la variación del rendimiento entre períodos pasados y escenarios climáticos futuros (Magrin *et al.*, 2005). Además, el área de estudio se ve afectada por periódicas inundaciones que alcanzan a las áreas rurales (sembrados, hacienda y viviendas) y zonas urbanas, lo cual tiene importantes consecuencias económicas regionales (Taboada *et al.*, 2009). Todas ellas afectaron a las actividades económicas, la dinámica de los cuerpos de agua y con ello la

biodiversidad y las coberturas del suelo de la Región Pampeana (Barsky *et al.*, 2008; Taboada *et al.*, 2009).

Forte Lay *et al.* (2008) establecieron las diferencias del régimen de lluvias entre los períodos 1947-1976 y 1977-2006, en los que se observó un incremento de la precipitación anual en el último período. Las diferencias de precipitaciones entre ambos ciclos superaron los 50 mm/año hasta alcanzar variaciones de 150 y 200 mm/año. Las máximas amplitudes se registraron en el noreste y centro de la Región Pampeana. Otros autores obtuvieron resultados similares en cuanto a la tendencia creciente de la precipitación a partir de 1960 y también en la localización de los principales aumentos con algunas tendencias en la precipitación anual (Castañeda y Barros, 1994; Barros *et al.*, 2000; Doyle *et al.*, 2012). Este aumento de precipitaciones ocasionó notables incrementos en los rendimientos de los cultivos de secano (Magrin *et al.*, 2005) y contribuyó de forma contundente a la expansión de las fronteras agrícolas y del área sembrada con cultivos anuales (Volante *et al.*, 2015). Como evidencia de esto se observó un desplazamiento hacia el oeste durante la década de 1990 del límite occidental de la Región Pampeana, permitiendo la expansión de cultivos de grano (Sierra *et al.*, 1994).

Diversos autores han delimitado la Región Pampeana según distintos parámetros (Roccatagliata, 1988; Cabrera, 1994; Burkart *et al.*, 1999; Bertonatti y Corcuera, 2000; Díaz y Mormeneo, 2002), aunque son muy pocos los que analizan la distribución de la precipitación específicamente. Se han utilizado una variedad de técnicas para identificar patrones espaciales y regiones de precipitación homogéneas, que incluyen análisis de correlación, análisis de componentes principales (ACP), análisis espectral y análisis de conglomerados (Saikranthi *et al.*, 2013). Donde el ACP y el análisis de conglomerados son las técnicas más utilizadas para delimitar el patrón espacial y las regiones de precipitación homogénea (Dinpashoh *et al.*, 2004; Soltani *et al.*, 2007; Raziei *et al.*, 2008; Modarres y Sarhadi, 2011; Darand y Daneshvar, 2014; Gocic y Trajkovic, 2014).

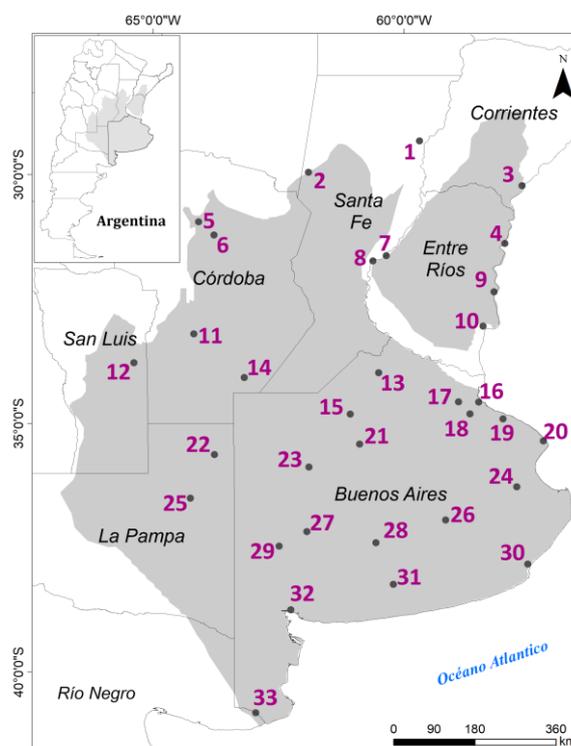
Teniendo en cuenta la heterogeneidad de las precipitaciones de la Región Pampeana, se plantea como objetivo de este capítulo realizar una clasificación en subregiones con el fin de caracterizar la variabilidad pluviométrica y la alternancia de eventos pluviométricos durante el período 1960-2010. Al evaluar la variabilidad de la precipitación a escala

subregional, es posible generar una nueva delimitación del área de estudio que considere la distribución y variabilidad de la precipitación en estos 50 años. La relevancia de este estudio es la de favorecer la predictibilidad y el desarrollo de métodos de pronóstico climático estacional de la precipitación de la Región Pampeana que permitan mejorar no sólo la productividad agropecuaria sino también la calidad ambiental de la región con el fin de prevenir los efectos adversos de inundaciones, sequías, erosión, etc.

## 2.2 Método de trabajo

### 2.2.1 Información meteorológica

Los datos climatológicos *in situ* fueron obtenidos de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que constituyen la base de los datos meteorológicos argentinos y son utilizados en la mayoría de los trabajos climáticos (Díaz, 2001; Forte Lay *et al.*, 2008; Aliaga *et al.*, 2016). Se analizaron series mensuales pluviométricas correspondientes a 33 estaciones meteorológicas para el período 1960-2010 (Figura 2.1). En este caso se analizaron 600 registros para cada estación, es decir 19.800 datos en total de la Región Pampeana (Tabla Anexo 2.1).



**Figura 2.1.** Estaciones meteorológicas utilizadas en la Región Pampeana. Los números se corresponden con la Tabla en el Anexo 2.1. (Modificado de Aliaga *et al.*, 2016).

### 2.2.2. Análisis de datos

El esquema del método de trabajo se describe en la Figura 2.2. La clasificación climática obtenida con los datos de precipitación se realizó mediante un análisis de agrupamiento. Éste se basa en la asociación de individuos según los atributos que poseen formando grupos o *cluster* de elementos, tales que los individuos dentro de cada conglomerado presenten cierto grado de homogeneidad en base a los valores adoptados sobre un conjunto de variables (Rousseeuw y Kaufman, 1990; Jolliffe y Philipp, 2010). El proceso implica una serie de pasos: el establecimiento de una matriz de datos, cálculo de una matriz de similitud y la agrupación de las entidades usualmente en forma de un dendrograma sobre la base de la matriz de similitud. Este procedimiento aglomerativo comienza su análisis con tantos grupos como individuos haya.

A partir de estas unidades iniciales se van formando grupos de forma ascendente, hasta que al final del proceso todos los casos tratados están contenidos en un mismo conglomerado o hasta que alcanza el número de grupos prefijados de acuerdo al grado de similitud deseado. Para este análisis se empleó el método jerárquico de Ward (Ward, 1963) y un intervalo de distancia euclidiana al cuadrado como medida de disimilaridad. Es decir, que la asociación está dada con la mínima distancia entre los elementos. El método de agrupación jerárquica aglomerativo de Ward ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones climáticas y climáticas (Knapp *et al.*, 2002; Marzban y Sandgathe, 2005; Jolliffe y Philipp, 2010; Aliaga *et al.*, 2016).

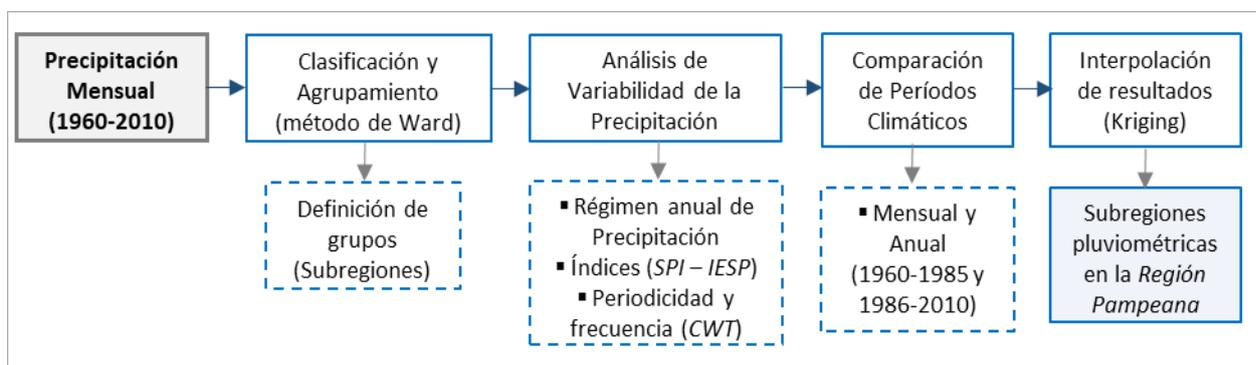


Figura 2.2. Esquema del método de trabajo.

En este análisis las estaciones meteorológicas fueron los objetos de agrupación sobre la base de datos pluviométricos mensuales para el período 1960- 2010. Para este análisis, el método jerárquico Ward fue aplicado con un intervalo de *distancia euclidiana al cuadrado* como la medición de disimilitud mide la distancia entre estaciones. Este método se agrupa por etapas, uniéndose los grupos de acuerdo con el incremento en el valor total de la suma de cuadrados de las diferencias de cada grupo al centroide de cada grupo individual (ecuaciones (1) y (2)).

$$E_k = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^k - m_j^k)^2 = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^k)^2 - n_k \sum_{j=1}^n (m_j^k)^2 \quad (1)$$

donde  $j$  es la variable,  $i$  es el individuo y  $k$  es el grupo.  $E_k$  es la suma de los errores al cuadrado del grupo  $k$ , que es la distancia euclidiana al cuadrado entre cada individuo del grupo  $k$  a su centroide.

$$E = \sum_{k=1}^h E_k \quad (2)$$

donde  $E$  es la suma de los errores al cuadrado para todos los conglomerados, si suponemos que hay  $h$  grupos. En este caso, permitió organizar las estaciones meteorológicas de la Región Pampeana en grupos con disimilitudes menores al 2%. La fusión se optimizó mediante la minimización del incremento de la varianza dentro de los grupos.

Una vez realizada la clasificación de la Región Pampeana en subregiones pluviométricas, se analizó la distribución anual y variabilidad en cada una. Se aplicaron dos índices pluviométricos, el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) y el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP). Estos se caracterizan por expresar la intensidad y duración de eventos pluviométricos. El IEP, desarrollado por McKee *et al.* (1993) mide el déficit de precipitación para múltiples escalas temporales. Se calcula a partir de la conversión de datos de precipitación de una serie lo suficientemente larga (mínimo 30 años) a probabilidades basadas en registros de precipitación acumuladas en meses. Dichas probabilidades componen series normalizadas con un promedio de 0 y una desviación estándar de 1. A cada valor de la precipitación acumulada se le asigna un valor de la función y se determina la probabilidad de ocurrencia de ésta (Peña Gallardo *et al.*, 2016). Una sequía se produce siempre que el IEP sea negativo y alcance un valor menor que o igual a -0,99. El fenómeno finaliza cuando el IEP se hace positivo. Cada fenómeno de sequía, por lo tanto, tiene una duración definida por su comienzo y su final, y una intensidad diferente para cada mes que dure el fenómeno (Garrido

del Pozo *et al.*, 2006). Los valores del IEP indican el tipo e intensidad del evento en: Extremadamente húmedos ( $> 2$ ), Muy húmedos (entre 1,5 y 2), Húmedos (entre 1 y 1,5) Normales (entre 1 y -1), Moderadamente secos (entre -1 y -1,5), Muy secos (entre -1,5 y -2) y Extremadamente secos ( $< -2$ ) (Edwards y McKee, 1997). La principal ventaja del IEP con relación a otros índices, es que permite el análisis de los impactos de las sequías en distintas escalas temporales.

El *Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica* (IESP) es un índice mensual de sequía pluviométrica elaborado por Pita (2001) basado en el cálculo de anomalías mensuales acumuladas. Al igual que el IEP, las anomalías son estandarizadas correspondiendo los valores negativos a meses secos y los valores positivos a meses húmedos. Sin embargo, su principal diferenciación respecto a otros índices similares, es que reinicia los cálculos de las anomalías acumuladas cada vez que se produce un nuevo mes seco. Ello permite reflejar las secuencias secas de diferentes longitudes a partir de una única elaboración del índice, sin la necesidad de realizarlo a múltiples escalas temporales para reflejar las diferentes duraciones de la sequía (Pita, 2001). Los eventos del IESP se categorizan en; Sin Sequía ( $\geq 0$ ), Sequía moderada (entre -1 y 0), Sequía severa (entre -1,7 y -1), Sequía extrema (entre -1,7 y -2,3) y Sequía excepcional (entre  $\leq -2,3$ ). La utilización de este índice en un área con elevada variabilidad interanual de las precipitaciones responde a la necesidad de identificar las secuencias secas registradas a partir de la sucesión de meses lluviosos y secos. Los índices basados en datos de precipitación realizan un buen desempeño en comparación a índices más complejos (Pita, 2001; Ayuso *et al.*, 2015). Además, puede identificar distintos tipos de sequías, ya que diferentes sistemas naturales y sectores económicos pueden responder a las condiciones de sequía en escalas de tiempo muy diferentes (Vicente-Serrano *et al.*, 2012).

Posteriormente, se analizó la distribución de frecuencias de la precipitación en cada una de las subregiones diferenciadas mediante la Transformada Wavelet Continua (*Continuous Wavelet Transform*, CWT). La misma se define como (Mallat, 1999):

$$(\widehat{WS})(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int S(t) \bar{\psi}_{ab} dt = \langle S, \bar{\psi}_{ab} \rangle \quad b \in \mathbb{R}, a > 0 \quad (3)$$

donde,

$$\psi_{ab} = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (4)$$

Esta función debe cumplir que  $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} |\psi| = 0$  y que el valor medio sea nulo, p.e.  $\int \psi(t) dt = 0$  (Klees y Haagsmans, 2000). El parámetro  $a$  es un factor de escala de la función *mother* y el  $b$  realiza una traslación en el tiempo. El valor de  $(\hat{W}S)(a, b)$  es una medida de la correlación entre la *mother* y un segmento local de la señal analizada. Un valor alto indica que la señal tiene una mayor componente de la frecuencia correspondiente a la escala asignada, por lo cual es posible reconstruir la variación temporal de la distribución de la amplitud de la señal en el espacio de frecuencia (Veltcheva y Soares, 2015). En este caso se utilizó la wavelet de Morlet dado que ya ha sido aplicada con éxito para el estudio de la variabilidad de la precipitación (Coulibaly, 2006; Aliaga *et al.*, 2016). Se escribieron lineamientos (*scripts*) en el lenguaje Scilab (Software de acceso libre, [www.scilab.org](http://www.scilab.org)). El esquema aplicado fue el mencionado por Torrence y Compo (1998). Se analizaron las isolíneas que describieron los valores alcanzados por  $|(\hat{W}S)(a, b)|$  y se obtuvo la distribución temporal y la periodicidad de los ciclos pluviométricos para cada subregión del área de estudio. Este método brinda una forma sencilla de analizar la descomposición de una serie de datos en tiempo-frecuencia distribuidas en el espacio y observar el modo dominante de variabilidad y la forma en que esos modos varían en el tiempo.

Posteriormente, se realizó una comparación de períodos climáticos no superpuestos de 25 años cada uno. Se compararon a nivel mensual y también anual. Esta última mediante la función de densidad de probabilidad que describe la probabilidad relativa de que cualquier variable aleatoria ocurra en un punto dado. La probabilidad de que la variable aleatoria -en este caso la precipitación anual- se encuentre dentro de una región particular viene dada por la integral de la densidad de esta variable sobre la región. La función de densidad de probabilidad no es negativa en todas partes y su integral en todo el espacio es igual a uno (Ogungbenro y Morakinyo, 2014). Una variable aleatoria  $x$  tiene densidad  $f$ , donde  $f$  es una función integrable de Lebesgue no negativa, si

$$P [a \leq x \leq b] = \int_a^b f(x) dx \quad (5)$$

la distribución uniforme en el intervalo  $[0, 1]$  tiene una densidad de probabilidad  $f(x) = 1$  para  $0 \leq x \leq 1$  y  $f(x) = 0$  en cualquier otro lugar (Ogungbenro y Morakinyo, 2014).

La distribución normal estándar tiene densidad de probabilidad

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (6)$$

si se da una variable aleatoria  $X$  y su distribución admite una función de densidad de probabilidad  $f$ , entonces el valor esperado de  $X$  se puede calcular como

$$E [x] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (7)$$

Finalmente, se representaron los resultados de la clasificación subregional mediante el método de interpolación. Los métodos de interpolación generan diferentes resultados de acuerdo con el enfoque que utilizan para determinar los valores de celda de salida. En este caso se adaptó una técnica de interpolación geoestadística denominado *Kriging*. Éste supone que la distancia o dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede ser usado para explicar la variación en el área y se ajusta a un número especificado de puntos dentro de un determinado radio para establecer el valor de salida para cada ubicación. Kriging tiene como objetivo producir una mejor estimación lineal no sesgada para una ubicación desconocida. Es lineal porque proyecta los valores con combinaciones lineales ponderadas de los datos disponibles e imparcial porque la media del error es 0; eso tiene como objetivo minimizar la varianza de los errores (Menafoglio *et al.*, 2013). El Kriging Ordinario de tipo esférico fue elegido para este estudio porque es el más adecuado para las geociencias (FAO, 2003). Se usó un tamaño esférico y de celda regular de 0,01. Esta técnica ha demostrado los resultados que mejor se ajustan al análisis de datos climatológicos (Gong y Richman, 1995; Marzban y Sandgathe, 2005; Keskin *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015, Aliaga *et al.*, 2016; 2017).

## 2.3 Resultados

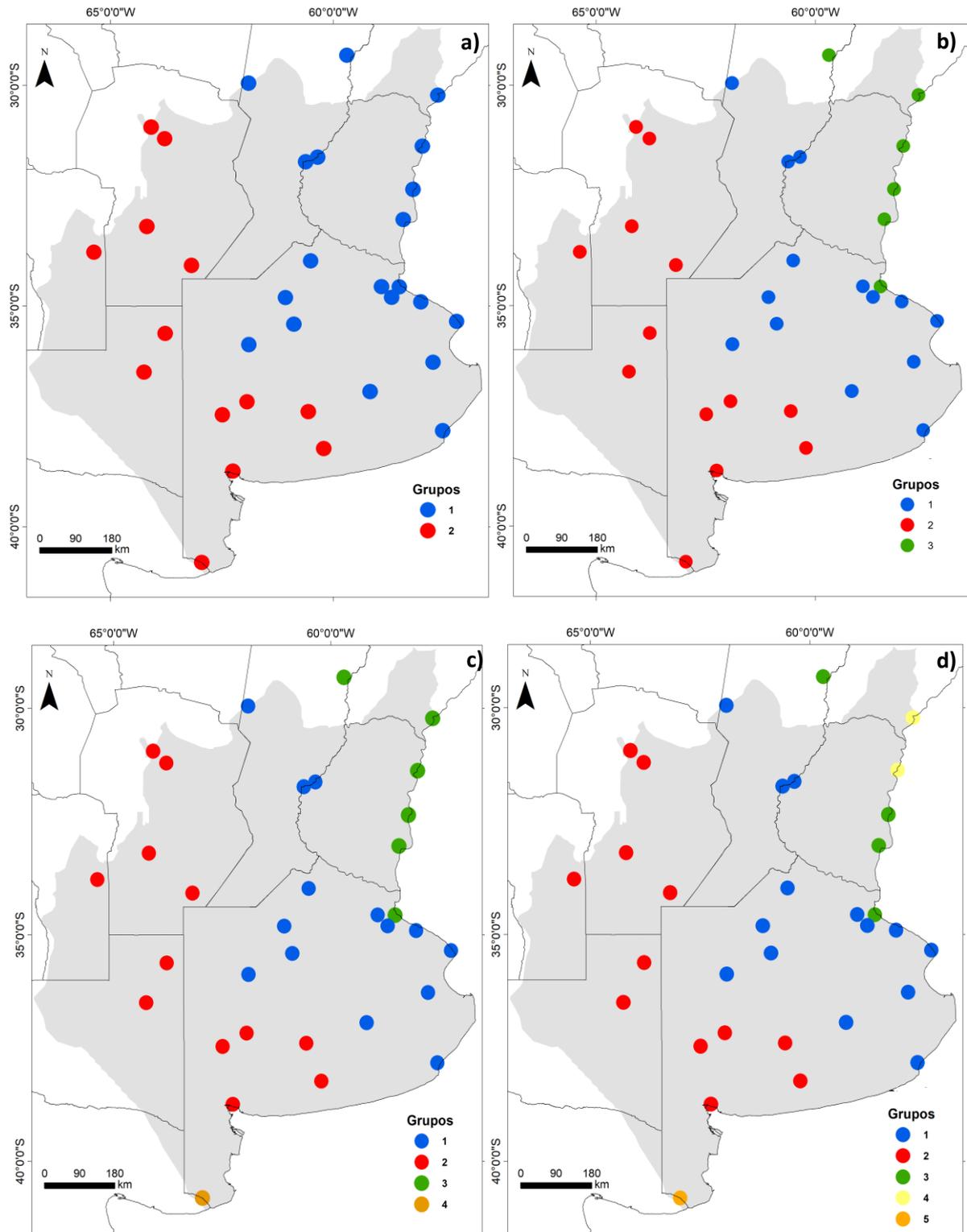
### 2.3.1 Formación de subregiones

El proceso aglomerativo permitió observar la dinámica de la formación de grupos. Al agrupar las estaciones en dos conjuntos (Figura 2.3a), la Región Pampeana queda dividida principalmente por una línea en sentido NNE-SSO, generando dos grandes áreas al Este (*grupo 1*) y Oeste (*grupo 2*). Este resultado es esperable ya que los principales sistemas productores de lluvia en la región provienen de frentes cálidos y fríos que avanzan desde SO y N-NE respectivamente y que generan abundantes lluvias en sus distintas fases (Figura 5.3). Esta subdivisión también es consistente y coherente desde el punto de vista de la precipitación con los estudios de Penalba y Vargas (2004), Rivera *et al.*, (2013) y Penalba y Rivera (2016). Sin embargo, las dos subregiones no son suficientes para definir regiones homogéneas de

precipitaciones, porque coincidiendo con Minetti *et al.* (1999) se requieren más de dos subregiones para representar los patrones de precipitación en esta región.

El resultado de la división en tres grupos (Figura 2.3b), muestra como el grupo 1 obtenido en el caso anterior se subdivide en el extremo NE, mientras que grupo 2 permanece igual. El nuevo grupo 3 coincide con el área de mayor proximidad al sistema convectivo del Atlántico Sur donde las mayores precipitaciones están asociadas a la brisa del mar, convección local y el avance de frentes cálidos (Celemín, 1984). En la otra etapa (Figura 2.3c), clasificación en cuatro grupos mantuvo la distribución anterior de los grupos 1 y 3, mientras que el 2 se divide en el extremo sur de la Región Pampeana con solo una estación. La separación de este solo punto en la Región Pampeana coincide con lo descrito por Aliaga *et al.*, (2016) y Ferrelli (2016), considerando la mayor aridez en esta zona con respecto al resto de la región. En el caso de clasificar la región en 5 grupos, el grupo 3 se divide nuevamente creando un nuevo grupo 4 en el extremo NE de la Región Pampeana. Esta última subdivisión coincide con lo identificado por Penalba y Vargas (2004).

Finalmente, la clasificación utilizada corresponde a la de 6 grupos (Figura 2.4). Esta es la que mejor se adapta a la distribución espacial de la precipitación a lo largo de la región. Este resultado coincide con lo estudiado por Díaz y Mormeneo (2002). Por lo tanto, se considera esta última clasificación como la más apropiada para la Región Pampeana. El árbol de asociación jerárquico se presenta en la Figura 2.6. Para facilitar la descripción de los grupos obtenidos se tomó como referencia el número de grupo de la Figura 2.4. La forma en que se agruparon permitió observar que los grupos 4 y 2 tuvieron las menores diferencias (o mayor similitud entre ellos). De la misma manera, los grupos 5 y 3 presentaron características similares. Hacia el extremo sur, el grupo 6 se relaciona más con el 4 y 2 que con la zona más húmeda, y el 1 fue más cercano al 3 y 5 (Figura 2.6). Por lo que se observa que las similitudes entre los grupos responden a la primera división de la Región Pampeana (Figura 2.3a) la cual coincide con la isohieta de 800 mm/año (Rivera *et al.*, 2013).



**Figura 2.3.** Distribución espacial de las estaciones agrupadas según la precipitación mensual en a) dos, b) tres, c) cuatro y d) cinco grupos (período 1960-2010).

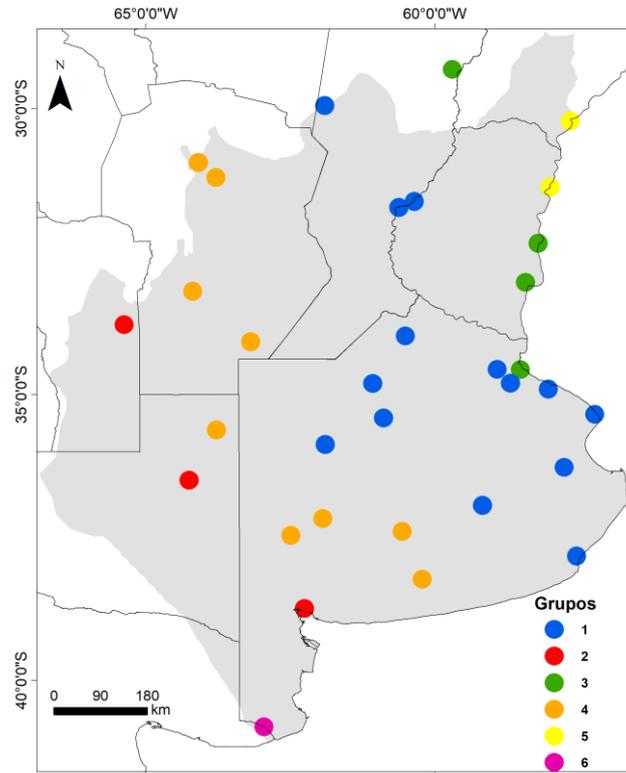


Figura 2.4. Distribución espacial de las estaciones agrupadas según la precipitación.

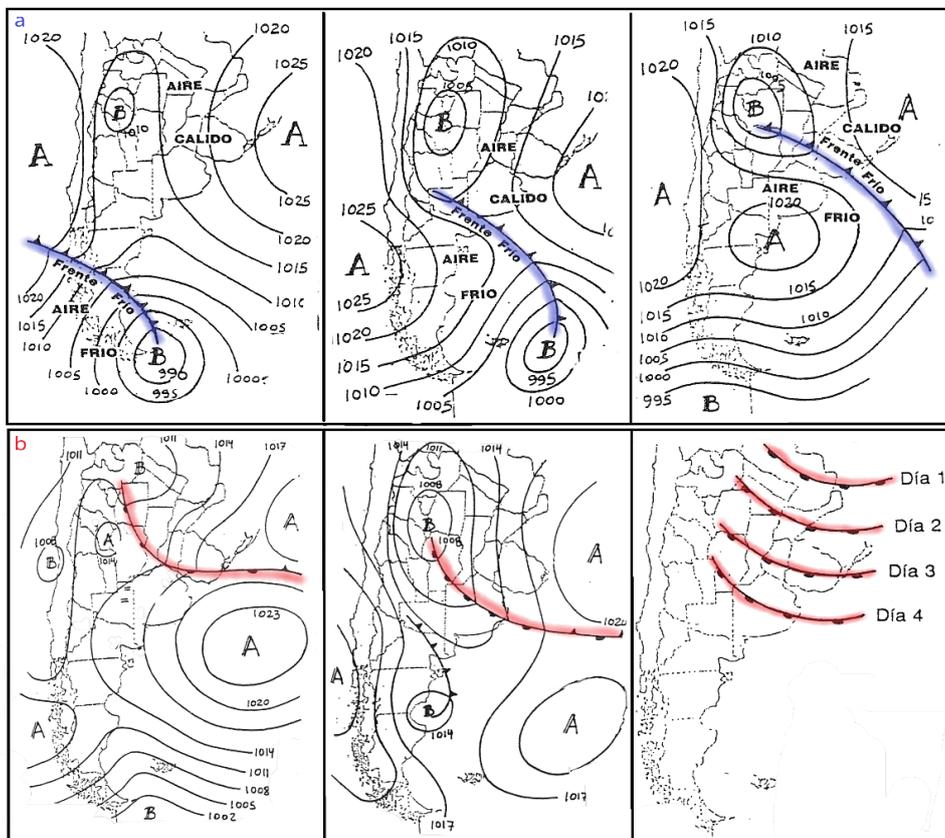
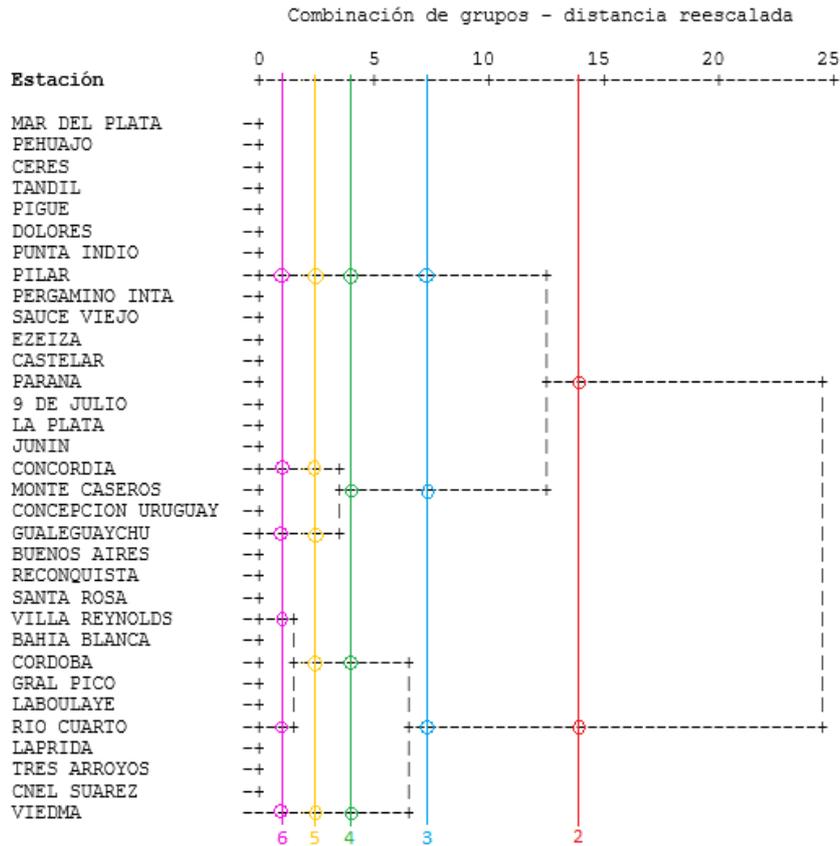


Figura 2.5. Avance de frentes fríos y cálidos en Argentina. Modificado de Celemin (1984).



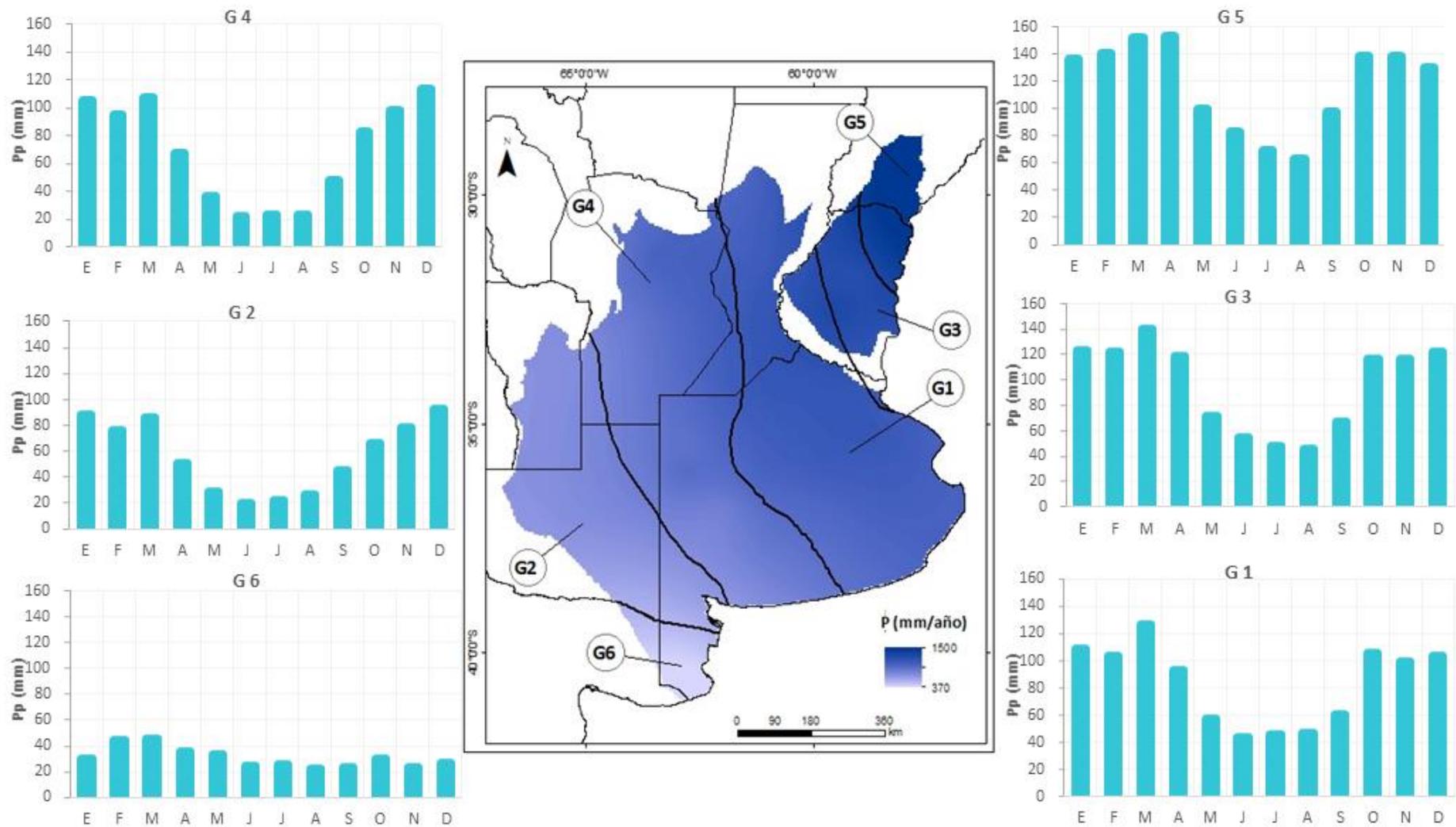
**Figura 2.6.** Dendrograma de agrupamiento según la precipitación (1960-2010).

### 2.3.2. Variabilidad subregional de la precipitación

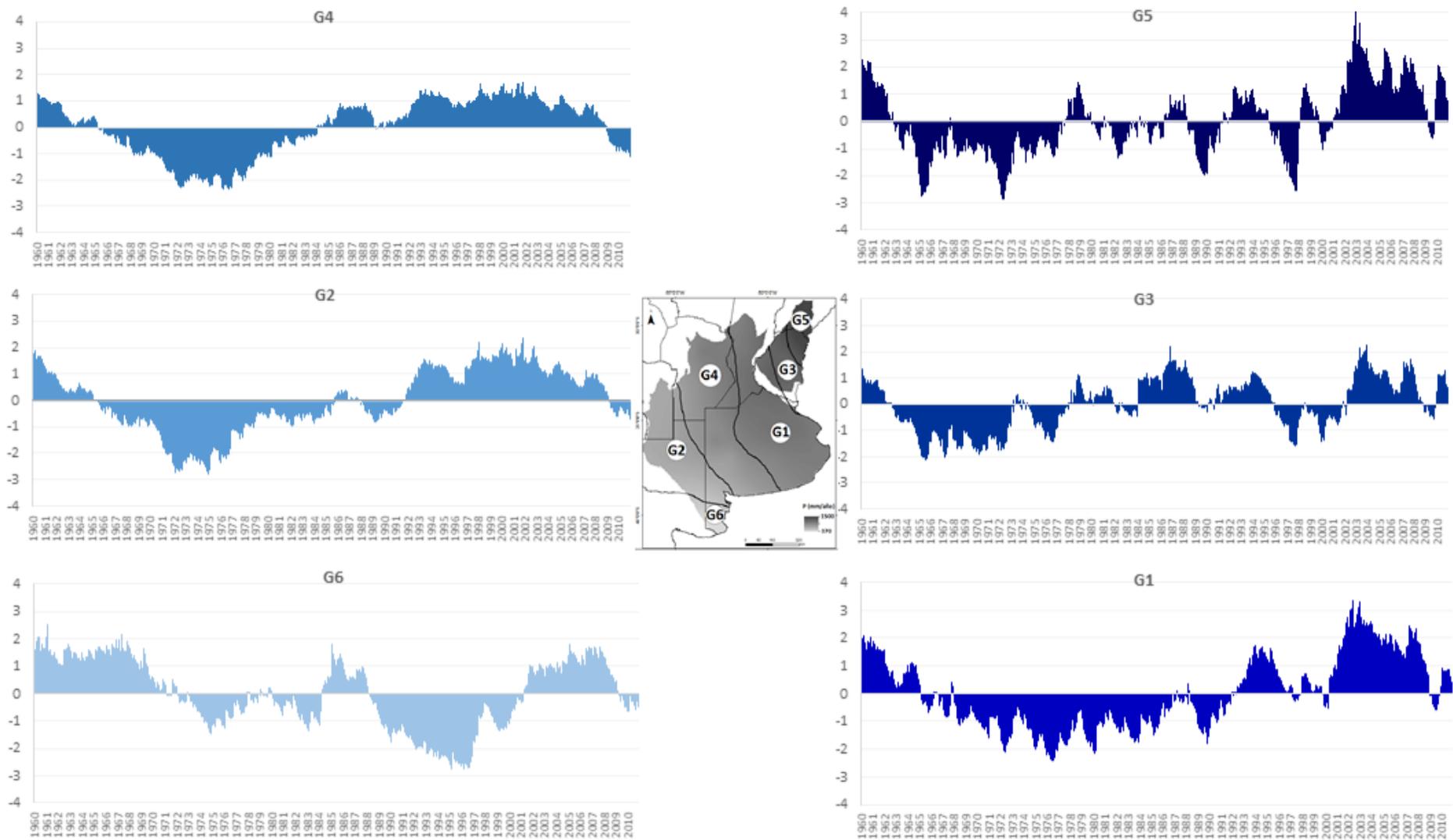
El curso anual de precipitación (Figura 2.7) de cada grupo mostró una estacionalidad marcada por un mayor volumen de lluvias durante los meses de otoño (marzo-abril) y primavera (octubre-noviembre). La estación seca corresponde al invierno, sin embargo no en todos ellos se observó la misma amplitud anual. Los grupos más lluviosos presentaron mayores amplitudes anuales que los más secos. Las mayores precipitaciones se concentraron en el noreste de la Región Pampeana en grupos 5 y 3, siendo el primero el que alcanzó las máximas precipitaciones mensuales (155 mm en el mes de abril). El grupo 6 presentó las menores precipitaciones en la Región Pampeana con máximos medios mensuales de 45 mm y una amplitud anual de 23 mm (Figura 2.7). El gradiente de precipitaciones disminuye hacia el sudoeste como consecuencia de los efectos de la latitud y la circulación oceánica que la caracteriza, hasta alcanzar los promedios mensuales de precipitación más bajos de la Región Pampeana en el grupo 6 (Figura 2.7).

La aplicación del IESP, el cual mide las sequías permitió observar la ocurrencia de déficit significativos por su intensidad y/o duración no son homogéneos en cada grupo (Figura 2.8). El grupo 5 presentó las mayores amplitudes del índice, por lo que los eventos extremos afectaron con mayor intensidad el noreste de la región, alcanzando un valor de 4 en el año 2003. Los grupos 1, 2 y 4 se ven afectadas en forma similar por los eventos extremos de precipitación, tanto húmedos como secos en intensidad y duración. Solo en el período centrado en el año 1990 el grupo 4 demostró un comportamiento diferente, sin sequías. El área del grupo 2 presentó una mayor cantidad de eventos secos que húmedos durante el período de estudio. El grupo 6 manifestó las condiciones de humedad y sequía más extremas, es decir, con las mayores amplitudes pluviométricas, sin embargo los períodos húmedos fueron de menor duración que los secos. Los grupos 3 y 4 mostraron menos frecuencia de valores del ISEP que representen eventos extremos, como es el caso de mayor que 2 en el período 2002-2004 e inferiores a -2 en el período 1972-1976, respectivamente (Figura 2.8). A pesar de estas diferencias entre los grupos, cabe destacar que teniendo en cuenta la escala de intensidad de eventos secos, los considerados extremos afectaron a toda la Región Pampeana. Por ejemplo, los eventos de extrema sequía registrados en los años 1988 y 2009 (Figura 2.8).

El IEP también permitió identificar eventos extremos importantes en todos los grupos de la Región Pampeana (Figura 2.9). La mayores coincidencias entre los 6 grupos se observan a partir de 1990 en adelante. Otra similitud en todos los casos, es que todas las posibles categorías o intensidades de los eventos (según las escalas desarrolladas por Edwards y McKee, 1997), se observan en cada uno de los grupos, incluyendo las excepcionales por encima de -2,3 (Figura 2.9). En algunos grupos como por ejemplo el 1, se observan resultados similares a los obtenidos con el IESP. Sin embargo en el grupo 5 los eventos húmedos son menos intensos con respecto a índice anterior, mientras que en los grupos 4 y 6 el resultado es inverso. En ambos casos se logró comprobar mediante índices que el comportamiento de la variabilidad pluviométrica en los seis grupos determinados no son iguales durante el período de estudio.



**Figura 2.7.** Regimen mensual de la precipitación (1960-2010) para los seis grupos identificados (Modificado de Aliaga *et al.*, 2016).



**Figura 2.8.** IESP de la precipitación en los seis grupos identificados (período 1960-2010).

Los resultados de CWT para la precipitación media en cada grupo se presentan en la Figura 2.10. El eje x representa el período de estudio en meses y años (50 años = 600 meses). El eje y indica el período de la frecuencia o señal en meses. Hacia la derecha se describe, en potencia, las señales predominantes para cada grupo (línea continua) mientras el cono de influencia se presenta con una línea punteada (Figura 2.10). Este último indica el área por encima de la cual los picos de mayor intensidad espectral no se ven afectados por los efectos de borde. Los que están por debajo son influenciados por los extremos de la muestra. La escala de colores a la derecha de cada caso representa magnitudes relativas de los coeficientes de CWT. Los máximos valores representan mayores relaciones entre el dato y la wavelet madre seleccionada. Los colores amarillo, naranja y rojo representan valores positivos de CWT y los azules indican correlación negativa (Hermida *et al.*, 2015).

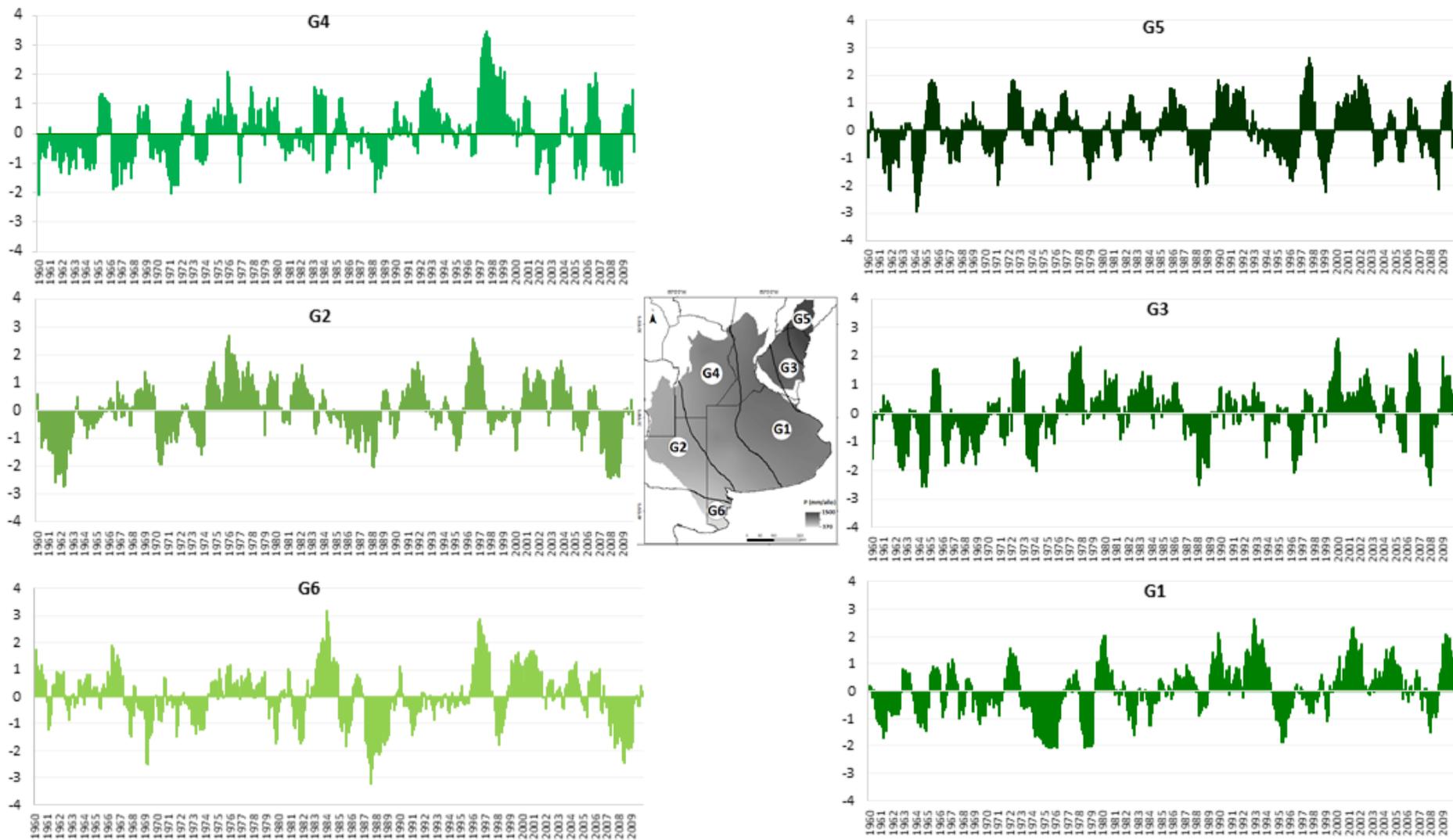
La señal anual fue más intensa en los grupos centrales de la Región Pampeana, mientras que en ambos extremos, representados por los grupos 5 y 6 fue menos predominante (Figura 2.10). Dentro de los grupos de marcada señal anual, los números 2 y 4 presentaron la mayor intensidad, mientras que la menor correspondió a los grupos 3 y 1. Los grupos que se localizan en ambos extremos latitudinales también se destacaron por la presencia de eventos extremos de abundantes precipitaciones y sequías y por tener señales estacionales e interanuales más fuertes en comparación con las restantes (Figura 2.10).

Con respecto a las frecuencias interanuales y estacionales, en el grupo 5 se destacaron señales periódicas de tres, cinco y seis meses, las cuales podrían estar relacionadas con la Oscilación Madden Julian (MJO) que posee un período de 60 a 90 días. Se observaron también señales estacionales de 6 meses en los grupos 1 y 3 que coincidieron con las estaciones lluviosas de otoño y primavera (Figura 2.10). En el caso de las señales interanuales se observaron ciclos de cinco años de notable intensidad en los dos grupos más húmedos (3 y 5) y de 3 años en el 5. (Figura 2.10). En el grupo 3 el ciclo de 3 años identificó los eventos de mayor duración y la de 5 años se presentó en todo el período de estudio. Por el contrario, los eventos de mayor duración (8 a 10 años) se observaron en el grupo 6 (Figura 2.10).

Una de las principales fuentes de variabilidad de las precipitaciones a escala interanual en la Región Pampeana es el ENSO (El Niño Oscilación Sur), cuyas fases extremas son conocidas como eventos El Niño (EN) y La Niña (LN). El grupo 3 evidenció períodos de elevadas

precipitaciones durante los años 1991-92 y 2002 que coinciden con eventos moderados EN según indica el Índice Oceánico de El Niño (ONI) desarrollado por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Por otro lado, en el grupo 1 también se registraron períodos muy lluviosos durante los mismos años pero de mayor intensidad y duración. En el grupo 4 la componente de 4 años marcó ciclos lluviosos, destacando el período 1980-87, de los cuales los años 1980-82 se caracterizaron como EN muy fuertes mientras que en 1983-87 fueron moderados. En el caso del grupo 2 se observaron períodos húmedos de variación estacional e interanual. Sin embargo, los eventos más intensos fueron los secos con una señal de 8 años. Por último, el grupo 6 tuvo componentes de 3 y 4 años de períodos lluviosos aunque los secos son de mayor intensidad y duración (Figura 2.10).

Teniendo en cuenta la distribución y comportamiento de la precipitación durante el período de estudio, puede afirmarse que los grupos 1 al 4 presentaron mayor homogeneidad entre ellos, lo cual responde principalmente a su comportamiento anual. Los grupos 5 y 6 tuvieron respuestas diferentes, seguramente al estar influenciadas por regímenes pluviométricos que exceden a las características típicas de la Región Pampeana. En el caso del 5, por la influencia subtropical y del 6, por el dominio nordpatagónico.



**Figura 2.9.** IEP de la precipitación en los seis grupos identificados (período 1960-2010). Modificado de Aliaga *et al.* (2016)

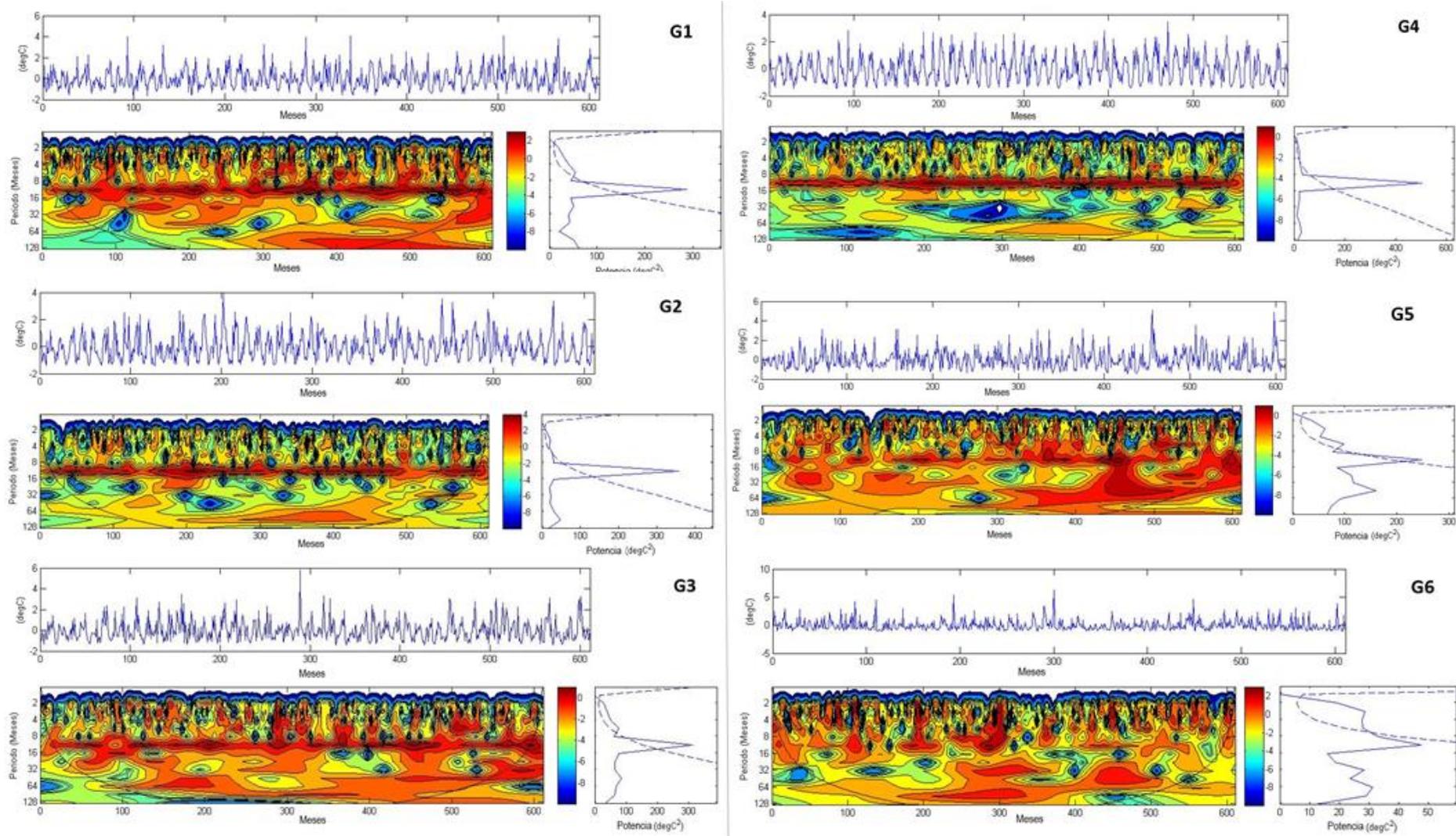


Figura 2.10. Regimen mensual de la precipitación (1960-2010) para los seis grupos identificados. Modificado de Aliaga *et al.* (2016).

### *2.3.3 Variación de la precipitación media mensual y anual por períodos climáticos*

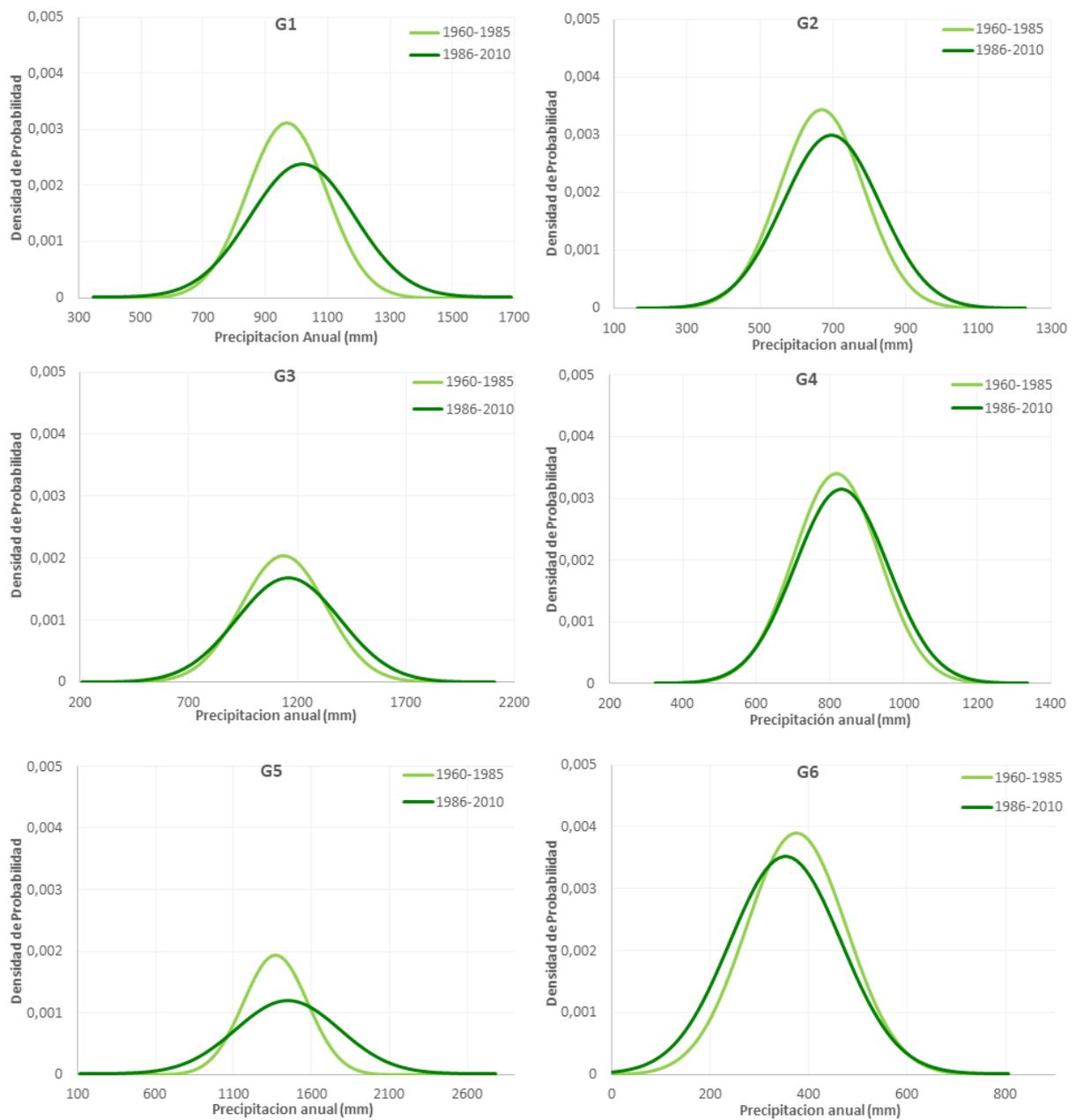
La comparación entre dos períodos climáticos permitió observar algunas diferencias estacionales de la Región Pampeana. El patrón de distribución de las precipitaciones a lo largo del año se repite en todos los grupos, una estación seca durante el invierno y abundantes lluvias en primavera y verano. Los grupos 1, 3 y 5 tienen lluvias importantes en Abril, mientras que los otros grupos no. Además, estos tres grupos muestran un aumento de las precipitaciones en el período 1986-2010 con respecto al anterior (Figura 2.11). Por otro lado, el grupo 6 muestra un leve aumento de las precipitaciones en otoño e invierno, lo cual genera mayor homogeneidad en la distribución de las precipitaciones a lo largo del año explicando las mínimas amplitudes anuales de la Región Pampeana (Figura 2.11).

La función de probabilidad de densidad anual muestra algunas diferencias entre ambos períodos (Figura 2.12). En el grupo 1 la precipitación anual oscila entre 730 y 1200 mm en el primer período (1960-1985) y entre 660 y 1300 mm en el segundo (1986-2010). En el grupo 2 prácticamente no hubo variaciones entre los períodos que variaron entre 450 y 960, y 470 a 990, respectivamente. En el tercer grupo en el primer período fue de 850 a 1590 y en el segundo de 630 a 1600. En el grupo 4 las precipitaciones anuales se mantuvieron iguales en la mínima y máxima anual. En el grupo 5 las mínimas son iguales, aunque las máximas anuales aumentaron de 1800 a 2270 mm/año. En el caso del grupo 6, al igual que el Grupo 4, las máximas y mínimas precipitaciones anuales se mantuvieron similares (Figura 2.12).

En todos los grupos que cubren la Región Pampeana se observó una leve disminución en la concentración de las precipitaciones cerca de la media. Los grupos en los que es más notable en los número 1 y 5, con variaciones del 30 al 23% y 20 a 11% respectivamente, lo cual indica una mayor variabilidad de las precipitaciones durante el año. En los grupos 1 a 5 la precipitación media anual del segundo período (1960-1985) aumento con respecto al primero (1986-2010). Los casos más significativos fueron los grupos 1 y 5 con 100 mm/año. En ambos casos, esto se refleja en el aumento de las precipitaciones medias máximas que fue de 100 y 300 mm/año respectivamente. Se destaca en grupo 3 en la que la mínima anual disminuyó 200 mm/año. El patrón espacial de precipitación estacional parece estar altamente controlado por la amplia extensión latitudinal de la región y por los pronunciados relieves orográficos.



**Figura 2.11.** Precipitación media mensual para los períodos 1960-1985 y 1986-2010 en los grupos seleccionados.

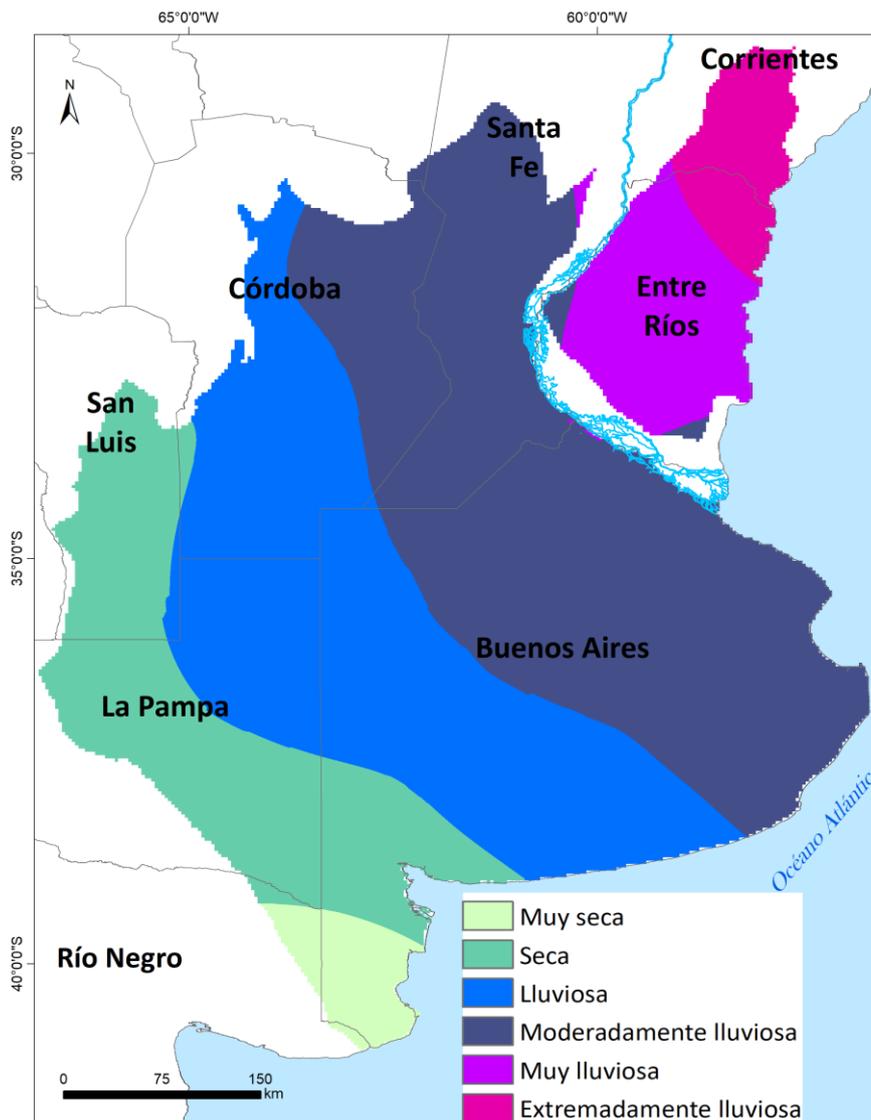


**Figura 2.12.** Distribución Normal de la precipitación anual en el período 1960-1985 y 1986-2010 en los grupos seleccionados.

### 2.3.4 Definición de subregiones pluviométricas

Teniendo en cuenta el análisis de la distribución de la precipitación y la comparación de las características entre los grupos clasificados en la Región Pampeana, fue posible caracterizarlos y establecer una delimitación para cada uno. A modo descriptivo entonces, se le asignaron a los seis grupos las siguientes denominaciones: 1: Moderadamente lluviosa

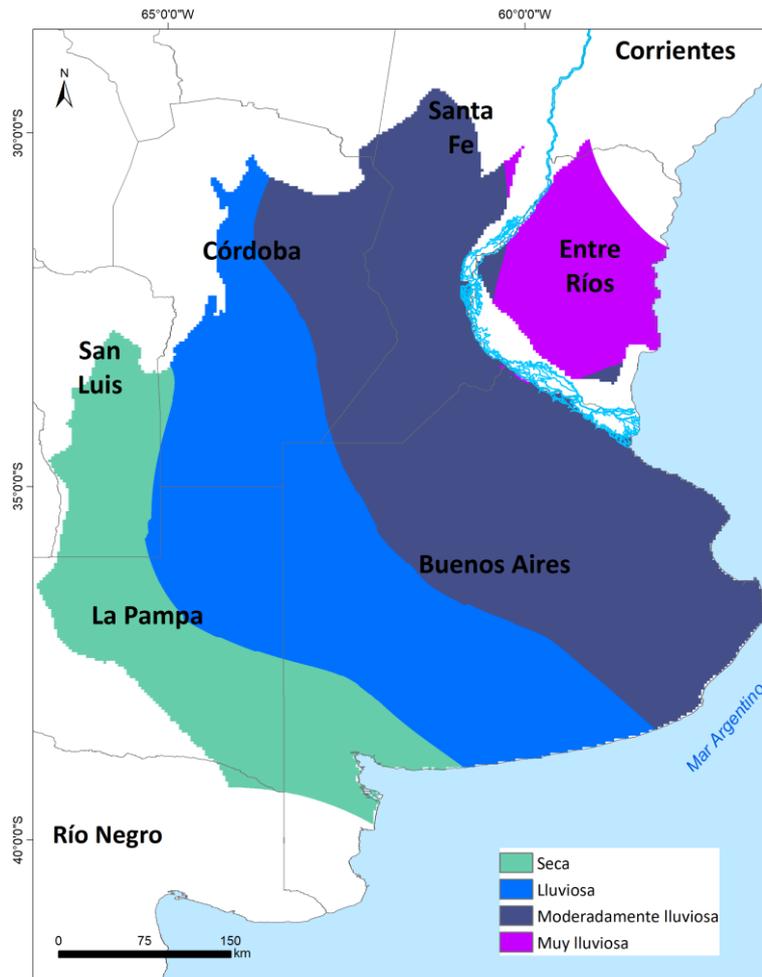
(ModLL); 2: Seca (S); 3: Muy lluviosa (MLL); 4: Lluviosa (LL); 5: Extremadamente lluviosa (ELL) y 6: Muy seca (MS). En su conjunto estas subregiones representan un área con características pluviométricas típicas de una región templada húmeda y subhúmeda y responden únicamente a las condiciones pluviométricas (Figura 2.13). El conocimiento de estos límites permite caracterizar y comprender otros aspectos sociales y económicos de la región, así como prevenir efectos adversos sobre la población y sus actividades económicas.



**Figura 2.13.** Zonificación de la Región Pampeana según su régimen pluviométrico.

Por otro lado, si se tuviera que precisar la delimitación de la Región Pampeana desde un punto de vista solo pluviométrico se debería reducir el número de subregiones dado que presentan otras características. En la Figura 2.14 se plantea una nueva propuesta con las

subregiones MLL, ModLL, LL y S. Se demostró que la subregión *MS* presenta un comportamiento norpatagónico caracterizado por la presencia de una masa de aire con muy poca humedad (Soriano, 1956), mientras que la *ELL* se caracteriza por un comportamiento subtropical (Figura 2.13). En ninguno de estos casos se mantuvo una clara relación con el régimen pampeano.



**Figura 2.14.** Nueva delimitación de la Región Pampeana según su régimen pluviométrico para el período 1960-2010.

La región sudoeste de la Provincia de Buenos Aires que coincide con la *MS* se encuentra por debajo de la isohieta de 500 mm. Existen ciclos climáticos en que esos valores se modifican. Su ecosistema natural se ha mantenido en períodos secos gracias a la cobertura del suelo con especies arbóreas, arbustivas y pastizales que han permitido conservar la

humedad y evitar la degradación en una zona donde prevalecen fuertes vientos que favorecen los procesos de erosión. Sin embargo, el avance de la actividad agrícola ha incrementado la superficie ocupada por tierras degradadas hasta llegar en la actualidad a procesos de desertificación en extensas áreas. Una de las consecuencias de este proceso es la disminución progresiva de la producción agropecuaria, mientras los ecosistemas se ven cada vez más afectados (OPDS, 2012).

En el otro extremo, el área comprendida por la subregión *ELL* presenta condiciones subtropicales. La práctica de la ganadería resulta difícil por las altas temperaturas y el predominio de pastos relativamente pobres y su agricultura se centra en el desarrollo de cultivos de arroz y yerba mate (Alarcón, 2013). Las condiciones medio ambientales de ambas subregiones (*MS* y *ELL*) sumadas a la variabilidad de las precipitaciones, exigen que las técnicas de producción agropecuaria deban adecuarse a las limitaciones medioambientales.

## **2.4 Conclusiones**

La aplicación de distintas escalas de análisis y métodos permitió analizar la distribución espacial y el comportamiento temporal de las precipitaciones en la Región Pampeana. Su extensión la vuelve compleja y heterogénea. Siguiendo lo estudiado por Díaz y Mormeneo (2002), se trabajó con seis grupos en lugar de cuatro y se extendió el período de estudio a 50 años. En este capítulo se demostró que la variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana es muy elevada. La aplicación del método de agrupamiento permitió clasificar el área de estudio en seis subregiones cuya nomenclatura se relacionó con el volumen de precipitación, identificándose cuatro regiones húmedas en las que las precipitaciones anuales fueron superiores a los 650 mm y dos regiones secas.

Esta zonificación facilitó el análisis de la variabilidad de las precipitaciones, su gradiente y la duración e intensidad de los eventos extremos. Esto permitió analizar la variabilidad de las precipitaciones e identificar eventos extremos comparando su intensidad y periodicidad en cada subregión. Por ejemplo, durante los eventos de extrema sequía registrados en los años 1988 y 2009 y los eventos muy lluviosos de 1997 y 2000-2002 se observaron consecuencias socioeconómicas significativas como la reducción notable de la

cobertura de cultivos y pastos al aumentar la superficie ocupada por suelos descubiertos (Ferrelli *et al.*, 2011).

Se observó que los eventos extremos fueron más intensos a medida que aumentó la aridez del ambiente. En la subregión *Muy Seca*, se observaron menor cantidad de eventos extremos pero de mayor intensidad. En el caso opuesto, la región *Extremadamente lluviosa* presentó una mayor cantidad de eventos extremos pero la mayoría de ellos no superó la escala de moderadamente húmedo o moderadamente seco según el IEP. Los eventos extremos de mayor intensidad afectaron a toda la Región Pampeana, mientras que los de menor intensidad fueron observados sólo en algunas subregiones. Ejemplo de ello son los años 2002 y 2008 caracterizados por abundantes lluvias y sequías severas, respectivamente. La clasificación pluviométrica permitió captar diferencias en eventos débiles (según ONI). El análisis de las precipitaciones en relación al ONI demostró que los eventos El Niño y La Niña tienen gran influencia en el área de estudio, observándose además que el impacto de estos fenómenos varía de una subregión a otra.

Los resultados obtenidos coinciden con lo estudiado por Barros *et al.* (2000): las tendencias de precipitación anual positivas pueden atribuirse en parte a los cambios en la frecuencia e intensidad de las fases del ENSO. La ocurrencia de lluvias intensas se da en períodos cortos de tiempo pero con mayor frecuencia, especialmente entre los 30 y 40° S de latitud (Barros *et al.*, 2000). Se observó que en la Región Pampeana la contribución más importante a la variación anual de la precipitación proviene de la variabilidad en el otoño y en menor medida en el verano. Las frecuencias interanuales y estacionales identificadas de tres, cinco y seis meses podrían estar relacionadas con la Oscilación Madden Julian (Bridgman y Oliver, 2006). Esta oscilación de la atmósfera tropical-oceánica afecta a la variabilidad de las precipitaciones en latitudes bajas, coincidiendo con el extremo noreste de la Región Pampeana influenciado por el anticiclón del Atlántico Sur.

También los resultados obtenidos coinciden con los estudios que prueban una tendencia positiva en cuanto al aumento de la precipitación (Castañeda y Barros, 1994; Barros *et al.*, 2000; Doyle *et al.*, 2012). Coincidiendo con Forte Lay *et al.* (2008) al comparar períodos climáticos, el segundo que representa las últimas décadas muestra un incremento de la precipitación anual. Lo cual se probó en todos las subregiones menos en la *Muy seca* (grupo

6). Además, se registraron los mayores aumentos en mm/año también en las subregiones en el noreste y centro de la Región Pampeana.

Como aporte final, se propuso una nueva delimitación de la Región Pampeana que considera la distribución de la precipitación durante el período 1960-2010. Este conocimiento constituye un aporte importante para la gestión territorial, ya que el estudio de los distintos regímenes pluviométricos ayuda a la planificación de los calendarios agrícolas y a la gestión del territorio. La disponibilidad de recursos hídricos marca el desarrollo de numerosas actividades agroeconómicas dependientes de las precipitaciones *in situ*. La caracterización de los regímenes pluviométricos a escala subregional es una herramienta necesaria para generar acciones de prevención de procesos como la erosión, las sequías y las inundaciones que podrían impactar sobre la productividad.

## Capítulo 3

### CLASIFICACIÓN DEL CLIMA PAMPEANO SEGÚN PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

#### 3.1 Introducción

Cuando se analiza la variabilidad climática y el clima de un área se estudian principalmente las variaciones de dos parámetros meteorológicos: la precipitación y la temperatura del aire. Existen numerosos estudios que los utilizan para realizar clasificaciones climáticas (Ninyerola *et al.*, 2000; Shahriar *et al.*, 2015), aplicadas a diferentes objetivos como comprender su relación con la biodiversidad o las coberturas vegetales (Tamarís-Turizo y López-Salgado, 2006; Gandini *et al.*, 2014), el potencial productivo (Thomas, 1992; Falasca *et al.*, 2014; Baban, 2016; Cabré *et al.*, 2016; Fischer y Velthuisen, 2016), proyecciones del cambio climático (Urrutia y Vuille, 2009; Flaounas *et al.*, 2013; Ban *et al.*, 2014), entre otros.

Según estos parámetros, se conoce que la Región Pampeana se encuentra dentro de la región subtropical y de latitudes medias o climas templados. Además, al estar próxima al Océano Atlántico Sur, genera menores amplitudes térmicas diarias y anuales comparado con otras regiones de latitudes similares en el Hemisferio Norte (Barros *et al.*, 2015). Los ciclos naturales en la atmósfera pueden afectar el clima de la región durante semanas, meses y décadas (Scian *et al.*, 2006; Scian y Pierini, 2013). En la Región Pampeana la precipitación disminuye de noreste a sudoeste y determina el paso del clima cálido y húmedo a uno semiárido (Scian *et al.*, 2006). La zona oriental es subtropical húmeda y subhúmeda, mientras que el noroeste es una estepa seca-caliente. La zona oeste es seca y fría y la región suroeste de la pampa es árida y fría. Las temperaturas medias anuales disminuyen de norte a sur, mientras que el clima continental predomina de este a oeste, causando variaciones en los regímenes térmicos.

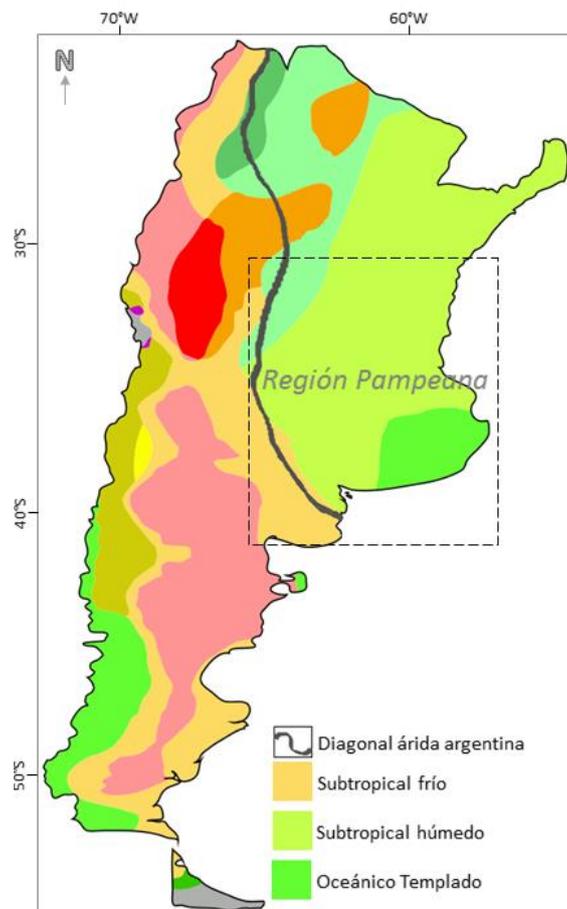
A nivel mundial, una de las clasificaciones climáticas más importante es la denominada *Köppen*, desarrollada por Wladimir Köppen (1936). Consiste en una zonificación a escala global basada en la temperatura y precipitación media mensual y anual. El autor denomina cada tipo de clima con una serie de letras tomando como referencia la vegetación nativa. Al considerar sus resultados en Argentina, específicamente en la Región Pampeana, se

identifican tres zonas climáticas; dos áreas dentro de la categoría de *Templados Mesotermal* y uno en la denominada *Seco* (Figura 3.1).

Los *templados* se encuentran dentro del grupo con precipitaciones distribuidas a lo largo del año por lo que no hay una estación seca. Incluye el clima *Subtropical sin estación seca*, donde la temperatura media del mes más cálido supera los 22 °C y localmente le otorga el nombre de *clima pampeano*. Se extiende en el centro de la Argentina (Región Pampeana y la cuenca del Paraná). El otro clima dentro de la categoría de los Mesotermes es el *templado Oceánico de verano suave*, donde la temperatura media del mes más cálido no llega a los 22 °C pero se superan los 10 °C durante cuatro o más meses al año. Es llamado *clima oceánico* o *atlántico*, templado y húmedo y se observa en las regiones occidentales de las grandes masas continentales al no llegar el verano a los 22 °C debido a la influencia del mar o la altitud, como zonas costeras del centro de Argentina.

Por último dentro de los climas *Semiáridos*, identifica el *Semiárido frío*, donde las precipitaciones y la vegetación son escasas. Este clima es conocido en algunas regiones como de transición entre el mediterráneo y el desértico. Se observa en zonas de estepas, semidesiertos o zonas previas a los desiertos. La Región Pampeana se encuentra en el extremo sur coincidiendo con la disminución de la precipitación media y el comienzo de la *Diagonal Árida argentina* (Figura 3.1).

En nuestro país, diversos autores han delimitado la Región Pampeana según este criterio para caracterizarla y definir factores edáficos, aptitud de uso de la tierra y variables agro-climáticas, características fitogeográficas, biodiversidad y servicios ambientales o recursos naturales y actividades económicas (Roccatagliata, 1988; Cabrera, 1994; Burkart *et al.* 1999; Bertonatti y Corcuera, 2000). Además, varios estudios han aplicado la identificación de zonas climáticas homogéneas por conglomerados en la Región Pampeana con variables hídricas (Rodríguez y De La Casa, 1990; Ateca *et al.*, 2001; Ravello *et al.*, 2001; Hurtado *et al.*, 2002).



**Figura 3.1.** Clasificación climática de Köppen en la Región Pampeana, Argentina.  
Modificado de Köppen, 1936 y Bruniard, 1982.

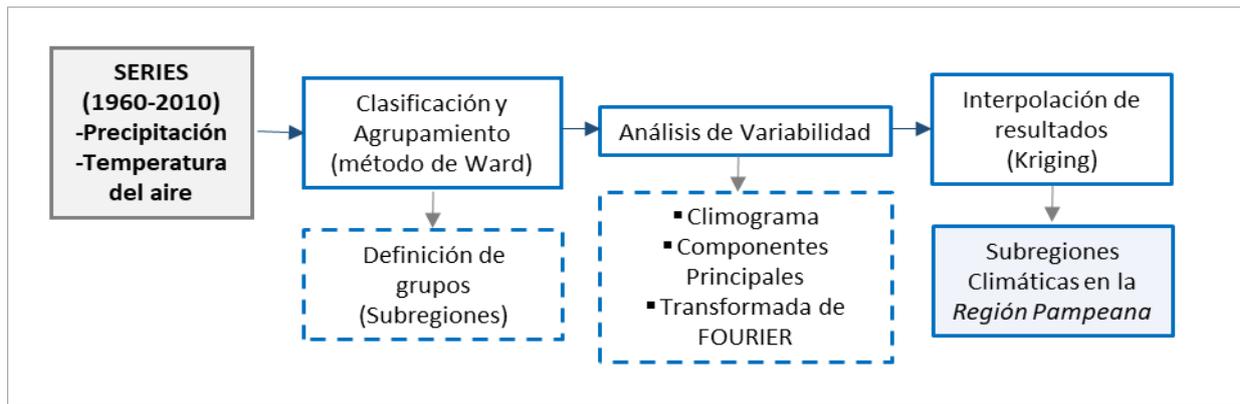
Una de las clasificaciones climáticas desarrolladas específicamente para la Región Pampeana que se destaca, es la realizada por Díaz y Mormeneo (2002). Ésta consiste en la caracterización de regiones agroclimáticas homogéneas en la Región Pampeana considerando la precipitación y la temperatura para el período 1961-1990. El análisis de conglomerados lo realizaron para cada variable individualmente, identificando 12 zonas climáticas según la temperatura y otras 12 según la precipitación. Luego de la intersección de ambos resultados los autores definieron seis grupos o subregiones homogéneas (Figura 3.2).



registros para cada estación, es decir 39.600 datos en total de la Región Pampeana (Tabla Anexo 2.1). El esquema del método de trabajo se describe en la Figura 3.3. La clasificación climática obtenida con los datos de precipitación y temperatura se realizó mediante un análisis de agrupamiento o cluster descrita en el Capítulo 2. En este caso las estaciones meteorológicas fueron los objetos a agruparse sobre la base de datos de precipitación y temperatura del aire.

Una vez clasificada la Región Pampeana y conocidos los grupos se realizó un análisis de frecuencias en cada uno y para ambas variables mediante la Transformada Rápida de Fourier (TRF). Para ello se realizó previamente un análisis de componentes principales (ACP) con las estaciones pertenecientes a cada grupo. Esto se realizó de forma separada para la precipitación y la temperatura a fin de obtener un componente que representara la variabilidad en cada grupo. Luego a ese componente se le aplicó la TRF. El ACP es una herramienta de exploración de datos estadísticos basada en ordenación que convierte un número de variables potencialmente correlacionadas (con algún atributo compartido en el espacio o el tiempo) en un conjunto de variables no correlacionadas que capturan la variabilidad de los datos (Abson *et al.*, 2012). Es un análisis no paramétrico y es independiente de cualquier hipótesis sobre la distribución de probabilidad de datos (Abdi y Williams, 2010).

El ACP utiliza transformación lineal ortogonal para identificar un vector que representa la mayor variabilidad total en un conjunto de N variables como sea posible con el primer componente principal, dada por la suma de las varianzas de las variables observadas (Hatcher, 1997). En el caso de la precipitación al ACP se le realizó una rotación de los vectores en un nuevo conjunto, a fin de mejorar la interpretación de los resultados mediante la rotación *Varimax* (Kaiser, 1958). Este tipo de rotación es la más utilizada para mejorar el análisis de datos de precipitación y es adecuada cuando el número de componentes es reducido (Teo *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2012). Esta técnica estadística multivariable es de las más utilizadas para la dimensionalidad en las ciencias atmosféricas (Preisendorfer, 1988; Jolliffe, 2002; Hannachi *et al.*, 2007; Abson *et al.*, 2012).



**Figura 3.3.** Esquema de los pasos del método de trabajo

Existen varios contrastes que pueden realizarse para evaluar si el análisis factorial es adecuado para las muestras analizadas. Uno de los más utilizados es el test Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) que relaciona los coeficientes de correlación observados entre las variables. Cuanto más cerca de 1 tenga el valor obtenido, implica que la relación entre las variables es alta. Si  $KMO \geq 0.9$ , el test es muy bueno; notable para  $KMO \geq 0.8$ ; mediano para  $KMO \geq 0.7$ ; bajo para  $KMO \geq 0.6$ ; y muy bajo para  $KMO < 0.5$ . Además, la prueba de esfericidad de Bartlett evalúa la aplicabilidad del análisis factorial de las variables estudiadas, el cual es aceptable si  $\text{Sig. (p-valor)} < 0.05$ . Estos análisis fueron realizados mediante el software SPSS Statistics 17.0, STATISTICA 7 y GRAPHER 6. Finalmente se realizó el mapa de la distribución espacial de los grupos en el software ArcGIS 10.1. Para ello se aplicó una interpolación espacial para la Región Pampeana mediante el método *geoestadístico* de interpolación que se utiliza para modelos de predicción más avanzados como el caso del *Kriging* descrito en el Capítulo 2.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Análisis de agrupamiento

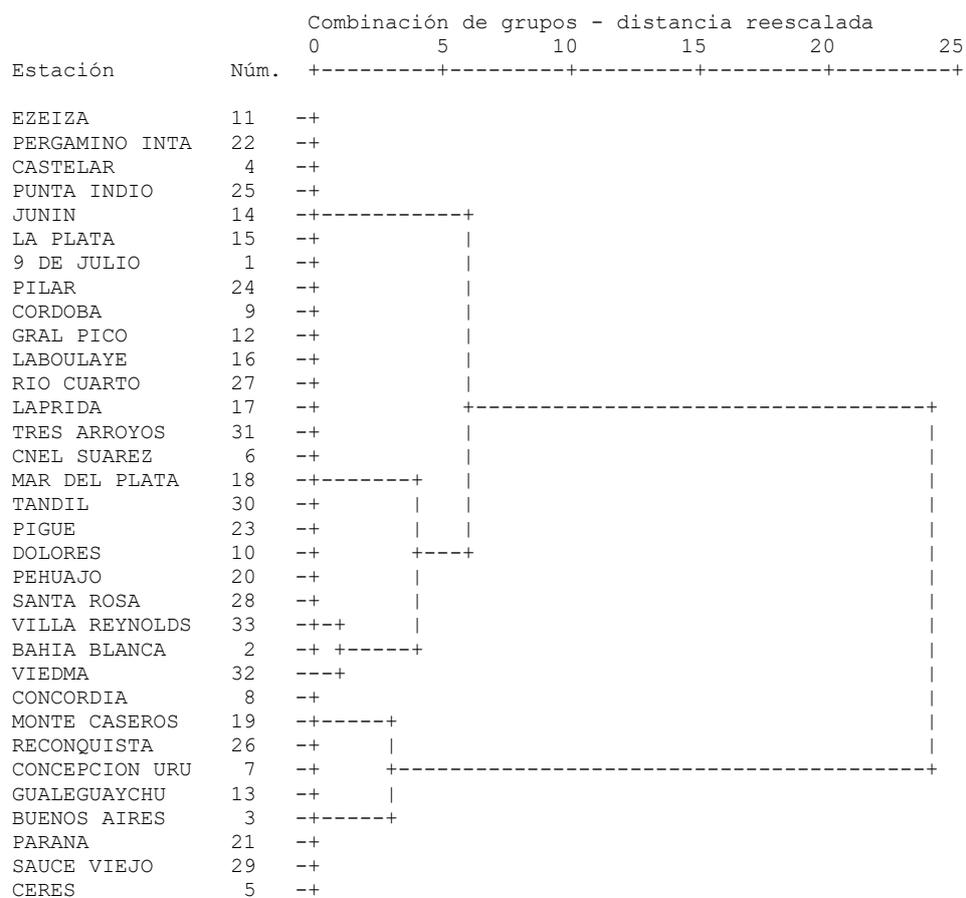
EL análisis de conglomerados mostró resultados claros de cuanta similitud climática existe entre los sitios considerados. Se obtuvieron los índices de distancia entre las estaciones por el análisis de a par detallado en la Tabla 3.2. La distancia promedio entre las estaciones fue de 4,32 con una amplitud notable entre los casos. Las máximas distancias están

concentradas en el caso 19, con un promedio de distancia de 13,77 con respecto al resto de los casos. La misma corresponde a la estación Monte Caseros (ubicada en el extremo noreste de la Región Pampeana, Figura 2.1) y la segunda más alejada es el caso 8, que pertenece a la estación de Concordia. Esto permite observar que las condiciones de precipitación y temperatura en el sector noreste de la región de estudio distan notablemente con respecto a las condiciones entre el resto de los casos, es decir en otras latitudes de la Región Pampeana.

Con respecto a los casos más cercanos en cuanto al comportamiento de los parámetros considerados, se destaca la mínima disimilitud con 0,004 (entre el caso 18 y 30 que corresponden a Tandil y Mar del Plata - Figura 3.5). Considerando los promedios de las distancias mínimas, los casos 9 y 1 (correspondientes a Córdoba y 9 de Julio) presentan las máximas similitudes con respecto a la mayoría de los casos, es decir que representan las condiciones generales de la mayor parte del resto del área de estudio. El dendrograma resultante de este análisis permite identificar el nivel de coincidencias a medida que forman los grupos (Figura 3.5).

Como resultado, se agruparon las 33 estaciones en 7 grupos diferenciados. La distribución espacial de los grupos en la Región Pampeana está representado en la Figura 3.6. Se observa un gradiente en la región donde la temperatura disminuye de norte a sur y la precipitación de noreste a sudoeste (Grimm, 2011; Aliaga *et al.*, 2016). La precipitación máxima se registró al noreste de la región debido a la contribución del aire caliente y húmedo del Océano Atlántico Sur. Los grupos 1, 2, 4 y 6 mostraron una disminución progresiva en el gradiente de temperatura, con diferencias de hasta 5 °C entre los extremos, así como una disminución de la precipitación media de 1.300 mm/año a 900 mm/año (Figura 3.6).

Al oeste una disminución considerable de la precipitación fue representada por los grupos 3 y 5, donde la precipitación se redujo entre 250 y 200 mm/año en comparación con los grupos vecinos 2 y 6, respectivamente. La temperatura disminuyó entre los racimos 2 y 3 debido al aumento de la altitud en la provincia de Córdoba (noroeste – Figura 3.3). El grupo 4 mostró un arreglo Noroeste - Sureste que coincidió con la diagonal árida de Sudamérica en Argentina. Esto indica una limitación climática en la precipitación anual que coincide con la isolínea de 500 mm/año (Gabella y Zimmermann, 2016).

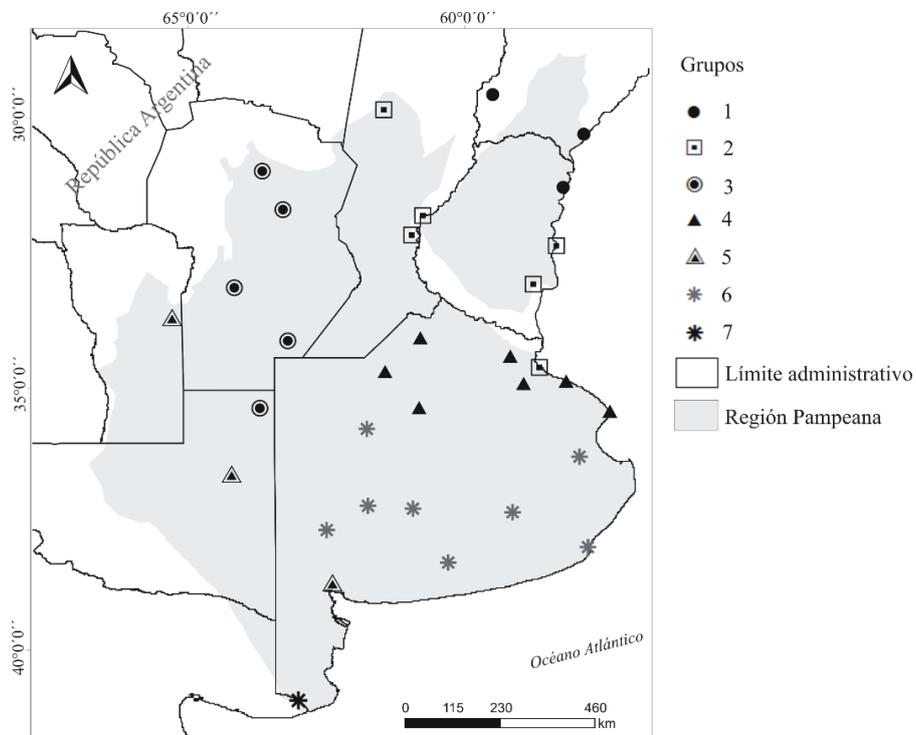


**Figura 3.5.** Dendrograma de grupos según precipitación y temperatura (1960-2010)

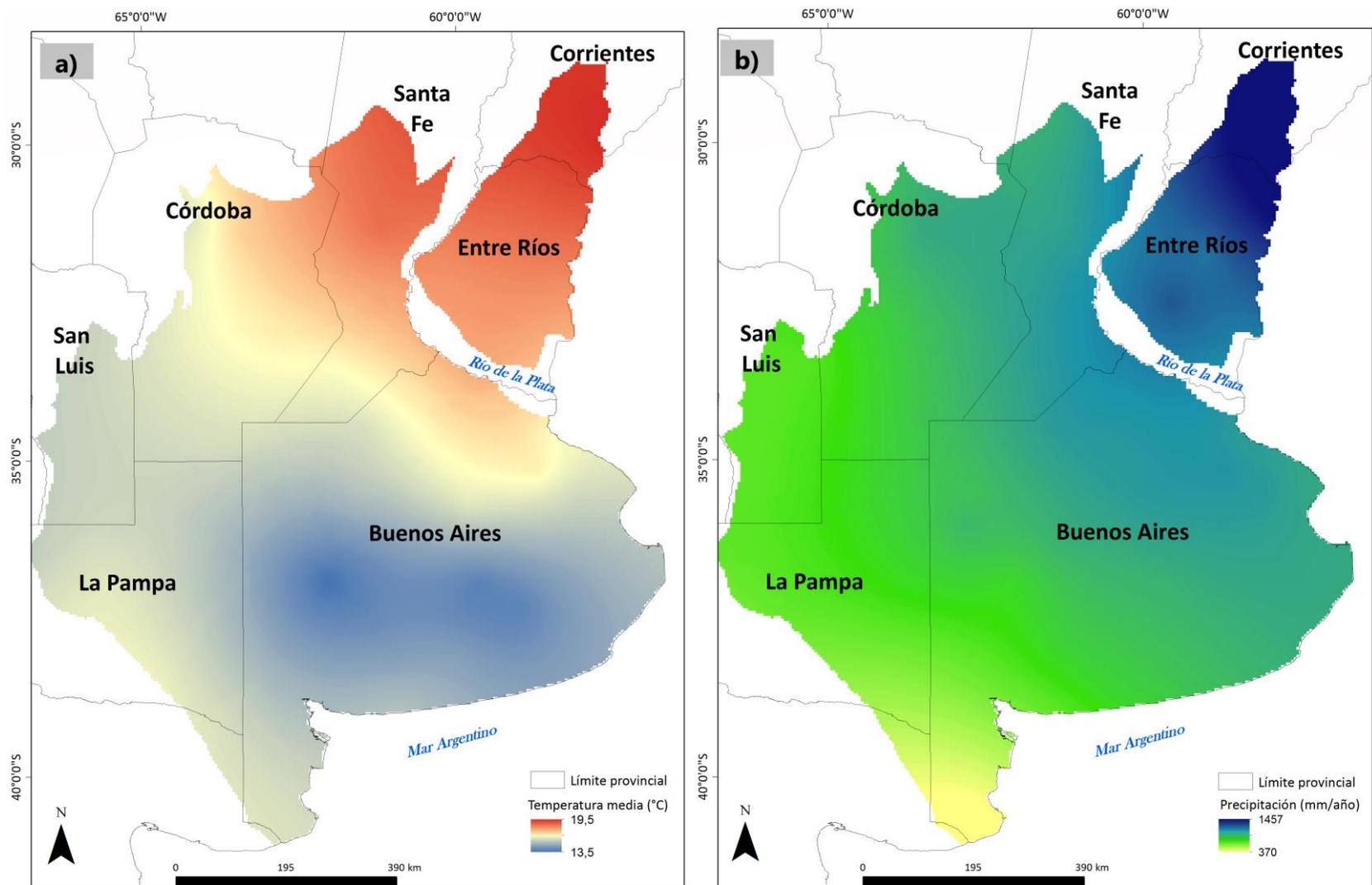
		Matriz de distancias																																				
Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33					
1																																						
2	3,4																																					
3	1,5	8,6																																				
4	0,2	4,3	0,8																																			
5	3,0	6,3	2,1	1,9																																		
6	3,7	1,6	9,9	5,3	10,8																																	
7	1,6	7,7	0,2	0,7	1,1	9,9																																
8	5,4	16,2	1,2	4,0	4,3	18,0	1,6																															
9	0,6	1,2	3,5	1,0	3,0	2,4	3,0	8,7																														
10	0,7	2,3	4,1	1,5	5,9	1,3	4,3	9,7	0,8																													
11	0,1	3,3	1,3	0,1	2,2	4,2	1,2	5,1	0,5	1,0																												
12	0,6	1,3	3,3	0,9	2,8	2,6	2,8	8,4	0,0	0,8	0,5																											
13	1,0	6,6	0,2	0,4	1,2	8,4	0,1	2,2	2,3	3,3	0,7	2,1																										
14	0,0	3,3	1,8	0,3	3,4	3,3	1,9	5,9	0,6	0,5	0,1	0,6	1,3																									
15	0,0	3,4	1,9	0,3	3,6	3,2	2,0	6,0	0,7	0,5	0,2	0,7	1,3	0,0																								
16	0,5	1,4	3,2	0,8	2,9	2,5	2,8	8,3	0,0	0,7	0,4	0,0	2,1	0,5	0,6																							
17	2,1	1,2	7,2	3,4	8,0	0,2	7,2	14,3	1,2	0,5	2,5	1,4	5,9	1,8	1,8	1,3																						
18	1,8	2,7	6,3	3,1	8,7	0,7	6,7	12,7	1,8	0,3	2,4	1,9	5,5	1,5	1,4	1,7	0,3																					
19	8,9	21,9	3,1	7,0	6,9	23,9	3,7	0,4	13,1	14,1	8,5	12,7	4,5	9,5	9,6	12,6	19,7	17,6																				
20	0,4	2,0	3,4	1,0	4,6	1,7	3,4	8,6	0,4	0,1	0,6	0,4	2,5	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	12,9																			
21	1,6	6,4	0,7	0,8	0,4	9,3	0,2	2,6	2,4	4,3	1,1	2,2	0,2	1,9	2,1	2,3	6,7	6,7	5,0	3,3																		
22	0,1	3,3	1,3	0,1	2,0	4,4	1,1	5,0	0,6	1,1	0,0	0,5	0,7	0,2	0,2	0,4	2,6	2,5	8,4	0,6	1,0																	
23	1,5	2,0	6,0	2,7	7,8	0,6	6,2	12,4	1,3	0,2	2,0	1,4	5,0	1,3	1,2	1,2	0,1	0,1	17,4	0,4	6,1	2,1																
24	0,4	3,3	1,3	0,2	1,2	5,2	0,9	4,9	0,6	1,8	0,2	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	3,3	3,5	8,2	1,1	0,6	0,1	2,9															
25	0,1	2,3	2,3	0,4	3,0	2,8	2,1	6,8	0,2	0,5	0,1	0,2	1,5	0,1	0,1	0,2	1,5	1,5	10,7	0,2	1,9	0,2	1,1	0,4														
26	6,3	15,9	1,8	4,4	2,9	19,5	1,6	0,6	8,9	11,1	5,6	8,5	2,3	6,9	7,1	8,5	15,5	14,6	1,0	9,7	2,1	5,4	14,0	4,8	7,4													
27	0,8	1,2	3,5	1,0	2,7	2,7	2,9	8,7	0,0	1,0	0,6	0,0	2,2	0,8	0,9	0,0	1,5	2,1	13,0	0,6	2,2	0,6	1,6	0,6	0,3	8,6												
28	2,5	0,1	7,2	3,3	5,4	1,5	6,4	14,3	0,7	1,6	2,4	0,8	5,4	2,4	2,5	0,8	0,9	2,2	19,7	1,3	5,3	2,5	1,5	2,5	1,6	14,1	0,7											
29	2,1	6,3	1,1	1,1	0,1	9,9	0,4	3,2	2,6	4,9	1,5	2,4	0,5	2,5	2,6	2,5	7,2	7,5	5,7	3,7	0,1	1,3	6,7	0,8	2,3	2,3	5,3											
30	1,8	2,6	6,5	3,1	8,7	0,6	6,8	12,9	1,7	0,3	2,4	1,9	5,6	1,5	1,4	1,7	0,3	0,0	18,0	0,7	6,8	2,6	0,0	3,5	1,5	14,8	2,1	2,0	7,5									
31	1,8	0,9	6,5	2,8	6,9	0,4	6,3	13,4	0,8	0,5	2,0	0,9	5,1	1,5	1,5	0,8	0,1	0,5	18,6	0,5	5,8	2,1	0,2	2,6	1,1	14,3	1,0	0,6	6,2	0,5								
32	11,3	2,3	19,7	12,8	14,7	4,5	18,2	30,5	6,8	8,4	11,1	7,0	16,5	10,9	11,1	7,2	5,2	8,1	38,1	8,2	15,8	11,2	7,1	10,9	9,2	29,4	6,7	3,1	15,3	7,8	5,0							
33	2,3	0,1	6,7	3,0	4,9	1,7	5,9	13,6	0,6	1,6	2,2	0,6	4,9	2,2	2,3	0,7	1,1	2,3	18,8	1,3	4,8	2,2	1,6	2,2	1,4	13,3	0,5	0,0	4,8	2,2	0,7	3,4						

Tabla 3.2. Matriz de distancias entre pares de estaciones. Se resaltan los casos de máximas y mínimas distancias (N° de caso = estación en Figura 3.5).

El grupo 3 tiene una extensión latitudinal mientras que los otros se distribuyen en forma circular o longitudinal. Finalmente, el grupo 7 fue el más frío y seco de las Pampas, con precipitaciones por debajo de 400 mm/año, aproximadamente 300 mm menos que el grupo noreste cercano. Sólo en este caso, el grupo está representado por una sola estación meteorológica (Viedma), situada en el límite meridional de la región (Figura 3.6). Mediante el método de interpolación citado, fue posible observar la distribución espacial de los parámetros estudiados (Figura 3.7). Un mayor aporte al conocimiento de la distribución espacial de estos dos parámetros consiste en representar los resultados del análisis de agrupamiento y de la variabilidad de los parámetros considerados en cada subregión.



**Figura 3.6.** Distribución espacial de los grupos obtenidos en la Región Pampeana

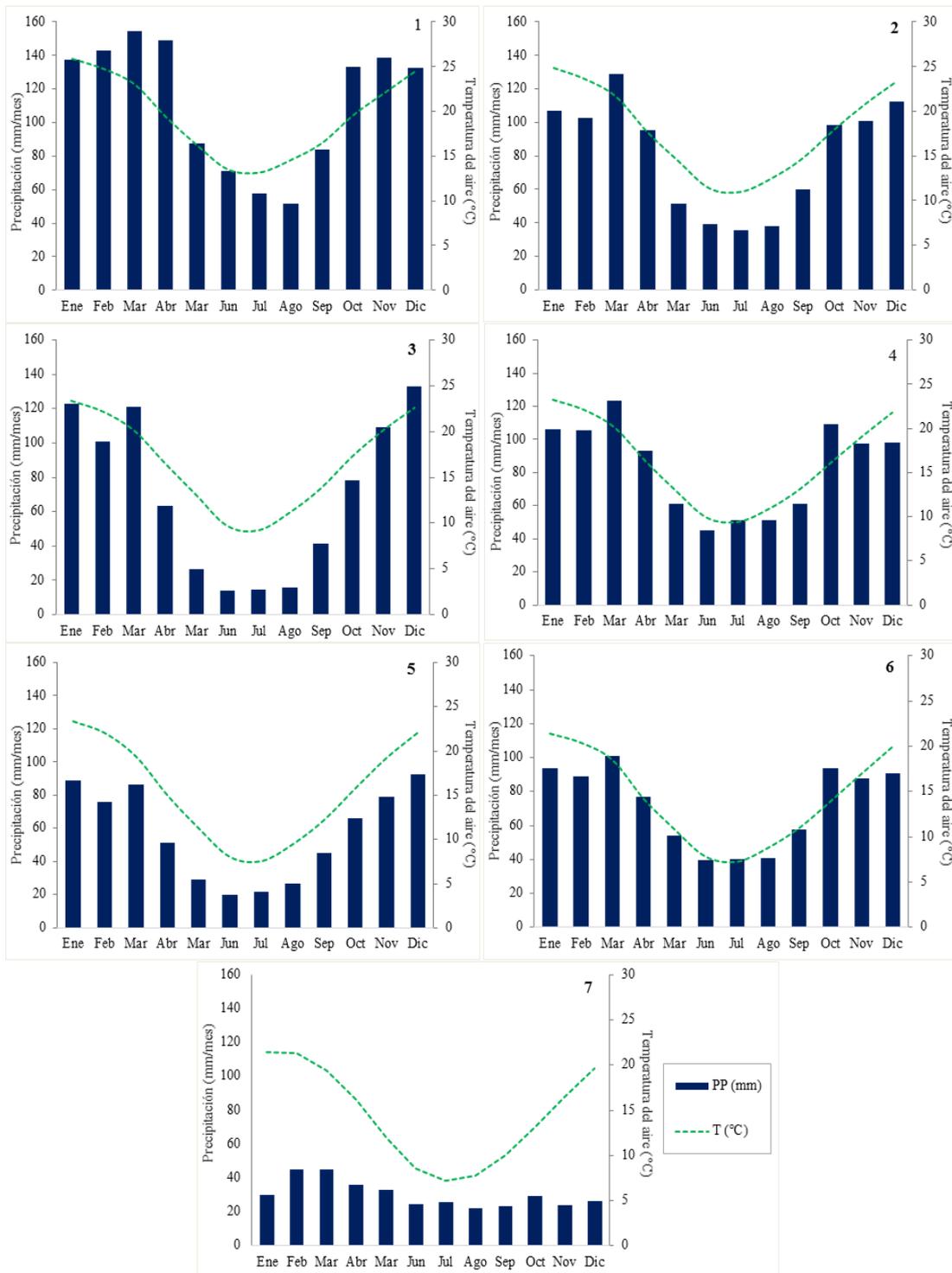


**Figura 3.7.** Distribución de la temperatura (a) y de la precipitación media anual (b) en la Región Pampeana (1960-2010)

### 3.3.2 Variabilidad climática por grupo

En todos los grupos resultantes se identifica una estacionalidad térmica propia de las latitudes medias o templadas. Aunque entre ellas la amplitud anual aumenta con la latitud y la continentalidad, como es el caso del grupo 5 y 6 con 15 °C y 14 °C de temperatura media, respectivamente. En la Región Pampeana la precipitación también presenta una estación pluviométrica marcada durante los meses de primavera y verano. Sin embargo se observa que esta se extiende al otoño en la zona del grupo 1 (102 mm/amplitud) reduciendo la estación más seca. Las dos zonas de mayores amplitudes son las correspondientes a los grupos 3 y 1 con 119 y 102 mm respectivamente. En líneas generales se observa que la amplitud anual de las precipitaciones disminuye con la latitud hasta el extremo sur (grupo 7) en el que la estacionalidad desaparece con solo 23 mm de amplitud anual (Figura 3.8).

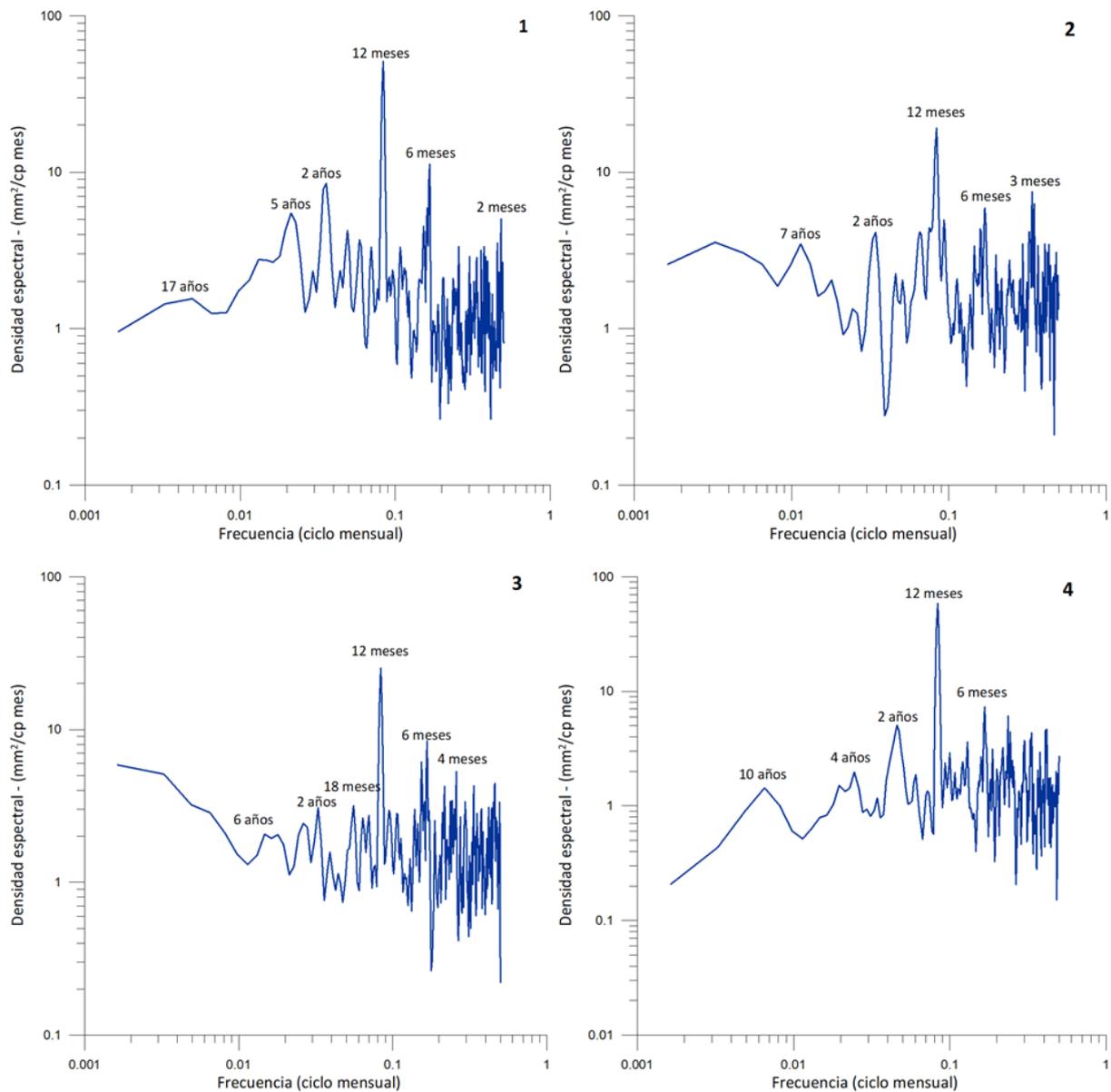
El ACP permitió obtener un factor que representara el mayor porcentaje de la varianza en los grupos 1 a 6. Al grupo 7 no fue necesario realizar el análisis el ACP debido a que está compuesto por una sola estación y se utilizaron directamente los datos de la misma para la realización de la TRF. En todos los casos en que se realizó, el test de KMO y la prueba de esfericidad de Bartlett fueron significativas probando la aplicabilidad del ACP. La totalidad de las pruebas se muestran en el Anexo 3.1. El análisis de Fourier mostró distintas señales para las variables estudiadas. Con respecto a la precipitación mensual de la región en estudio se identificaron fluctuaciones similares para todas las subregiones. Se observan señales que responden a una variación inter-decádica, de 17 años en los grupos 1 y 6 (Figura 3.9). Dentro de las señales inter-anales se identifican las de 5 y 7 años en algunas subregiones, mientras que la de 2 años se repite en cada grupo con densidad variable. La señal anual es la de mayor intensidad en todos los grupos, aunque se destaca que en la subregión 3 alcanza su máxima densidad. Las áreas donde la señal anual es menor se encuentra en el S y SO de la Región Pampeana representada por los grupos 6 y 7. Las frecuencias estacionales también son comunes en toda la región de estudio, como en el caso de 6 meses, con una notable señal en los grupos 1, 2 y 4. Aunque también se reconocen señales de 2, 3 y 4 meses, que corresponden a las variaciones estacionales (Figura 3.9).



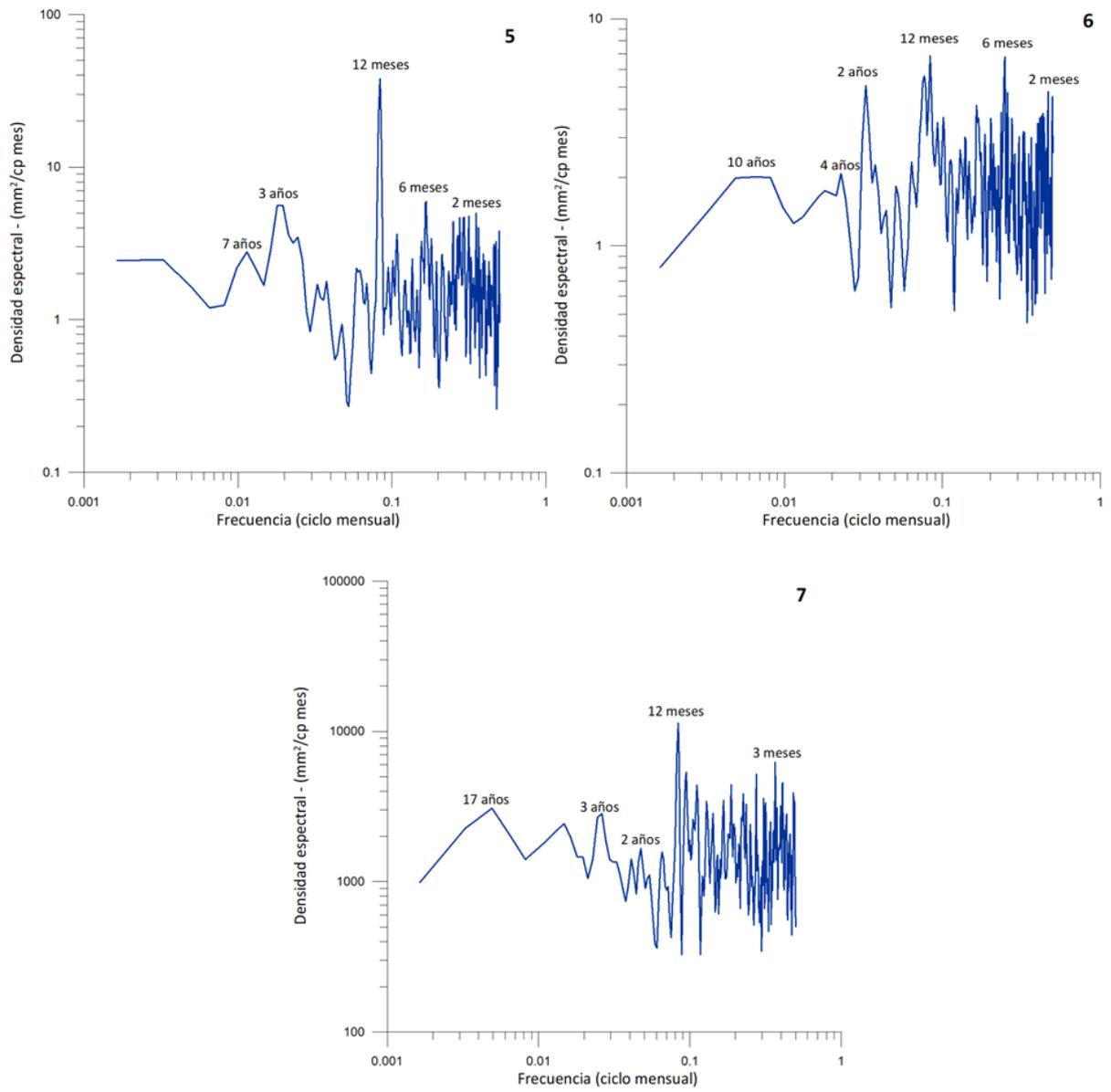
**Figura 3.8.** Variabilidad Interanual de la precipitación y temperatura del aire en los 7 grupos.

La Transformada Rápida de Fourier de la temperatura del aire presentó la mayor intensidad en la frecuencia anual (12 meses). A diferencia de lo que ocurre con la densidad anual de la precipitación entre las subregiones, la densidad espectral de la temperatura es

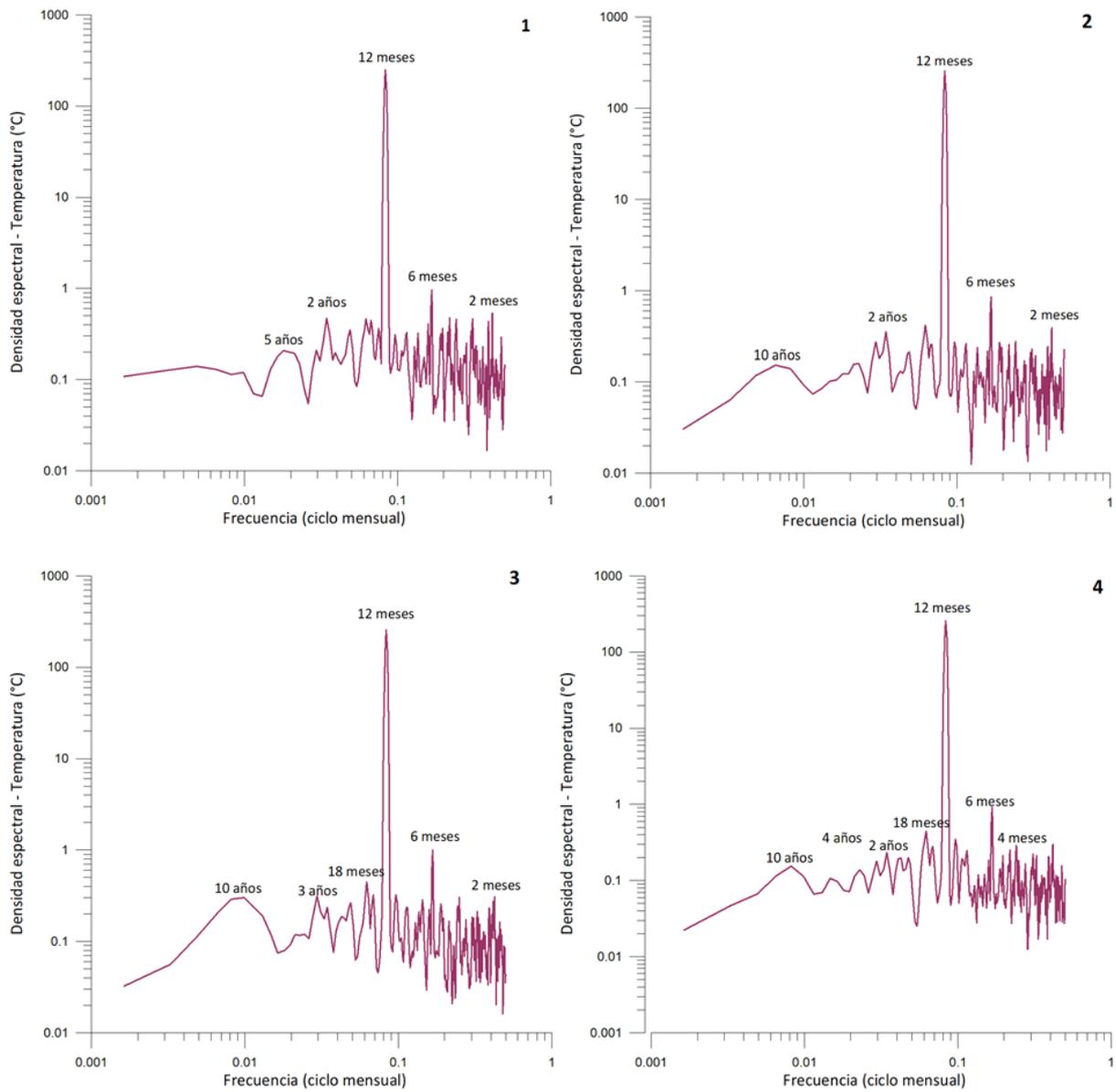
elevada en los siete grupos. Se identifican máximos inter-decádicos de 10, 12 y 17 años, mientras que los ciclos inter anuales se presentan entre los 4 y 2 años. También se observaron señales de 6, 4 y 2 meses que se corresponden con fluctuaciones estacionales (Figura 3.10).



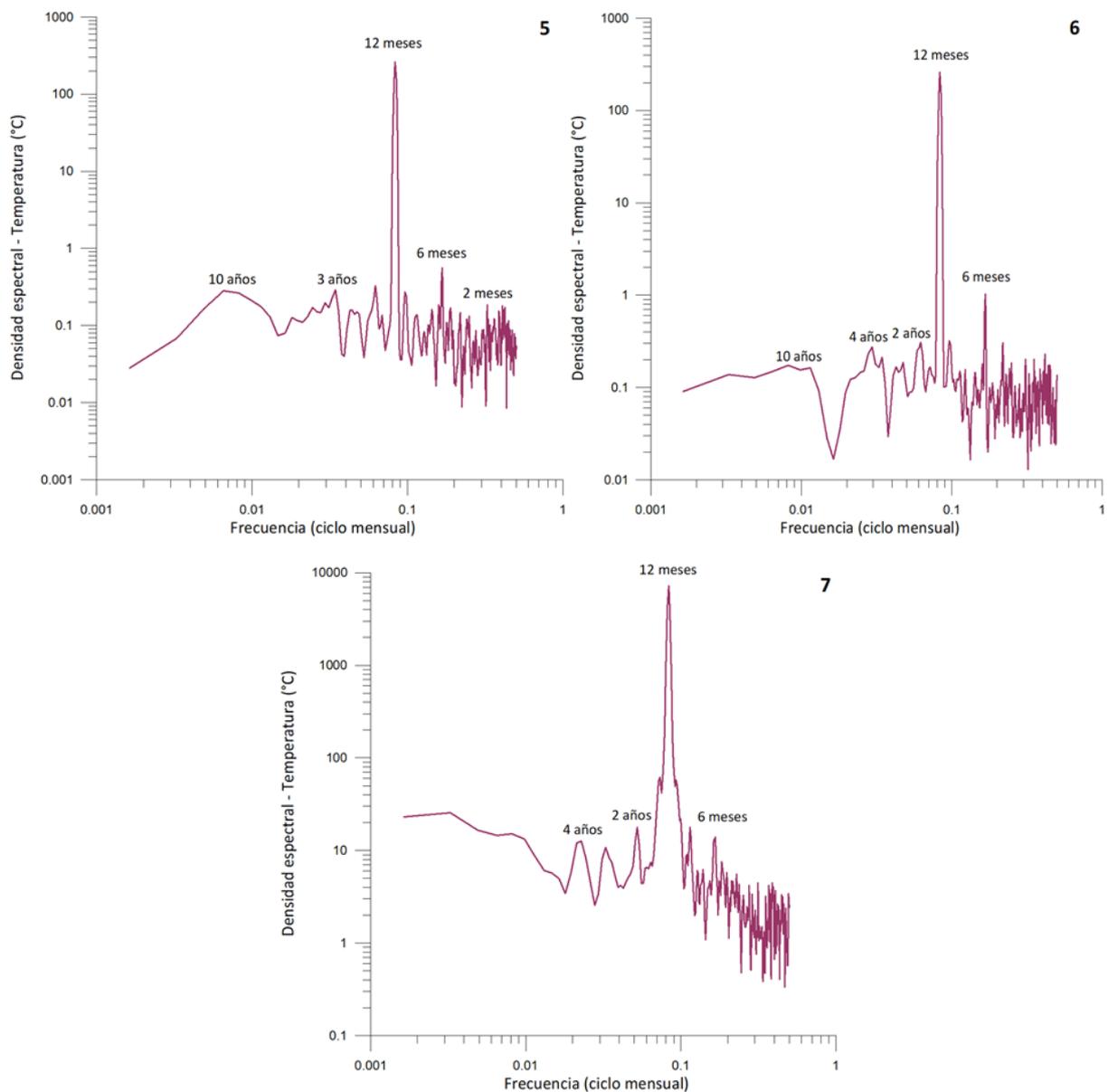
**Figura 3.9.** Densidad espectral de la precipitación mensual en los grupos 1 a 7 (Período 1960-2010).



**Figura 3.10.** Densidad espectral de precipitación en los grupos 1 a 7 (período 1960-2010).



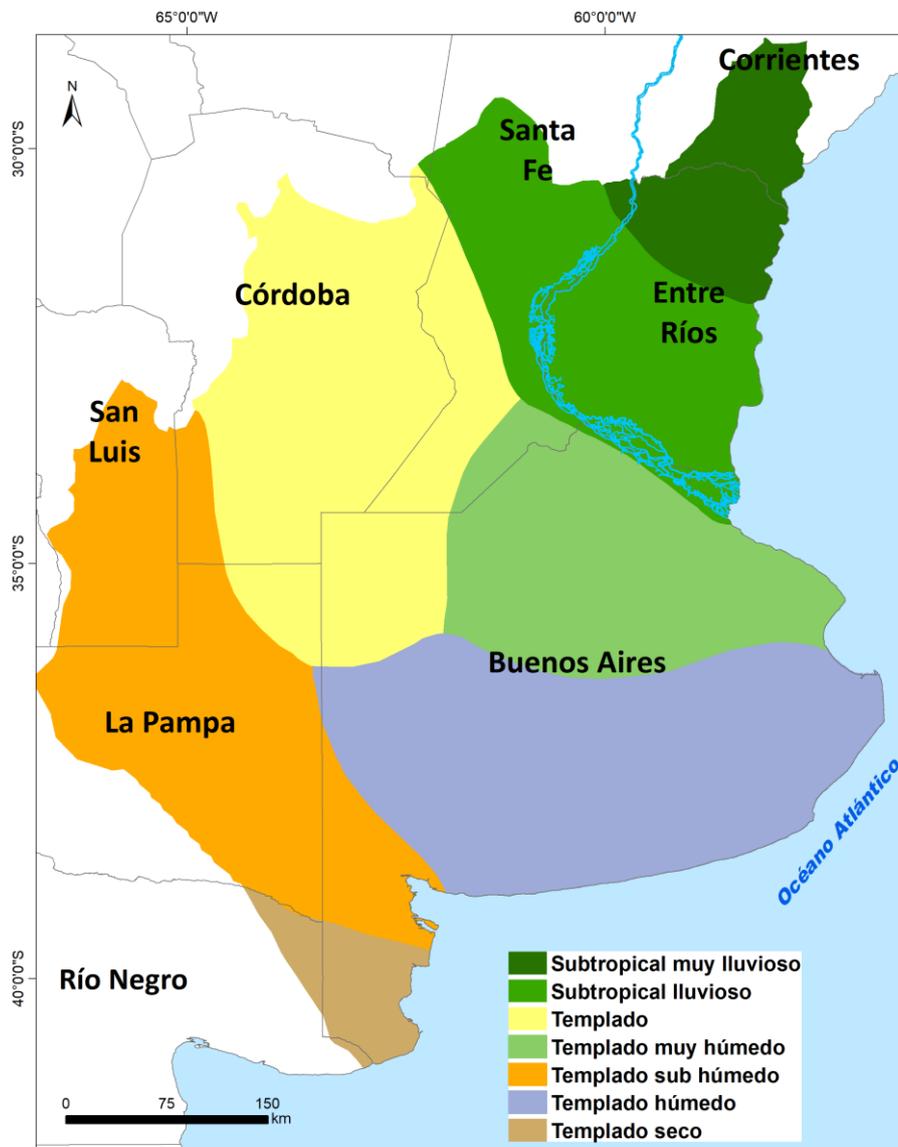
**Figura 3.11.** Densidad espectral de la temperatura media en los grupos 1 a 7 (período 1960-2010).



**Figura 3.12.** Densidad espectral de la temperatura media en los grupos 1 a 7 (período 1960-2010).

A partir de las características de los 7 grupos definidos se los nombraron como subregiones. El producto final de esta metodología es la obtención de un mapa de clasificación climática preliminar de la Región Pampeana. Éste responde a la interpolación de los grupos formados según la variabilidad de la precipitación y temperatura del aire durante el período 1960-2010 (Figura 3.8). A cada subregión se le asignó un nombre representativo de dichas condiciones, siendo el grupo 1: *Subtropical muy lluvioso*; 2: *Subtropical lluvioso*; 3:

Templado; 4 Templado Muy húmedo; 5: Templado Sub húmedo; 6: Templado húmedo y 7: Templado seco (Figura 3.11).



**Figura 3.13.** Mapa climático de la Región Pampeana según la variabilidad de la precipitación y la temperatura del aire para el período 1960-2010. Modificado de Aliaga *et al.*, (2017).

### 3.4 Conclusiones

Para el período de estudio de 50 años (1960-2010) se identificaron 7 subregiones climáticas utilizando como parámetros indicativos a la precipitación y la temperatura del aire,

que son las variables comúnmente utilizadas para definir los tipos de climas. Las subregiones responden a la variabilidad anual e interanual característica de acuerdo a los análisis estadísticos utilizados. Se observó que la zonificación está determinada por la distribución de precipitaciones anuales que disminuyen de noreste a sudoeste. Mientras que la temperatura lo hace latitudinalmente. El caso 7 (*Templado Seco*) en el extremo sur de la Región Pampeana es el que más dista del resto de las condiciones climáticas medias del resto de la región (Figura 3.11).

Según los resultados obtenidos por Köppen para la Región Pampeana, se observan coincidencias en el caso 6 y 7 (*Templado húmedo y Templado seco*) con los climas que él define como Oceánico Templado y Semiárido frío, respectivamente. Mientras que el resto de las subregiones identificadas en este estudio (1: *Subtropical muy lluvioso*; 2: *Subtropical lluvioso*; 3: *Templado*; 4 *Templado Muy húmedo*; 5: *Templado Sub húmedo*) están incluidas en lo que él define como Subtropical húmedo (Figuras 3.2 y 3.11).

Con respecto a lo estudiado por Díaz y Mormeneo (2002), se observan semejanzas en la distribución espacial y coincidencias en las subregiones 1 a 6, mientras que la 7 corresponde a un área no considerada en el análisis. EL grupo 1 y 2 (*Subtropical muy lluvioso y Subtropical lluvioso*) está identificado por la zona denominada Cálido húmedo, el grupo 3 (*Templado*) coincide con el clima Cálido Subhúmedo en el norte de Córdoba, mientras que el caso 4 (*Templado Muy húmedo*) lo hace con el Templado húmedo. Por último, el 5 (*Templado Sub húmedo*) coincide con el templado subhúmedo, mientras que el resultado 6 combina con los climas Frío húmedo y Sub húmedo, el cual coincide con la zona alta de las sierras de Ventania y Tandilia, que disminuyen la temperatura media en ese sector de la Región Pampeana (Figuras 3.2 y 3.11).

## Capítulo 4

### CLASIFICACION CLIMÁTICA PROPUESTA DE LA REGIÓN PAMEPANA

#### 4.1 Introducción

Una de las herramientas más utilizadas en los últimos años para la clasificación climática son los *Modelos Globales* de la circulación general de la atmósfera (De Castro *et al.*, 2007; Rubel y Kottek, 2010; Dixon *et al.*, 2016). Estos modelos se basan principalmente en cambios de la temperatura del aire por emisiones de CO<sub>2</sub>, mediante la cual predicen una tendencia ascendente en los registros de la temperatura superficial (Flato *et al.*, 2013). Sin embargo, la escala de trabajo global pasa por alto algunas características fisiográficas y los procesos físicos a menor escala que condicionan las variaciones climáticas locales o regionales, dato relevante en estudios de impacto y en diversas aplicaciones.

El clima local y regional está condicionado por interacciones entre la circulación en gran escala de la atmósfera y los océanos, pero también por características físicas de pequeña escala de cada sitio, como topografía, cobertura vegetal, tipo y estado del suelo, etc. (Labraga *et al.*, 2011). Existe una gran variedad de procedimientos de zonificación que comprenden métodos dinámicos, basados en modelos atmosféricos regionales de alta resolución y también métodos estadísticos basados en modelos empíricos (Von Storch *et al.*, 2000; Salathé, 2003).

El clima es clave para determinar las diferentes características y distribución de los ecosistemas naturales. La temperatura influye por ejemplo, en la distribución y abundancia de patrones de plantas y animales debido a sus limitaciones fisiológicas, mientras que la variabilidad de las precipitaciones en todas las escalas temporales determina los ciclos estacionales, así como los cambios anuales (Parmesan *et al.*, 2000, Thomas *et al.*, 2004; Rosenzweig *et al.*, 2007). Sin embargo, estos parámetros no son los únicos que definen el clima regional, los vientos predominantes que están definidos por los centros de acción, la topografía y otras variables pueden dar respuestas más completas de la variabilidad climática.

Es por ello que existen clasificaciones climáticas que no utilizan solamente la temperatura del aire y la precipitación, sino que también consideran más parámetros climáticos, topográficos o edáficos. Por ejemplo, en distintas regiones en Europa se

consideraron variables de la temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento. De los resultados obtenidos, se observó que si bien la temperatura domina la agrupación, la selección resultante está influenciada por todas las variables (Wilcke y Barring, 2016). Otro estudio a gran escala es el realizado en África y Oceanía, donde se presentó una clasificación con 16 atributos climáticos mensuales derivados de la precipitación, temperatura, evaporación, humedad y latitud. Las agrupaciones formadas mostraron una contigüidad geográfica que permitió trazar límites (Russell y Moore, 1976).

En Alemania se aplicó una zonificación para evaluar la dispersión de ciertos cultivos. Se utilizaron datos de precipitación, temperatura del aire y duración de la luz solar, junto con velocidad y dirección del viento, permitiendo definir regiones con un máximo de homogeneidad (Schmidt y Schröder, 2011). Mientras que en España, la misma tuvo objetivos relacionados con el rendimiento energético mínimo para los edificios. Para llevar a cabo la zonificación climática se utilizaron datos de temperatura, radiación global y humedad relativa (De La Flor *et al.*, 2008). Por otro lado, en Chile se evaluaron los recursos climáticos y edáficos considerando la precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar así como también la topografía del suelo. Por lo cual obtuvieron una clasificación en distritos topoclimáticos que fueron utilizados para relacionarlos con los suelos (Morales *et al.*, 2006).

En Argentina las clasificaciones realizadas tienen objetivos agroecológicos, como las desarrolladas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) mediante la Red de Información Agropecuaria Pampeana (RIAP). Ésta tiene entre sus objetivos contar con información agrometeorológica de la región a fin de obtener áreas de relativa homogeneidad agroecológica. La definición de zonas y subzonas agroecológicas responden en este caso a variables agroclimáticas, tipos fisonómicos y estructura de la vegetación, sistemas productivos característicos, procesos de desmonte, entre otros (Lorda *et al.*, 2008).

En cada caso analizado, a las variables precipitación y temperatura del aire se le sumaron más parámetros que permitieron obtener resultados más específicos según los propósitos de la clasificación. En la Región Pampeana, además del gradiente latitudinal y longitudinal de precipitación y temperatura, existen otros factores que modelan el clima regional. Sobre todo considerando que si bien hay un dominio de llanuras en el área de estudio, la altura o la continentalidad también afectan localmente al clima. En la Región Pampeana los frecuentes vientos del Noreste son generados por el sistema semi-permanente

de alta presión del Atlántico Sur que aporta aire húmedo y cálido. La región bajo la influencia de la presión alta del Atlántico Sur representa el área subtropical de la Argentina. Por otra parte, predominan los vientos secos del oeste en el extremo sur de la región (Celemín, 1984).

La Región Pampeana ha sido caracterizada para fines agro-meteorológicos basados en precipitación y temperatura (Díaz y Mormeneo, 2002; Magrin *et al.*, 2005; Lorda *et al.*, 2008; Gandini *et al.*, 2014), sin embargo se carece de clasificaciones que contemplen otros parámetros o condiciones que definen la variabilidad climática de una región. Las clasificaciones climáticas que incluyen más información que la de la precipitación y temperatura, ofrecen respuestas más específicas para comprender distintos procesos ambientales así como obtener respuesta ante problemáticas socio-económicas. El presente capítulo tiene como objetivo mejorar el conocimiento sobre las características climáticas de la Región Pampeana a escala subregional, utilizando variables climáticas y topográficas durante el período 1960-2010.

## **4.2 Método de trabajo**

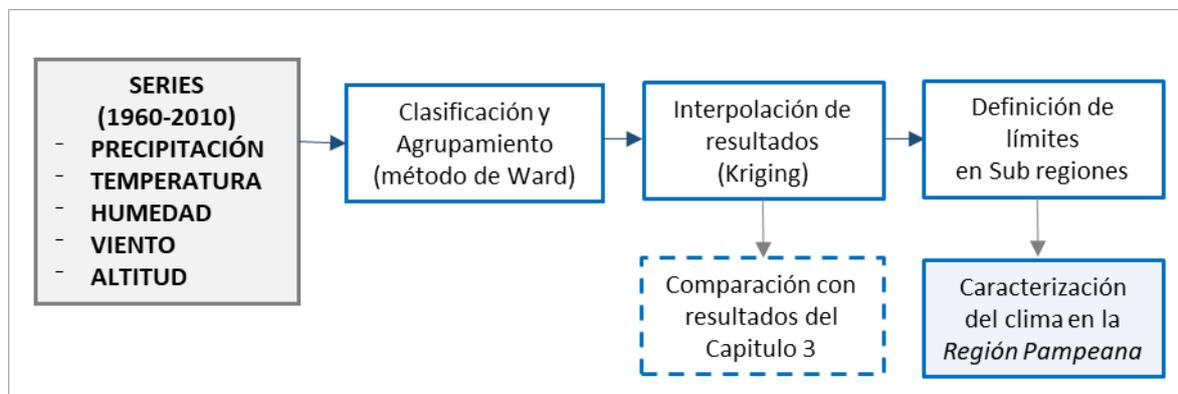
### *4.2.1 Datos*

Para la clasificación climática de la Región Pampeana en este capítulo se utilizaron los datos *in situ* de las mismas estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) descritas en la Figura 2.1. Sin embargo en este análisis además de las series mensuales de precipitación y temperatura del aire se incorporan la velocidad del viento y humedad relativa de las 33 estaciones durante el mismo período de estudio. Conjuntamente se considera la altura media de la estación de medición (Tabla Anexo 2.1). Se analizaron un total de 79.233 datos. Se consultaron también los datos de direcciones de viento de mayor frecuencia en cada estación durante el período de estudio obtenidos de los promedios decádicos del Servicio Meteorológico Nacional (1960-2010). De los mismos se obtuvieron las direcciones predominantes, la frecuencia en escala de 1000 y la estacionalidad. Los mismos se describen en la Tabla Anexo 4.1.

### *4.2.2 Análisis de datos*

Los pasos metodológicos empleados en este análisis se describen en la Figura 4.1. Los métodos de agrupación e interpolación aplicados se describen en el Capítulo 2. Se realizó un

Análisis de Componentes Principales (ACP) de las estaciones meteorológicas. Sus especificaciones y características se detallaron en el Capítulo 3.



**Figura 4.1.** Esquema de los pasos del método de trabajo.

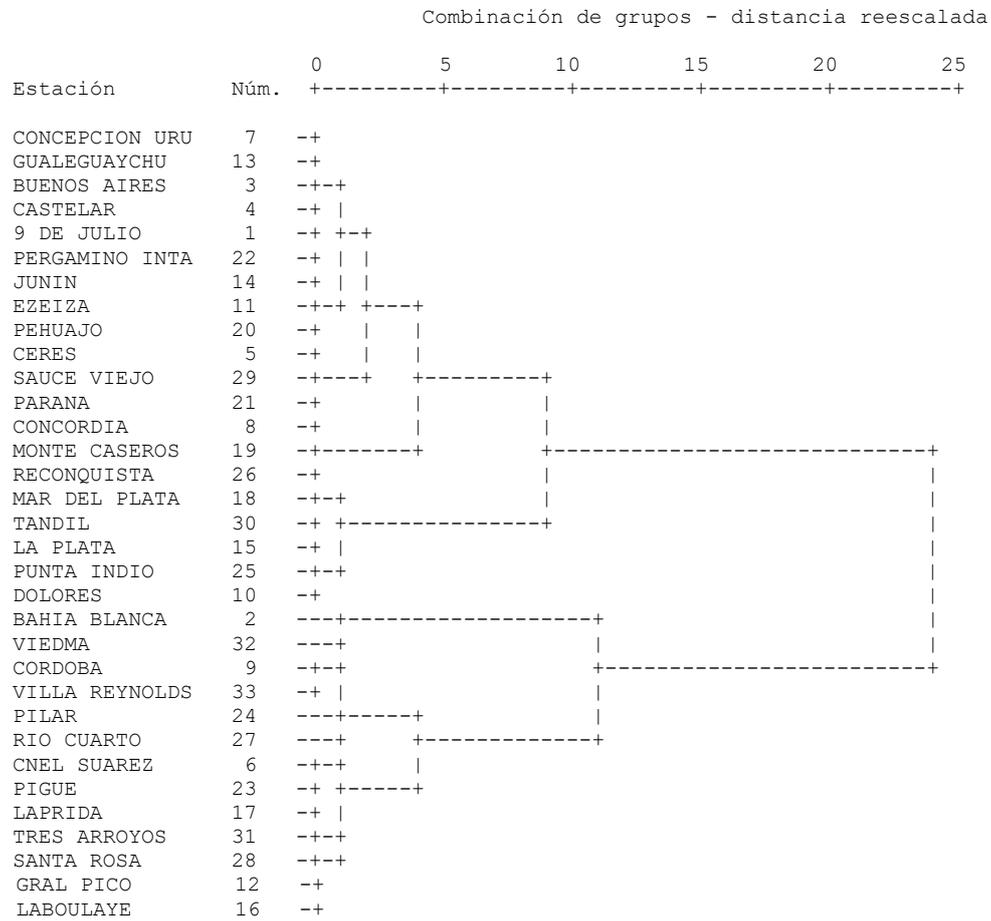
## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Análisis de agrupamiento

La matriz de distancia en el que se analizaron los datos de las estaciones de a pares se describe en la Tabla 4.1. En este caso, la distancia promedio entre las estaciones fue 11,3 con una amplitud promedio de 27,7. Estos superan en 7 y 13 puntos a lo obtenido en el Capítulo 3 respectivamente. Las máximas distancias están concentradas en los caso 23 y 28, que corresponden a los estaciones de Reconquista y Viedma, respectivamente (Figura 2.1). Ambas representan la amplitud de las características climáticas que se encuentra en la Región Pampeana.

Con respecto a los casos de mayor similitud se destaca la mínima disimilitud con 0,12 (entre el caso 7 y 13 que corresponden a Concepción del Uruguay y Gualeguaychú - Figuras 2.1 y Tabla 4.1). Considerando los promedios de las distancias mínimas, los casos 1, 12 y 17 (correspondientes a 9 de Julio, Gral. Pico y Laprida respectivamente) presentan las máximas similitudes con respecto a la mayoría de los casos. El dendrograma obtenido permite identificar el nivel de coincidencias a medida que forman los grupos que se mueven bajo un eje de distancia reescalada o estandarizada (Figura 4.2). El análisis agrupó las 33 estaciones

en 8 grupos diferenciados. La distribución de los grupos formados por el análisis se muestra en la Figura 4.3.

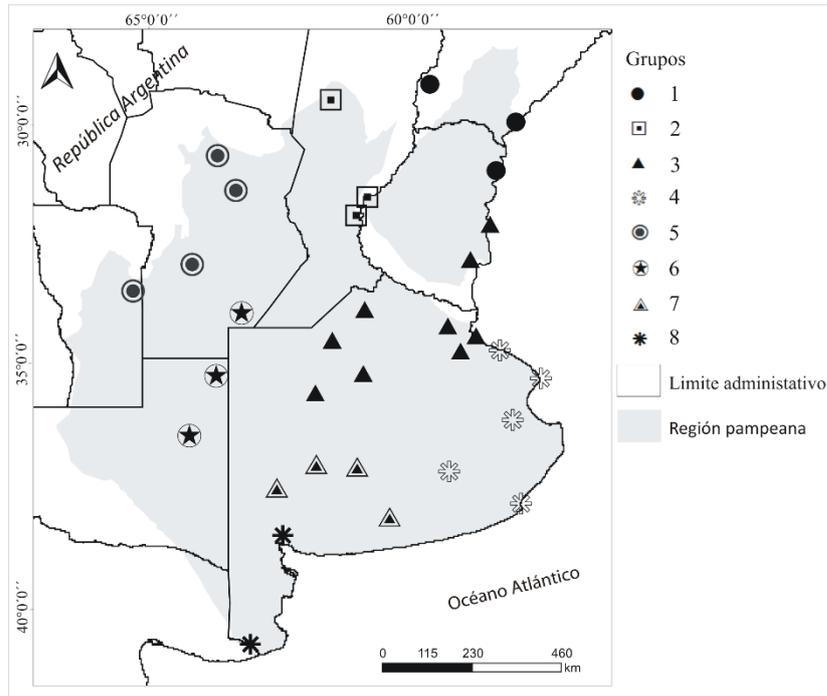


**Figura 4.2.** Dendrograma de grupos según datos atmosféricos y topográficos (1960-2010)

Matriz de distancias

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
1																																					
2	16,8																																				
3	1,7	21,8																																			
4	1,3	25,2	1,7																																		
5	3,2	18,0	2,6	4,0																																	
6	5,4	11,6	12,6	10,2	12,2																																
7	1,8	23,6	0,3	1,2	1,7	13,1																															
8	5,7	31,7	1,3	4,4	5,1	20,9	1,7																														
9	9,6	23,3	14,9	13,5	11,7	6,4	14,5	19,7																													
10	2,9	20,4	6,8	5,1	7,7	6,9	6,4	12,4	14,9																												
11	0,7	13,2	1,9	2,9	2,5	6,8	2,2	6,2	12,7	2,8																											
12	1,8	11,8	4,6	3,8	4,3	3,6	4,8	9,9	7,3	7,2	2,7																										
13	1,3	23,0	0,5	1,0	1,8	11,9	0,1	2,4	14,0	4,8	1,6	4,6																									
14	0,2	14,9	2,3	2,3	3,4	4,8	2,5	6,6	9,6	2,2	0,4	2,1	1,9																								
15	3,2	12,9	5,4	7,3	5,6	7,8	5,9	10,5	15,2	2,2	1,4	6,7	4,8	2,0																							
16	1,3	10,1	4,3	4,2	3,6	3,0	4,6	9,8	7,2	5,4	1,6	0,3	4,2	1,2	4,3																						
17	5,1	17,2	10,5	7,0	11,9	2,5	10,9	17,2	7,4	10,4	8,0	2,2	10,4	5,7	12,7	3,3																					
18	7,6	10,9	12,6	14,0	12,9	7,3	13,7	20,4	19,0	4,0	5,3	10,6	11,8	5,6	1,8	7,5	15,0																				
19	9,1	38,2	3,5	7,7	7,4	26,7	3,8	0,7	23,3	15,7	9,5	14,9	4,6	10,0	13,1	14,4	23,6	24,1																			
20	1,0	12,3	4,5	4,3	4,8	3,3	4,8	10,2	9,6	1,7	0,9	2,6	3,8	0,4	1,4	1,3	5,9	3,4	14,0																		
21	5,4	9,5	4,5	9,3	3,2	12,3	5,4	7,8	15,2	10,9	3,2	5,5	5,7	4,7	4,6	4,2	14,0	9,5	10,3	5,4																	
22	0,2	17,2	1,6	1,3	2,1	6,5	1,4	5,3	10,2	2,6	0,5	2,3	0,9	0,3	2,8	1,6	6,5	7,7	8,5	1,1	5,0																
23	4,3	18,4	10,3	8,0	10,3	1,4	10,4	16,4	3,2	6,0	6,6	4,1	9,3	4,0	7,8	3,6	3,3	9,3	20,8	3,4	12,7	5,1															
24	6,2	27,0	8,2	6,2	8,1	9,2	7,8	10,9	4,1	14,8	9,9	4,2	8,1	7,6	16,2	5,7	4,6	23,5	14,8	9,6	13,4	6,8	5,8														
25	5,3	15,2	8,2	9,8	6,8	9,9	8,1	13,7	16,9	2,4	3,2	9,6	6,7	3,8	0,6	6,6	16,4	2,1	16,0	2,7	6,8	4,5	9,6	19,7													
26	7,2	31,8	3,2	6,8	3,5	22,9	2,6	2,0	19,8	11,4	6,5	12,4	2,9	7,5	8,8	11,2	22,3	18,6	1,6	10,4	7,2	5,9	17,8	14,3	10,0												
27	12,1	11,3	16,1	17,8	13,5	7,4	17,4	22,0	5,5	21,5	13,3	6,1	17,7	11,9	16,9	6,5	7,5	19,6	27,2	11,6	10,4	13,2	8,3	7,7	20,7	24,7											
28	5,2	11,2	10,1	7,8	8,6	3,0	10,2	17,2	7,5	11,2	6,7	1,1	9,9	5,6	11,3	1,9	1,4	14,0	23,7	5,4	9,9	6,0	4,9	5,3	14,4	20,5	5,2										
29	2,9	19,5	2,1	3,6	0,6	13,2	1,3	4,5	14,9	5,5	1,8	5,8	1,1	2,9	3,8	4,6	13,9	10,6	6,4	4,1	3,7	1,8	11,3	11,2	4,6	2,5	17,8	11,2									
30	4,5	10,7	10,1	10,3	10,3	2,0	11,1	17,4	9,1	3,9	4,3	5,5	9,6	3,1	2,9	3,5	7,2	2,1	21,5	1,5	8,6	5,1	2,8	13,3	4,1	17,3	10,7	7,3	9,7								
31	4,9	9,8	9,3	7,8	10,4	3,1	10,3	16,5	11,3	10,5	5,9	1,5	9,9	5,1	10,0	2,2	1,5	11,7	23,1	4,9	9,4	6,1	5,9	8,0	14,0	21,4	6,8	1,0	12,1	6,4							
32	27,6	6,4	34,6	34,2	30,7	18,8	36,2	47,4	35,3	34,0	25,2	18,1	35,8	26,9	29,1	18,5	19,8	26,3	57,6	24,1	23,5	28,7	29,2	34,3	33,1	51,6	18,8	13,5	34,0	23,9	12,0						
33	12,4	21,1	18,6	16,0	15,1	6,3	18,4	25,0	1,9	20,0	15,8	6,8	18,2	12,8	20,5	7,9	5,1	23,8	30,6	12,6	18,0	13,4	5,3	4,2	23,3	27,4	3,6	4,7	19,7	12,3	8,5	26,6					

Tabla 4.1. Matriz de distancias entre pares de estaciones. Se resaltan los casos de máximas y mínimas distancias (N° de estación correspondiente Figura 4.2).



**Figura 4.3.** Distribución espacial de los grupos obtenidos en la Región Pampeana.  
Modificado de Aliaga *et al.* (2017).

#### 4.3.2 Caracterización climática de la Región Pampeana

En comparación con el análisis previo, la incorporación de nuevos parámetros climatológicos y topográficos no modificó el Grupo 1 en cuanto a las estaciones que lo componen. Este se caracteriza por una elevada humedad relativa debido a su latitud y al ingreso de las masas húmedas que acceden al continente desde el Anticiclón del Atlántico Sur (Figuras 4.4 y 4.5). Durante el período de estudio, la dirección del viento fue más frecuente desde el E, SE y NE (Tabla Anexo 4.1), los cuales se concentraron durante los meses de primavera y el verano. Este grupo corresponde a una región con ciclo semestral, como resultado de dos factores: el calentamiento (representado por el ciclo anual) y la advección de la humedad (representada por el ciclo semestral) (Penalba y Rivera, 2016).

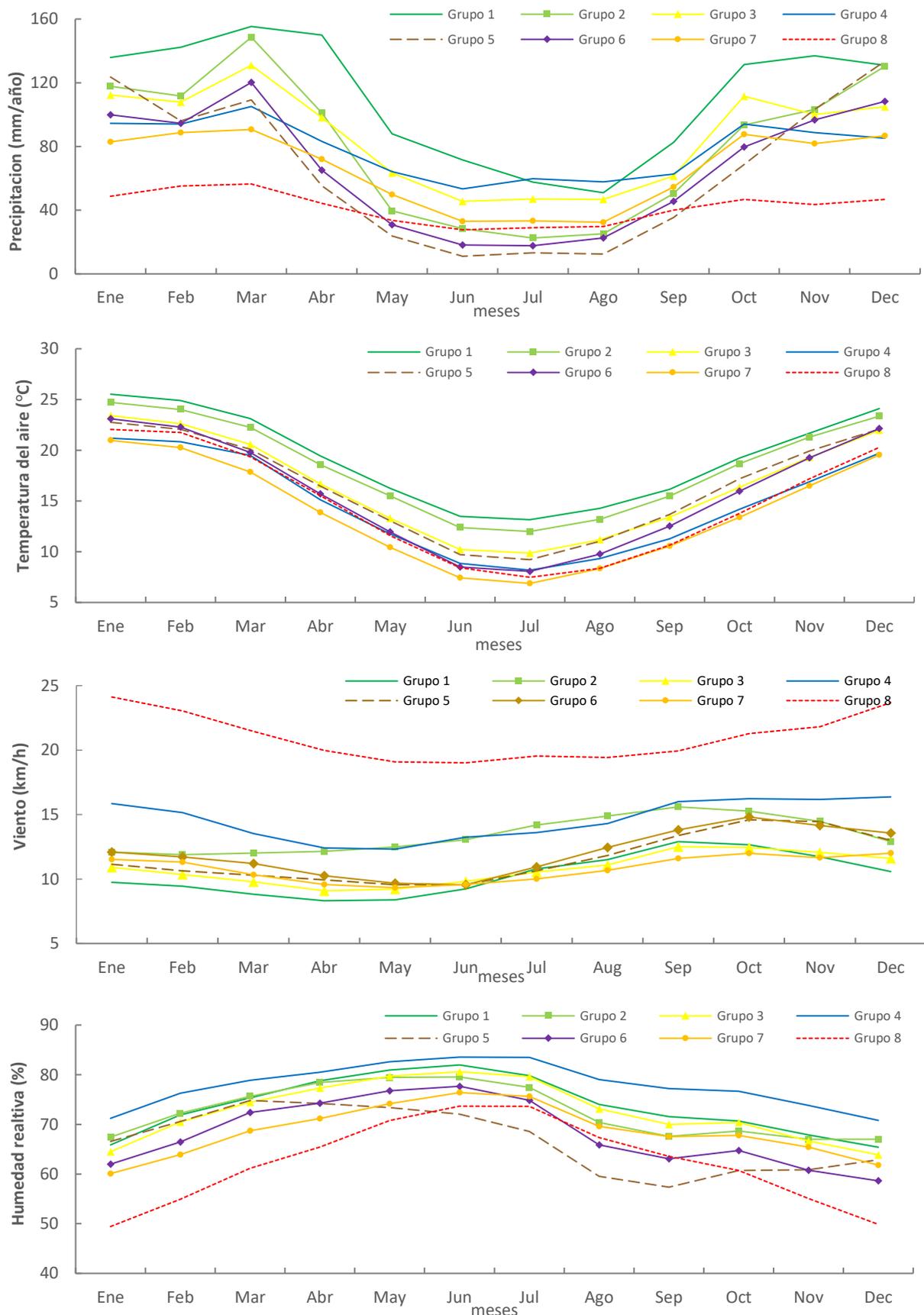
En esta clasificación, el Grupo 2 abarca una menor superficie en relación al obtenido en el Capítulo 3. Se caracteriza por el dominio de elevadas temperaturas pero con menos precipitaciones con respecto al Grupo 1 (Tabla 4.2). El viento del NE fue predominante aunque no se observa una marcada estacionalidad. Representa un clima cálido y húmedo con una

altitud de 61 msnm (Figura 4.4). El área ocupada por el Grupo 3 se extendió al NE, representando un área de precipitaciones abundantes y elevadas temperaturas. Este grupo incluye el área de la cuenca inferior del Río de la Plata y su estuario (Figura 2.1), con escasa altitud y elevada humedad. En esta región, la dirección predominante del viento varió de NE a SE (Tabla Anexo 4.1).

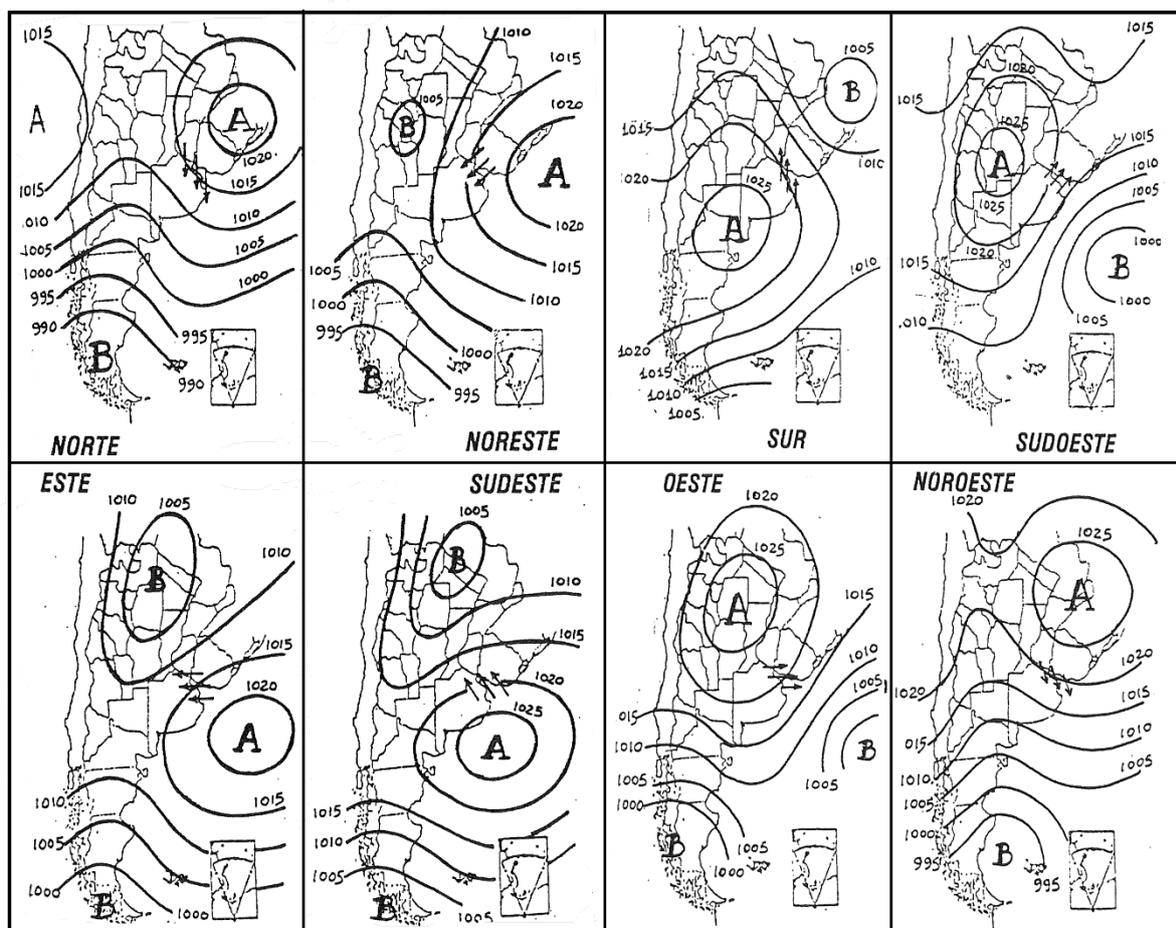
El Grupo 4 representa un clima pampeano de influencia marítima, con una intensa velocidad del viento y precipitaciones (Figura 4.4). Las direcciones del viento desde el NE, E y SE fueron frecuentes desde la costa, mientras que en el interior del continente eran del O (Tabla Anexo 4.1). El Grupo 5 se modificó con respecto al Capítulo 3, dando prioridad a la altitud de la zona (435 msnm), que es la más alta de todas las agrupaciones, unificando las provincias de Córdoba y San Luis (Sierras Pampeanas) (Figura 4.4 y Tabla 4.2). El clima es más continental y se destaca por una disminución de las precipitaciones anuales y la humedad relativa. La velocidad media del viento es 11 km/h, mientras que la dirección predominante es del NE durante todo el año y del E y S son más frecuentes en primavera y verano. El Grupo 6 registró un similar régimen de precipitación con respecto al grupo 5, pero con menor altitud y humedad, mostrando la importancia de estos parámetros en la definición de áreas (Figura 4.4 y Tabla 4.2).

En el sur de la provincia de Buenos Aires se encuentra el Grupo 7 que contiene los sistemas Serranos de Tandilia y Ventania (altitud media de 216 metros), donde la temperatura media es de 14 °C (Figura 4.4). Finalmente, el Grupo 8, influenciado por la velocidad del viento, se caracterizó por ser más frío y seco que los otros grupos y por cubrir el sur de la Pampa con las precipitaciones y temperaturas más bajas. Aunque las masas de aire del NE predominan, en el sur ingresan vientos fríos de la región Patagónica (Figura 4.5).

Según Barros *et al.* (2015), las direcciones de viento más frecuentes en el este de Argentina entre los 35 y los 39 °S, es decir, sobre el Río de la Plata y la provincia de Buenos Aires (Figuras 2.1 y 4.5), giraron del NE al E-NE y al E. Un debilitamiento de los vientos del oeste y un desplazamiento del eje zonal máximo del viento de 46 a 48 °S se observó al sur en la Patagonia. Estos cambios mejoraron la advección del aire húmedo desde el Océano Atlántico sobre la mayoría de la Región Pampeana (Barros *et al.*, 2015).



**Figura 4.4.** Comportamiento anual de las variables climáticas estudiadas en cada grupo (1960-2010).



**Figura 4.5.** Situaciones meteorológicas de cada dirección de viento en Argentina.  
Modificado de Celemin (1984).

Grupos (Capítulo 3)	1	2	3	4	5	6	7	
Precipitación (mm/año)	1357	1056	859	1004	692	883	369	*
Temperatura (°C)	19	18	16	16	16	14	15	*
Grupos (Capítulo 4)	1	2	3	4	5	6	7	8
Precipitación (mm/año)	1357	988	819	1043	829	957	512	814
Temperatura (°C)	19	19	17	17	14	15	14	16
Humedad Relativa (%)	74	74	69	73	70	79	65	69
Viento (km/h)	10	14	11	11	12	15	21	12
Altitud (msnm)	48	61	435	47	216	50	43	158

**Tabla 4.2.** Valores medios de los parámetros considerados en el caso Capítulo 2 y el caso Capítulo 3 en la Región Pampeana.

Considerando el gradiente pluviométrico anual, fue posible detectar cierta superposición en la distribución de los conglomerados. Este análisis permitió observar que la mayor parte de la Pampa recibió entre 750 y 1100 mm/año de precipitación. Por otra parte,

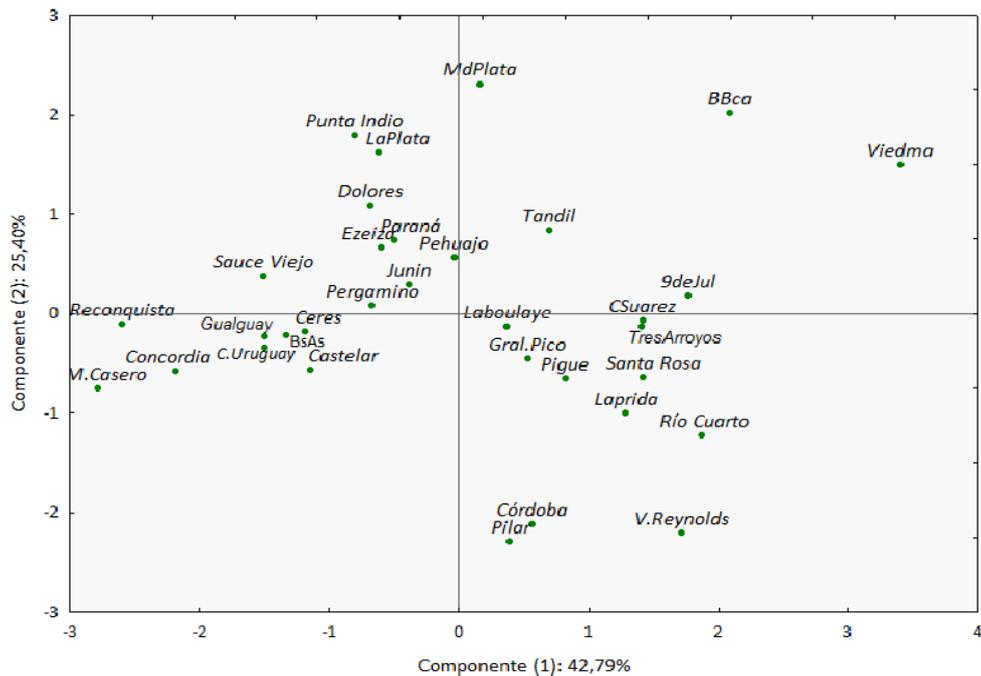
el viento fue otro factor en la expansión de ciertas subregiones climáticas, especialmente en el sur y noreste de la Pampa. Éste fue el caso de los Grupos 3, 4 y 8 (Tabla 4.2).

La temperatura del aire mostró la estacionalidad común a las zonas templadas (veranos cálidos e inviernos fríos). Sin embargo, el Grupo 8, situado en el extremo sur de la zona de estudio, no presentó las temperaturas más bajas. Esto se debe a que a pesar de que se encuentra en el extremo sur de la Región Pampeana y está más expuesta ante el avance de frentes fríos, la temperatura del aire no está modificada por la altura como en el grupo 5 (Figura 4.4). El valor térmico mínimo lo encontramos en el grupo 7, que coincidió con la segunda altitud más alta (colinas Ventania y Tandilia). Se observó una marcada precipitación estacional en todos los grupos con los máximos de precipitación en verano y primavera. De hecho en 7 de los 8 grupos el máximo de lluvia ocurrió en marzo y el mínimo en junio-agosto (invierno). La amplitud anual y estacional de las precipitaciones disminuyó de Noreste a Sudoeste. Las mínimas amplitudes anuales se observaron en los grupos 5, 6 y 2 con 11, 18 y 23 mm, respectivamente. Estos registros coincidieron con la proximidad a la costa de la provincia de Buenos Aires, destacando la acción moderadora del cercano Océano Atlántico. Por el contrario, la mayor variación anual fue 126 mm, observada en el N y representada por el grupo 2 (Figura 4.4).

Los valores máximos de humedad relativa se distribuyeron entre marzo y junio. Los grupos con mayor humedad se encontraron en la mitad oriental de la Pampa (1, 2, 3 y 4). El grupo 8 presentó más humedad debido a la mayor exposición al mar, mientras que el promedio anual más bajo fue representado por el grupo 5 (Figura 4.4). Por último, en el grupo 8 los porcentajes mínimos de humedad se observaron en verano y tuvieron un patrón opuesto a la velocidad del viento, que fue mayor que en el resto de las Pampas a lo largo del año, con un promedio de 21 km/h, otros grupos variaban entre 10 y 15 km/h. A lo largo de la Pampa, la velocidad máxima del viento se produjo en la primavera, con la excepción del grupo 8 situado en el sur (Figura 4.4).

El ACP resultó en dos factores o componentes principales que explican el 68% de la variabilidad climática en las estaciones estudiadas. En la primera componente pesan; o sea, tiene valor absoluto grande, las variables de temperatura, precipitación y humedad. Lo que indica que a valores grandes de la primera componente corresponden a estaciones donde las temperaturas y lluvias no son tan elevadas (Tabla 4.3 – Figura 4.6). Contrariamente, valores

mínimos de esta primera componente representan las áreas de mayores lluvias y altas temperaturas. En la segunda componente pesan especialmente las variables viento y altitud. Valores grandes de esta componente indicarán zonas viento considerable aunque no de tanta altitud.



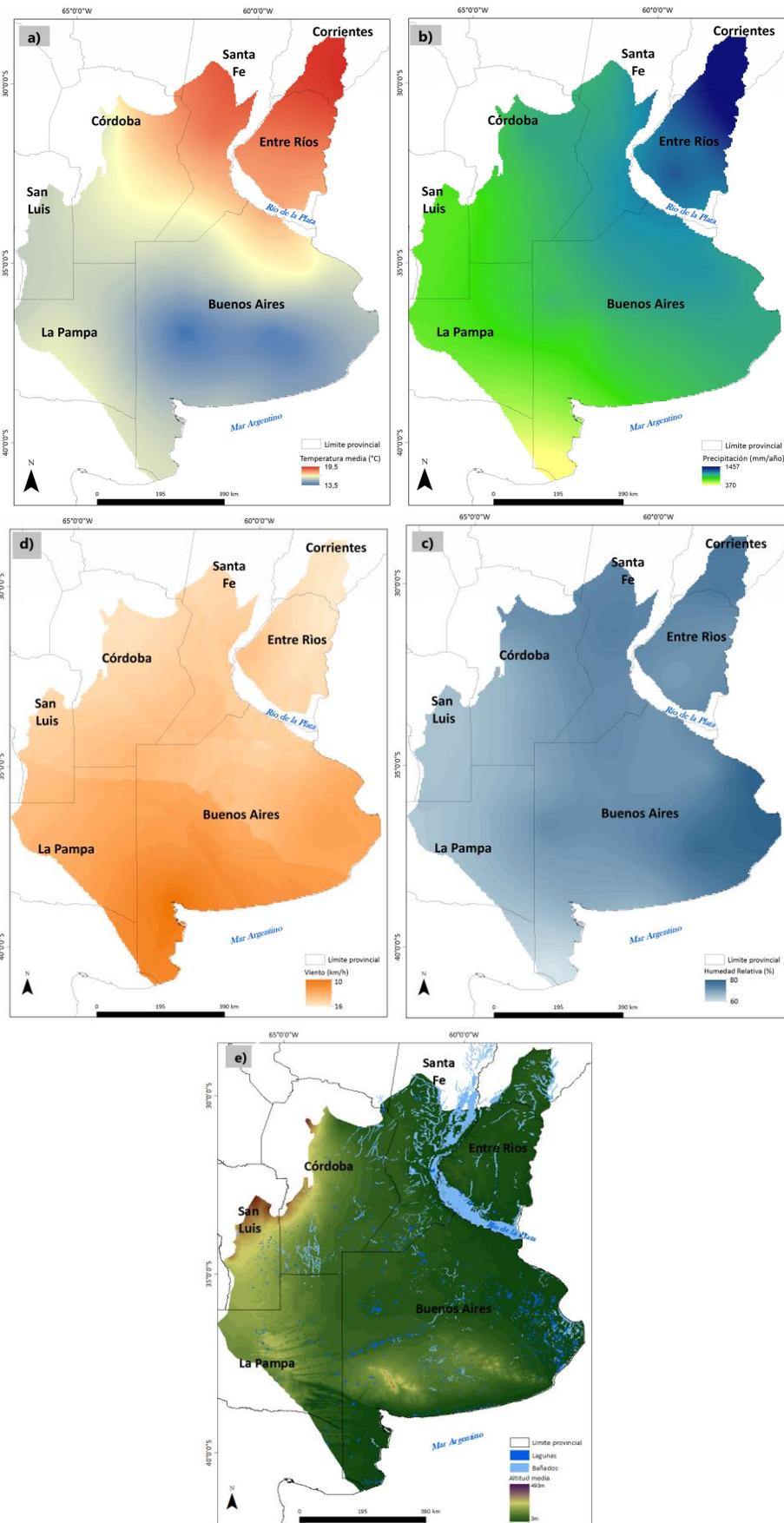
**Figura 4.6.** Distribución de las estaciones estudiadas según los dos primeros componentes.

	Componente 1	Componente 2
<i>Precipitación</i>	<b>-0,841</b>	-0,088
<i>Temperatura</i>	<b>-0,745</b>	-0,276
<i>Humedad</i>	-0,646	0,423
<i>Viento</i>	0,476	<b>0,704</b>
<i>Altitud</i>	0,479	<b>-0,714</b>

**Tabla 4.3.** Peso de los componentes principales.

#### 4.3.3. Definición de subregiones climáticas de la Región Pampeana

Una vez realizado el análisis en cada grupo clasificado, se definieron las clases climáticas en la Región Pampeana. Así como también se pudo observar la influencia de cada parámetro en la definición climática de cada uno (Figura 4.7).



**Figura 4.7.** Distribución espacial de las variables consideradas para la clasificación: *a*, Temperatura del aire; *b*, Precipitación; *c*, Humedad Relativa; *d*, Viento; *e*, Altura.

A partir de los resultados del análisis de agrupamiento, el comportamiento de las variables consideradas y la interpolación de los resultados para cada caso, se definieron 8 climas que pueden localizarse espacialmente en la Región Pampeana durante el período de estudio (Aliaga *et al.*, 2017). Los mismos fueron nombrados considerando altitud y clasificaciones anteriores (i.e. Kottek *et al.*, 2006). Los grupos se definieron como; 1: *Subtropical*; 2: *Cálido Húmedo*; 3: *Cálido Serrano Pampeano*; 4: *Templado Muy Húmedo*; 5: *Templado Serrano de Ventania*; 6: *Templado Oceánico*; 7: *Semiárido* y 8: *Continental Pampeano* (Figura 4.8).

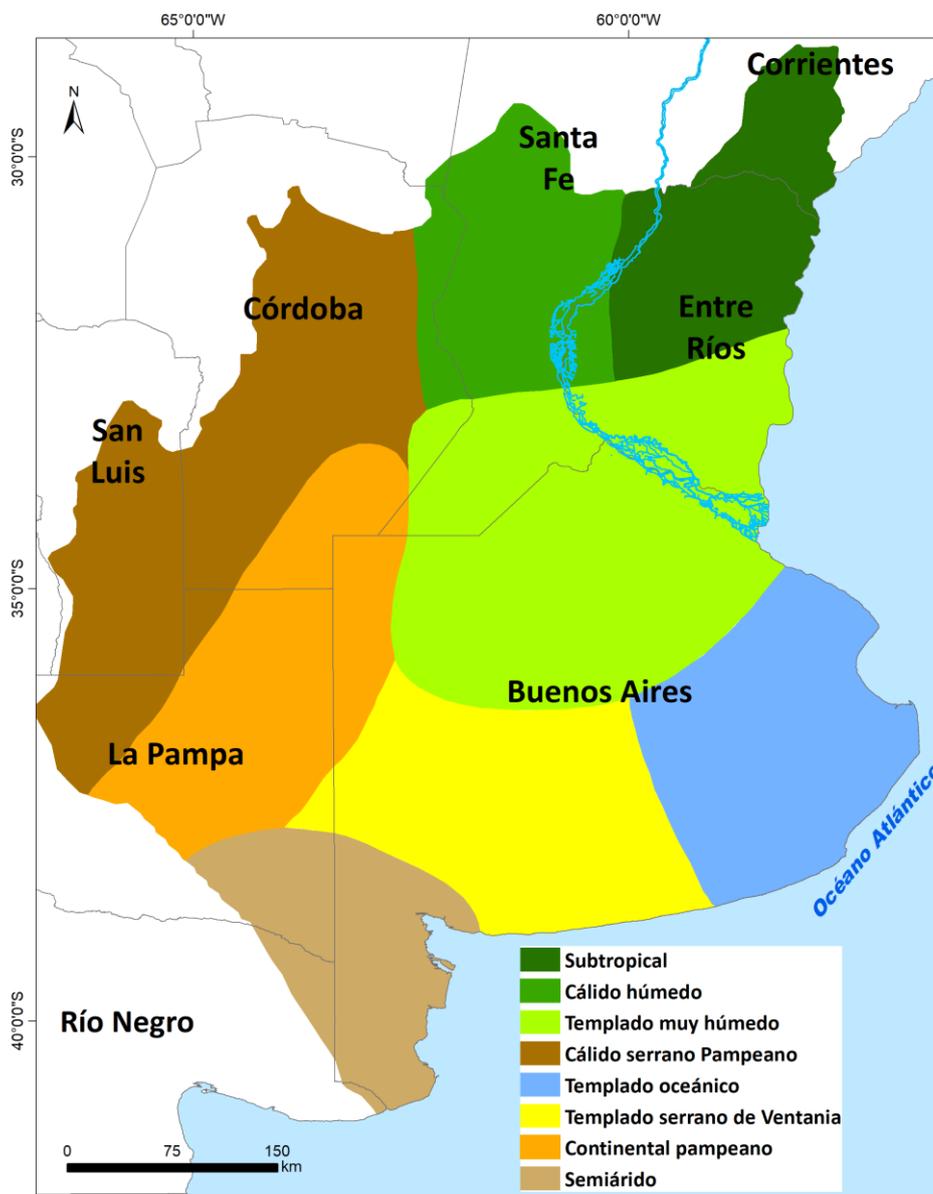
Se identificaron tres áreas con influencia subtropical, donde la precipitación y las temperaturas medias son las más elevadas de la Región Pampeana. En esta zona, las masas de aire caliente entran permanentemente por el norte, noreste y este. Sin embargo, pueden ser interrumpidos por frentes fríos del Suroeste, principalmente en invierno, que incluyen;

- *Subtropical*: Región más cálida y lluviosa de la Pampa, con la velocidad media más baja de viento.
- *Cálido Húmedo*: Posee características similares al *Subtropical*, pero con menor precipitación anual debido al efecto continental. Los patrones térmicos y pluviales estacionales fueron más pronunciados. El viento presentó sus máximas velocidades en primavera y en la región norte.
- *Cálido Serrano Pampeano*: coincide zonas más elevadas de la región. Posee la temperatura media alta pero la precipitación disminuye en comparación con las regiones anteriores concentrada principalmente en primavera y verano.

Dentro de las áreas templadas se encuentran:

- *Templado Muy Húmedo*: La segunda zona más lluviosa de la región (> 1000 mm/año, similar al *Subtropical*). Es afectada por la entrada de masas húmedas del Océano Atlántico Sur.
- *Templado Serrano de Ventania*: Representa el área serrana de Ventania como la segunda de mayor altitud. Muestra similitudes con el *Serrano Pampeano* pero con temperaturas más bajas. En esta zona prevalecen los vientos del Noroeste y el pasaje de frentes fríos del Sudoeste principalmente en invierno.

- *Templado Oceánico*: Es la zona más húmeda de la región debido a su proximidad al mar y la segunda zona más ventosa. Las abundantes lluvias se asocian con el movimiento y la proximidad a los ciclones estacionarios del Atlántico Sur.
- *Semiárido*: Representa la región meridional y de menor altitud. Representa la zona con menor precipitación y considerablemente más ventosa que el resto del área de estudio.
- *Continental Pampeano*: mostró condiciones intermedias entre semiárido y subtropical. El viento, la altitud y la proximidad al mar tienen escasa influencia.



**Figura 4.8.** Mapa climático de la Región Pampeana para el período 1960-2010. (Modificado de Aliaga *et al.*, 2017).

#### 4.4. Conclusiones

Este capítulo formula una mejora de la regionalización climática en la Región Pampeana con respecto a lo presentado en el Capítulo 3. Se identificaron ocho subregiones del clima considerando los principales elementos climáticos como la lluvia, la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento, así como la altitud. Los gradientes térmicos y de precipitación fueron claramente marcados en las Pampas así como la distribución de vientos y humedad. Aunque la precipitación y la temperatura del aire son los parámetros básicos para describir el clima de la llanura pampeana y la mayoría de los estudios publicados consideraron esos parámetros (Díaz y Mormeneo, 2002, Grimm, 2011), otras variables climatológicas y topográficas permiten precisar la distribución de las condiciones climáticas que la caracterizan. Por ejemplo al considerar la humedad producto de la cercanía al mar, el relieve modifica principalmente la temperatura y el viento y es de influencia notable en el sur de la Región Pampeana generando condiciones de mayor aridez.

Considerando el propósito de las zonificaciones, que es separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo, podrían formularse entonces, programas de manejo más específicos y efectivos para cada zona. Cada una tiene una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras, y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de tierras. Una de las ventajas de esta metodología es poder trabajar con datos *in situ* y a su vez aportar información climática de las áreas en las que no se tienen datos o estaciones de medición.

## Capítulo 5

### VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LAS SUBREGIONES PAMPEANAS

#### 5.1 Introducción

Como se describió en el Capítulo 1, existen numerosos factores y escalas de análisis para definir el clima de un lugar. La variabilidad climática también responde a diferentes procesos dependiendo de su posición global. Los modos dominantes de las variaciones en la circulación atmosférica del Hemisferio Sur como el Modo de Latitudes Altas o el Modo del Pacífico-Sudamérica, están asociados con anomalías en la temperatura de la superficie del mar (TSM) en distintas cuencas oceánicas (Mo, 2000). Estas variaciones en la circulación atmosférica, con un amplio rango de escalas de tiempo, afectan la normal distribución espacial y temporal de las lluvias (Labraga, 2011).

La variabilidad interanual es un importante modulador de la variabilidad sinóptica e interestacional en América del Sur. Las oscilaciones interanuales de la precipitación total anual se deben principalmente a la variabilidad en el otoño y verano austral. Esta última es la temporada de máximas lluvias en la mayor parte del continente y de más influencia del ENSO en el cono sur de Sudamérica (Grimm, 2011). Las variaciones en la TSM en el Pacífico ecuatorial que caracterizan a los eventos El Niño y La Niña producen una señal discernible en la variabilidad de lluvia en el sudeste de Sudamérica (SSA), particularmente durante la primavera austral (Grimm *et al.*, 2000).

La amplia influencia de los eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el clima regional es bien conocida y tales eventos pueden tener un impacto socioeconómico considerable (Davey *et al.*, 2014). Cada evento de ENSO es diferente y ocurre junto con otros factores climáticos, por lo que mientras las tasas históricas proporcionan una orientación general, no deben considerarse como una predicción de impactos para un evento inminente o en curso de ENSO (Davey *et al.*, 2014).

Como ya se mencionó, otro de los factores que afecta a las frecuencias interanuales y estacionales es la Oscilación Madden Julian (MJO) que posee un período de 60 a 90 días (Bridgman y Oliver, 2006). Esta oscilación de la atmósfera tropical-oceánica afecta a la

variabilidad de las precipitaciones, principalmente en latitudes bajas, coincidiendo con el extremo noreste de la Región Pampeana influenciado por el anticiclón del Atlántico Sur. Según González (2010) la actividad de la MJO se desarrolla a través de trenes de onda de Rossby que conectan el Océano Atlántico con Sudamérica.

En áreas de llanura la dinámica de los recursos hídricos se relaciona directamente con la regularidad, intensidad y frecuencia de la variabilidad climática. El conocimiento de eventos extremos son relevantes para orientar las políticas de ordenamiento del territorio referidas a obras de infraestructura y a diversas actividades económicas que deben ajustarse a las condiciones pluviométricas como lo son la agricultura, ganadería y turismo (Zhao *et al.*, 2012). En la Región Pampeana la alternancia de períodos secos y húmedos y sus condiciones extremas tienen importantes consecuencias sociales y económicas. El régimen pluviométrico tiene la capacidad de alterar los ecosistemas. Hay ciclos naturales en la atmósfera que afectan el régimen pluviométrico pampeano durante semanas, meses y décadas (Grimm, 2011; Aliaga *et al.*, 2016). Desde un punto de vista agronómico se observa sequía cuando el nivel de almacenamiento del agua en el suelo ha bajado lo suficiente como para afectar el desarrollo o mantenimiento de una planta. En algunos casos, esta falta de agua es tan importante en períodos críticos de un cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1976) que genera una disminución de los rindes en el momento de la cosecha o baja de productividad. Las sequías han sido objeto de gran preocupación en las principales praderas del mundo, por su influencia en la producción de alimentos y también en la degradación de recursos edáficos (erosión eólica) (Minetti *et al.*, 2007).

En los últimos 50 años se produjeron en Argentina una sucesión de períodos de sequías meteorológicas severas e inundaciones significativas. Las mismas afectaron a las actividades económicas, la dinámica de los cuerpos de agua y con ello a la biodiversidad y las coberturas del suelo de la Región Pampeana (Barsky *et al.* 2008; Taboada *et al.*, 2012). Forte Lay *et al.* (2008) establecieron las diferencias del régimen de lluvias entre los períodos 1947-1976 y 1977-2006, donde se observó un incremento de la precipitación anual en el último período. Las diferencias de precipitaciones entre ambos ciclos superaron los 50 mm hasta alcanzar variaciones de 150 y 200 mm. Las máximas amplitudes se registraron en el noreste de la provincia de Entre Ríos, mientras que variaciones de 150 mm se registraron en el centro de la

región, la cual coincide con áreas donde estos cambios favorecieron el reemplazo de la ganadería por la agricultura.

Castañeda y Barros (1994), Barros *et al.* (2000) y Doyle *et al.* (2012) obtuvieron resultados similares en cuanto a la tendencia creciente de la precipitación a partir de 1960, principalmente en el extremo noreste de la Región Pampeana con algunas tendencias positivas de 5 mm por año y un máximo superior a 8 mm por año. El aumento de precipitaciones registrado en la Región Pampeana ocasionó notables incrementos en los rendimientos de los cultivos de secano (Magrin *et al.*, 2005) y contribuyó en forma contundente a la expansión de las fronteras agrícolas y del área sembrada con cultivos anuales (Volante *et al.*, 2015). Como evidencia de esto se observó un corrimiento de la isohieta de 500 mm hacia el Oeste durante la década de 1990, la cual constituye el límite occidental de la Región Pampeana permitiendo el ingreso de cultivos de grano (Sierra *et al.*, 1994).

Por otro lado cabe considerar las posibles variaciones de la temperatura del aire. Según lo estudiado por Hulme y Sheard (1999), la temperatura media anual en Argentina aumentó un 1 °C durante el siglo pasado, donde la década de los años 1990 fue la más cálida. La estación invernal (junio–agosto), registró el mayor aumento del observado a lo largo de todo el año. A su vez, también se percibió una disminución en la frecuencia de heladas. Estudios relacionados a las emisiones a la atmósfera determinaron posibles escenarios para la Región Pampeana según la concentración de CO<sub>2</sub> (Special Bulletin Concerning Emission Scenarios – IPCC, 2000). De acuerdo con estos pronósticos, el IPCC prevé un aumento de la temperatura media de la llanura pampeana de 1 °C bajo condiciones de bajo impacto (una concentración de CO<sub>2</sub> de 532 ppm dando una elevación global de 1,2 °C para el año 2080). Este aumento ascendería entre 2,9 y 3,4 °C en un escenario de mayor impacto (concentración de CO<sub>2</sub> de 721 ppm produciendo un incremento de 3,9 °C para el año 2080). En el primer escenario la precipitación aumentaría un 5% en la Región Pampeana para el 2080, mientras que según el segundo escenario el incremento de las precipitaciones sería casi del 17 % en el mismo año. Estos escenarios no consideran eventos como los de El Niño, que se sabe que afectan también a la precipitación en las lagunas pampeanas.

Si bien hay muchos estudios climáticos de la Región Pampeana, debido a que es una de las regiones más productivas de nuestro país, el objetivo del presente capítulo es conocer su variabilidad climática en las diferentes subregiones climáticas pampeanas que fueron definidas en la Capítulo 4. Este análisis constituye un aporte importante al conocimiento del clima en la región de estudio, pues la variabilidad del clima sin lugar a dudas es diferente en cada una de las subregiones. Estos resultados más específicos, podrán ser utilizados por diferentes actores sociales de la mencionada región.

## 5.2 Metodología

Se analizaron datos mensuales y anuales de las estaciones pertenecientes al SMN y localizadas en las 8 subregiones climáticas de la Región Pampeana. Como ya se mencionó el período de estudio corresponde a cincuenta años (1960-2010). Sobre esta base de datos se efectuó un análisis de la variabilidad climática teniendo en cuenta distintas escalas temporales y el cálculo de las anomalías de los diferentes parámetros meteorológicos. Los análisis se realizaron sobre la media mensual entre las estaciones que conforman cada grupo (Capítulo 4). Se utilizaron los análisis de Fourier y métodos estadísticos estándar. Además se estudió la escala estacional (90 días) la cual es importante para el planeamiento de las actividades que dependen del clima como la agricultura, el turismo y la pesca (Piccolo, 2013).

Para la determinación de períodos secos y húmedos se usó el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) (Edwards y Mckee, 1997). La misma fue modificada en una distribución normal de forma tal que el valor 0 se correspondió con los valores medios. Una vez calculado el índice se caracterizaron los períodos en húmedos y secos. Un evento de sequía se define cuando los valores de IEP son inferiores a -1,0, significa que la precipitación supera una desviación estándar. Los eventos húmedos fueron representados por los valores de IEP mayores a 1. Cuatro parámetros son considerados para eventos secos y húmedos a través de IEP: frecuencia - número de períodos; *Periodicidad* - tiempo entre un evento y la ocurrencia de otro; *Duración* - duración media de todos los eventos, máxima y mínima; *Intensidad* - valores promedio de IEP de todos los eventos. Se calcularon por separado para los eventos secos y húmedos de cada estación meteorológica para identificar diferencias significativas entre las subregiones.

La variabilidad en las precipitaciones se relacionaron con la intensidad del Índice ENSO y ONI (*Ocean Niño Index*), desarrollado por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, Estados Unidos) y permite identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el Océano Pacífico Tropical. Se obtiene a partir de la media móvil de tres meses de la anomalía de la temperatura superficial del mar (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Los eventos cálidos se producen con el desarrollo de una anomalía positiva de la SST ( $> +0,5$  °C), mientras fríos se definen por la ocurrencia de una anomalía negativa ( $< -0,5$  °C).

### **5.3 Resultados**

La variabilidad climática en la Región Pampeana se estudió teniendo en cuenta las distintas escalas temporales de análisis mencionadas previamente. Por lo tanto, a continuación se presentan de forma separada los resultados para cada uno de los parámetros analizados y estableciendo comparaciones con las respuestas observadas en distintas subregiones pampeanas. A modo de facilitar la presentación de los resultados se expresaran como grupos 1 al 8 o abreviado G1 a G8.

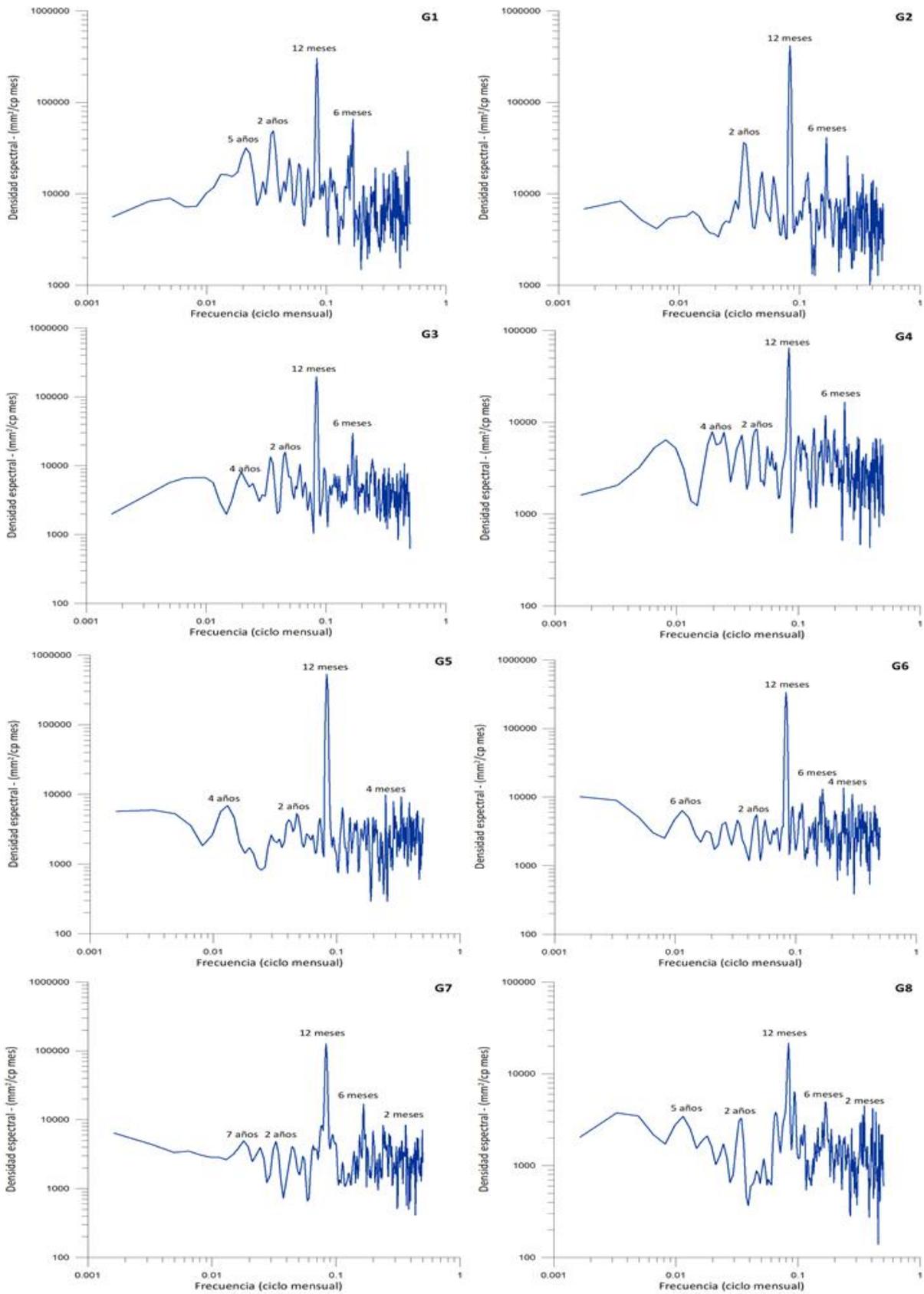
#### *5.3.1 Precipitación*

El análisis de Fourier aplicado a la precipitación mensual mostró intensidades similares para todas las subregiones. Se observan señales que responden a una variación inter-decádica, aunque son de baja densidad considerando el período de estudio de 50 años. Dentro de las señales inter-anales se identifican señales en 2 años (considerablemente más intensas en los grupos 1 y 2) y de 4 a 7 años en todas las subregiones (Figura 5.1). La señal anual es la de mayor intensidad en todos los casos, aunque las máximas densidades están representadas en los grupos 4 y 5, mientras que las más bajas corresponden a los grupos 3, 7 y 8. La variabilidad estacional también es común en toda la región de estudio, como en el caso de 6 meses y 2 meses en todos los casos, aunque son notablemente más intensas en los grupos 1 y 2 (Figura 5.1).

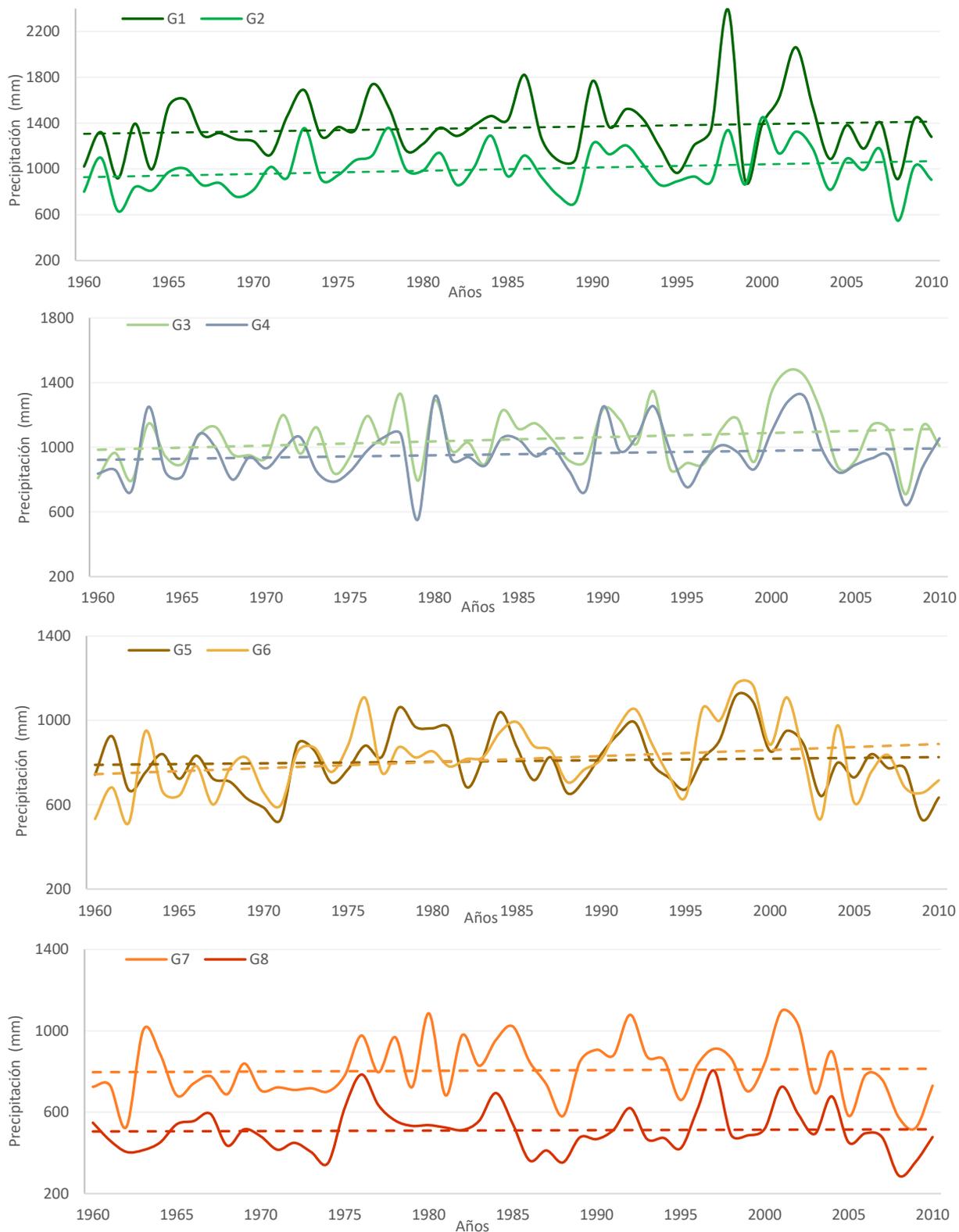
Se observa una variabilidad anual de las precipitaciones en todos los grupos, aunque se destaca en caso del grupo 1 donde la amplitud es considerablemente mayor, ya que se registra la mayor amplitud anual de precipitación (1400 mm entre 1998 y 1999) (Figura 5.2). Mientras que las zonas con menores amplitudes medias están represadas en los grupo 5, 7 y 8 que se aproximan a los 500 mm anuales. Con respecto a las variaciones decádicas es notable

una variación próxima a los 5 años, como en el caso de un período muy lluvioso entre los años 2000 y 2005 que afectó a toda la Región Pampeana, así como en los siguientes 5 años (2005 al 2010) que se caracteriza por escasas precipitaciones anuales (Figura 5.2).

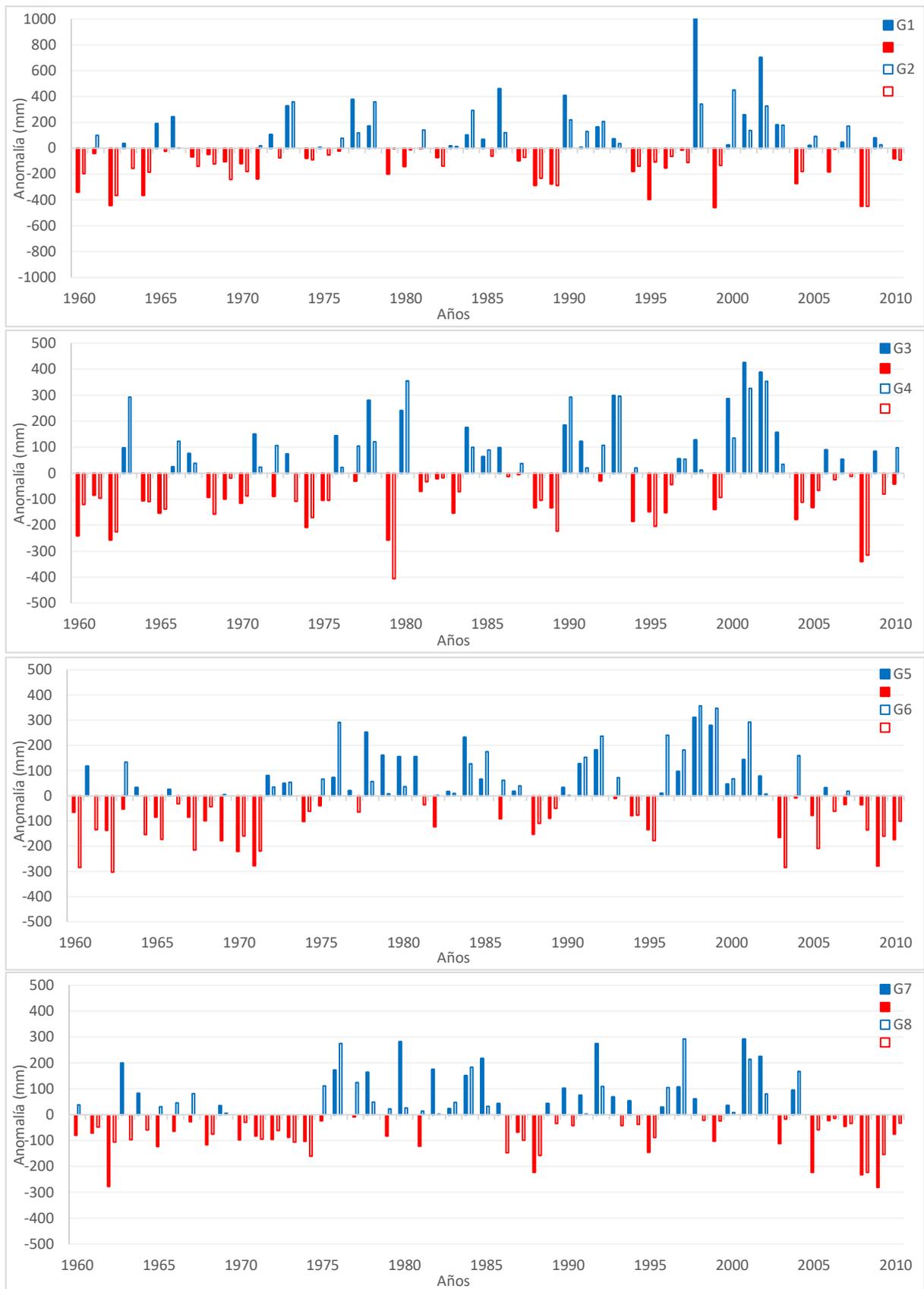
Las anomalías medias anuales indican una disminución de las variaciones positivas hacia el sur de la Región Pampeana. Se destacan los grupos 1, 2 y 3 como los que registran los máximos anuales (Figura 5.3). Se observa un dominio de anomalías negativas durante la primera década y media del período de estudio (1960-1975) en todos los grupos, aunque son más considerables en los grupos 3 a 7. Durante el resto del período los ciclos negativos fueron más cortos, aunque no menos intensos. El predominio de años con anomalías positivas se observa entre el 1975 y el 2005, donde se destacan las máximas precipitaciones anuales en toda la región entre los años 1995 y 2005 (Figura 5.3). A escala estacional la variación es notable en todas las subregiones. El verano es la estación más lluviosa con una media de 308 mm, aunque en algunos subgrupos tiene una distribución más homogénea en conjunto con la primavera. Los veranos más lluviosos se registran en los grupos 5, 2 y 6 con 320, 264 y 245 mm de diferencia con el invierno respectivamente. Los grupos 8 y 4 muestran una distribución más uniforme de las lluvias durante el año con 65 y 100 mm de amplitud (Figura 5.4 y 5.5).



**Figura 5.1.** Densidad espectral de la precipitación mensual en las ocho subregiones pampeanas (1960-210).



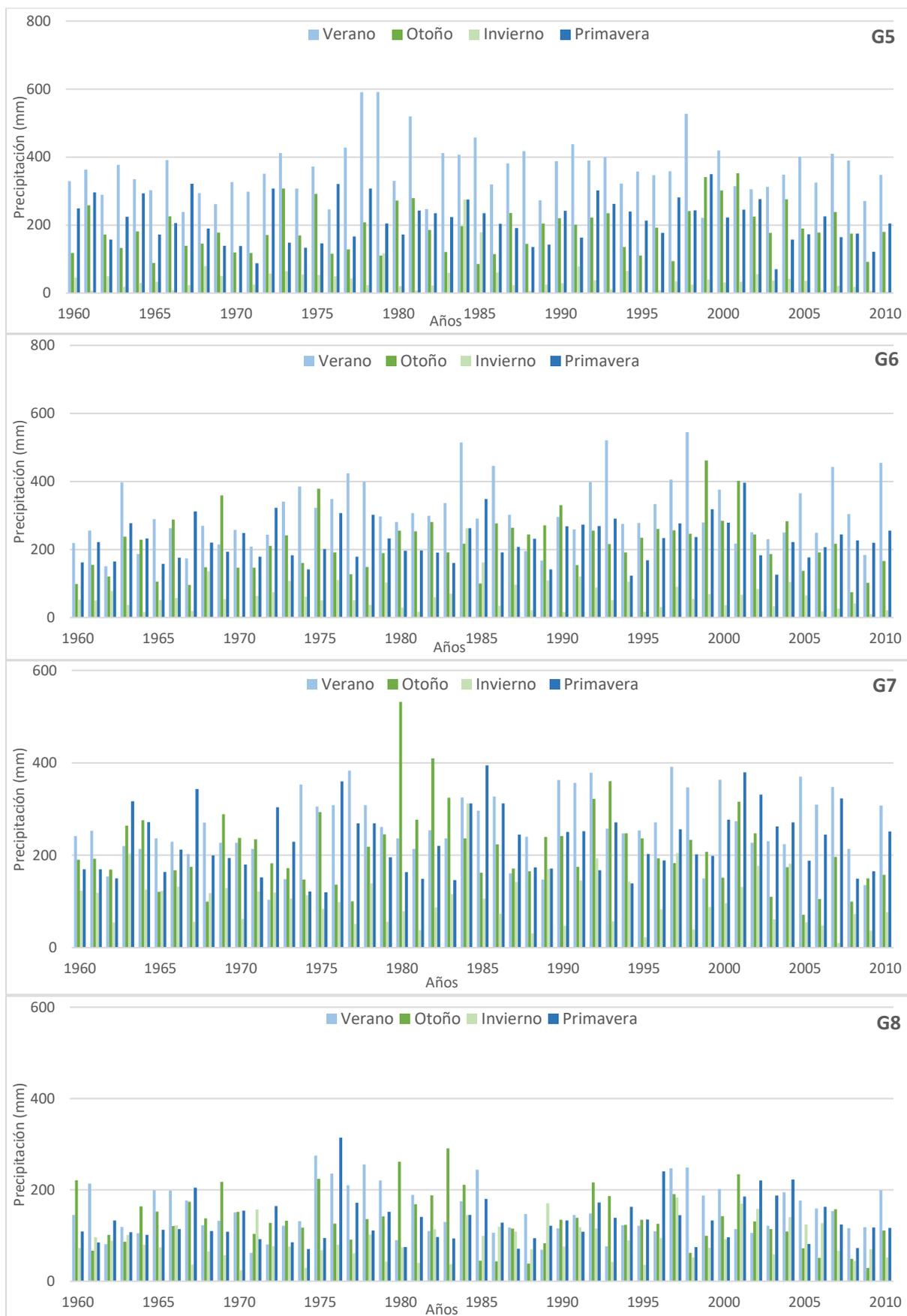
**Figura 5.2.** Precipitación anual y tendencia en las ocho subregiones pampeanas (1960-2010).



**Figura 5.3.** Anomalías de la precipitación media anual (mm) en las ocho subregiones (1960-2010)



**Figura 5.4.** Precipitación estacional en las subregiones 1 a 4 (1960-2010).



**Figura 5.5.** Precipitación estacional en las subregiones 5 a 8 (1960-2010).

La aplicación del IEP a partir de la precipitación mensual de cada estación facilitó la identificación de los eventos considerados húmedos y secos a los largo de la Región Pampeana, para así caracterizar su variación en cada subregión. No se observa un dominio de un evento sobre otros, la frecuencia de ambos es similar en la Región Pampeana (Tabla 5.1). Las duraciones máximas de los mismos marcan en algunos casos lugares con mayor vulnerabilidad ante los efectos de estos. Por ejemplo, en el caso de los eventos húmedos las estaciones *Junín*, *Pergamino* y *Laboulaye* (de las subregiones 3 y 6 respectivamente) registraron eventos húmedos de hasta 25 meses y coincide con áreas que sufren importantes inundaciones (Aliaga *et al*, 2016). Por otro lado, los períodos secos alcanzan duraciones máximas de hasta 24 meses en estaciones del grupo 8 (subregión *Semiárida*).

Estación	Eventos Secos						Eventos húmedos					
	F	P	I	D med	D mín	D máx	F	P	I	D med	D mín	D máx
9 DE JULIO	8	63	-2,0	4,4	2	11	8	48	1,9	5,1	2	10
BAHIA BLANCA	6	86	-2,1	6,8	3	10	7	50	1,9	4,6	3	9
BUENOS AIRES	8	65	-1,9	4,8	2	8	7	50	1,9	6,1	2	12
CASTELAR	10	53	-2,0	3,9	2	8	6	92	1,9	6,0	3	8
CERES	6	88	-2,0	5,7	2	10	6	54	1,9	5,7	2	10
CNEL SUAREZ	3	122	-2,1	11,7	3	19	5	35	1,8	5,4	2	11
CON. URUGUAY	6	78	-1,9	3,8	2	8	9	49	1,9	6,5	2	13
CONCORDIA	6	88	-1,9	4,8	3	8	6	82	2,1	6,7	3	15
CORDOBA	6	88	-1,8	6,0	2	10	5	67	2,0	7,4	4	11
DOLORES	9	59	-2,1	5,3	2	11	6	98	1,8	6,3	2	12
EZEIZA	10	41	-1,9	4,8	2	8	5	105	1,9	7,6	2	16
GRAL PICO	7	82	-1,9	6,6	2	12	6	54	1,8	5,3	2	10
GUALEGUAYCHU	7	81	-2,0	4,6	2	10	5	60	1,9	8,6	3	12
JUNIN	7	82	-1,9	5,6	2	9	5	70	2,0	7,8	2	19
LA PLATA	7	74	-2,0	6,6	2	11	7	65	1,9	4,4	2	12
LABOULAYE	6	84	-1,7	5,5	2	10	4	90	2,1	9,3	2	25
LAPRIDA	6	72	-1,9	7,3	3	21	7	50	1,9	5,3	3	12
MAR DEL PLATA	8	51	-1,9	4,8	2	14	5	79	1,8	6,4	4	12
MTE CASEROS	8	58	-1,9	4,9	2	8	7	63	1,8	5,1	2	9
PEHUAJO	5	118	-2,0	5,0	3	12	6	56	2,0	6,5	2	12
PARANA	8	74	-1,9	6,4	3	10	4	108	2,0	8,3	5	11
PERGAMINO IN.	7	84	-1,8	4,6	2	10	5	79	1,8	9,2	4	19
PIGUE	6	94	-2,0	7,6	2	17	5	70	1,9	7,6	2	11
PILAR	3	120	-2,0	10,7	2	21	5	62	1,9	9,0	2	11
PUNTA INDIO	3	96	-2,1	12,3	5	21	6	76	1,8	6,3	3	10
RECONQUISTA	6	76	-1,8	5,3	2	11	5	89	2,1	8,0	5	13
RIO CUARTO	7	70	-1,9	6,6	2	16	7	55	1,8	5,9	2	9
SANTA ROSA	7	82	-1,8	7,3	3	12	6	70	1,9	9,2	3	18
SAUCE VIEJO	6	94	-1,9	5,5	2	8	6	82	2,0	8,7	5	12
TANDIL	6	56	-2,1	7,2	2	20	6	72	1,9	6,5	2	12
TRES ARROYOS	9	66	-2,0	5,8	2	10	7	77	1,7	4,1	3	7
VIEDMA	6	78	-1,9	7,8	2	24	5	82	2,0	7,6	2	14
VILLA REYNOLDS	6	82	-1,9	5,7	2	22	6	52	1,9	6,8	5	8

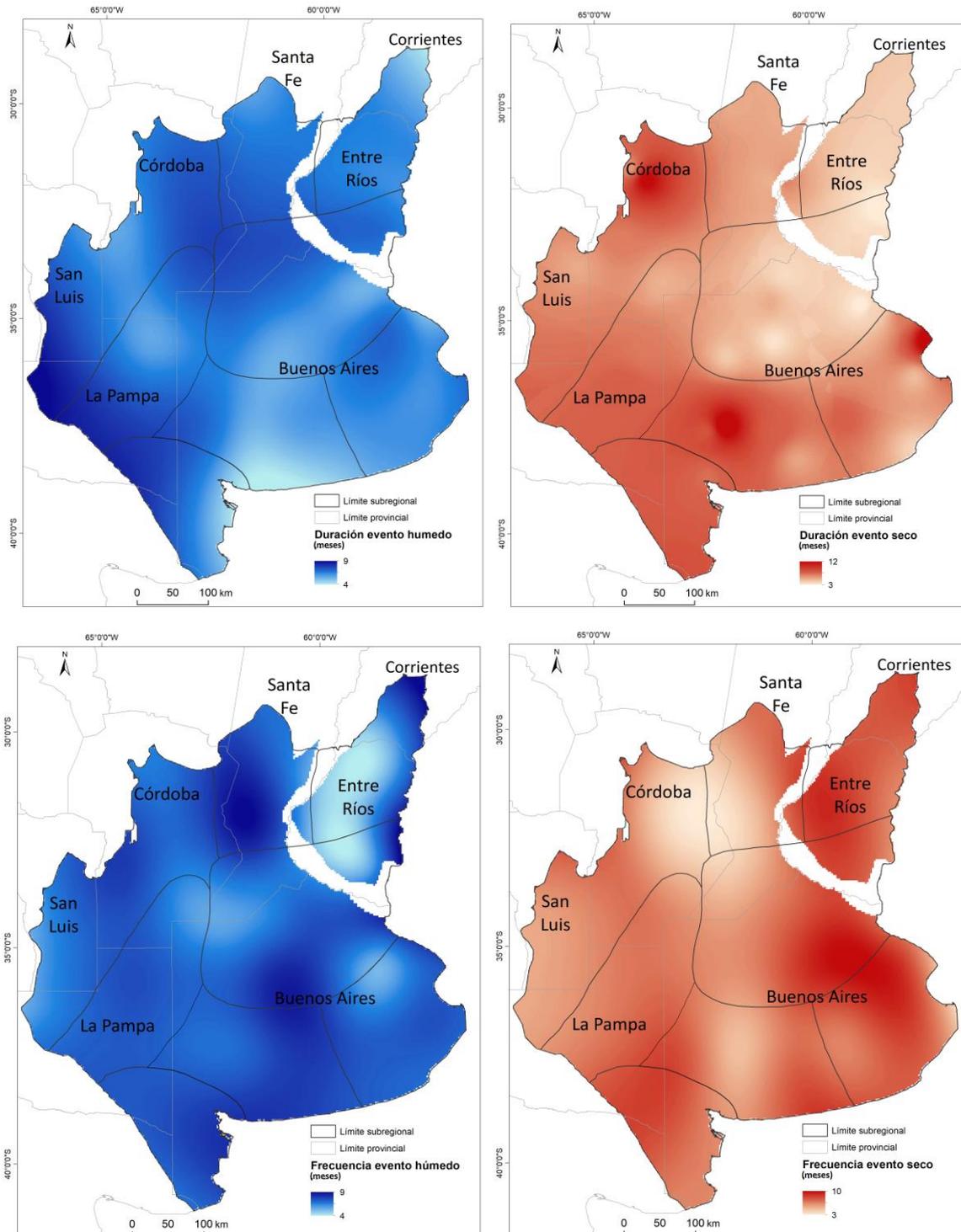
**Tabla 5.1.** Características de los eventos secos y húmedos según el IEP en las estaciones del SMN durante el período 1960-2010. Frecuencia (F): número de eventos; Periodicidad (P): tiempo entre un evento y la ocurrencia de otro (meses); Duración media (D med), mínima (D min) y máxima (D máx) del evento en meses; Intensidad (I): valores promedio de IEP.

La frecuencia muestra un patrón inversamente proporcional a la periodicidad (Figura 5.6 y 5.7). En general, los eventos secos fueron más frecuentes en la región centro-norte, en el noreste de Buenos Aires y en el sureste de las provincias de La Pampa. Por otro lado, los eventos húmedos fueron más frecuentes en las regiones suroccidental y noreste de la provincia de Buenos Aires y en la zona centro-norte de la Pampa. Los valores de periodicidad más altos se encontraron en el noreste y fueron más bajos en el suroeste de la Pampa. La intensidad de los eventos secos fue mayor al norte y disminuyó al sur. La intensidad de los húmedos presentó un gradiente más alto en el noreste, y disminuyó al suroeste. La longitud media de los eventos secos fue mayor al suroeste de la Pampa y disminuyó al noreste. En lo que respecta a los eventos húmedos, la longitud media fue mayor al norte e inferior al sur de la Pampa (Figuras 5.6 y 5.7).

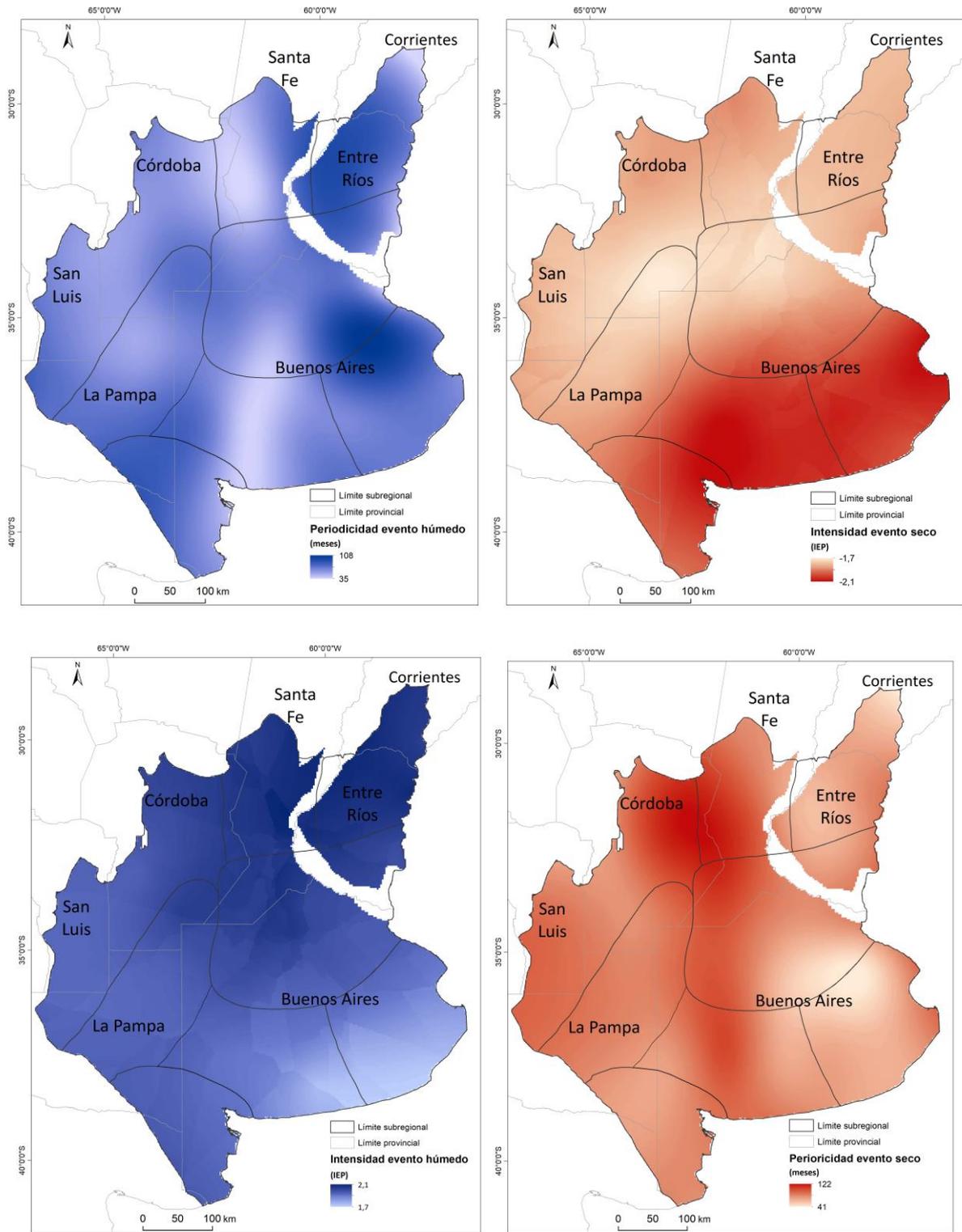
Mediante el índice ONI como indicador de los eventos ENSO, durante los 50 años estudiados se observaron distintas respuestas entre las subregiones. En el grupo 1 los períodos de lluvias excesivas coinciden con eventos El niño considerablemente con mayor frecuencia que las mínimas lo hacen con valores por debajo de -0,5 del índice. Estas coincidencias se observan durante los años 1966, 1973, 1986, 1998, 2002-03 y 2010 en el caso de los húmedos y en los años 1974, 1989, 2000 y 2008 los secos (Figura 5.8). En el Grupo 2 la mayoría de las variaciones extremas de las precipitaciones no coinciden con eventos ENSO, aunque se identifican algunas coincidencias de eventos en el grupo 1, como en los años 1964-66, 1978, 1998 y 2007 (húmedos) y en 1974 y 1989 (secos) (Figura 5.8).

Con respecto al grupo 3, se identifica un desfase de las mayores lluvias un año después de eventos el niño. Salvo en el año 1973, tampoco se observan coincidencias en el caso de los períodos secos. Algo similar en cuanto al posible efecto tardío del índice se aprecia en el grupo 4. Los períodos húmedos que podrían deberse a eventos El Niño son en los años 1988 y 1991, mientras que en 1968 y 1973 coinciden con los secos. En los registros máximos de lluvias en 1980 y 2002 no pueden explicarse directamente con eventos El Niño (Figura 5.9). Los grupos 5 y 6 muestran similitudes en la escasa coincidencia de las variaciones pluviométricas con respecto al ONI. En general los ciclos lluviosos ocurren aproximadamente 2 años después que los eventos El Niño (Figura 5.10). En los grupos 7 y 8 se observan mayores coincidencias entre las máximas precipitaciones y los eventos El Niño, como así también La Niña. En el primer caso, los años húmedos coinciden durante 1977, 1993 y 2007, mientras

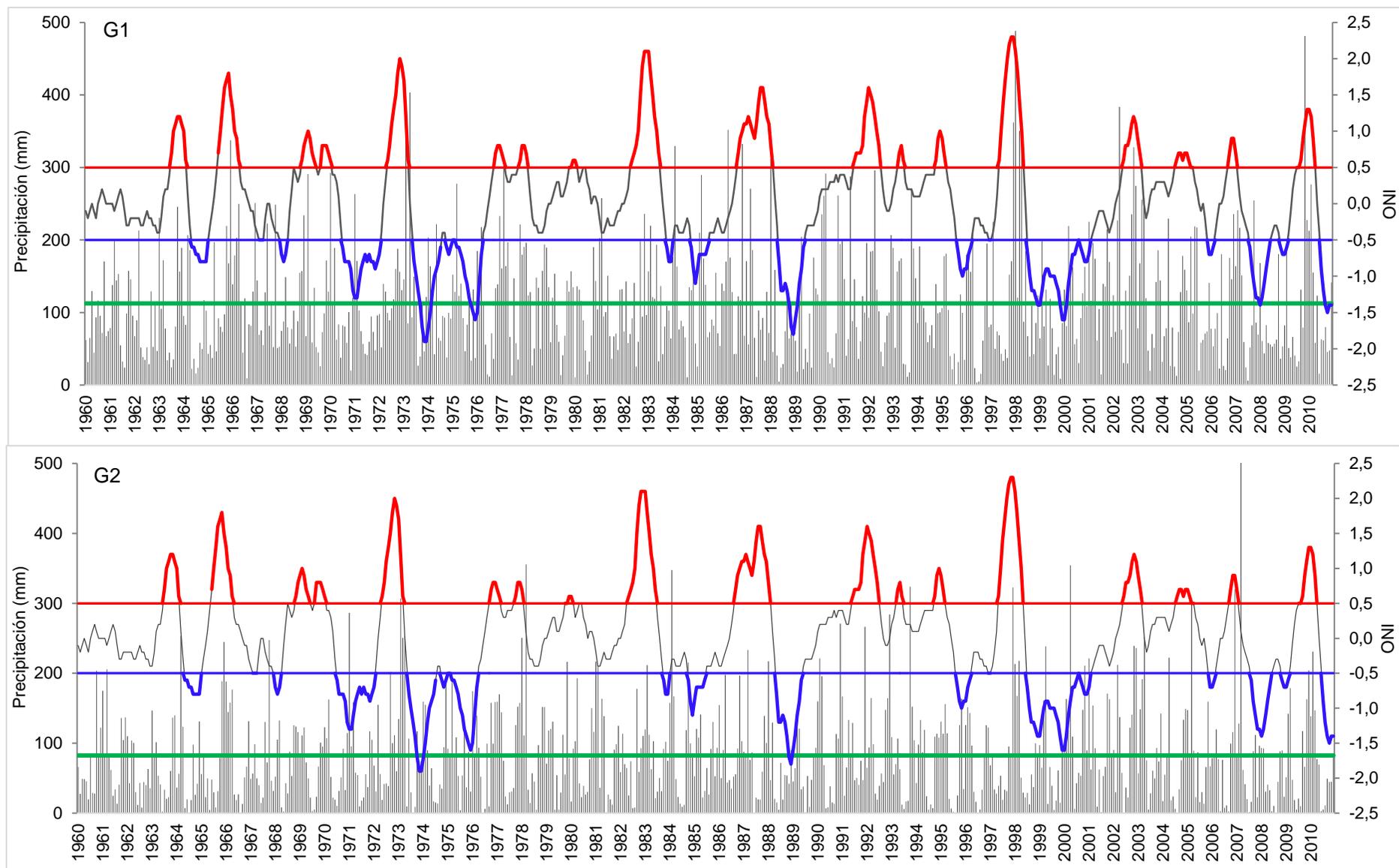
que los secos lo hacen en 1973, 1975, 1990 y 2008. En el grupo 8 lo hacen en 1969, 1978, 1980 y 1983 en el caso de los positivos y en 1971, 1973, 1976 y 2008 en el caso de los negativos (Figura 5.11).



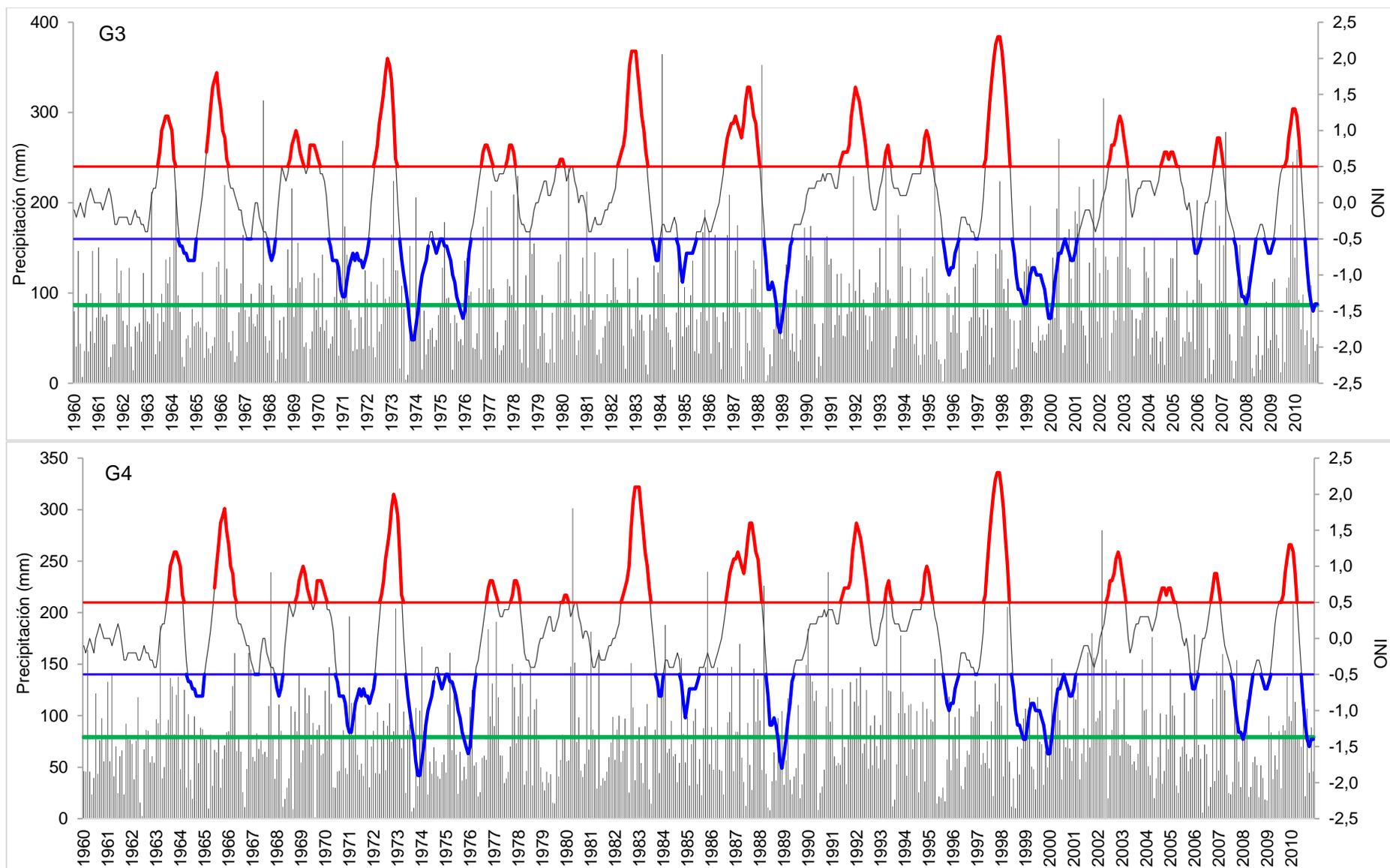
**Figura 5.6.** Distribución espacial de la Duración y Frecuencia media de eventos húmedos y secos en la Región Pampeana (período 1960-2010).



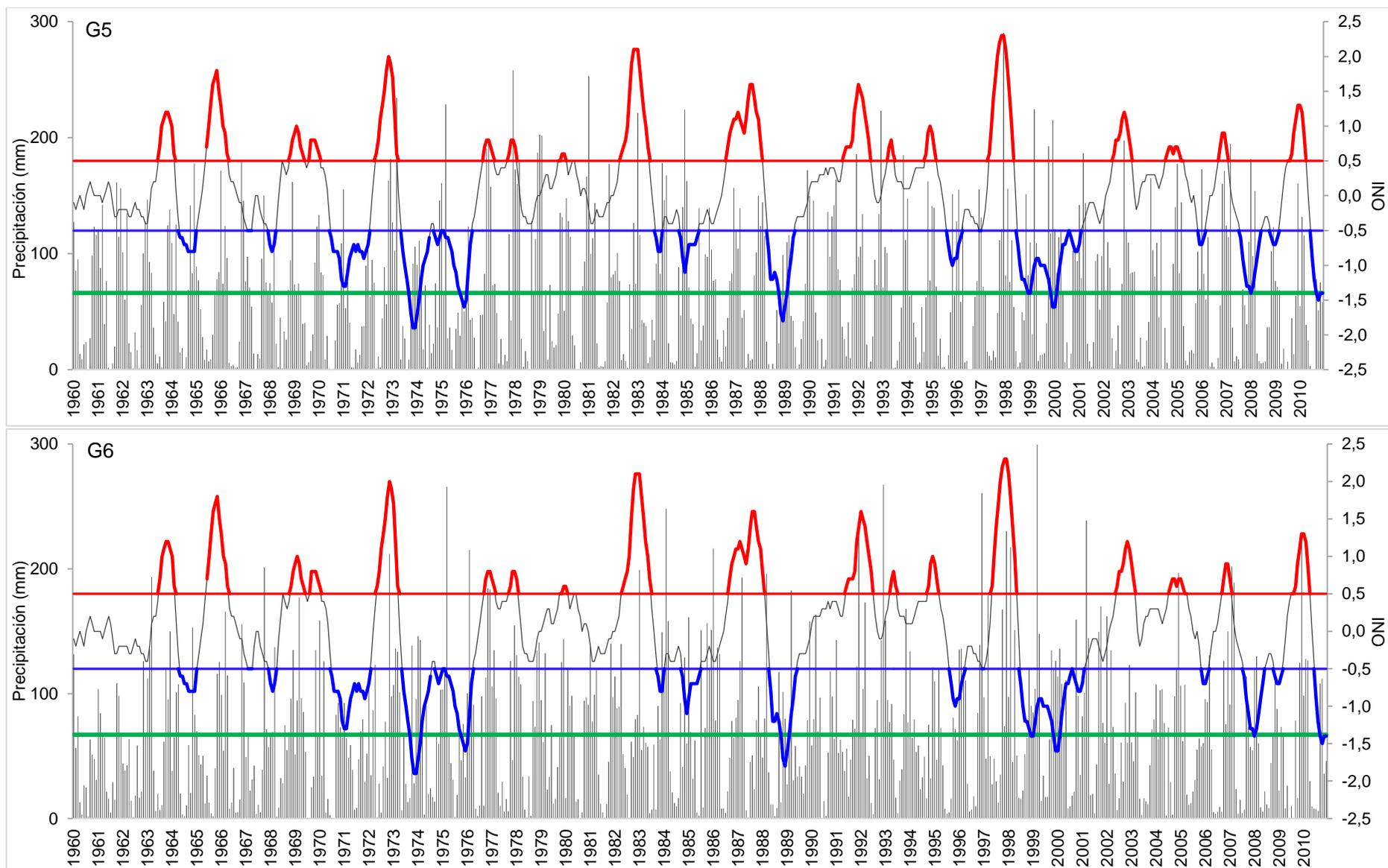
**Figura 5.7.** Distribución espacial de la Periodicidad e Intensidad media de eventos húmedos y secos en la Región Pampeana (período 1960-2010).



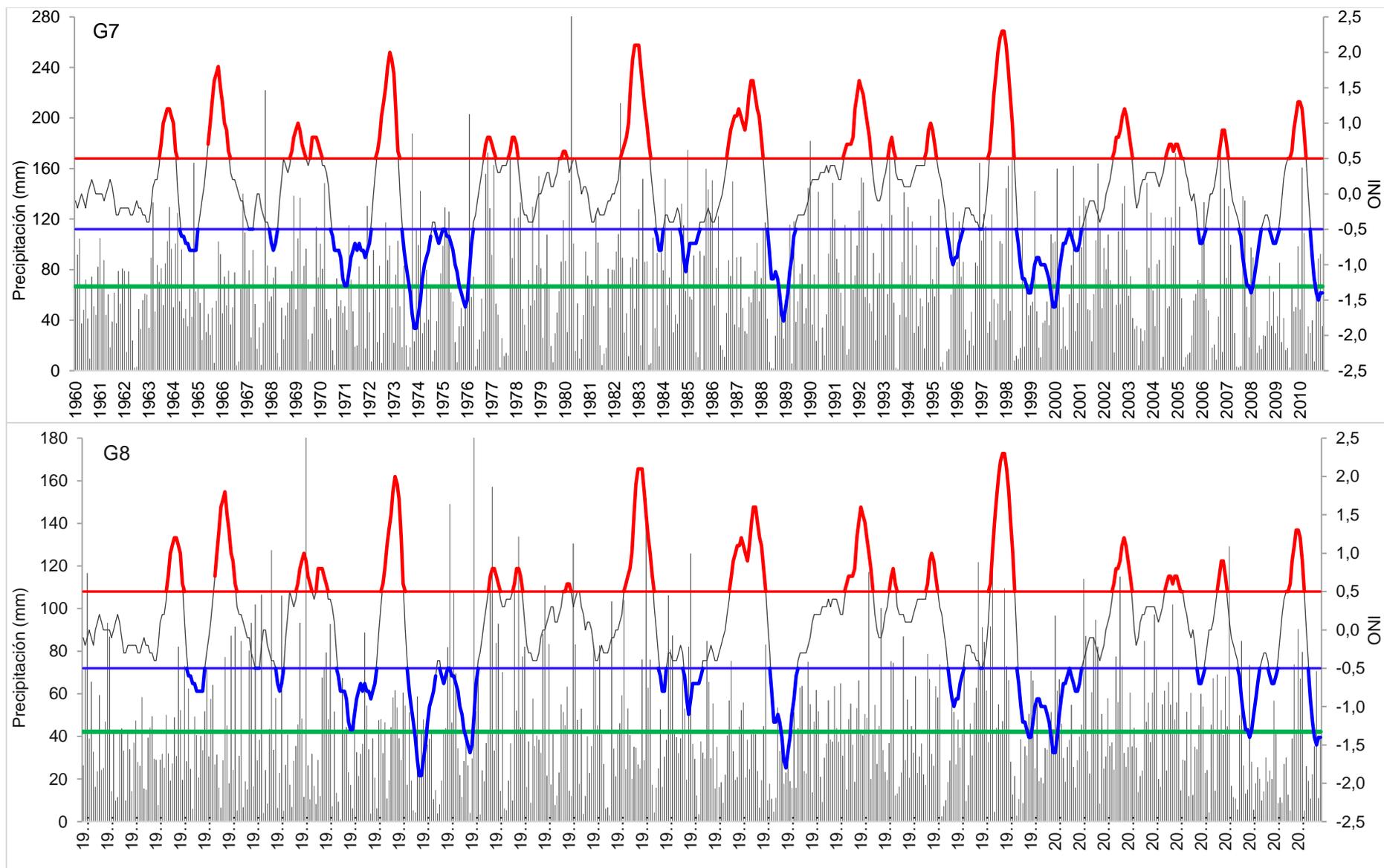
**Figura 5.8.** Precipitación mensual media en el G1 y G2 y su relación con el ONI, con los eventos el Niño (rojo) y la Niña (azul).



**Figura 5.9.** Precipitación mensual media en el G3 y G4 y su relación con el ONI, con los eventos el Niño (rojo) y la Niña (azul).



**Figura 5.10.** Precipitación mensual media en el G5 y G6 y su relación con el ONI, con los eventos el Niño (rojo) y la Niña (rojo).



**Figura 5.11.** Precipitación mensual media en el G7 y G8 y su relación con el ONI, con los eventos el Niño (rojo) y la Niña (azul).

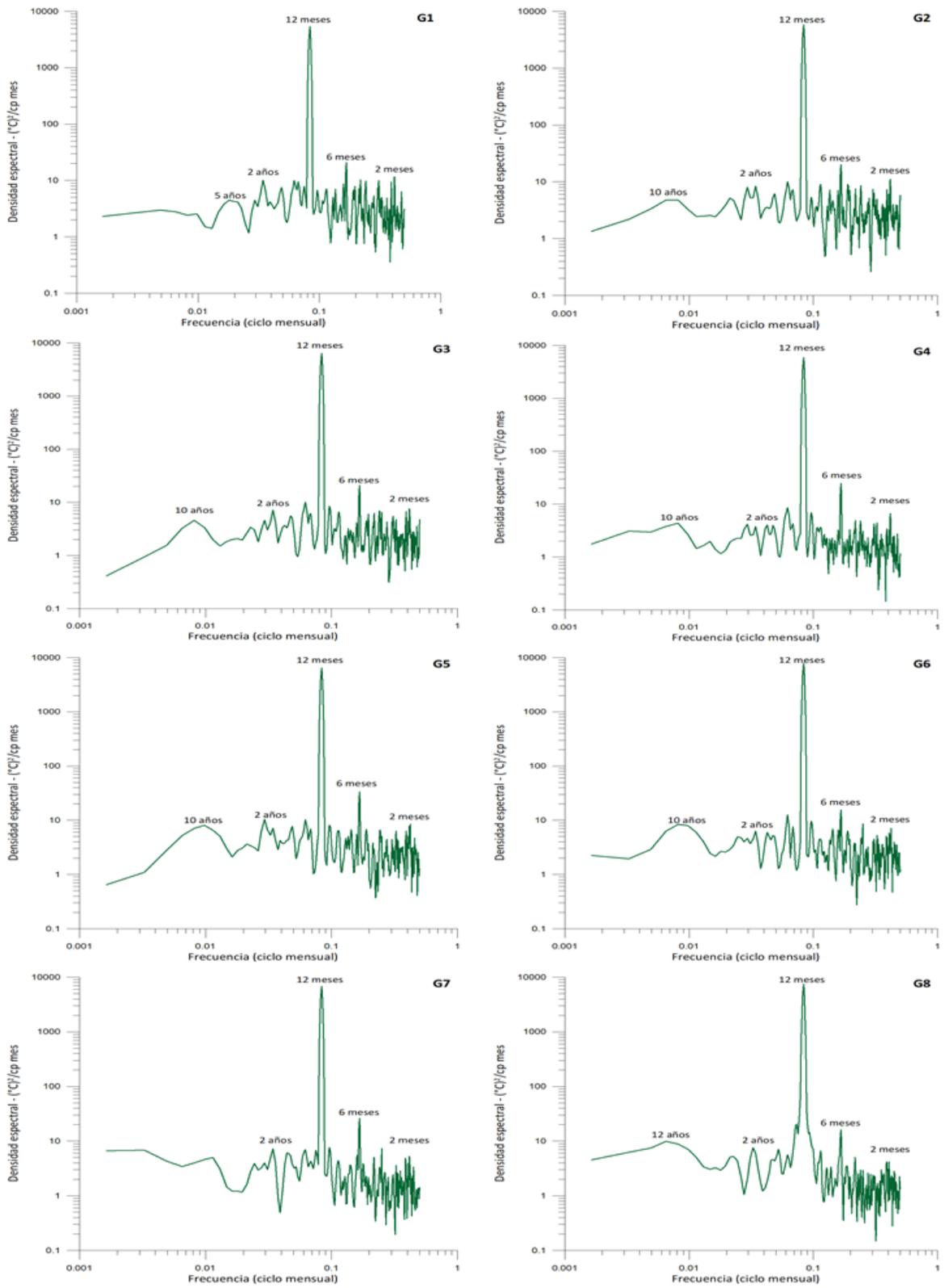
### 5.3.2. *Temperatura del aire*

Debido a las latitudes medias y zonas templadas, la temperatura del aire tiene una estacionalidad definida a lo largo de toda la Región Pampeana. El análisis de Fourier muestra que a diferencia de la precipitación, no hay tantos máximos de densidad durante el período de estudio. Además de la señal de 12 meses, se identifica la señal inter-anual en 2 años, aunque no es considerablemente mayor en ningún grupo en particular (Figura 5.12). La variabilidad estacional también es común en toda la región de estudio, como en el caso de 6 meses y 2 meses en todos los casos (Figura 5.12).

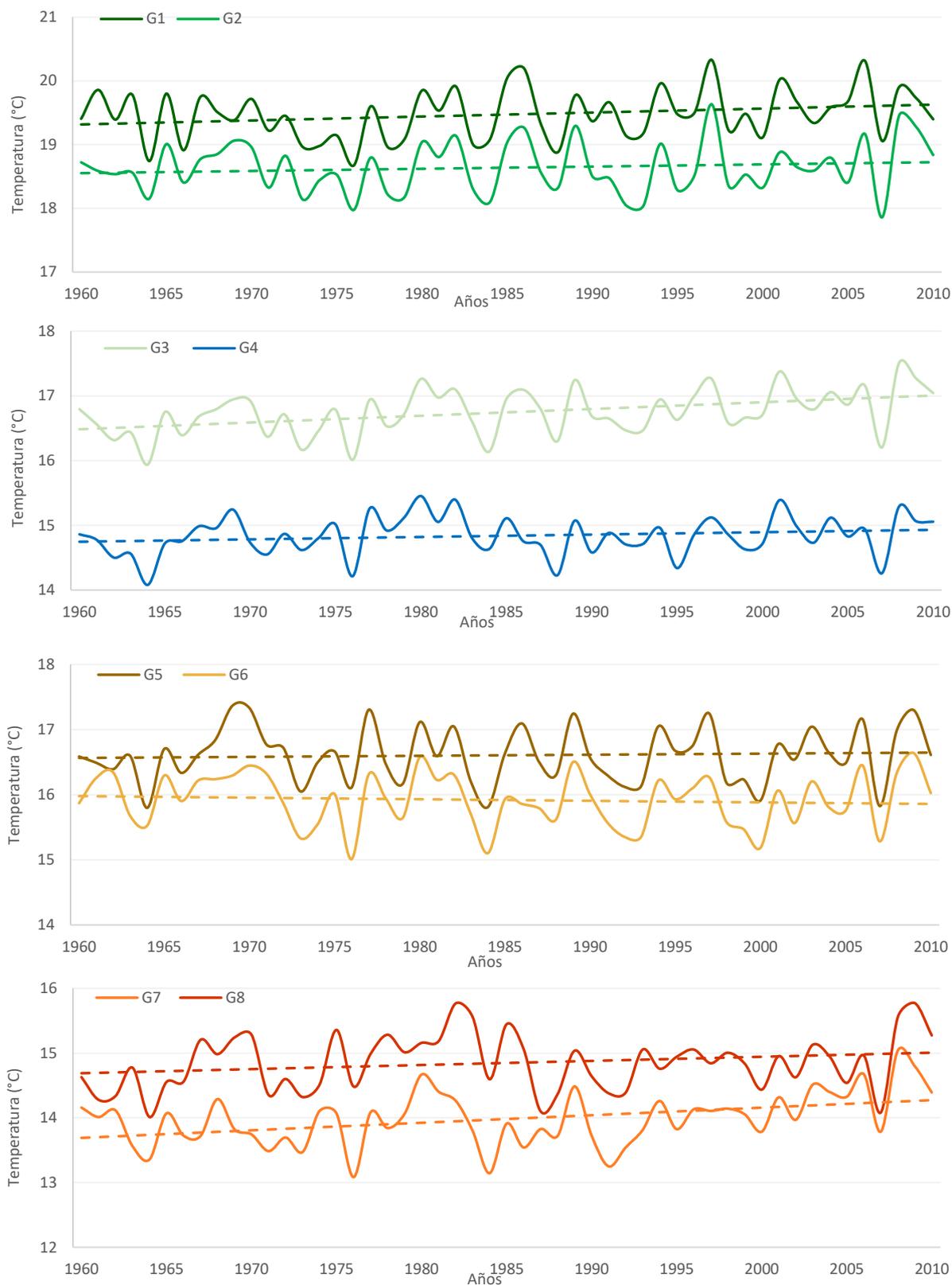
La variabilidad anual también se observa en todos los grupos. Exceptuando los grupos 5 y 6, en el resto de la Región Pampeana hay una tendencia positiva, es decir, un aumento de la temperatura media durante la etapa de estudio. La temperatura media de la Región Pampeana para el período de 50 años estudiados es de 16,4 °C. Los grupos 3, 5 y 6 presentan esta condición con su temperatura media anual. La temperatura media máxima se registra en el grupo 1 en el extremo Noreste de la Región Pampeana, mientras que la media más baja corresponde a la zona de mayor altitud media en el grupo 7 (14,0 °C). Este último grupo coincide también con la zona de mayor amplitud media anual de 2 °C, mientras que las mínimas se registran en el grupo 4 con 1,4 °C. (Figura 5.13).

Las anomalías de temperaturas, tanto positivas como negativas, tienen un similar valor medio para el período de estudio, sin embargo a nivel subregional se observan algunas diferencias. Entre los grupos se registran mayores coincidencias en las anomalías negativas que en las positivas. El grupo 7 presenta la máxima anomalía positiva con 1,6 °C en el año 2008, el cual coincide con anomalías negativas en las precipitaciones. A diferencia de éstas, los casos negativos nunca alcanzaron el 1 °C negativo. Las más bajas llegaron a 0,9 °C en los grupos 6 y 7 respectivamente (Figura 5.14).

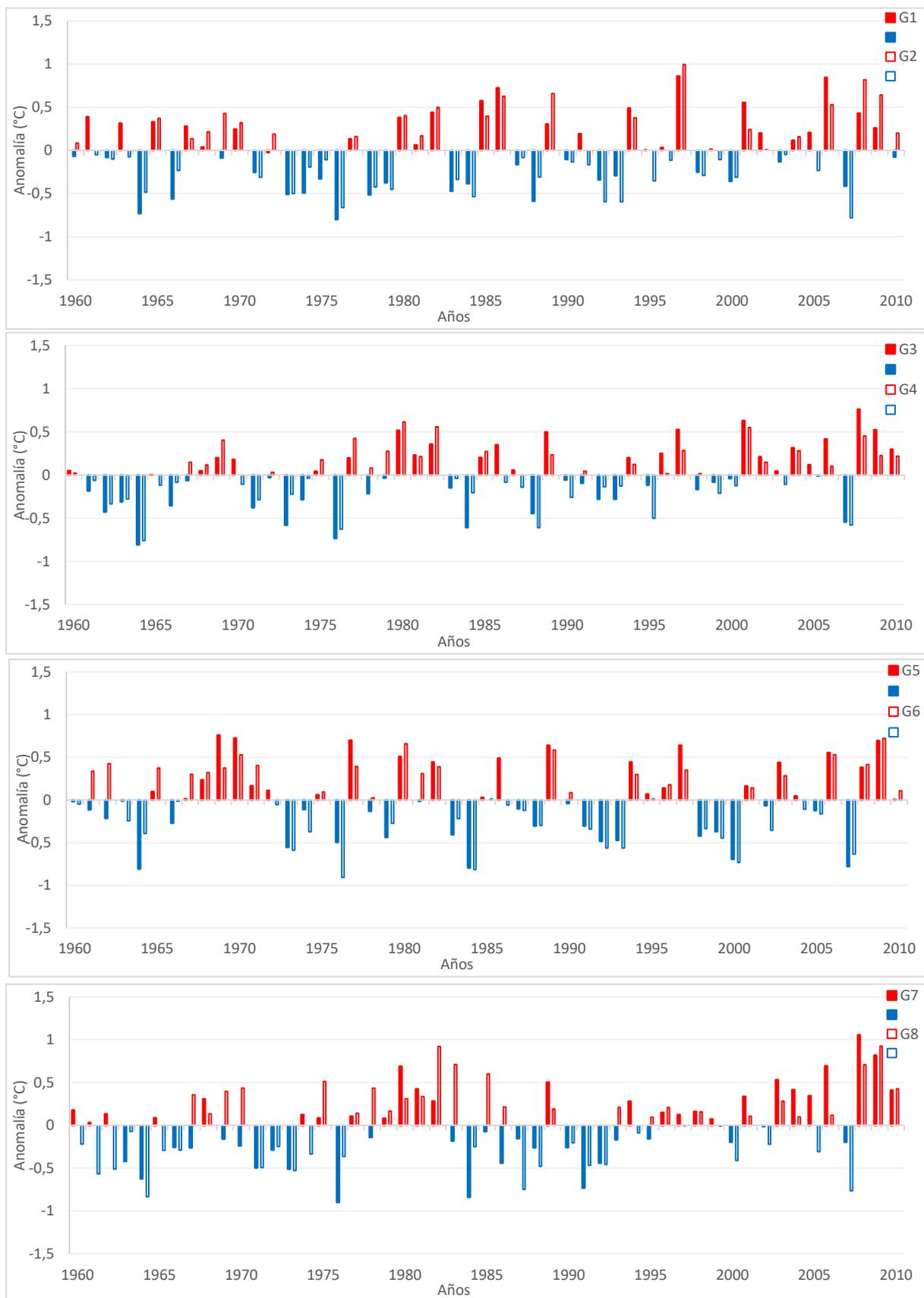
A escala estacional se observan menores amplitudes en los meses del otoño y primavera. La temperatura media del verano para el período analizado es de 22,6 °C, aunque los más cálidos se registraron en el grupo 1 (25 °C). Esto se debe además a que los inviernos son suaves en estas latitudes. Las variaciones estacionales más notables se registran con 13,9°C y 13,5°C en los grupos 6 y 8 respectivamente. En el caso 6, las amplitudes máximas coinciden con áreas de mayor continentalidad de la Región Pampeana (Figura 5.15 y 4.16).



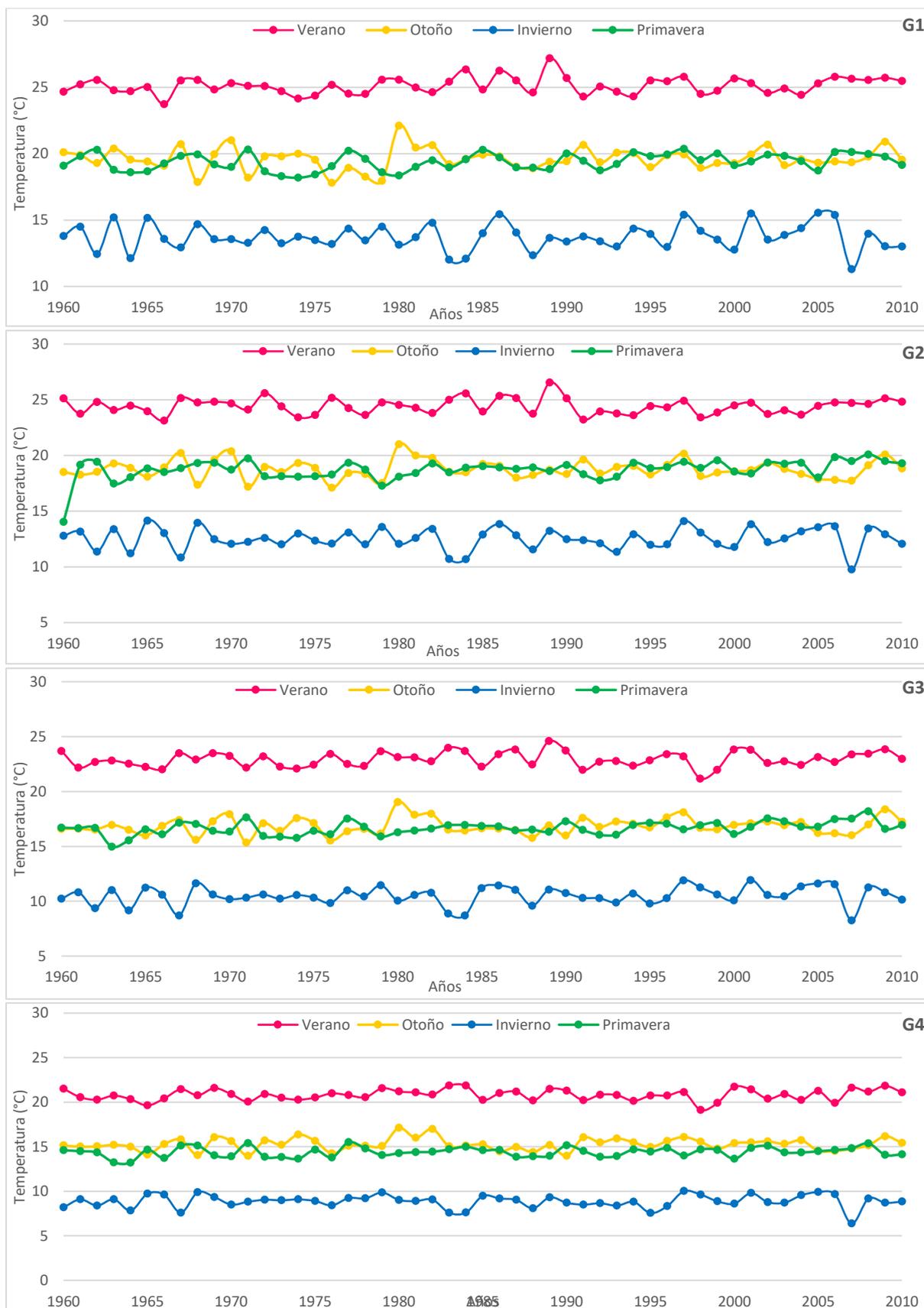
**Figura 5.12.** Densidad espectral de la precipitación mensual en las ocho subregiones pampeanas (1960-210).



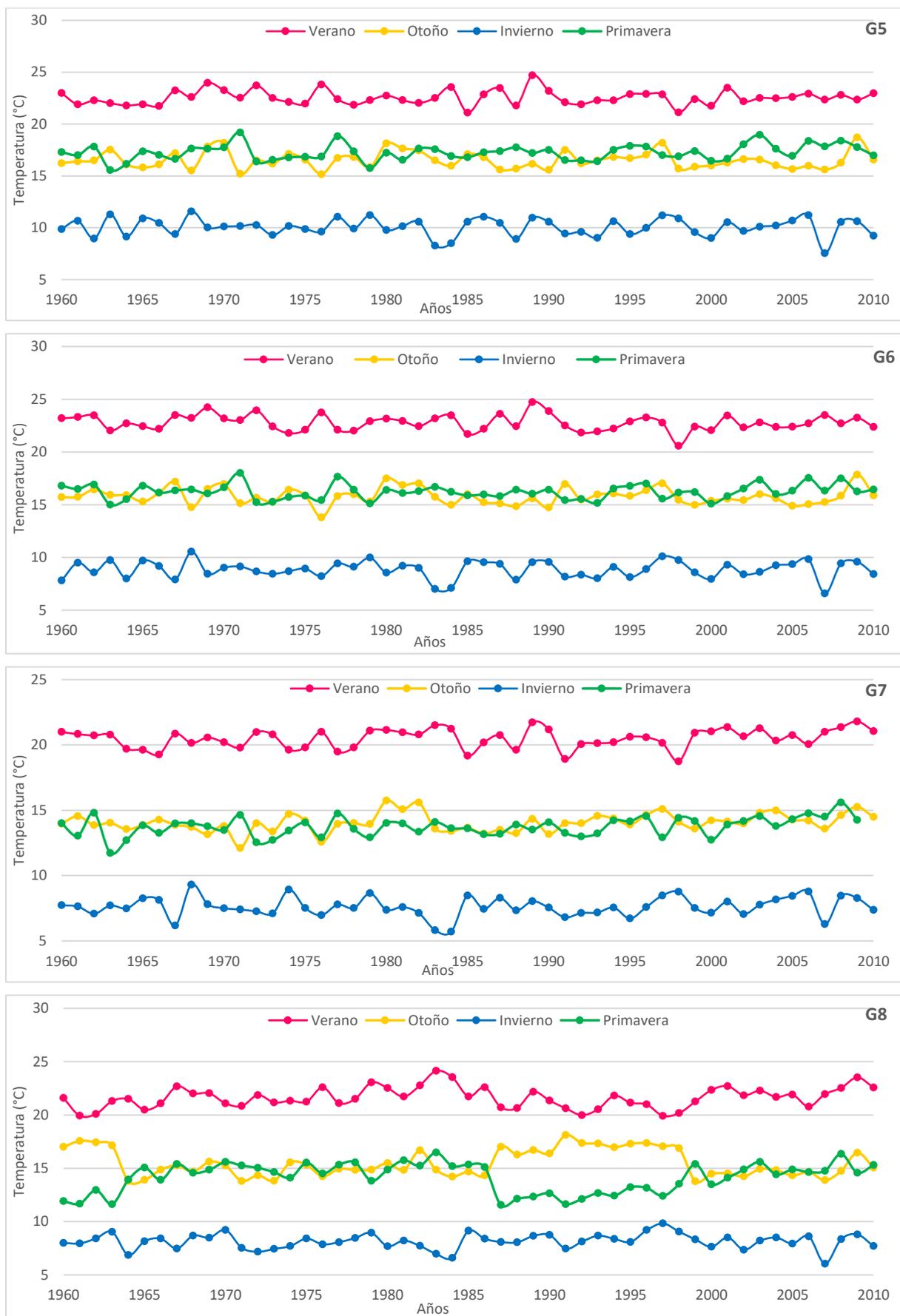
**Figura 5.13.** Temperatura del aire anual y tendencia en las ocho subregiones pampeanas (1960-210).



**Figura 5.14.** Anomalías de la temperatura del aire media anual en las 8 subregiones (1960-2010)



**Figura 5.15.** Temperatura media estacional en las subregiones 1 a 4 (1960-2010).



**Figura 5.16.** Temperatura media estacional en las subregiones 5 a 8 (1960-2010).

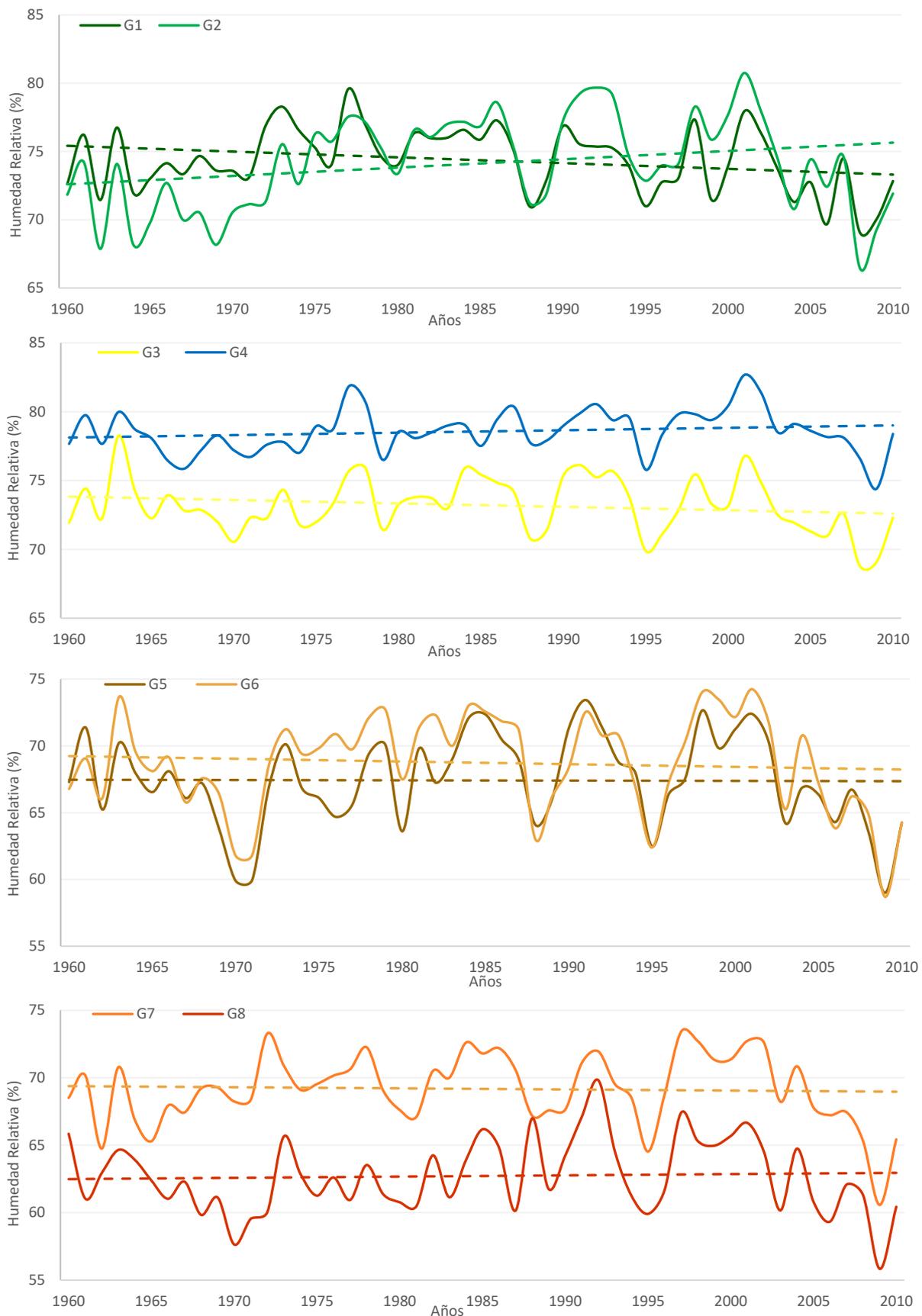
### 5.3.3. Humedad Relativa

La humedad relativa media en la Región Pampeana durante el período estudiado es de 71 %. Las zonas más húmedas se encuentran en el Norte de la Región Pampeana, aunque la media máxima de centra en el grupo 4 con 78 %, mientras que la mínima es de 62 % en el grupo 8 (Figura 5.18). A diferencia de la precipitación y la temperatura del aire, la humedad no mostró tendencias positivas en ningún grupo, incluso se observa cierta inclinación a una disminución de la humedad media en los grupos 1, 3 y 6. Las variaciones interanuales muestran un similar comportamiento, aunque lo hacen en distinta intensidad. Los años más húmedos se corresponden con los máximos de precipitaciones como se describió, por ejemplo, entre los años 2000 y 2005 como muestra de elevada humedad en toda la Región Pampeana y de sequía extrema entre los años 2005 y 2010 (Figura 5.18).

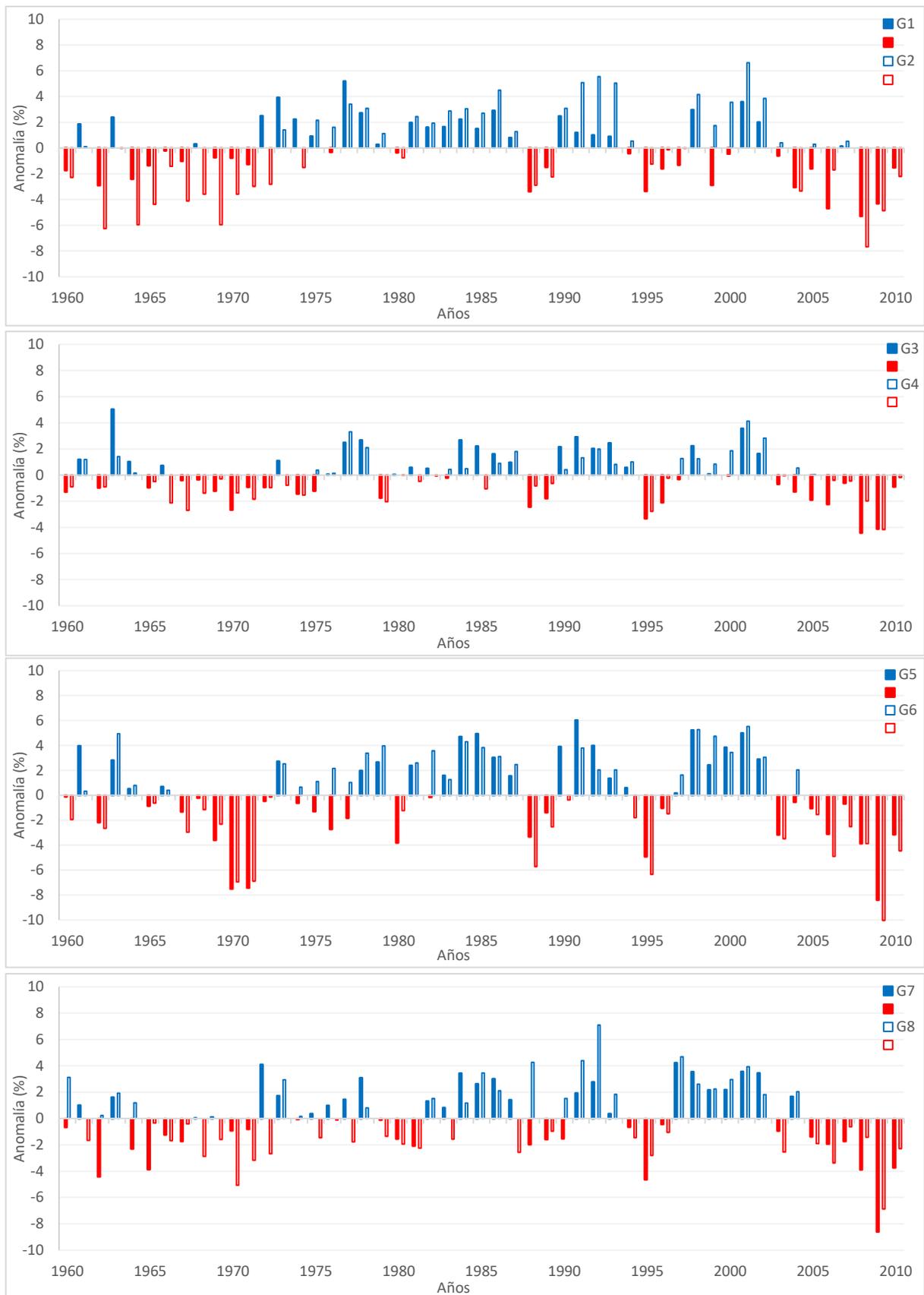
El análisis decádico de las anomalías permite observar un domino de anomalías de humedad negativas desde 1960 hasta 1975. A partir de éste, comienzan a predominar las anomalías positivas durante la mayor cantidad de los años, hasta aproximadamente el año 2004, cuando comienza en período de muy baja humedad. A pesar de esto, las anomalías negativas son considerablemente más intensas que las positivas. Las anomalías negativas tienen un valor medio de casi -4%, mientras que las positivas no alcanzan el 3%. Los grupos donde se concentran los períodos más secos son los 5, 6 y 7, como por ejemplo entre los años 2005 y 2010 (Figura 5.19).

### 5.3.4. Velocidad y dirección del viento

Esta variable atmosférica es una de las más heterogéneas a lo largo de la Región Pampeana. El análisis de Fourier muestra que si bien la señal anual es la más fuerte en todos los grupos, en algunos predominan las señales estacionales, sobre todo de 4 meses en los grupos 5 y 6, mientras que en otros son más notables los interanuales. Estos incluyen 10 y de 7 a 2 años (Figura 5.20). Durante el período de estudio, la velocidad media del viento en la Región Pampeana fue 13 km/h. Este valor no representa las diferentes intensidades medias. La subregión menos ventosa corresponde al grupo 7, con una velocidad media de 9,8 km/h, mientras que la que muestra las mayores velocidades medias es contigua a esta en el grupo 8 con una media de 21,2 km/h.



**Figura 5.18.** Humedad relativa anual y tendencia en las ocho subregiones pampeanas (1960-210).

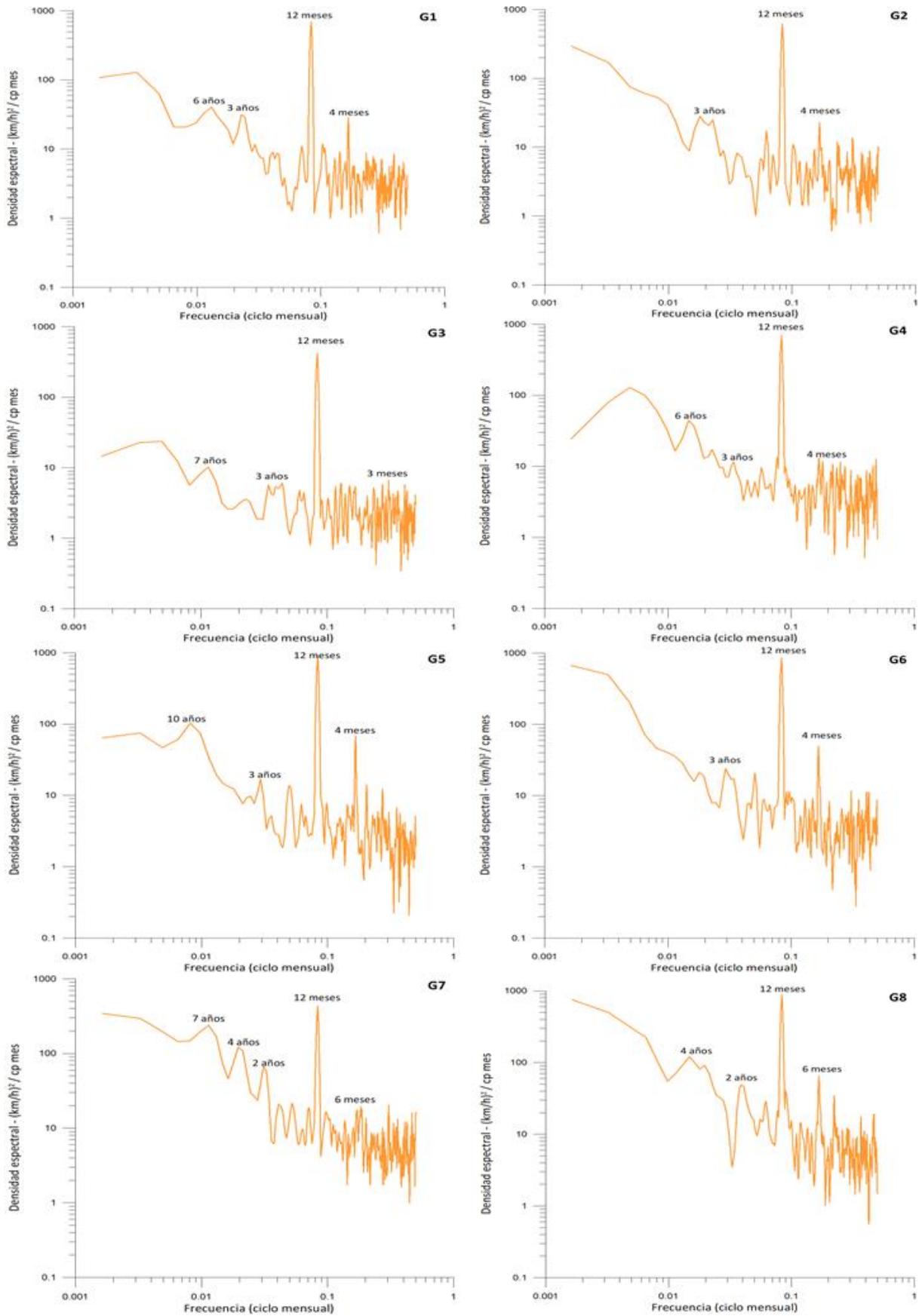


**Figura 5.19.** Anomalías de la Humedad relativa media anual en las 8 subregiones (1960-2010)

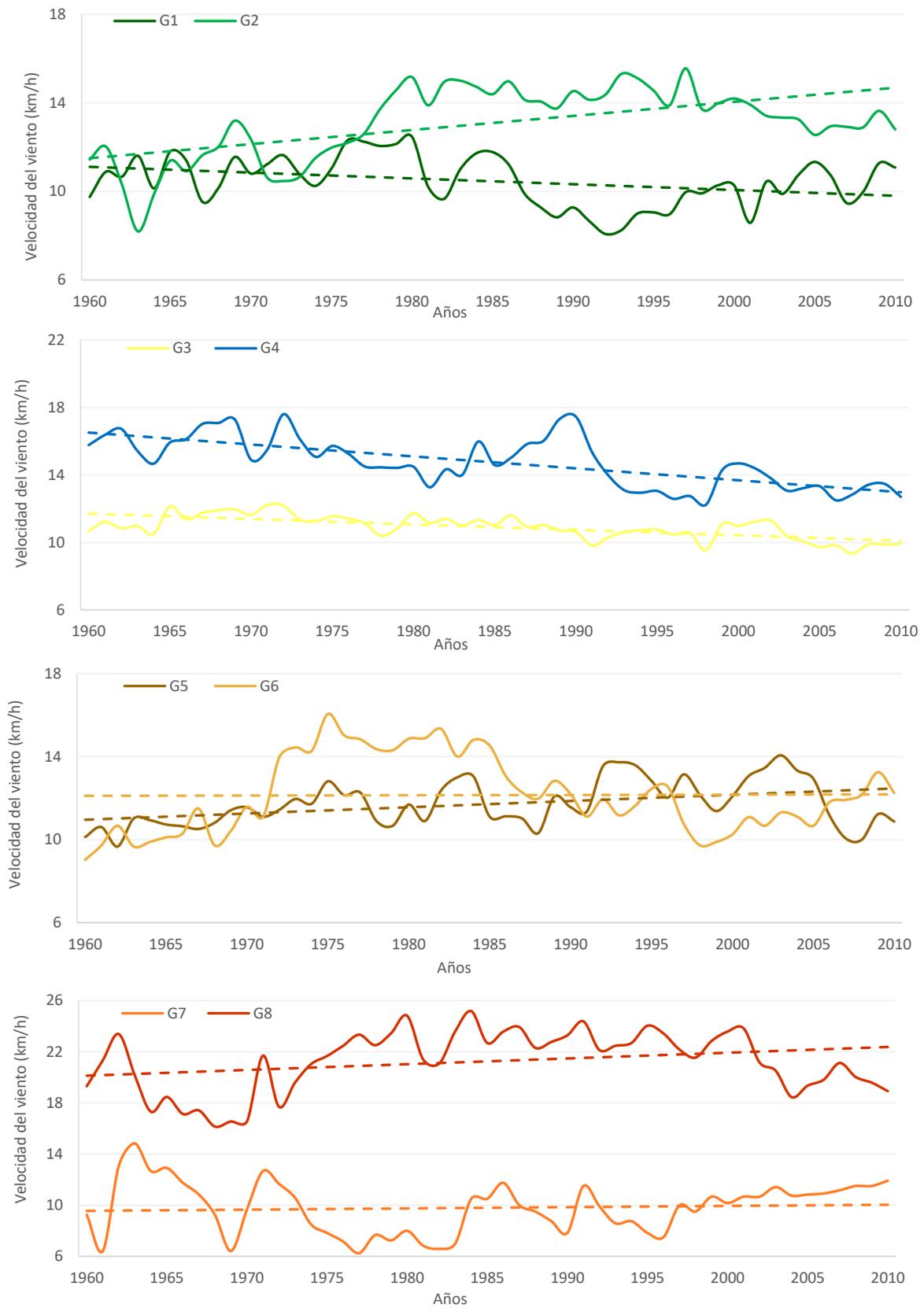
La segunda más ventosa está muy por debajo de ella con 14 km/h en el grupo 4 (Figura 5.21). Otro hecho destacable, es la evolución de los grupos 1 y 2. En las décadas del 60 presentaban valores relativamente próximos, en las décadas del 2000 las tendencias muestran pendientes con diferente dirección. Esto indica que la variabilidad climática no afecta a todos los grupos por igual.

Al observar las anomalías se puede identificar la misma tendencia, si bien las medias de las positivas y negativas son similares ( $\pm 1,3$  km/h), la variabilidad interanual e intergrupala es notable. Los extremos positivos y negativos de las anomalías se registran en el grupo 8. En esa zona de mayores amplitudes se distingue una disminución entre las primeras dos décadas (1960-1980) con respecto al resto del período de estudio (Figura 5.22).

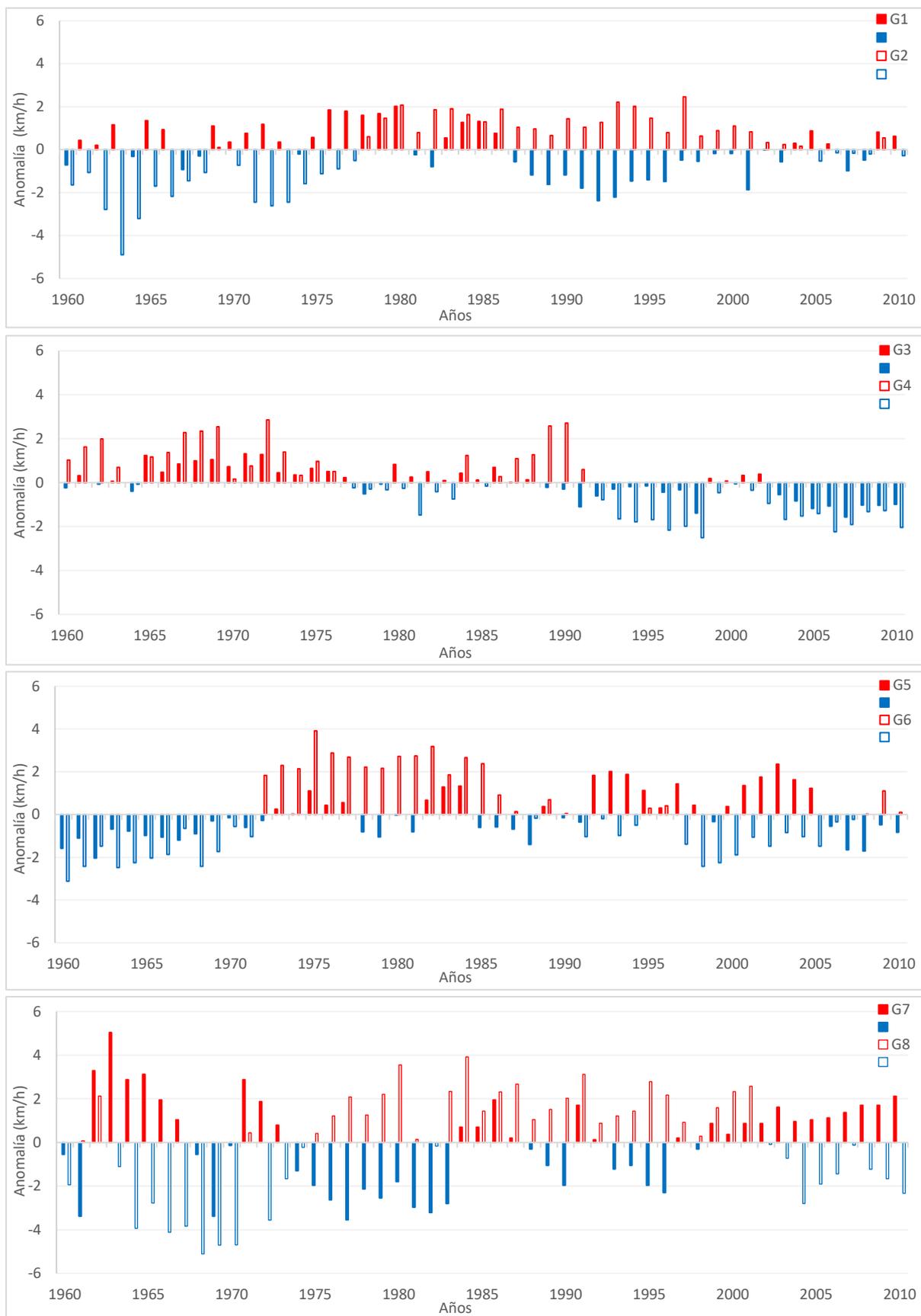
El análisis de las frecuencias medias en cuanto a la dirección del viento muestra ser tan heterogéneo como las velocidades medias. Los grupos 1 y 2 registran las mayores frecuencias en dirección Este, Noreste y Sudeste. En el primer caso se destaca la mayor frecuencia en dirección Sudoeste en la década 1981-1990, mientras que en el grupo 2 en lo hace desde el Noreste para los años 1960-1970. El grupo 3 que se encuentra en el centro de la Región Pampeana no hay una dirección predominante o de mayor frecuencia, solo levemente del sector Noreste. Lo mismo ocurre en el caso del 4 ya que no se registra en el período de estudio una tendencia (Figura 5.23). En los grupos 5 y 6 comienza a observar un dominio de viento Norte y Noreste. En el caso del 7 y 8 es notable el dominio de las frecuencias con sentido Norte y Noroeste con respecto al resto de las direcciones. Aunque se destacan las máximas frecuencias del Noroeste en la grupo 8, el cual coincide con la zona de mayor velocidad media de la Región Pampeana. Cabe destacar que en este último caso la frecuencia casi se duplicó en las últimas dos décadas del período de estudio (1991-2010) (Figura 5.23).



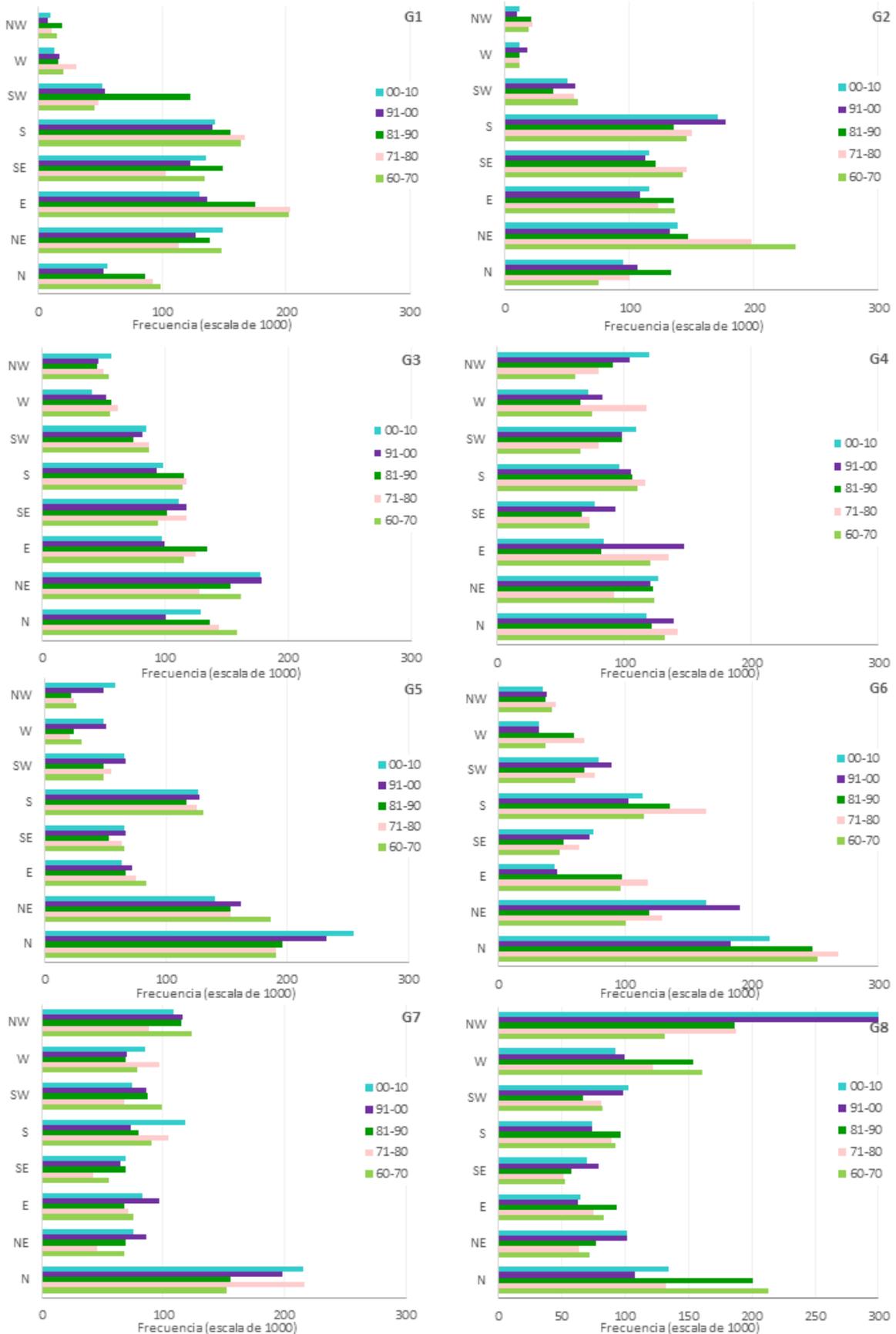
**Figura 5.20.** Densidad espectral de velocidad del viento en las 8 subregiones pampeanas (1960-210).



**Figura 5.21.** Velocidad del viento y tendencia en las ocho subregiones pampeanas (1960-2010).



**Figura 5.22.** Anomalías de la velocidad media del viento en las 8 subregiones (1960-2010).



**Figura 5.23.** Frecuencia media decádica de dirección del viento en las 8 subregiones (1960-2010)

#### 5.4. Conclusiones

En el presente capítulo se analizó la variabilidad climática de 50 años de datos con el objeto de describir cómo se desarrolla en cada subregión. Con respecto a la precipitación se observa una tendencia positiva en todas las subregiones, salvo en la 7 y 8. Además, las anomalías positivas son más grandes que las negativas. Las anomalías positivas disminuyen hacia el sur de la Región Pampeana. En general, los eventos secos fueron más frecuentes en la región centro-norte, en el noreste de Buenos Aires y en el sureste de las provincias de La Pampa. Por otro lado, los eventos húmedos fueron más frecuentes en las regiones suroccidental y noreste de la provincia de Buenos Aires y en la zona centro-norte de la Pampa. El verano es la estación más lluviosa con un valor medio anual de 308 mm, aunque en algunos subgrupos tiene una distribución similar a la primavera. Los veranos más lluviosos se registran en los grupos 5, 2 y 6 que representan las áreas de mayor continentalidad hacia el norte y noroeste de la región, alejadas de la costa.

Los eventos secos también tienen una gran importancia en las Pampas. En ambos casos, la intensidad y la duración del evento tuvieron una relación inversa, es decir, cuando el evento fue de corta duración fue más intensa de acuerdo con IEP. Esto coincide con los estudios de Penalba y Rivera (2016) que indicaron que, en los últimos años, ha habido una tendencia a que las sequías sean más cortas. En relación a los eventos ENSO se observaron distintas respuestas entre las subregiones. Hay subregiones pampeanas que se ven directamente afectadas por los eventos ENSO y en otras se observan variaciones de precipitaciones uno o dos años más tarde, o directamente no influyen significativamente en ellas como para explicar dicha variabilidad. Se puede decir que los eventos ENSO tienen mayores coincidencias con la variabilidad a nivel local en las subregiones norte (Grupo 1 y 2), mientras que en el centro-este en el límite costero de la Región Pampeana se observa un desfase en cuanto al posible efecto en las lluvias (Grupos 3 y 4). Hacia el interior del territorio, los grupos 5 y 6 muestran escasas coincidencias de las variaciones pluviométricas con respecto al ONI, u ocurren aproximadamente 2 años después. En el extremo sur de la región, los grupos 7 y 8 tiene mayores coincidencias entre las máximas precipitaciones y los eventos El Niño, como así también La Niña.

En cuanto a la temperatura del aire se observa una leve tendencia positiva del aumento de la temperatura media durante el período de estudio. La estacionalidad térmica

está definida a lo largo de toda la Región Pampeana, aunque se intensifica al aumentar la latitud. Los cambios topográficos, como las elevadas altitudes en el centro-sur de la provincia de Buenos Aires, marcan cambios en esta respuesta disminuyendo la temperatura media (Grupo 7). En cuanto a las anomalías, entre las subregiones se observan mayores coincidencias en las negativas que en las positivas.

La humedad relativa en la Región Pampeana tiene una amplitud media del 10% que está comprendido en el error de medición. La misma responde a las máximas precipitaciones y a la cercanía al mar, como sucede en los grupos 1, 3 y 4 que coinciden con la desembocadura del Río de la Plata y la costa bonaerense. A diferencia de la precipitación y la temperatura del aire, la humedad no mostro tendencias positivas en ningún grupo, incluso se observa cierta inclinación a una disminución de la humedad media en los grupos 1, 3 y 6. En general este parámetro no mostró variaciones importantes.

La velocidad media del viento en la Región Pampeana es 13 km/h. Las subregiones de mayor y menor velocidades medias son contiguas en el caso 7 y 8, con una velocidad media de 9,8 y 21,2 km/h respectivamente. La segunda subregión más ventosa está muy por debajo de ella con 14 km/h (grupo 4). La dirección del viento también es variable. En el norte de la Región Pampeana, los grupos 1 y 2 muestran mayores frecuencias en dirección Este, Noreste y Sudeste y tendencias opuestas durante el período de estudio. En los grupos 3 y 4 que se encuentra en el centro de la Región Pampeana no hay una dirección predominante o de mayor frecuencia, solo levemente del sector Noreste. Hacia el oeste, los grupos 5 y 6 muestran un dominio de viento Norte y Noreste. Éste es más frecuente en los casos 7 y 8 donde se destaca el viento Norte y más aún el Noroeste con respecto al resto de las direcciones.

Como se describió, no toda la variabilidad de las precipitaciones está explicada por el fenómeno de la Oscilación del Sur, sin embargo se pudieron encontrar distintas conexiones en diferentes latitudes de la Región Pampeana. Estos procesos de gran escala, junto los que son relativamente constantes en el tiempo y en el espacio, influyen en el clima en aspectos relacionados con la transferencia de energía y calor. Por lo que el clima en la Región Pampeana no depende solamente de la latitud, la elevación y la distancia al mar, sino también la influencia de clima global. Es importante además conocer las implicancias climáticas

hidrográficas en el área de estudio, ya que el ENSO es un fenómeno de periodicidad e intensidad sumamente variable (Grimm *et al.*, 2000).

## Capítulo 6

### VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LAS LAGUNAS PAMPEANAS

#### 6.1 Introducción

El clima es un factor clave para determinar las diferentes características y distribución de los sistemas naturales. Pequeñas fluctuaciones en los patrones climáticos pueden afectar el comportamiento de los ecosistemas, en especial a los de agua continental, aunque los efectos específicos pueden variar entre regiones y el tipo de cuerpo de agua. En el caso de las lagunas pampeanas, debido a la reducida profundidad y la ausencia de estratificación los cuerpos de agua superficiales están menos influenciados por condiciones climáticas pasadas que los cuerpos de agua profundos, ya que responden más directamente a condiciones meteorológicas presentes (Gerten y Adrian 2000, 2001). No obstante, las diferencias en la morfometría de un cuerpo de agua y sus condiciones de sitio, determinan un efecto particular del clima sobre las variables ambientales (Gerten y Adrian 2001; George, 2000). Es decir que la especificidad del sitio, así como la morfología y la variabilidad del clima local, implican predicciones que se ajustan a un ecosistema y región específica (Mooij *et al.*, 2005).

Los procesos hidrológicos en grandes llanuras se diferencian considerablemente de aquellos que caracterizan a áreas serranas o de montaña. El principal rasgo distintivo de la hidrología de llanuras es la baja energía morfológica del terreno. En las tierras húmedas esto determina inundaciones temporarias, anegamiento del suelo, acumulación de sales cerca de la superficie y en muchos casos, el desarrollo de pantanos y lagunas poco profundas. Desde el punto de vista de la hidrología, es notable la acumulación del agua en forma de charcos o lagunas. El agua se traslada en forma de manto o levemente canalizada, movilizada por la pendiente local y las precipitaciones y la dirección del viento (Fuschini Mejía y Mejía, 1994).

La mayoría de las lagunas pampeanas son de origen natural, se pueden reconocer varias unidades diferenciadas con base en su geología, geomorfología, drenaje, suelos y vegetación. Desde el punto de vista geomorfológico, la llanura pampeana corresponde a un paisaje con un clima mucho más árido que el subhúmedo actual. La sucesión de períodos climáticos secos y húmedos permitió un importante desarrollo de sistemas de humedales y

lagos someros en las áreas más deprimidas (Iriondo, 2004). El régimen pluviométrico tiene la capacidad de alterar estos ecosistemas, siendo la morfometría la variable que muestra mayor dinamismo. Por otro lado, el estado trófico que experimentan las lagunas frente a situaciones de diversa pluviometría, responde a procesos de dilución / concentración en la hidrología del cuerpo de agua (Bohn, 2009).

La principal diferencia entre un lago y una laguna está determinada por la profundidad, cuyo límite depende de las condiciones ambientales en la que se encuentre. En Argentina no hay una profundidad establecida a partir de la cual se define a un cuerpo de agua como lago o laguna, aunque sería adecuado a los 10 m, ya que en latitudes templadas la termoclina se forma aproximadamente a esta profundidad (Geraldi, 2009). Según Dangavs (2005) solo dentro del territorio de la provincia de Buenos Aires se pueden contabilizar más de 300.000 cuerpos de agua. Las *lagunas* más numerosas son aquellas cuya superficie oscila entre 0,05 y 10 ha, en un número aproximado de 146.000 (Geraldi *et al.*, 2011). Las más trascendentes y conocidas son las lagunas mayores a 10 ha, cuyo número alcanza a 10.500. La lista se completa con unas 200.000 *microcubetas* y un número indeterminable de *charcas* con superficies menores a 0,01 ha. Desde un punto de vista hidrológico y considerando el tipo de cubeta, el aporte de agua superficial y atmosférico y la interrelación con el agua subterránea, las lagunas se clasifican en permanentes, semipermanentes, temporarias, efímeras y periódicas (Dangavs, 2005).

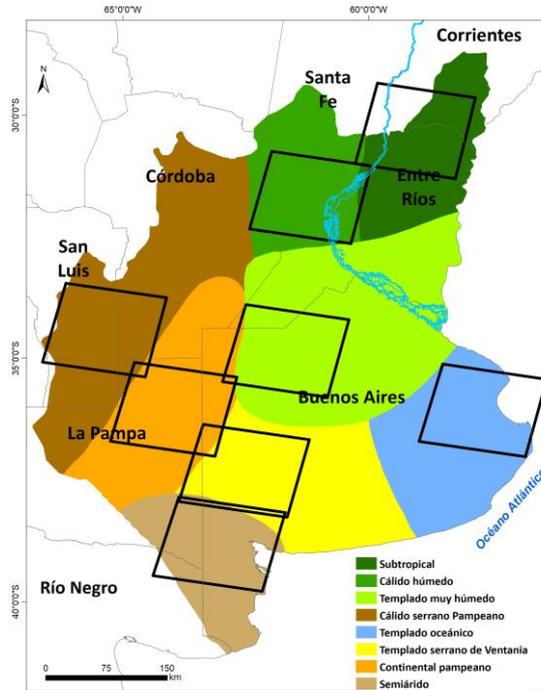
En gran parte de la planicie, el drenaje es endorreico o arreico, lo cual conduce a que se produzcan periódicas inundaciones extensas y prolongadas, alternando con frecuentes períodos de sequía. Las áreas más deprimidas generalmente albergan lagunas permanentes o temporarias (Quirós *et al.*, 2002). Estas depresiones juegan un papel fundamental en el balance hídrico del acuífero freático según funcionen como puntos de recarga o descarga de las aguas subterráneas. Sin embargo, no existe una estimación en relación a los volúmenes de agua que pueden transferirse entre ambos ambientes (Varni y Rivas, 2000). La alimentación de estos cuerpos de agua es diversa, dependiendo fundamentalmente de la extensión de su área al aporte superficial. En períodos de abundantes precipitaciones las depresiones se interconectan formando redes de flujo de tipo lineal de importante longitud mientras que en períodos más secos, las depresiones se hallan aisladas y sólo reciben aguas superficiales de su entorno. Por otra parte, el nivel freático se halla muy cercano a la superficie

del terreno por lo que también puede aportar agua a la laguna. Como consecuencia, la misma puede estar alimentada por aguas superficiales o subterráneas o por una combinación de ambas, dependiendo de las condiciones de humedad. La relación inversa también es posible, produciéndose un flujo de agua desde la laguna hacia el medio subterráneo (Varni y Rivas, 2000).

Una vez definidas las subregiones climáticas, se analiza un área representativa de cada una de ellas. El objetivo principal es evaluar la respuesta espacio temporal de las lagunas en distintas latitudes de la Región Pampeana considerando, no solo las características climáticas, sino también las condiciones de suelo, sus limitaciones, drenaje y topografía. El conocimiento del comportamiento de su sistema hidrológico es de suma importancia en la evaluación de los posibles efectos de la variación del clima sobre las lagunas. Se han realizado importantes estudios en lagunas de la provincia de Buenos Aires, específicamente, en relación a su morfometría, calidad de agua y eutrofización, así como también aquellos referidos a su distribución espacial y su variabilidad durante períodos pluviométricamente diferentes (Dangavs, 2005; Dukatz *et al.*, 2005; Quirós, 2005; Torremorel *et al.*, 2007; Allende *et al.*, 2009; Bohn, 2009; Fornerón *et al.*, 2010; Geraldí *et al.*, 2011). Sin embargo, son escasos los trabajos en los que se estudia la evolución de las características físicas de las lagunas en relación a la variabilidad climática durante períodos prolongados y a nivel regional.

## **6.2 Metodología**

Una vez caracterizados los eventos extremos en la Región Pampeana en distintas subregiones y sobre la base de la determinación de anomalías pluviométricas importantes, se seleccionó una escena representativa en cada una de ellas a fin de estudiar la variabilidad espacio temporal de los cuerpos de agua. Se utilizaron imágenes satelitales LANDSAT 5 TM (Resolución espacial 30 m) obtenidas en forma gratuita de la plataforma digital del United Stated Geological Survey (USGS, [www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov)). La lista de las imágenes utilizadas se describe en el Anexo Tabla 6.1 y Figura 6.1. Además se realizó la cartografía con información proveniente del SIG-250 (IGN, 2013), bases de datos de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SRH-INA, 2002) y Modelos de Elevación Digital (DEM – USGS).



**Figura 6.1.** Escenas de imágenes Landsat 5 TM utilizadas en la Región Pampeana.

Inicialmente se describieron las zonas seleccionadas a fin de conocer las condiciones de sitio de cada subregión, cuya delimitación está dada por los límites de la escena correspondiente (Figura 6.1). Se realizaron descripciones topográficas, hidrológicas y edáficas a fin de conocer las condiciones de sitio de los cuerpos de agua a estudiar. Estos se realizaron mediante el ArcMap 10.1. Posteriormente se llevó a cabo un estudio multitemporal con el objetivo de determinar las variaciones areales de las lagunas en cada subregión. Se procesaron digitalmente un total de 40 imágenes satelitales Landsat TM en ENVI 5.0 de los períodos pluviométricos húmedo (2001 y 2002), normal (2006) y seco (2008 y 2009) con fechas correspondientes a estaciones intermedias (otoño – primavera) ya que es durante esta época del año se registran las mayores precipitaciones.

Inicialmente en cada fecha se realizaron correcciones geométricas y radiométricas necesarias para este tipo de análisis desarrolladas por Song *et al.* (2001), Schroeder *et al.* (2006), Carmona *et al.* (2011) descritas en el Anexo 6.1. Luego, la determinación de la cobertura de agua se obtuvo mediante una clasificación no supervisada del tipo *Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique (Algorithm)* (ISODATA). Para el estudio de los cuerpos de agua, el método ISODATA ha sido aplicado con éxito por otros autores (Bohn, 2009;

Fornerón *et al.*, 2010; Aliaga *et al.*, 2016; Solana *et al.*, 2016; Passucci *et al.*, 2017). Este método diferenció a los cuerpos de agua de la superficie terrestre según su característica radiativa. En el caso de las regiones húmedas donde se localizan terrenos húmedos y agua (ambos con baja reflectividad) se procedió a utilizar la técnica de *Masking* de ENVI 5.0. La misma se realizó indicando el rango de valores de los píxeles que pertenecieron a agua, dejando fuera los de terrenos húmedos. Esto permitió discriminar la cobertura del agua de los terrenos húmedos. Una vez elaborada la máscara, ella se aplicó sobre la imagen. Los resultados de las clasificaciones fueron exportados en formato *shape* y se analizaron con un Sistema de Información Geográfica SIG (ArcGIS 10.1).

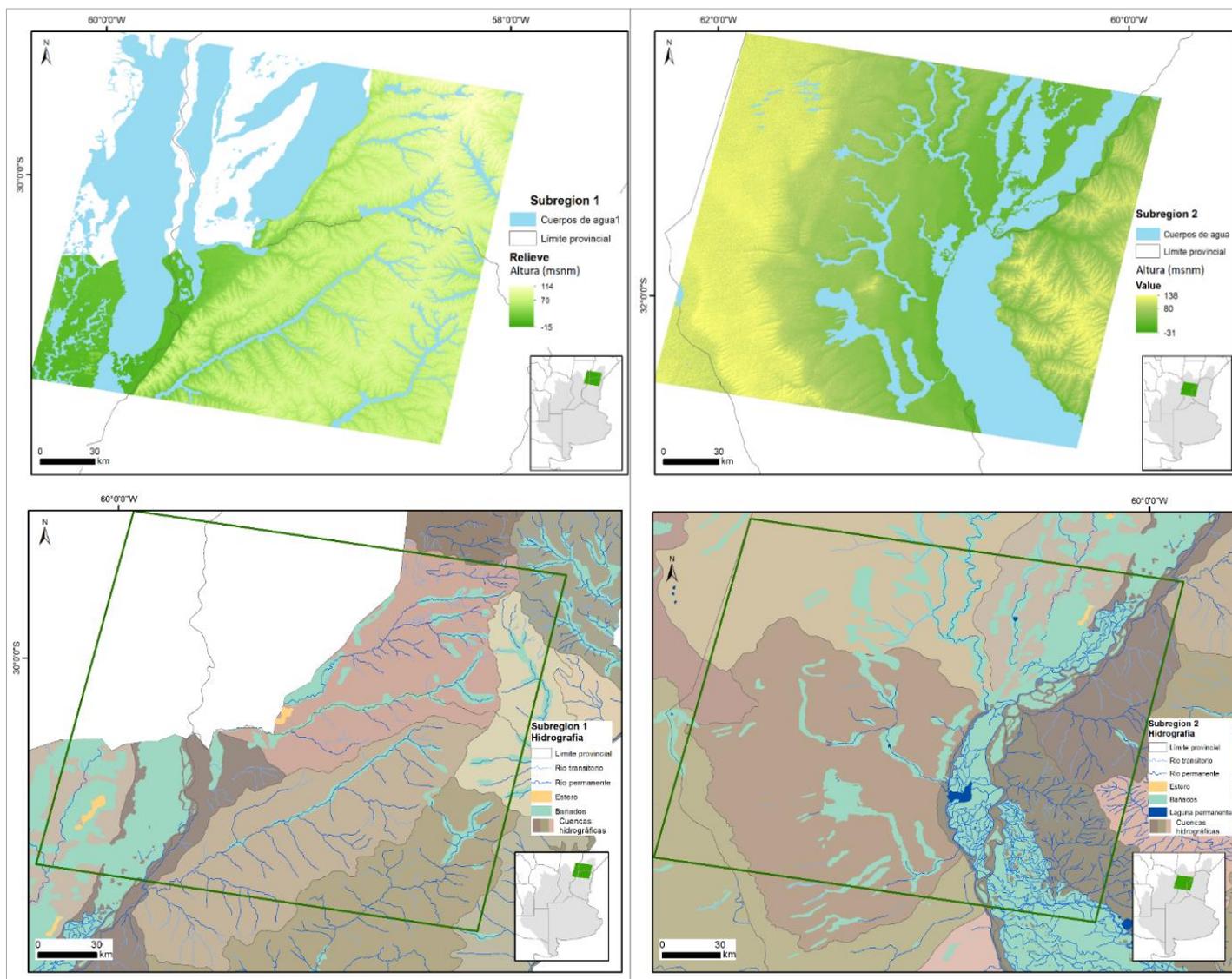
### 6.3. Resultados

Las áreas seleccionadas en el presente capítulo tienen condiciones de sitio propias convirtiéndolas en ambientes lagunares específicos para su estudio. A fin de lograr una mejor presentación de los mismos, se describe el análisis realizado en cada una en tres apartados distintos. La numeración de las subregiones continúa con la utilizada en las Figuras 4.3 y 4.8 del Capítulo 4.

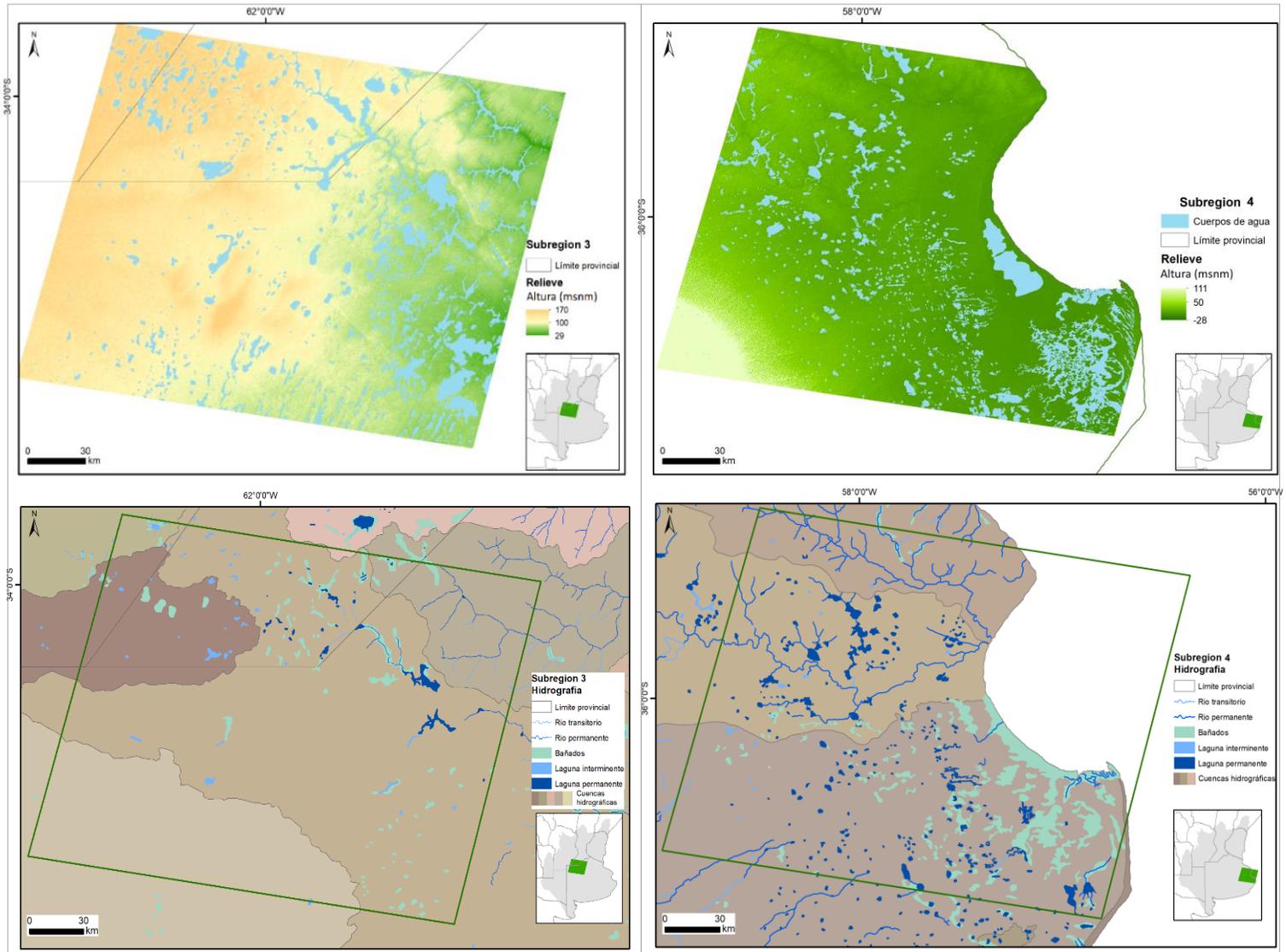
#### 6.3.1. Características topográficas e hidrográficas.

- *Subregión 1*: se encuentra dentro de la *Pampa Ondulada* (Anexo 6.3). En ella se manifiestan formas típicamente fluviales como las terrazas, pantanos, cubetas de deflación, entre otras. El paisaje predominante es de *altillanuras* y *peniplanicies* suavemente onduladas (Figura 6.2). Las altillanuras se caracterizan por un relieve plano a ligeramente cóncavo y depresiones cerradas (Paparotti y Gvozdenovich, 2007). Presentan problemas de drenaje debido a las escasas pendientes, las cuales pueden llegar a ser muy suaves, de 0,5 a 2,5 %, constituyendo un paisaje muy homogéneo. También se identifican otras unidades fisiográficas como las llanuras aluviales relacionadas con una copiosa red hidrográfica, ya que todo el territorio está drenado por varios cursos de agua (Figura 6.2).
- *Subregión 2*: también se encuentra dentro de la *Pampa Ondulada* (Anexo 6.3). El paisaje es principalmente ondulado donde los procesos de degradación de suelos como la erosión hídrica son potencialmente importantes. El paisaje fisiográfico más extenso lo constituye la peniplanicie con relieve suavemente ondulado a plano (Figura 6.2). El rango de pendientes oscilan entre las moderadamente pronunciadas (2-4 % de inclinación) a

- gradientes menores (0,5-1 %). Otros ambientes fisiográficos característicos son las cuchillas que actúan como amplias divisorias de aguas y los depósitos sedimentarios que forman el relleno aluvial de los arroyos más importantes (Paparotti y Gvozdenovich, 2007).
- *Subregión 3:* se encuentra dentro de la *Pampa Interior* (Anexo 6.3). El paisaje es muy llano, sin embargo, en las cercanías de los grandes ríos se vuelve ligeramente ondulado (Figura 6.3). La red de drenaje es poco definida, existiendo grandes cuencas arreicas caracterizadas por la presencia de lagunas permanentes o temporarias, con amplias zonas afectadas por salinización (INTA-SAGyP 1989, 1990). Se caracteriza por la presencia de cubetas lagunares formadas por procesos eólicos, careciendo de desagüe y localizadas en depresiones intermedanasas (Tricart, 1973). Su forma de media luna y disposición SO-NE es producto de la acción de los vientos dominantes (Geraldí *et al.*, 2011).
  - *Subregión 4:* se encuentra dentro de la *Pampa Deprimida* (Anexo 6.3). Se caracteriza por la escasa diferenciación de su relieve, la cual se debe a su morfogénesis (Figura 6.3). Su topografía se describe como una depresión muy ancha, asimétrica y muy poco marcada rodeada de la Pampa Ondulada al norte y las sierras de Tandilia al sur (Tricart, 1973). Además, combina declives o pendientes poco marcados lo cual perjudica el escurrimiento y a pesar del clima húmedo, la hidrografía muestra aspecto de drenaje de tipo semiárido. Esta región alberga la mayor densidad de cubetas y microcubetas a lo largo de la costa y paralela a ella. Un grupo muy importante de lagunas tienen su origen en antiguos canales de marea abandonados (Geraldí *et al.*, 2011). El agua se agota paulatinamente por infiltración o evaporación sin llegar al eje principal del drenaje (Tricart, 1973). La integración de la red hidrográfica se logra durante las crecidas importantes, por lo que las características de esta región están marcadas por la insuficiente pendiente general y no por el clima (Figura 6.3).
  - *Subregión 5:* Se encuentra dentro del área conocida como *Pampa Alta* (Anexo 6.4), ubicada cerca de las serranías de Córdoba y de San Luis en el ambiente de las Sierras Pampeanas. Su altitud va aumentando progresivamente de SE a NO. Se caracteriza por la presencia de terrenos bajos y depresiones ocupadas por lagunas permanentes o temporales (Figura 6.4). La intensa actividad de procesos como la acción erosiva ejercida por el agua de escurrimiento superficial a lo largo del tiempo geológico dio lugar a un paisaje serrano dominado por la presencia de valles fluviales (Ojeda *et al.*, 2007).

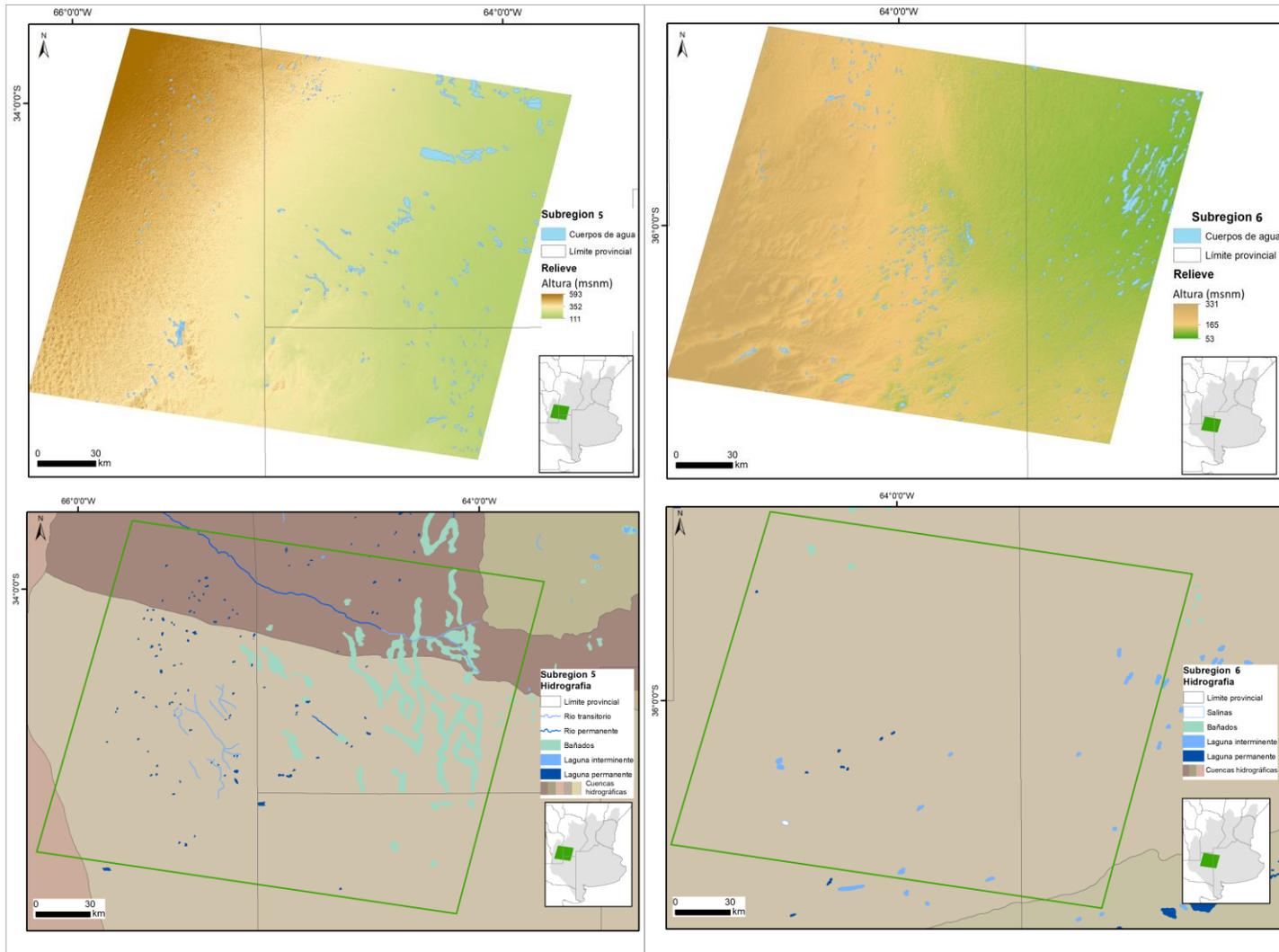


**Figuras 6.2.** Caracterización topográfica e hidrográfica de las subregiones 1 y 2 según DEM (USGS) e IGN (SIG 250).

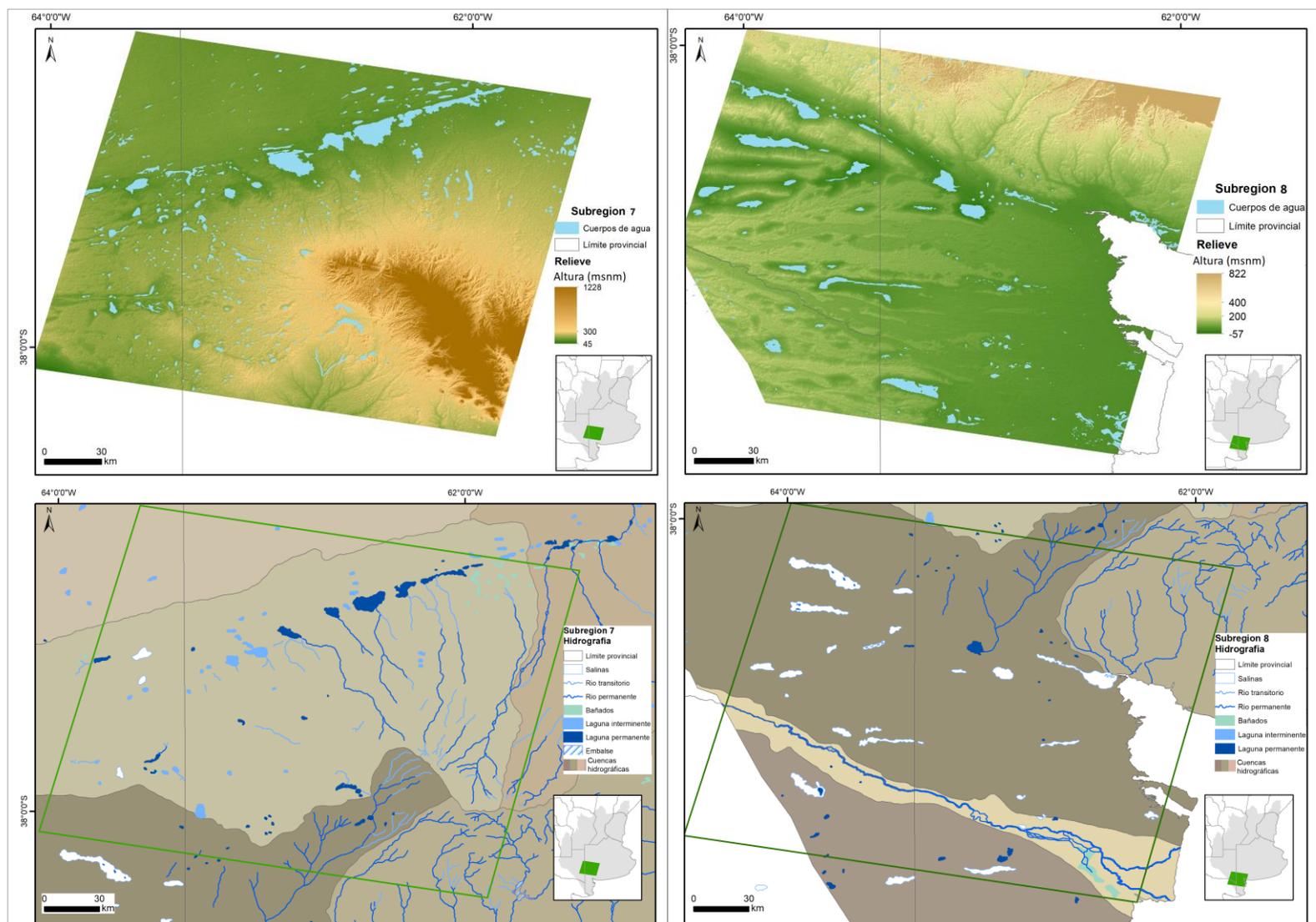


**Figuras 6.3.** Caracterización topográfica e hidrográfica de las subregiones 3 y 4 según DEM (USGS) e IGN (SIG 250).

- *Subregión 6:* también se encuentra en la *Pampa Interior* (Anexo 6.3). Es un área donde predomina la llanura plana que no se ve modificada por depresiones o elevaciones relevantes, aunque en las cercanías de los grandes ríos se vuelve ligeramente ondulada (Figura 6.4). La interrumpen algunos médanos menores, fijados por la vegetación, como consecuencia de la erosión eólica y su mal manejo de suelo. Pequeñas lagunas ocupan las depresiones intermedanosas. Posee una red de drenaje poco definida de lagunas arreicas temporarias, con amplias zonas afectadas por salinización (INTA-SAGyP 1989, 1990).
- *Subregión 7:* comprende una zona de relieve cóncavo producto de una gran depresión radial que se extiende en gran parte de la provincia de Buenos Aires (Geraldi *et al.*, 2011). En esta subregión las lagunas son resultado de la combinación de procesos tectónicos, fluviales y eólicos. Las lagunas de origen tectónico se caracterizan por presentarse encadenadas y alineadas a lo largo de los ejes estructurales (Figura 6.5). Además éstas son las que presentan las mayores profundidades dentro de la provincia. Hacia el sur del área seleccionada se encuentran otro tipo de lagunas que se pueden clasificar como paleocanales bien definidos. Muchos de ellos se han convertido en salinas y se activan durante períodos más húmedos (Geraldi *et al.*, 2011).
- *Subregión 8:* Ubicada en la denominada *Pampa Austral* o *Seca* (Anexo 6.3). Constituye el sector inferior de la cuenca hidrográfica del río Colorado, la cual se extiende en dirección NO-SE marcando el área de transición entre la Región Pampeana y la Patagónica (Figura 6.5). La cuenca se asienta sobre una fosa intercratónica con fallas predominantes en sentido E-O y un fuerte modelado eólico en la mayor parte del territorio, mientras que en la zona de influencia del río Colorado predomina el modelado hídrico (Morello *et al.*, 2012). Las lagunas y salitrales presentes están asociados a médanos con control estructural siguiendo una similar orientación E-O (Figura 6.5). Muchos de los cuerpos de agua se convierten en salinas durante períodos de escasas precipitaciones e intensa evaporación. El paisaje predominante es de llanura plana a suavemente ondulada.



**Figuras 6.4.** Caracterización topográfica e hidrográfica de las subregiones 5 y 6 según DEM (USGS) e IGN (SIG 250).



**Figuras 6.5.** Caracterización topográfica e hidrográfica de las subregiones 7 y 8 según DEM (USGS) e IGN (SIG 250)

### 6.3.2. Características del suelo

Las condiciones actuales del suelo son en parte el resultado del conjunto de procesos pedogenéticos o de *evolución de suelo* responsables de su formación. Existe cierta regionalización de estos procesos en la Región Pampeana. La *Melanización* (proceso químico y bioquímico que conduce al oscurecimiento del suelo por incorporación de compuestos orgánicos) se identifica prácticamente en todos los suelos de la región con mayor o menor intensidad (Imbellone *et al.*, 2010). La *Ilimerización* (procesos mecánico de eluviación de la fracción arcilla del suelo), si bien está muy difundida, tiene mayor expresión hacia el Este (Pampa Ondulada, Pampa Deprimida, Pampa Llana Santafesina). El *Hidromorfismo* (conjunto de procesos que se origina en la saturación con agua del perfil de suelo durante períodos prolongados que provoca déficit de oxígeno) tiene su mayor difusión en la Pampa Deprimida. Los procesos de *Sodificación* y *Salinización* (evolución del suelo en condiciones de alta concentración de sodio y sales, respectivamente) se encuentran en la Pampa Deprimida en el primer caso y en el O y S de la Región Pampeana en el segundo (Imbellone *et al.*, 2010). La *Vertisolización* (proceso que tiene lugar cuando el material del suelo posee la propiedad de contraerse y expandirse de manera considerable según las variaciones del contenido de humedad), tiene mayor difusión en la provincia de Entre Ríos, extendiéndose al sur de Corrientes y con menor expresión en la provincia de Buenos Aires, en el este de la Pampa Ondulada y Pampa Deprimida (Imbellone *et al.*, 2010).

En general los procesos pedogenéticos en la Región Pampeana están relacionados con la definición de la *taxonomía* del suelo (Imbellone *et al.*, 2010). Las mismas definen las funciones que el suelo cumple en cuanto a su calidad, entrada y transferencia de agua, resistencia a la degradación superficial, a la constitución del ambiente adecuado para el desarrollo de plantas y de la biota, entre otros (Doran y Parkin, 1994). Estas funciones han sido alteradas en gran parte de la Región Pampeana por medio de procesos erosivos favorecidos por el uso intensivo agrícola-ganadero convencional. Algunas de las propiedades que más afectan a la condición física de suelo se encuentran: la textura, la profundidad, porosidad y la materia orgánica, las cuales no son independientes. En la Tabla 6.1 se describen las taxonomías de suelos presentes en la Región Pampeana y los procesos dominantes que les dieron origen.

Proceso	Taxonomía de Suelos (Orden)
<i>Ilimerización</i>	Alfisoles, Ultisoles
<i>Melanización</i>	Molisoles, Inceptisoles
<i>Gleización (Hidromorfismo)</i>	Todos los otros excepto los Aridisoles
<i>Sodificación - Salinización</i>	Aridisoles
<i>Calcificación</i>	Aridisoles
<i>Vertisolización</i>	Vertisoles

**Tabla 6.1** Relación entre los procesos pedogenéticos identificados en la Región Pampeana y los distintos tipos de Taxonomía de Suelos (Modificado de Bockheim y Gennadiyev, 2000).

A fin de comprender mejor las características del suelo en cada subregión identificada, se describe la clasificación del orden taxonómico para el área de las escenas de las imágenes satelitales utilizadas en este capítulo (IGN, 2013). Se observa que son seis los órdenes que predominan en la Región Pampeana:

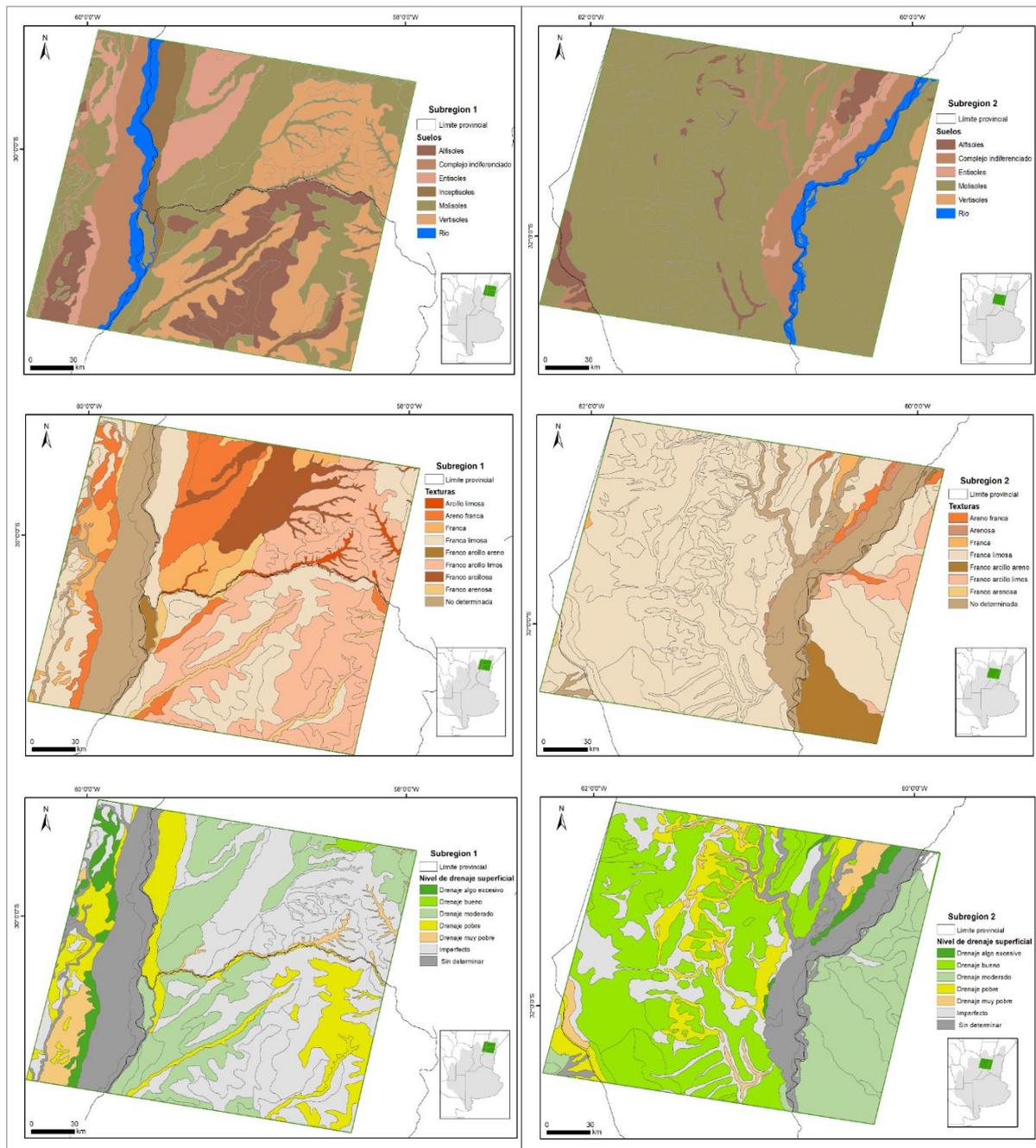
- a) *Alfisoles*: Estos suelos están presentes en todas las subregiones estudiadas exceptuando la número 8 en el extremo sur de la Región Pampeana (Figuras 6.6 a 6.9). Están asociados a zonas húmedas de cuerpos de agua o ríos, incluso coincidiendo con zonas inundables durante los períodos húmedos. Su régimen de humedad es tal que son suelos capaces de suministrar agua a las plantas durante meses consecutivos a lo largo de la estación de crecimiento. Sirven de asiento para obtener cultivos de ciclo corto y forrajes (INTA-SAGyP. 1990).
- b) *Aridisoles*: este orden taxonómico cubre la Patagonia y alcanza a la Región Pampeana desde el sur en la subregión 8. Se caracteriza por un deterioro rápido y ser muy lábiles, es decir resbaladizos e inestables. Las condiciones severas de este orden de suelos están relacionadas con baja densidad de población y economías de subsistencia (INTA-SAGyP. 1990).
- c) *Entisoles*: se encuentran en todas las subregiones, menos en el caso 3. Este orden es particularmente importante porque coincide con la mayoría de los suelos bajo riego a lo

largo de los principales ríos (Figura 6.6). También son comunes a lo largo de costas extendidas (Figura 6.7 a 6.9). Son suelos escasamente desarrollados, de poco espesor y generalmente pobres en materia orgánica (INTA, 1994).

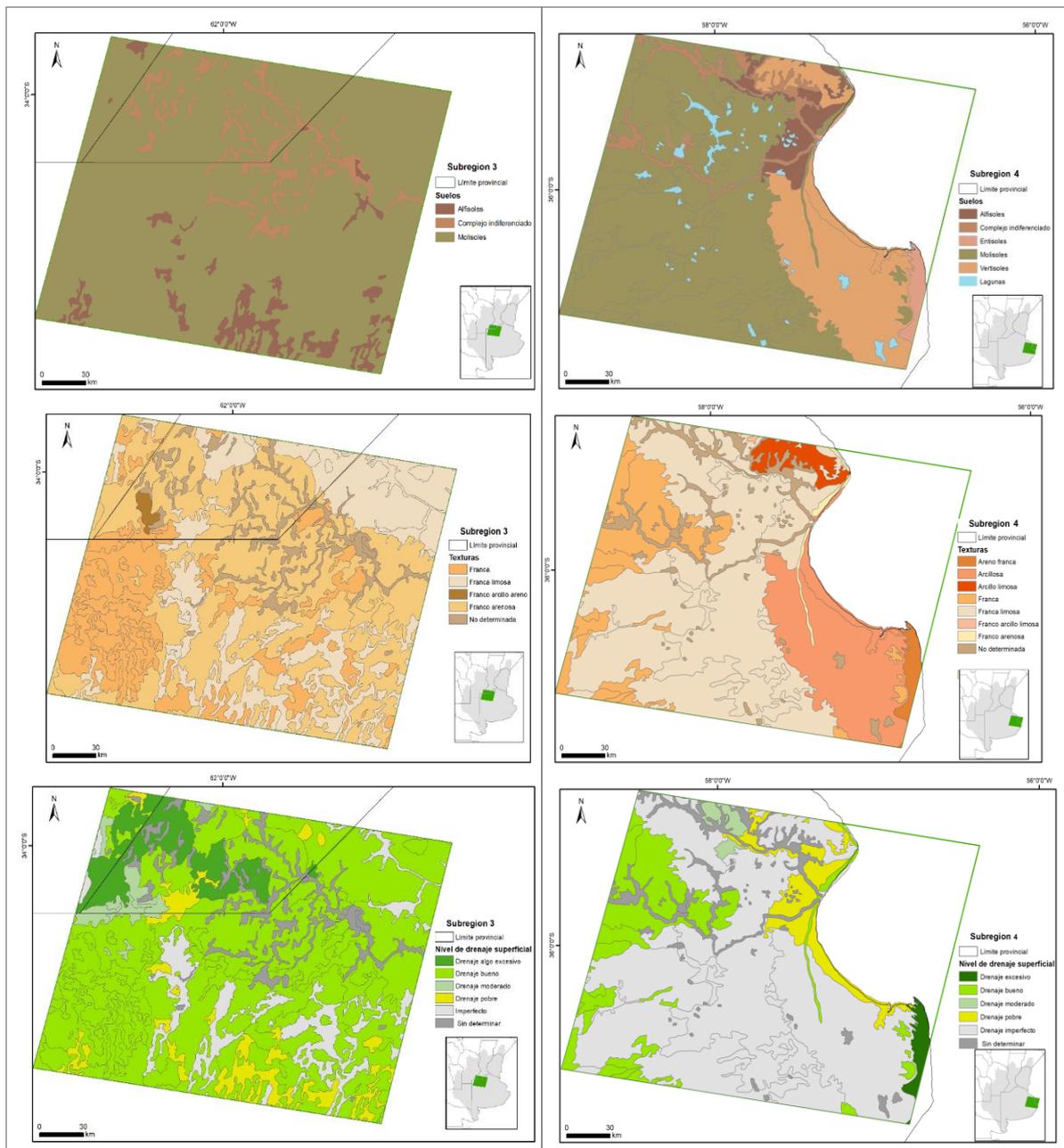
- d) *Inceptisoles*: se identifican en el extremo norte de la Región Pampeana (Figura 6.6). Debido a su diversidad no puede establecerse un uso de la tierra común, aunque en general no constituyen buenos suelos agrícolas.
- e) *Molisoles*: este orden es el dominante en la Región Pampeana cubriendo casi la totalidad de su superficie. Son oscuros debido a que se han desarrollado a partir de sedimentos minerales en climas templado - húmedo a semiárido (INTA, 1989). Los Molisoles han sido el objeto de muchos estudios debido a su indudable carácter poligenético. Son suelos bien desarrollados y de gran presencia de materia orgánica. Se encuentran en todas las subregiones estudiadas (Figuras 6.6 a 6.9).
- f) *Vertisoles*: se encuentran principalmente en áreas de elevada humedad, así como en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas. Se vuelven muy duros en la estación seca y muy plásticos en la húmeda. Son característicos en el NE de la Región Pampeana y el área costera de la Provincia de Buenos Aires (Figuras 6.6 y 6.7).
- g) *Complejo indiferenciado*: este término se utiliza en la clasificación estudiada para identificar las secciones donde no se han determinado o clasificado características específicas y que coinciden principalmente con planos aluviales o vías de escurrimiento (IGN, 2013).

Otra de las características importantes de considerar del suelo es su textura, la cual describe la cantidad y tamaño de las sustancias inorgánicas presentes como arena, limo y arcilla. Estas propiedades indican la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la aireación del terreno, la permeabilidad, la capacidad de retención del agua, etc. En forma descendente se encuentran las texturas arenosas, luego le siguen las limosas y las más finas son del grupo de las arcillas (Anexo 6.4). Las arenas representan funciones mecánicas ya que constituyen el armazón interno sobre las cuales se apoyan las otras fracciones finas del suelo, facilitando la circulación del agua y del aire. Las partículas limosas participan en forma limitada en la actividad química del suelo, mientras que su influencia en la relación agua – suelo no es insignificante. La arcilla representa la fracción más activa, tanto desde el punto de vista físico como del químico, reaccionando en forma más o menos evidente a la presencia del agua (Imbellone *et al.*, 2010).

En la subregión 1 se identifican una gran variedad de taxonomías que poseen alto contenido de materia orgánica pero que no se refleja en su fertilidad (INTA-SAGyP, 1990). Dominan las texturas arcillosas que generan el encharcamiento del agua y se refleja en el dominio de un drenaje moderado a imperfecto que sigue el cauce de los cursos de agua en sentido NE -SO (Figuras 6.2 y 6.6). Las principales limitaciones del suelo en esta subregión son la erosión hídrica, el drenaje deficiente y la profundidad efectiva somera (Figura 6.10).



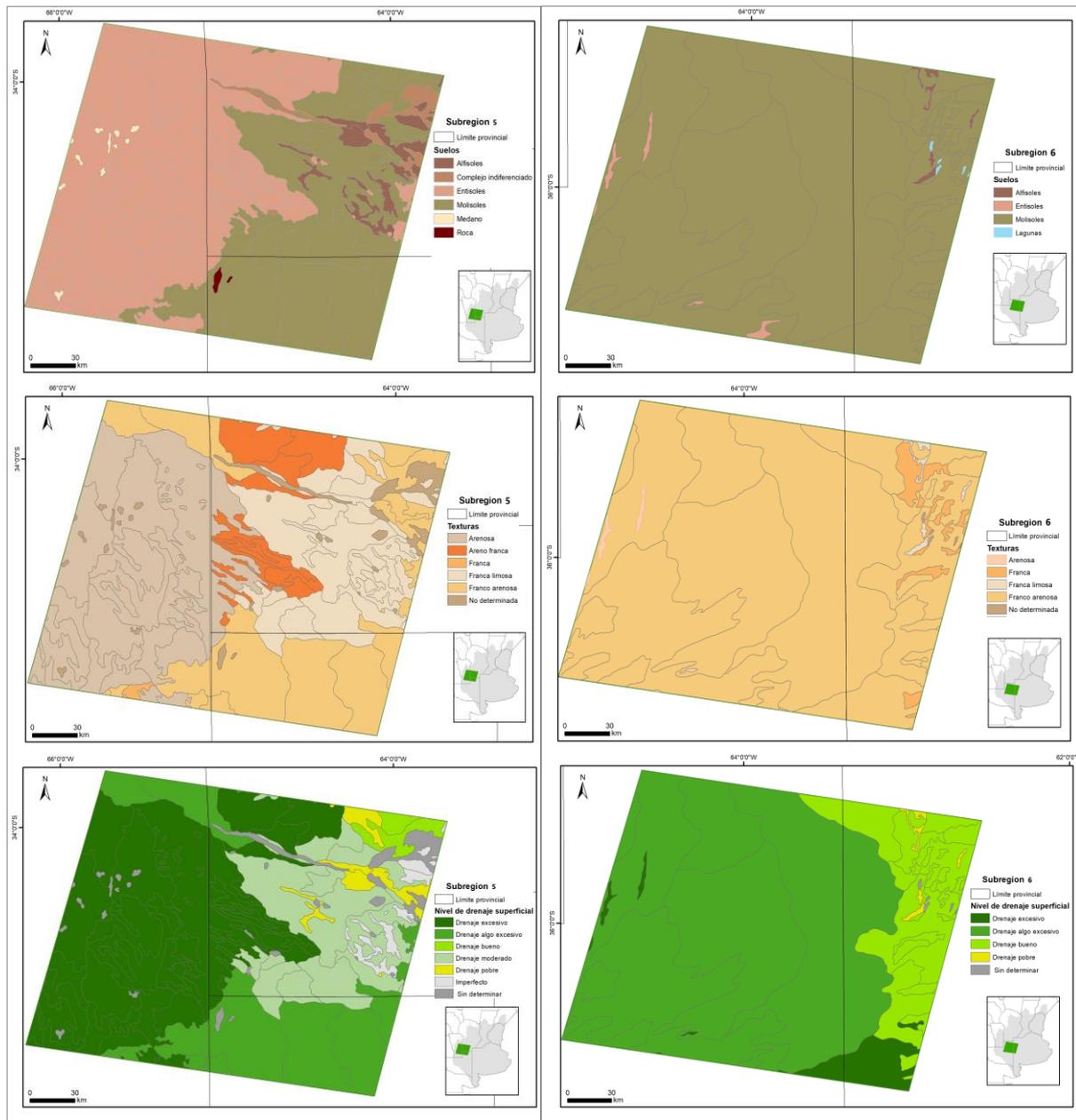
**Figura 6.6.** Clasificación taxonomía del suelo, textura y capacidad de drenaje superficial en las subregiones 1 y 2 de la Región Pampeana basada en la clasificación del IGN (2013).



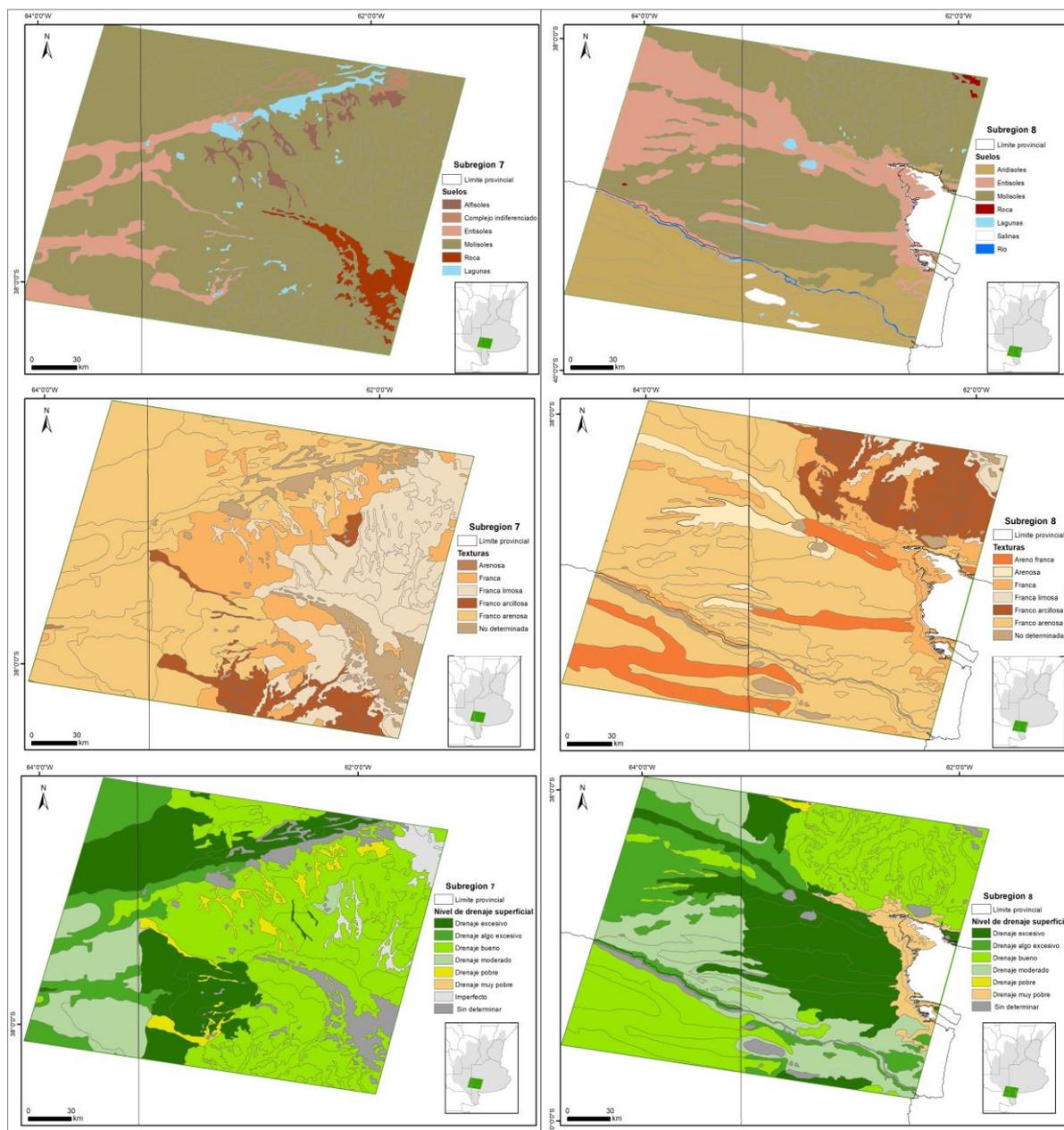
**Figura 6.7.** Clasificación taxonomía del suelo, textura y capacidad de drenaje superficial en las subregiones 3 y 4 de la Región Pampeana basada en la clasificación del IGN (2013).

La subregión 2 se desarrolla sobre un ambiente deltaico, el cual permanece casi todo el año bajo agua con una capa de materia orgánica de profundidad variable sin descomponer, el cual no los hace aptos para uso agrícola (INTA-SAGyP, 1990). Dominan las texturas franco limoso y arenoso con un drenaje moderado a bueno (Figura 6.6). En esta subregión las principales limitantes del suelo están relacionadas con las escasas pendientes, el drenaje deficiente y baja permeabilidad (Figura 6.10). En la subregión 3 las texturas del suelo son

principalmente areno-arcillosas. Los suelos son profundos, neutros y débilmente estructurados, pero ricos en humus (INTA-SAGyP, 1990). En el norte los suelos presentan un drenaje excesivo, baja capacidad de retención de humedad y alta susceptibilidad a la erosión (Figura 6.7). Sus limitantes principales se encuentran en la intensa erosión hídrica, drenaje deficiente y alcalinización (Figura 6.10).



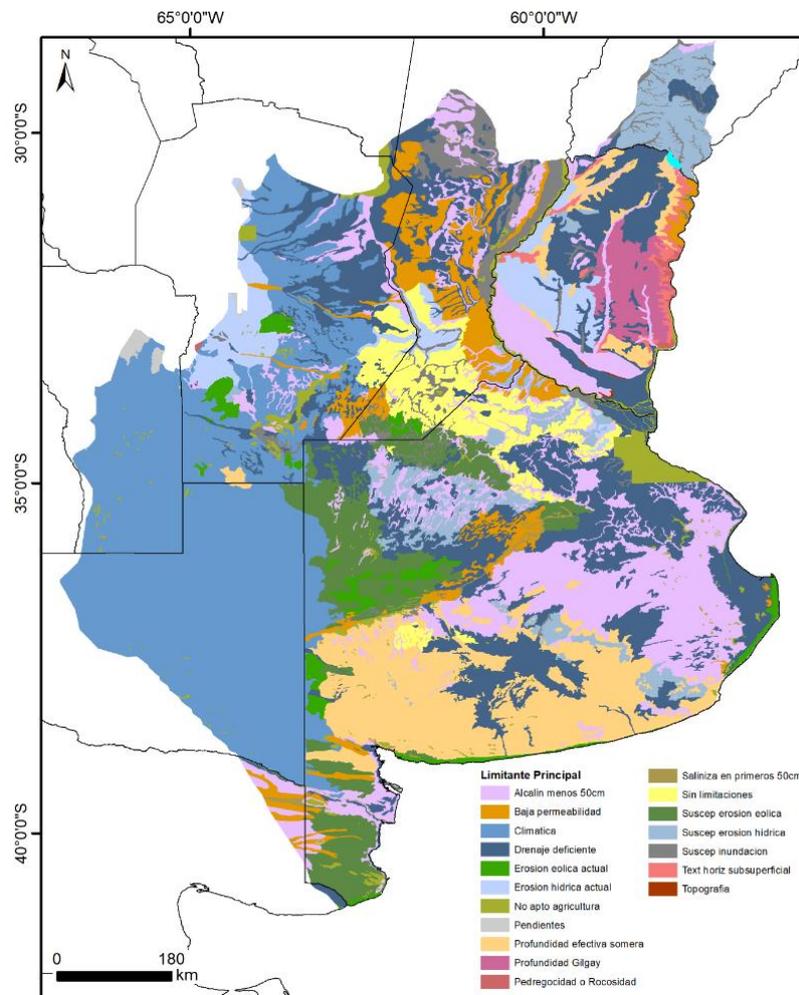
**Figura 6.8.** Clasificación taxonomía del suelo, textura y capacidad de drenaje superficial en las subregiones 5 y 6 de la Región Pampeana basada en la clasificación del IGN (2013).



**Figura 6.9.** Clasificación taxonomía del suelo, textura y capacidad de drenaje superficial en las subregiones 7 y 8 de la Región Pampeana basada en la clasificación del IGN (2013).

En la subregión 4 los molisoles dan lugar al dominio de los suelos Vertisoles en la línea de la costa. Su textura es de arena y arcilla, sin un buen drenaje superficial (Figura 6.7). Se desarrollan extensas lagunas de aguas estancadas las cuales se evaporan en épocas de sequía, cuya superficie es muy difícil de estimar debido a la alta dependencia de las precipitaciones y la interacción con agua dulce y salada, que ocasiona la variación constante de su perímetro (Geraldí *et al.*, 2011). Sus principales limitantes están relacionadas a la alcalinización superficial y al drenaje deficiente (Figura 6.10). En la subregión 5 predominan los suelos

Molisoles, con texturas franca, desde arenosa a limosa (Figura 6.8). Existen grandes depósitos de arenas eólicas con diferente geomorfología. En el este predominan llanuras arenosas, mientras que en la parte central predominan médanos (Sáenz y Colazo, 2015). En este caso la limitante climática es la más importante, acompañada por la erosión eólica y el drenaje deficiente (Figura 6.10).



**Figura 6.10.** Factores limitantes principales en los suelos de la Región Pampeana basado en la clasificación del IGN (2013).

En la subregión 6 predominan suelos Molisoles con textura arenosa y un drenaje excesivo (Figura 6.8). Las limitantes principales del suelo son climáticas y la erosión eólica (Figura 6.10). En la subregión 7 dominan los Molisoles, mientras que los Entisoles siguen el curso de las fallas estructurales. Están presentes las texturas arenosas en el oeste, mientras van prevaleciendo las texturas franco - limosas hacia el este. El drenaje es excesivo a

moderado (Figura 6.9). En esta subregión las limitantes principales están relacionadas con la profundidad efectiva somera, erosión eólica y condiciones climáticas (Figura 6.10). En el caso de la subregión 8 el dominio de los molisoles está acompañado de texturas arenosas con excesivo drenaje que alcanza hasta las proximidades de la costa (Figura 6.9). En este caso, las principales limitantes del suelo son climáticas, relacionadas a la erosión eólica y a la alcalinización (Figura 6.10).

### 6.3.3. Variabilidad espacio-temporal de las lagunas pampeanas

Para el análisis temporal se abordó la variación anual de cada una de las subregiones. Se detectaron los cambios experimentados por los cuerpos de agua entre los años 2001, 2002, 2006, 2008 y 2009. Esta técnica basada en imágenes satelitales es de gran ayuda en el estudio de la variación espacial de los cuerpos de agua (Bohn *et al.*, 2011). Se determinó la variación respecto del número de cuerpos de agua, área ocupada por éstos y se realizó una clasificación según el tamaño del espejo de agua en cada una de las subregiones. Se obtuvieron valores para el área total ocupada por los cuerpos de agua, número de lagunas y áreas medias para cada año. En la Tabla 6.2 se muestra como ejemplo lo obtenido para el año 2006 (normal).

<b>Cuerpos de agua Período normal - 2006</b>					
<b>G</b>	<b>Número</b>	<b>Tamaño medio (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Tamaño máximo (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Tamaño mínimo (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1452	0,31	26,9	0,01	457,6
<b>2</b>	678	10,475	167,1	0,022	562,8
<b>3</b>	2172	0,615	200,3	0,02	1335
<b>4</b>	1145	0,505	33,86	0,016	578
<b>5</b>	786	0,26	4,2	0,012	100,4
<b>6</b>	2132	0,187	10,3	0,017	399
<b>7</b>	1530	0,715	146,1	0,015	1093
<b>8</b>	441	0,738	63,9	0,012	352
	<b>Total</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Total</b>
	<b>10336</b>	<b>1,725625</b>	<b>81,5825</b>	<b>0,0155</b>	<b>4877,8</b>

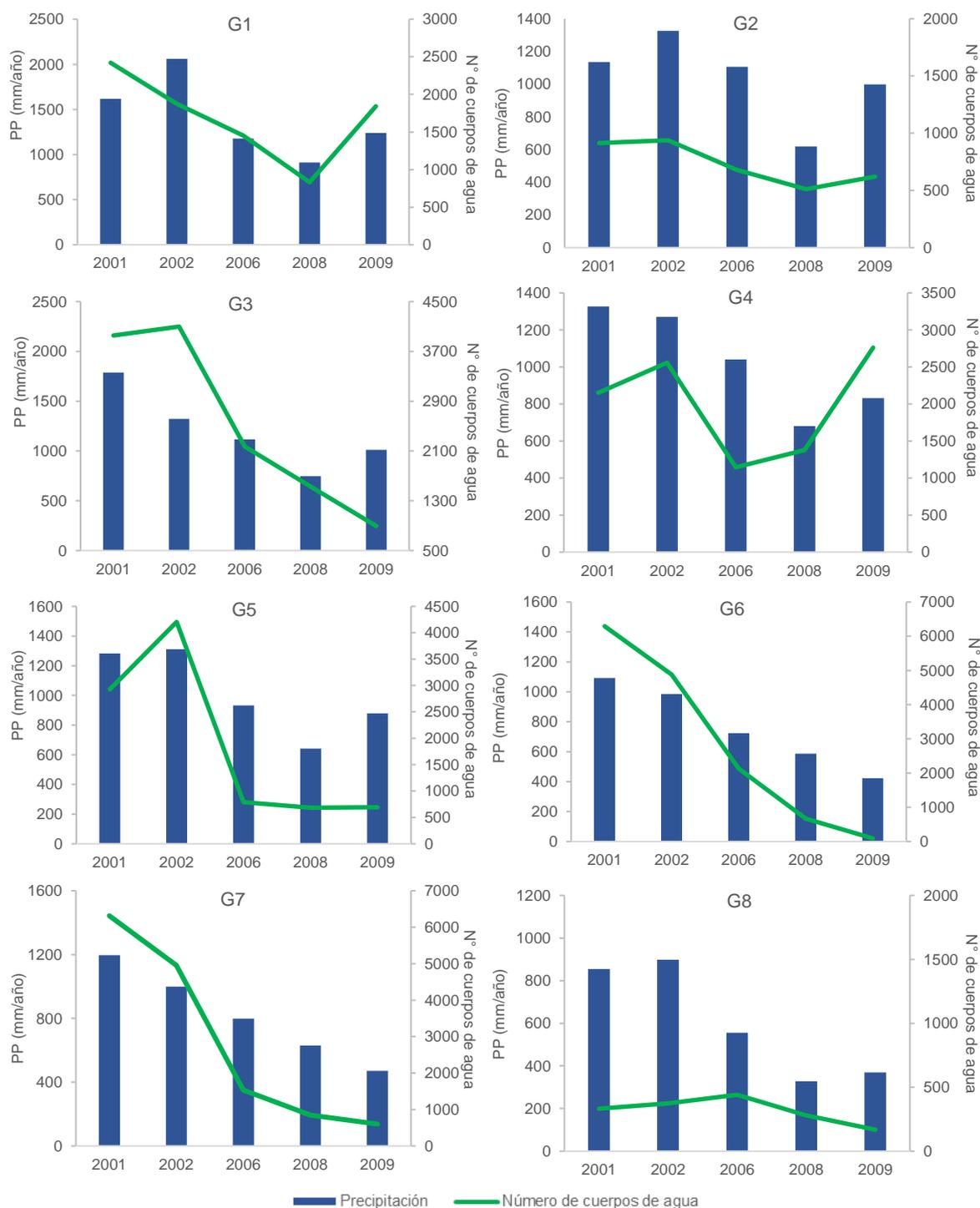
**Tabla 6.2.** Número, área total, tamaño medio, mínimas y máximas de cuerpos de agua en las subregiones estudiadas durante un período pluviométricamente normal (2006).

El número de lagunas responde en general a la variación anual de la precipitación. Sin embargo, se observaron algunas excepciones en las que el número de cuerpos de agua no se vio afectada o incluso tuvo una tendencia inversa. Por ejemplo en las subregiones 2, 3, 6 y 7 la relación es directa en la relación precipitación – número de lagunas. Mientras que en los casos 1, 4 y 8 al menos en un período estudiado no se encontró relación alguna (Figura 6.11). Por ejemplo, en la subregión 1, en el año 2002 no se observó un aumento en el número de cuerpos de agua a pesar del aumento considerable de la precipitación anual. Por otro lado, en la subregión 3, en ese mismo año se registró un aumento de cuerpos de agua aunque la precipitación anual fue menor que el año anterior. Esta última es una de las subregiones con mayor variabilidad en el número de lagunas durante el período de análisis, con más de 3000 cuerpos de agua (Figura 6.11). Otro caso particular se observa en la subregión 5, donde en los años menos lluviosos el número de cuerpos de agua se mantuvo estable.

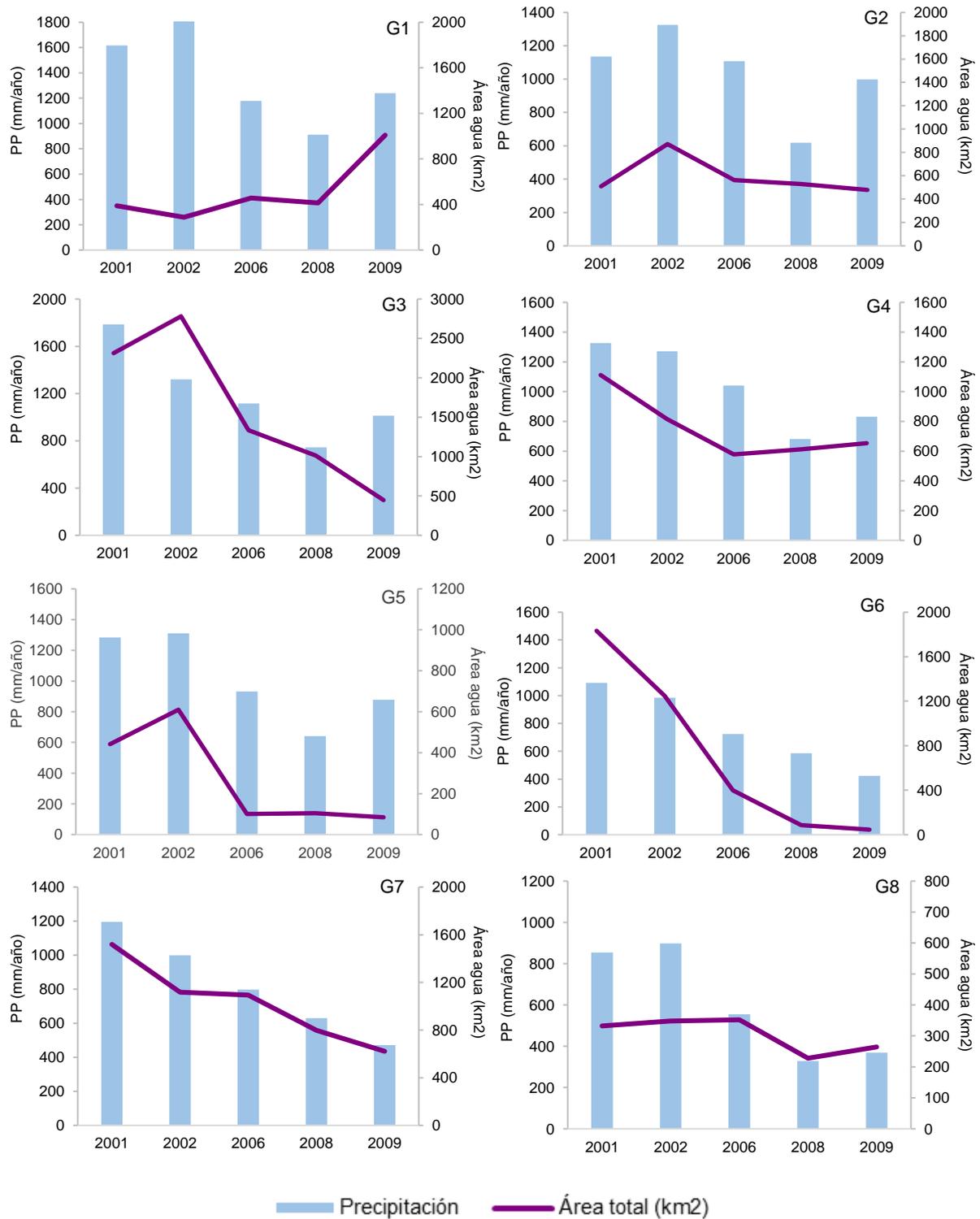
Una de las tendencias observadas a escala regional, es que los períodos húmedos afectan más a la presencia de cuerpos de agua que el valor de la precipitación anual en particular. Es decir, que las variaciones del número de cuerpos de agua en la Región Pampeana son mayores entre períodos normales y húmedos, que entre los normales y secos. El número de cuerpos de agua varían en valores de 2000 cuerpos de agua en el caso de la subregión 3 y de más de 4000 en los casos 5, 6 y 7 entre los períodos húmedos y el normal. Mientras que entre el normal y los secos las variaciones son de 1000 y 2000 en las subregiones 3 y 7 y la subregión 6, respectivamente (Figura 6.11). La subregión 8 ubicada en el extremo sur de la Región Pampeana se comporta de modo inverso, donde los períodos secos han afectado en mayor medida el número de cuerpos de agua.

Si bien el número de cuerpos de agua responde en general a los períodos húmedos, el aumento o disminución de los mismos no implica una mayor o menor cobertura de agua. En el análisis del área total cubierta por agua en cada subregión se observaron particularidades distintas (Figura 6.12). Exceptuando la subregión 1, en el resto de la Región Pampeana en el período húmedo (2001-2002) se registró la mayor área de cobertura de agua. La relación precipitación anual – área total cubierta con agua es en general directa en las subregiones 1, 2, 3, 6 y 7. Mientras que en las tres restante hay tendencias inversas (subregiones 4, 5 y 8 – Figuras 6.12 a 6.20). Con respecto a la relación entre el número de cuerpos de agua y el área total cubierta de agua, en las subregiones 2 a 6 se observa un comportamiento similar. En el

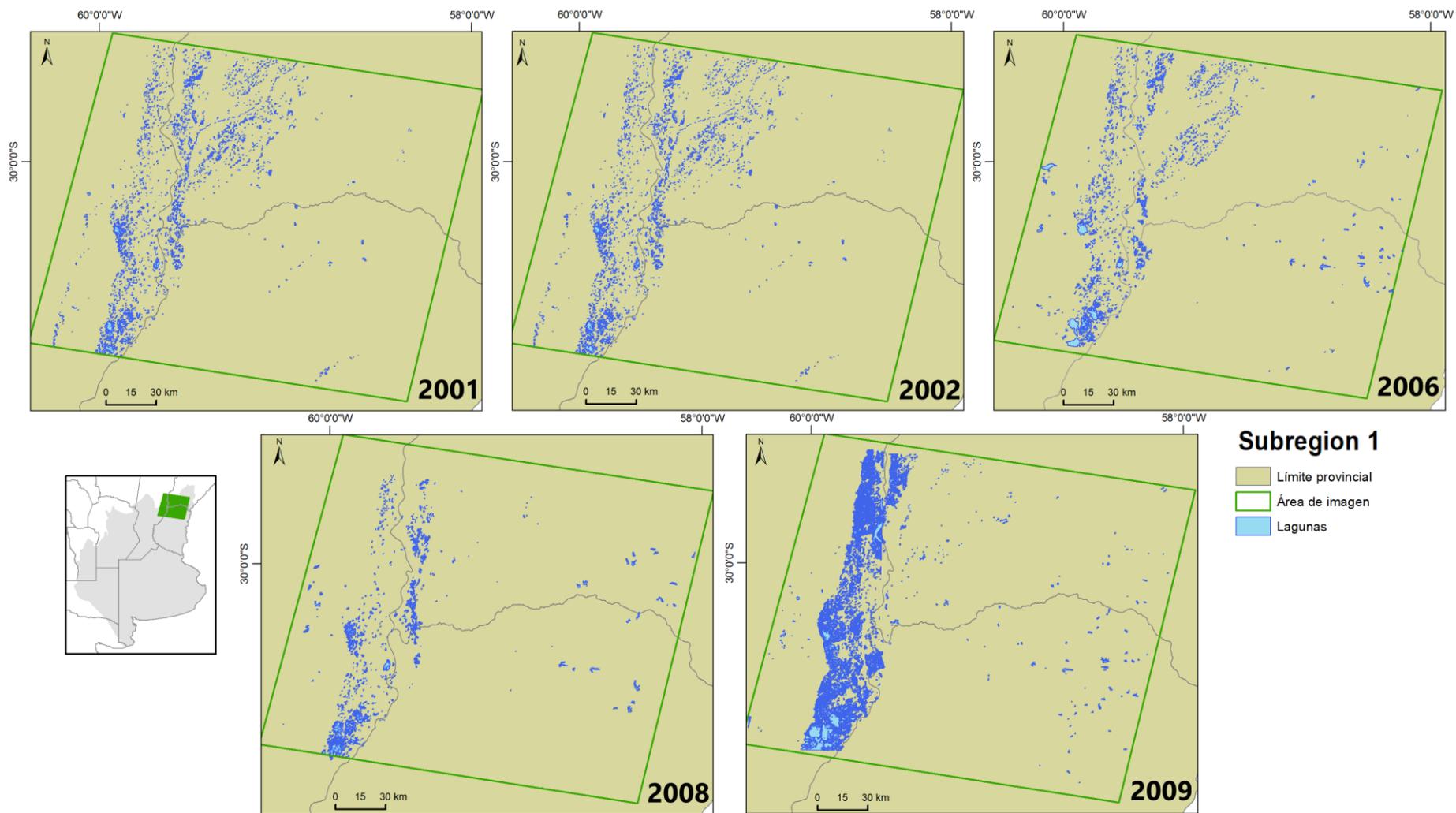
caso de la subregión 7 la amplitud en área total de agua entre el período normal y el húmedo no es tan grande como el número de cuerpos de agua, lo cual indica que si bien hay un mayor número de lagunas, la superficie del espejo de agua no fue considerablemente más grande (Figura 6.17).



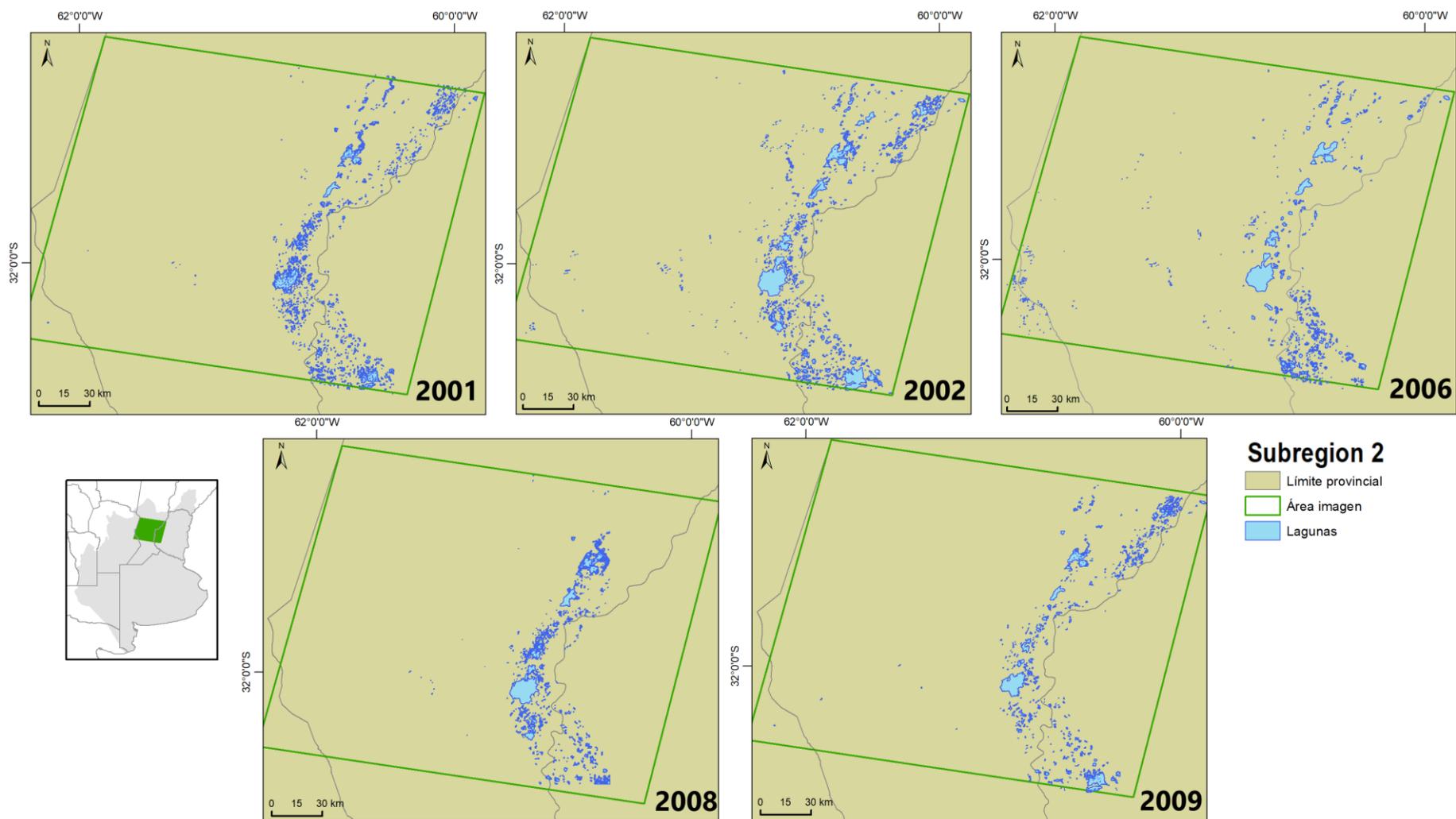
**Figura 6.11.** Variación multi-anual del número de cuerpos de agua en 8 subregiones pampeanas en relación a la precipitación media anual de dicha área.



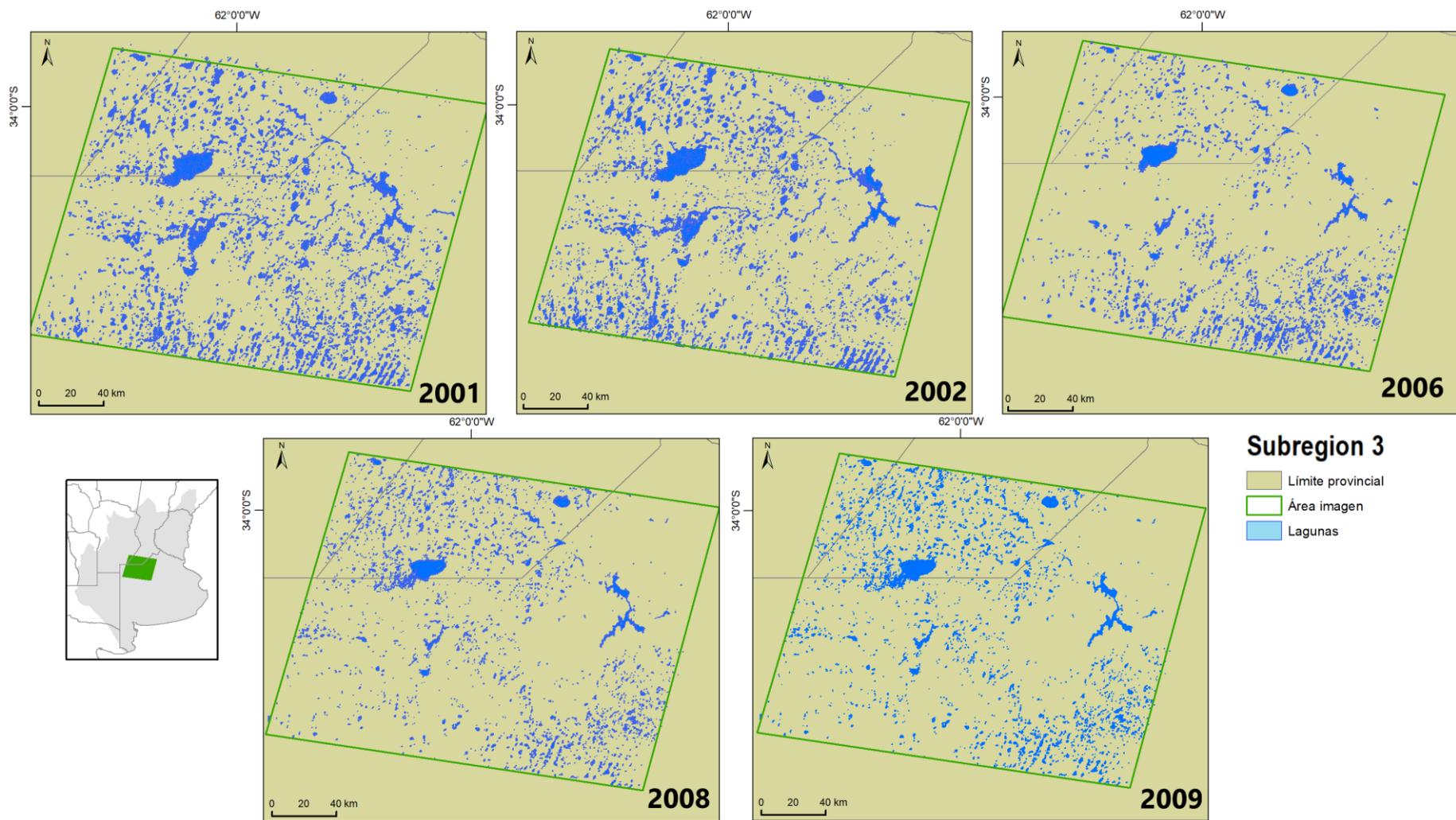
**Figura 6.12.** Variación multi-anual del área total de agua en 8 subregiones pampeanas en relación a la precipitación media anual de dicha área.



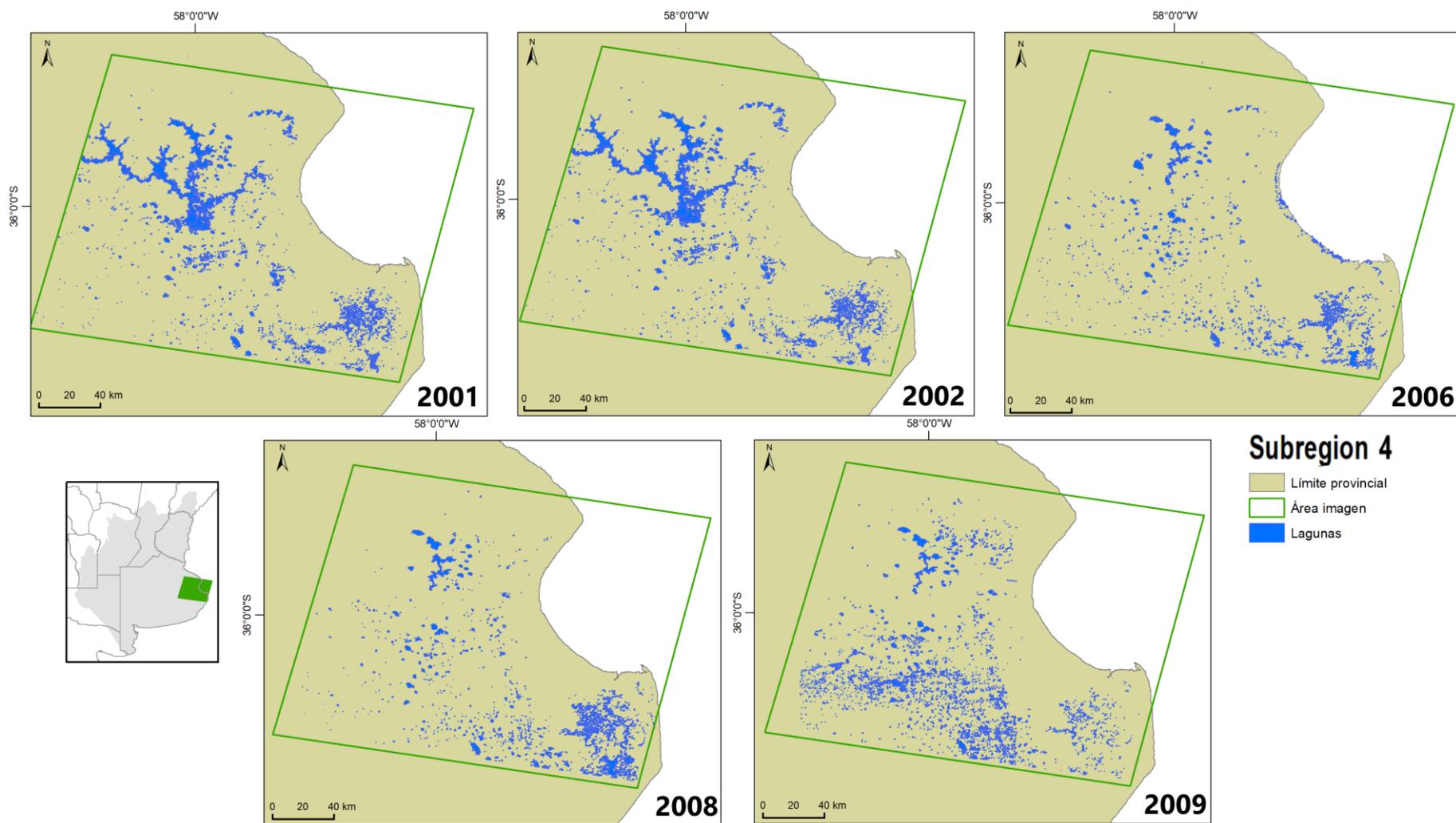
**Figura 6.13.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009 en la Subregión 1 de la Región Pampeana.



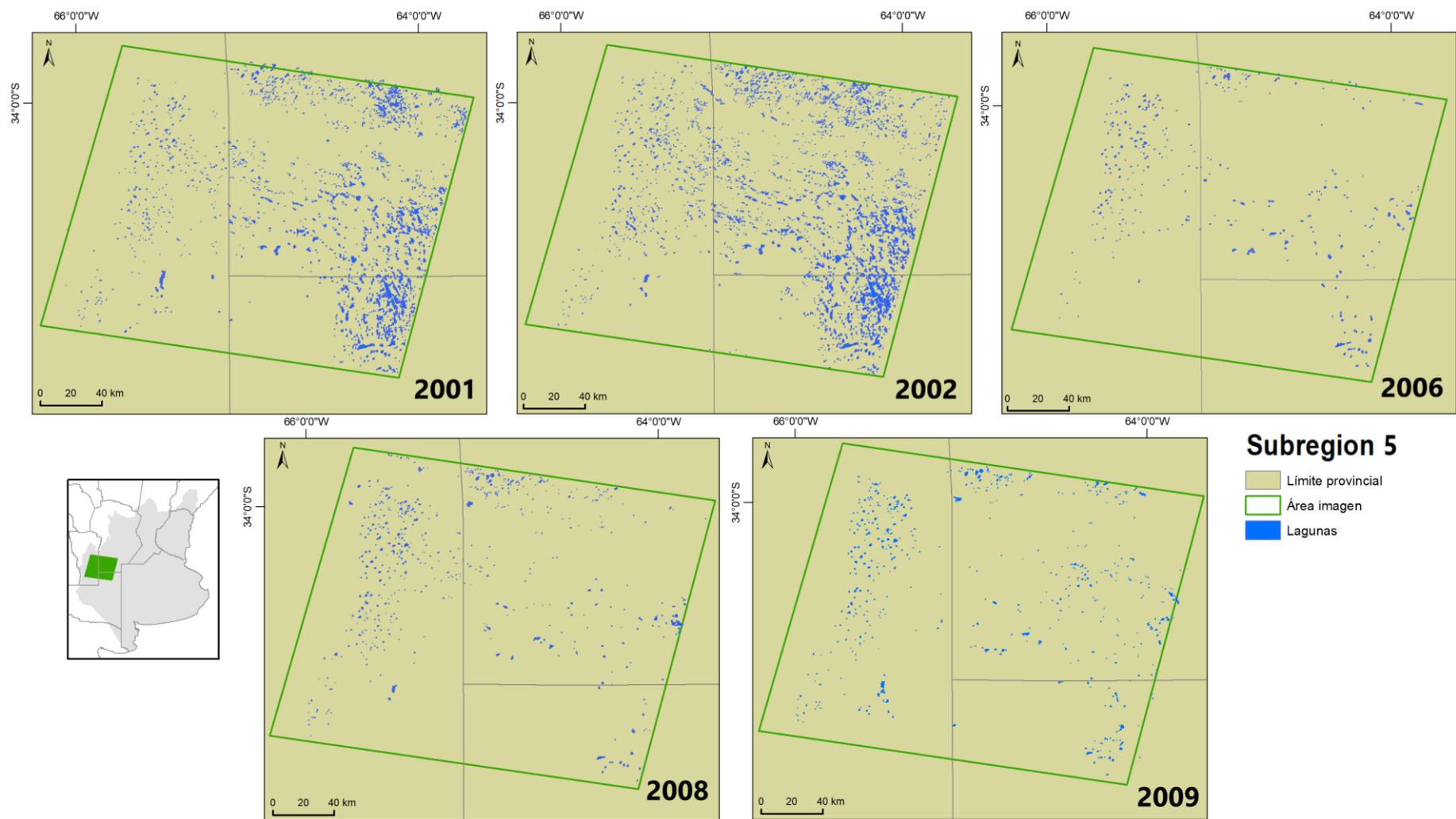
**Figura 6.14.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 2 de la Región Pampeana.



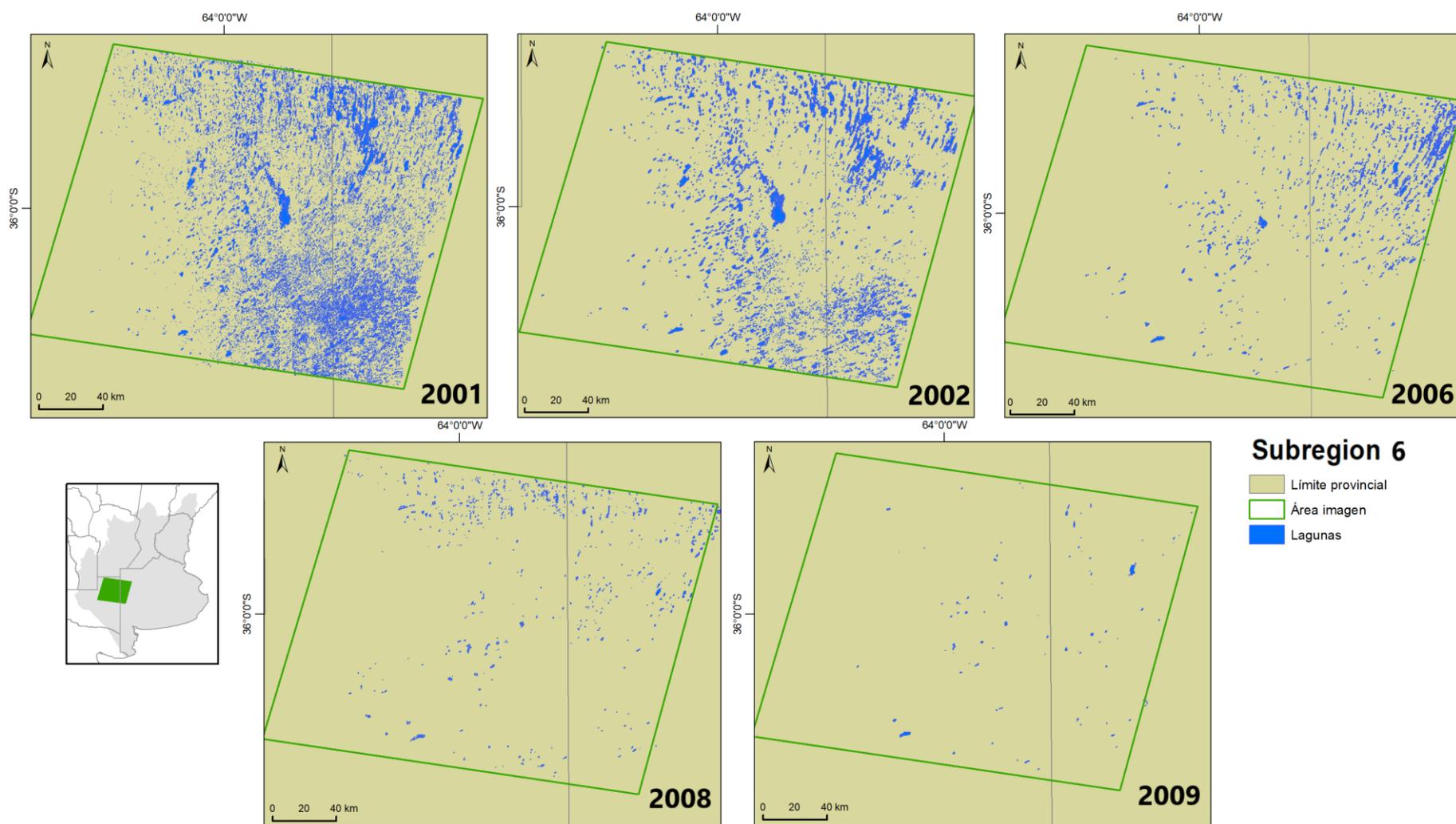
**Figura 6.15.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 3 de la Región Pampeana.



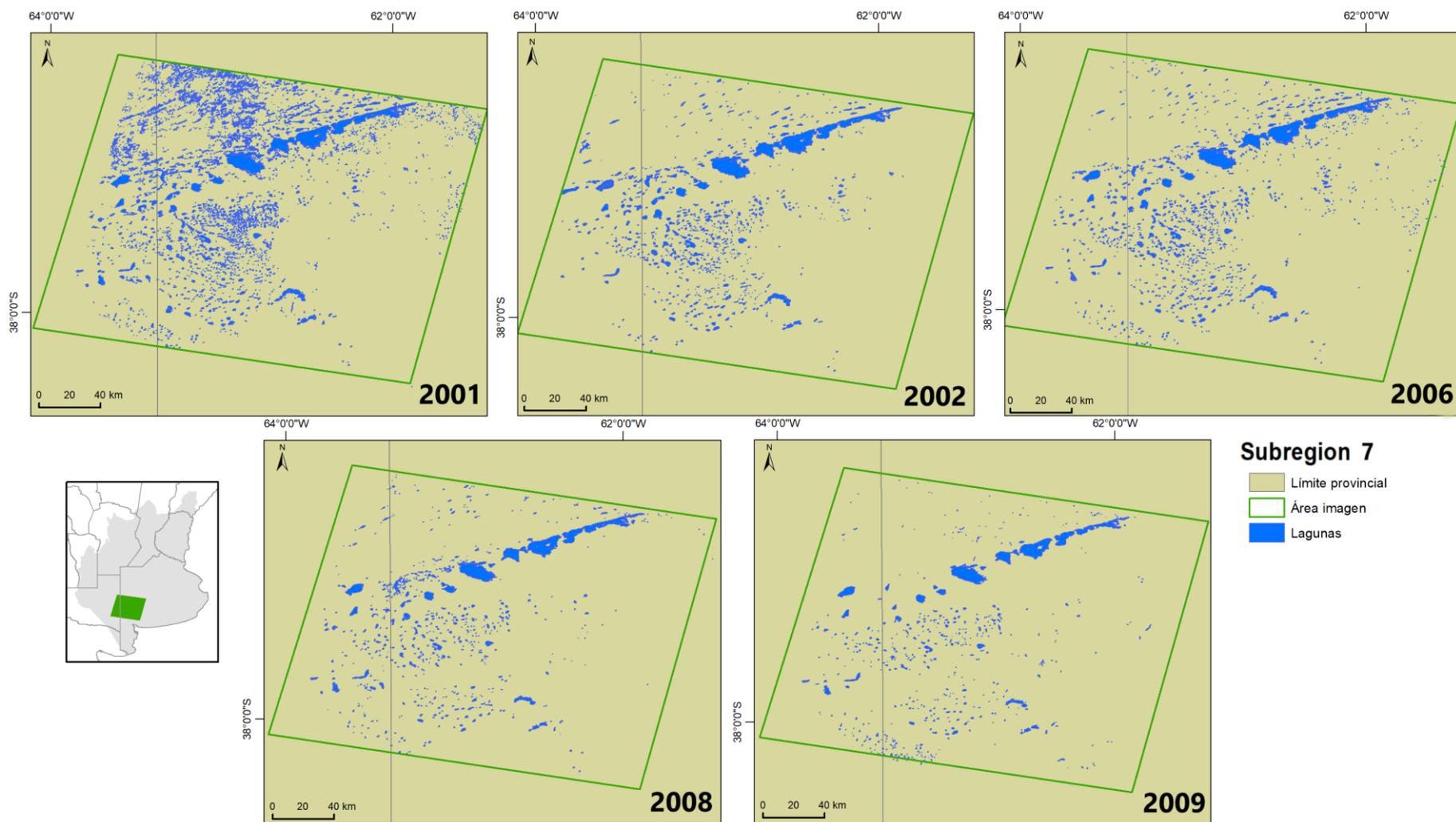
**Figura 6.16.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 4 de la Región Pampeana.



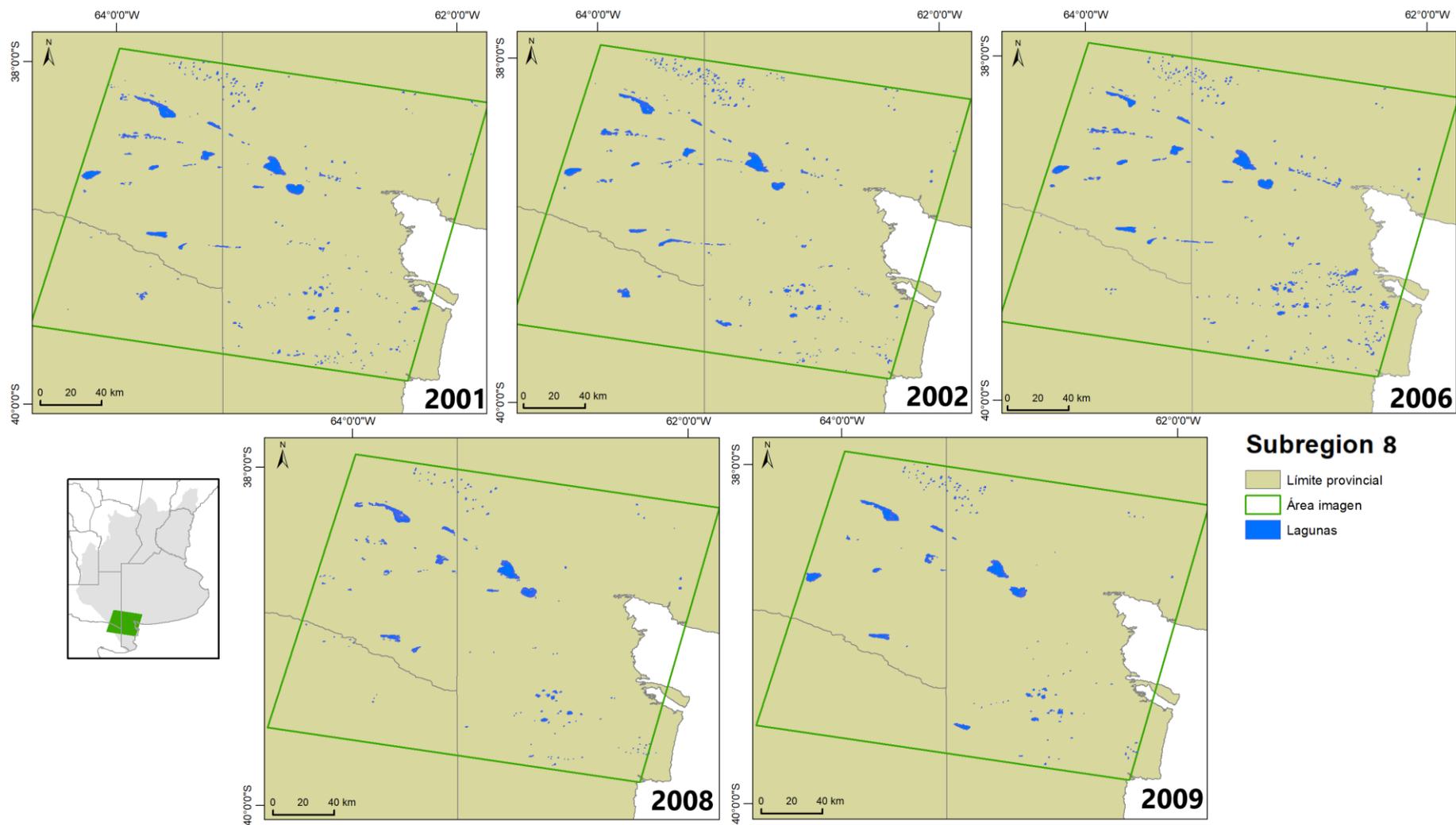
**Figura 6.17.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 5 de la Región Pampeana.



**Figura 6.18.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 6 de la Región Pampeana.



**Figura 6.19.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 7 de la Región Pampeana.



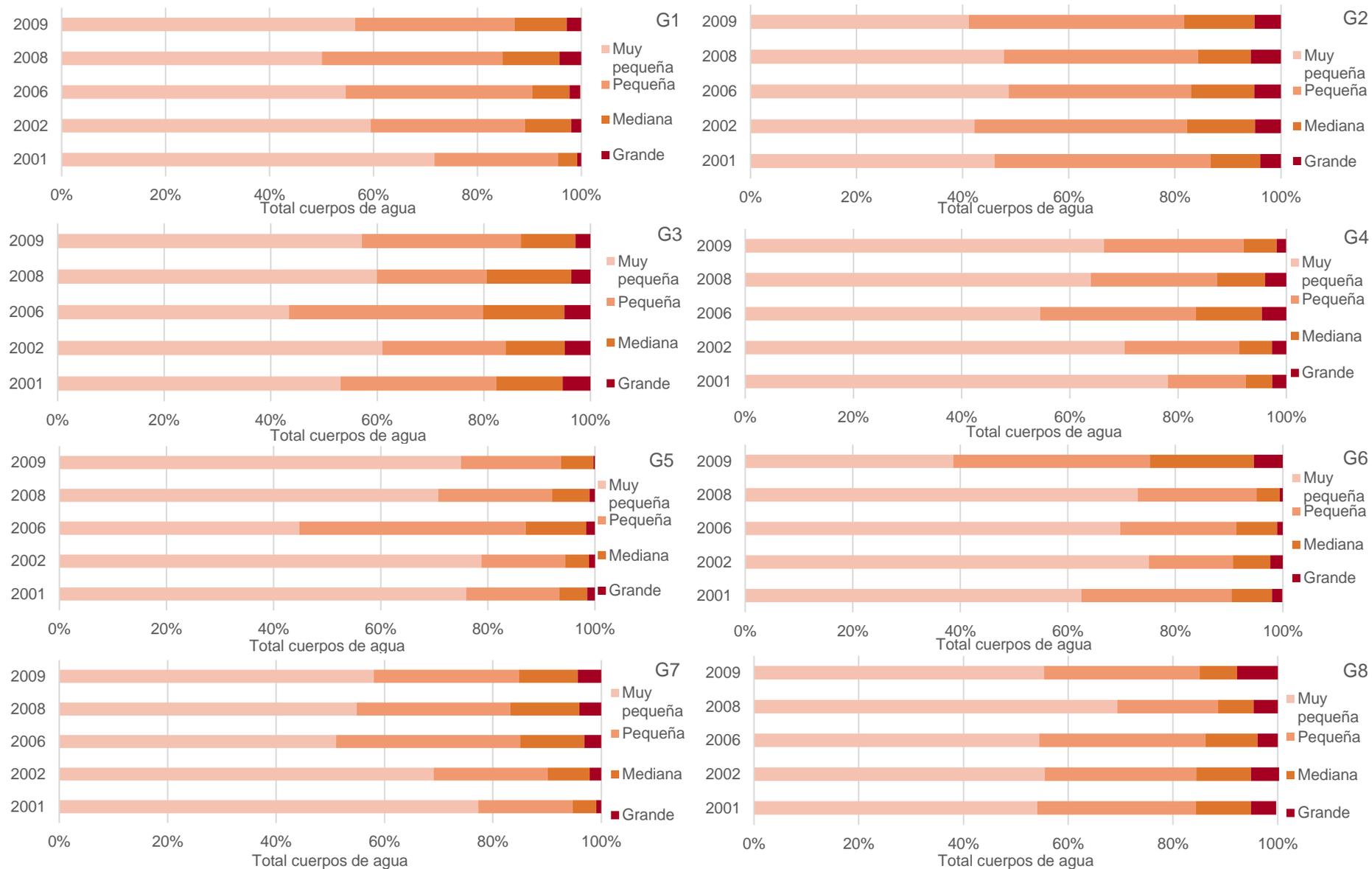
**Figura 6.20.** Distribución espacial de cuerpos de agua en períodos húmedos (2001-2002), normal (2006) y secos (2008-2009) en la Subregión 8 de la Región Pampeana.

Si bien las lagunas pampeanas han sido objeto de numerosos estudios, son escasas las clasificaciones de las mismas según su tamaño o superficie. Específicamente para la Región Pampeana, Dangavs describe que las lagunas varían de 0,01 a 15.000 has. Donde las clasifica en microcubetas (0,01 – 0,05 has), lagunas pequeñas (0,05 – 10 has), lagunas medianas (10 – 50 has) y grandes (50 – 200 has), las cuales pueden ser semipermanentes, efímeras o temporarias. De estas, las más comunes o frecuentes en la Región Pampeana son entre 0,05 y 10 has. Teniendo en cuenta la clasificación de los cuerpos de agua según su superficie (Dangavs, 2005), se realizó una clasificación para conocer la distribución de las mismas en cada subregión.

A los fines de esta tesis, se cambió las unidades de clasificación a unidades de km<sup>2</sup>. La categoría de microcubetas, de menos de 0,0005 km<sup>2</sup>, se eliminó del análisis al no ser percibido por el satélite según el tamaño del pixel (30 m = 0,009 km<sup>2</sup>). Según el rango de valores encontrados en los sitios estudiados y a lo descrito por autores previos se establecieron las siguientes categorías:

- Cuerpos de agua de 0,009 a 0,1 km<sup>2</sup>: *Laguna muy pequeña*
- Cuerpos de agua de 0,101 a 0,5 km<sup>2</sup>: *Laguna pequeña*
- Cuerpos de agua de 0,501 a 2 km<sup>2</sup>: *Laguna mediana*
- Cuerpos de agua de mayor a 2 km<sup>2</sup>: *Laguna grande*

En todas las subregiones hay un dominio de lagunas muy pequeñas, aunque es más marcado en las subregiones 4, 6 y 8 (Figura 6.21). Luego domina la composición las lagunas pequeñas con mayor presencia en las subregiones 1, 2 y 3 en el centro –norte de la Región Pampeana. Las medianas alcanzan su máxima presencia en las subregiones 2 y 3 (Figura 6.21). Finalmente las lagunas clasificadas como grandes ocupan el menor porcentaje principalmente en las subregiones 4 y 8. En los casos 1 y 3 al 6, durante los períodos húmedos (2001 y 2002) se destaca un aumento de la presencia de lagunas muy pequeñas. Por otro lado, en las subregiones 7 y 8, durante el período seco 2009 se observa un leve aumento de las lagunas más grandes, lo cual puede relacionarse con la desaparición del cuerpo de agua más pequeño durante escasas precipitaciones (Figura 6.19 y 6.21).



**Figura 6.21.** Composición de lagunas según su superficie en las 8 subregiones pampeanas.

En el norte de la Región Pampeana, las subregiones 1 y 2 poseen un fuerte control fluvial de los cuerpos de agua, donde las lagunas se concentran en lo largo de los ríos respondiendo no solo a la precipitación local, sino a los aportes aguas arriba de su cuenca. El desarrollo de zonas anegadas se ve favorecido por la escasa pendiente y drenaje deficiente. Además las lagunas que se encuentran alejadas al río Paraná son consideradas artificiales (Tricart, 1973), es decir que están bajo control antrópico. En la mayoría de los casos constituyen embalses que se encuentran en la cabecera de los afluentes del río Paraná.

La subregión 3 es de las pocas en las que se puede observar no solo importantes variaciones en el número de lagunas muy pequeñas y pequeñas efímeras o temporarias, sino también la importante variación espacio temporal en las lagunas medianas y grandes. El año 2001 registró la mayor cobertura de agua del período analizado, observándose una considerable disminución en el año 2002, a pesar de ser los dos años húmedos. La subregión 4 se caracteriza por ser un área cuya cuenca está controlada por sus características estructurales y geomorfológicas, más allá de las condiciones climáticas. El dominio de las depresiones explica la gran presencia de áreas cubierta por humedales. La escasa profundidad del nivel freático del drenaje podría ser la fuerza impulsora del sistema, por lo que la precipitación actúa como un factor determinante (Kruse y Laurencena, 2005; Bohn, *et al.*, 2016).

En la subregión 5, en cambio, no se observan importantes cambios en la cobertura de agua entre los dos años húmedos (2001–2002). La subregión 6 que cubre principalmente el extremo NE de la Provincia de la Pampa fue la más afectada en número de lagunas y superficie de agua durante los períodos húmedos. Según lo calculado, la variación es de más de 6000 lagunas entre el año 2002 y el 2009, lo cual representa una importante proporción de cobertura de agua efímera sobre el suelo. En la subregión 7 las mayores extensiones se observaron en el año 2001, disminuyendo en superficie hacia el 2009. Las lagunas efímeras o temporarias son lagunas muy pequeñas. La infiltración es el proceso predominante del equilibrio hidrológico (Bohn *et al.*, 2016). Los eventos húmedos fueron más efectivos en las

lagunas que los eventos secos, debido a que esta área se comporta hidrológicamente como una zona de acumulación (Geraldi *et al.*, 2011). Además, esta subregión se encuentra entre el sistema de Ventania al SE y una zona de médanos al NO, por lo que son varios los autores que han abordado el riesgo de inundación y la recepción de la mayoría de las aportaciones regionales de agua subterránea en este sistema (Gonzalez Uriarte y Orioli, 1998; Kruse y Laurencena, 2005; Auge, 2008; Geraldi *et al.*, 2011).

La subregión 8 en el extremo sur de la región, muestra rasgos de sus condiciones de aridez extrema en algunos períodos. La presencia de suelos Aridisoles y la escasa precipitación, acompaña a la formación de grandes salitrales distinguiéndose del resto de la Región Pampeana. Esta subregión es la menos afectada por los períodos húmedos en cuanto al número de cuerpos de agua. Según Bohn *et al.* (2016) el balance hidrológico de años anteriores contribuye a regular los efectos del evento seco, lo cual es muy relevante para estar en un entorno semiárido.

#### **6.4 Conclusiones**

El año 2002 se caracteriza como muy húmedo en toda la región, lo cual se observó en la cobertura de agua en la Región Pampeana. Mientras que el efecto contrario se observó durante el período seco 2008-2009. En todas las subregiones identificadas se observaron respuestas a los eventos húmedos y secos, pero esta variación no es el único factor generador de los cambios observados en las lagunas. Otros agentes además de la variabilidad climática acentúan o mitigan los cambios en la hidrología superficial. Se observó que los efectos de los períodos húmedos son de mayor intensidad, la cual puede contabilizarse en el número de lagunas y su superficie total.

En cada subregión la cuenca superficial respondió a las condiciones pluviométrías y a las condiciones de sitio y ambientales propias, explicadas en las secciones previas. Sus extensiones y disposiciones espacio temporal están ligados al origen de las lagunas, su topografía, hidrología y geomorfología actual. Esto muestra la riqueza en cuanto a la heterogeneidad de la Región Pampeana en muchos aspectos que deben ser considerados en estudios regionales. El conocimiento obtenido de la variabilidad del área de las lagunas

puede contribuir a las medidas que ayuden a mitigar las inundaciones y las sequías en distintas latitudes de la Región Pampeana, ya que la mayor parte de territorio es el soporte de importantes sistemas ecológicos, productivos y recursos de gran valor.

## *Capítulo 7*

### **CONCLUSIONES FINALES**

En la presente tesis se realizó un estudio en toda la Región Pampeana, Argentina, con el objetivo de zonificar su gran superficie según las características climáticas permitiendo conocer la variabilidad climática subregional y su relación con la dinámica espacio-temporal de las lagunas que las caracterizan. Para ello se llevaron a cabo tres clasificaciones climáticas utilizando simultáneamente distintos parámetros meteorológicos que permitieron obtener subregiones climáticas de la Región Pampeana para ser utilizadas según los intereses particulares de los actores sociales. En el estudio se utilizaron cincuenta años de datos pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (1960-2010).

La primera regionalización climática se llevó a cabo utilizando la precipitación. Se definieron seis subregiones que representan el gradiente pluviométrico de la Región Pampeana. Se identificaron cuatro subregiones húmedas en las que las precipitaciones anuales fueron superiores a los 650 mm y dos subregiones secas. Se demostró que la variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana es importante, donde los eventos extremos fueron más intensos a medida que aumentó la aridez del ambiente. Los eventos extremos de mayor intensidad afectaron a toda la Región Pampeana, mientras que los de menor intensidad fueron notables sólo en algunas subregiones. Ejemplo de ello son los años 2002 y 2008 caracterizados por abundantes lluvias y sequías severas, respectivamente. El análisis de las precipitaciones en relación al ONI demostró que los eventos El Niño y La Niña tienen gran influencia en el área de estudio, observándose además que el impacto de estos fenómenos varía de una subregión a otra. Las tendencias de precipitación anual positivas pueden atribuirse en parte a los cambios en la frecuencia e intensidad de las fases del ENSO. En la Región Pampeana la contribución más importante a la variación anual de la precipitación proviene de la variabilidad en el otoño y en menor medida en el verano. Esta oscilación de la atmósfera tropical-oceánica afecta a la variabilidad de las precipitaciones en latitudes bajas, coincidiendo con el extremo noreste de la Región Pampeana influenciado

por el anticiclón del Atlántico Sur. Como aporte a esta clasificación, se propuso una delimitación de la región pampeana que considera la distribución de la precipitación durante el período 1960-2010.

La segunda clasificación se realizó con datos de precipitación y temperatura del aire, en el cual se obtuvieron siete subregiones climáticas. Las subregiones responden a una significativa variabilidad anual e interanual. La zonificación obtenida está marcada por la distribución de precipitaciones anuales que disminuyen de Noreste a Sudoeste. Mientras que la temperatura lo hace latitudinalmente. Se le asignó a cada subregion una nomenclatura que representara dichas condiciones. Se destaca una subregión (*Templado Seco*) en el extremo sur de la Región Pampeana, que es la que más dista del resto de las subregiones que representan mejor las condiciones climáticas medias. La tercera regionalización propuesta, amplía los parámetros anteriores añadiendo datos de humedad relativa, velocidad del viento y altitud. Se obtuvieron en este caso ocho subregiones climáticas. Los gradientes térmicos y de precipitación fueron claramente determinantes, aunque también se observó el rol moderador de otros factores. Por ejemplo, al considerar la humedad producto de la cercanía al mar, el relieve que modifica principalmente la temperatura y el viento que es de influencia notable en el sur de la Región Pampeana generando condiciones de mayor aridez. Se propone esta última clasificación de subregiones climáticas para ser utilizada por los diferentes actores sociales de nuestro país (Aliaga et al., 2017).

A partir de lo obtenido en la última regionalización descrita, se estudió la variabilidad climática en cada subregión durante el período 1960-2010. Con respecto a la precipitación se observó que las anomalías positivas son más grandes que las negativas, además las positivas disminuyen en dirección N – S en la región pampeana. En general, los eventos secos fueron más frecuentes en la región centro-norte de la Región Pampeana y en el SE de la Provincia de La Pampa. Por otro lado, los eventos húmedos fueron más frecuentes en las regiones suroccidental y NE de la provincia de Buenos Aires y en la zona centro-norte de La Pampa. En ambos casos, la intensidad y duración del evento tuvieron una relación inversa, es decir, cuando el evento fue de corta duración, fue más intensa (de acuerdo con el índice

IEP). En relación a los eventos ENSO se observaron distintas respuestas de las subregiones. Hay subregiones pampeanas que se ven directamente afectadas por los eventos ENSO y en otras se observan variaciones de precipitaciones uno o dos años más tarde, o directamente no influye significativamente en ellas como para explicar dicha variabilidad.

En cuanto a la temperatura del aire se observa una leve tendencia positiva del aumento de la temperatura media durante el período de estudio. La estacionalidad térmica está definida a lo largo de toda la región pampeana, aunque se intensifica al aumentar la latitud. En cuanto a las anomalías térmicas, entre las subregiones se observan mayores coincidencias en las negativas que en las positivas. A diferencia de la precipitación y la temperatura del aire, la humedad no mostró tendencias positivas en ninguna subregion. La velocidad media del viento en la Región Pampeana es 13 km/h. Sin embargo este valor no es representativo de ninguna velocidad media de las diferentes subregiones. Es importante destacar que las subregiones de mayor y menor velocidad media son contiguas, con una velocidad media de 12 y 21 km/h respectivamente. La dirección del viento también es variable. En el norte de la región pampeana, muestran mayores frecuencias en dirección E, NE y SE. En el centro de la región pampeana no hay una dirección predominante o de mayor frecuencia, solo levemente del sector NE. Hacia el oeste de la región, muestran un dominio de viento N y NE.

Considerando las diferentes subregiones climáticas propuestas (Aliaga et al., 2017) se estudió la dinámica espacio temporal de los cuerpos de agua presentes en subregiones seleccionadas. Se estudió un período húmedo (2001-2002), normal (2006) y seco (2008-2009). Este análisis se llevó a cabo mediante el uso de productos de sensoramiento remoto. En todas las subregiones identificadas se observaron diferentes respuestas a los eventos húmedos y secos. Los efectos de los períodos húmedos son de mayor intensidad, la cual puede contabilizarse en el número de lagunas y su superficie total. Sin embargo las variaciones espaciales de las lagunas no solo dependen de la variabilidad climática. En cada subregión la hidrología superficial respondió a las condiciones pluviométrías y a las condiciones de sitio y ambientales propias. Sus extensiones y disposiciones espacio temporal están ligadas al origen de las lagunas, su topografía, hidrología y geomorfología

actual. Esto muestra la riqueza en cuanto a la heterogeneidad de la Región Pampeana en muchos aspectos que deben ser considerados en estudios subregionales.

En síntesis, en la presente investigación se probó la hipótesis planteada al inicio de la tesis: *La heterogeneidad climática en la Región Pampeana Argentina permite identificar diferentes subregiones climáticas según los elementos del clima que se analicen. La variabilidad climática afecta a las lagunas someras que se localizan en ella, en su número y extensión areal según la subregión pampeana en la que se encuentren.* Se lograron identificar los espacios diferenciados por sus características climáticas en *subregión homogéneas*, que como se describió en la introducción de la presente tesis, son ámbitos continuos o uniformes en el que cada una de sus partes muestra características en común, lo que permite evidenciar continuidades, similitudes y diferencias espaciales de determinados fenómenos.

Considerando el propósito de las zonificaciones, las tres regionalizaciones realizadas sirven de conocimiento más específicos y efectivos para cada subregión. Cada una tiene una específica combinación de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de tierras. Además, el conocimiento obtenido de la variabilidad del área de las lagunas contribuye a las medidas que ayuden a mitigar las inundaciones y las sequías en distintas áreas de la Región Pampeana, ya que la mayor parte de territorio es el soporte de importantes sistemas ecológicos, productivos y recursos de gran valor.

## REFERENCIAS

- Alarcón, M.F. 2013. Aproximación al análisis de la capacidad de acogida del territorio para el desarrollo de la actividad agrícola: el caso de la cuenca del río Miriñay, provincia de Corrientes (Argentina). XIV Encuentro de Geógrafos de América Latina (EGAL-2013), *Unión Geográfica Internacional – Comité Nacional de Perú*, Lima, 18 pp.
- Abatzoglou, J.T., Redmond, K.T. y Edwards, L.M. 2009. Classification of regional climate variability in the state of California. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8), 1527-1541
- Abdi, H. y Williams, L.J. 2010. Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(4), 433-459.
- Abson, D.J., Dougill, A.J. y Stringer, L.C. 2012. Using principal component analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa. *Applied Geography*, 35(1), 515-524.
- Adi, R.F., Sugiarto, Y., Arifah, A., Arini, E.Y. y Atmaja, T. 2017. Climate regionalization for main production areas of Indonesia: Case study of West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 54, No. 1, p. 012031. IOP Publishing.
- Adrian, R., O'Neill, C., Zagarese, H., Baines, S., Hessen, D., Keller, W., Livingstone, D., Sommaruga, R., Straile, D., Van donk, E., Weyhenmeyer, G. y Winder, M. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*. 54: 2283-2297.
- Alfonso, M.B., Zunino, J. y Piccolo, M.C. 2017. Impact of water input on plankton temporal dynamics from a managed shallow saline lake. *International Journal of Limnology*, EDP Sciences. 53, 391-400.
- Aliaga, V.S., Ferrelli, F., Alberdi-Algarañaz, E.D., Bohn, V.Y. y Piccolo, M.C. 2016. Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261-280.
- Aliaga, V.S., Ferrelli, F. y Piccolo, M.C. 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*. 37(S1), 1237-1247.
- Alijani, B., Ghohroudi, M. y Arabi, N. 2008. Developing a climate model for Iran using GIS. *Theor Appl Climatol*. 92: 103.
- Allende, I., Tell, G., Zagarese, H., Torremorell, A., Pérez, G., Bustingorry, J., Escaray, R. e Izaguirre, I. 2009. Phytoplankton and primary production in clear-vegetated, inorganic-

- turbid, and algal-turbid shallow lakes from the pampa plain (Argentina). *Hydrobiologia* 624: 45–60.
- Almazroui, M., Dambul, R., Islam, M.N. y Jones, P.D. 2015. Principal components based regionalization of the Saudi Arabian climate. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2555-2573.
- Alobaidi, M., Almazroui, M., Mashat, A. y Jones, P.D. 2017. Arabian Peninsula wet season dust storm distribution: regionalization and trends analysis (1983–2013). *International Journal of Climatology*, 37: 1356–1373.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S. y De Paepe, J.L. 2014. A regional audit of nitrogen fluxes in Pampean agroecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 184, 1-8.
- Ateca, M.R., Sereno, R. y Apezteguía, H. 2001. Zonificación de una superficie cultivada con soja según aspectos fenométricos y consumo de agua del suelo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa María. 9(1), 111-116.
- Auge, M. 2008. Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA). Buenos Aires, Argentina. 173 p.
- Ayuso, J.L., Ayuso-Ruiz, P., García-Marín, A.P., Estévez, J. y Taguas, E.V. 2015. Local Analysis of the Characteristics and Frequency of Extreme Droughts in Málaga Using the SPI (Standardized Precipitation Index). *Project Management and Engineering* (pp. 167-179). Springer, Cham.
- Baban, S.M. 2016. An Agro-Climatic Zoning Approach to Achieve Optimum Agricultural Production in the Kurdistan Region, Iraq. *Middle East J*, 5(3), 340-346.
- Badr, H.S., Dezfuli, A.K., Zaitchik, B.F. y Peters-Lidard, C.D. 2016. Regionalizing Africa: Patterns of Precipitation Variability in Observations and Global Climate Models. *J. Climate*, 29, 9027–9043.
- Baeriswyl, P.A. y Rebetez, M. 1997. Regionalization of Precipitation in Switzerland by Means of Principal Component Analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 58, 31-41.
- Baldi, G., Guerschman, J.P. y Paruelo, J.M. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116:197-208.
- Ban, N., Schmidli, J. y Schär, C. 2014. Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 7889-7907.

- Barros, V.R., Doyle, M.E. y Camilloni, I. 2008 Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and the low-level circulation. *Theor Appl Climatol*, 93:19–33.
- Barros, V., Clarke, R. y Silva Dias, P. 2006. Climate change in the La Plata basin. *Publication of the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), São José dos Campos, Brazil*.
- Barros, V.R., Boninsegna, J.A., Camilloni, I.A., Chidiak, M., Magrín, G.O. y Rusticucci, M. 2015. Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(2), 151-169.
- Barros, V.R., Castañeda, M.E. y Doyle, M.E. 2000. Recent precipitation trends in Southern South America East of the Andes: an indication of climatic variability. En P.P. Smolka, V. Volkheimer, (eds.), *Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates: Key Sites, Methods, Data and Models*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 187-206.
- Barsky, A., Podestá, G. y Toranzo, F.R. 2008. Percepción de variabilidad climática, uso de información y estrategias de los agentes frente al riesgo: Análisis de esquemas decisionales en agricultores de la región pampeana argentina. *Mundo agrario*, 8(16), 00-00.
- Bartolomé, M., Caputo, M.G., Celis, A., Herzer, H. y Rodríguez, C. 2004. El clima y otros factores de riesgo productivo en la pampa húmeda argentina. *Realidad Económica*, 202(88), 107.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., y Palutikof, J.P. 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Bertón, J. A. y Echeverría, J. 2002. Zonas áridas de la provincia de San Luis (Argentina): Dos clasificaciones climáticas. X Jornadas Cuidemos nuestro mundo. Implementación de un modelo ambiental para San Luis, 31-40.
- Bertonatti, C. y Corcuera, J. 2000. Situación ambiental Argentina 2000. Buenos Aires, Fundación Vida Silvestre, 391 pp.
- Bockheim, J.G. y Gennadiyev, A.N. 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95(1-2), 53-72.
- Bohn V.Y., Piccolo M.C., Pratolongo P.D. y Perillo G.M.E. 2012. Evaluación del estado trófico de dos Lagunas Pampeanas (Argentina). *Ecología*, N°24: 11-26.

- Bohn, V. 2009. Geomorfología e hidrografía de las lagunas del sur de la provincia de Buenos Aires. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, tesis doctoral, 244 p.
- Bohn, V.Y., Cintia Piccolo, M. y Perillo, G.M. 2011. Análisis de los períodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de Climatología*, 11.
- Bohn, V.Y., Delgado, A.L., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M. 2016. Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 818.
- Bridgman, H.A. y Oliver, J.E. 2006. *The global climate system: patterns, processes, and teleconnections*. Cambridge University Press.
- Brown, A., Martínez Ortiz, U., Acerbi, M. y Corcuera, J.F. (Eds.) 2006. La Situación Ambiental Argentina 2005, Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires.
- Bruniard, E.D. 1982. La diagonal árida Argentina: un límite climático real. *Revista Geográfica*, (95), 5-20.
- Burgos, J.J. 1971. Clima de la Provincia de Buenos Aires en relación con la vegetación natural y el suelo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Burgos, J.J. 1963. El clima de las regiones áridas de la República Argentina. *Rev. Inv. Agric*, 385-405.
- Burgos, J.J. 1970. Clima de la región noreste de la República Argentina en relación con la vegetación natural y el suelo. *Soc Argent Bot Bol*. 11: 37-101
- Burkart, R., Bárbaro, N.O., Sánchez, R.O. y Gómez, D.A. 1999. Eco-regiones de la Argentina. Presidencia de la Nación-Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable-Administración de Parques Nacionales.
- Cabré, M.F., Quérol, H. y Nuñez, M. 2016. Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Mendoza, Argentina. *International journal of biometeorology*, 60(9), 1325-1340.
- Cabrera, A.L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Sociedad Argentina de Botánica* 14:1-42.
- Cabrera, A.L. 1976. Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería: regiones fitogeográficas Argentinas. ACME, Buenos Aires. 85 pp.
- Cabrera, A.L. 1994. Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería Tomo II, Fascículo 1: Regiones fitogeográficas Argentinas. ACME, Buenos Aires.

- Carmona, F., Rivas, R., Thomas, L. y Marino, B. 2011. Caracterización espectral del estuario del Río Quequén Grande por medio de imágenes Landsat. En Raúl Rivas, Facundo Carmona y Dora Ocampo (Eds). Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana. Tandil, Buenos Aires. 11-29.
- Carvalho, M.J., Melo-Gonçalves, P., Teixeira, J.C. y Rocha, A. 2016. Regionalization of Europe based on a K-Means Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 94, 22-28.
- Castañeda, M.E. y Barros, V.R. 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al Este de los Andes. *Meteorológica*, 19, 23-32.
- Celemín, A.H. 1984. Meteorología práctica. Edición del autor, Mar del Plata. 313 pp.
- Chaves, B. y Jaramillo, A. 1998. Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. *Cenicafé*, 49 (3): 224-230.
- Comrie, A. y Glenn, E. 1998. Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*, 10(3), 201-215.
- Conroy, J.L. y Overpeck, J.T. 2011. Regionalization of present-day precipitation in the greater monsoon region of Asia. *Journal of Climate*, 24(15), 4073-4095.
- Coulibaly, P. 2006. Spatial and temporal variability of Canadian seasonal precipitation (1900–2000). *Advances in Water Resources* 29, 1846-1865.
- Cuervo, L.M. 2003. Pensar el territorio: los conceptos de ciudad-global y región en sus orígenes y evolución. Santiago de Chile: Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Dirección de Gestión del Desarrollo Local y Regional, Serie Gestión Pública 40.
- Damario, E.A. y Pascale, A.J. 1988. Características agroclimáticas de la Región Pampeana argentina. *Rev. Facultad de Agronomía*, 9(1-2), 41-64.
- Dangavs, N. 2005. Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. En: Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. Capítulo XIII, 219-235.
- Darand, M. y Daneshvar, M.R.M. 2014. Regionalization of precipitation regimes in Iran using principal component analysis and hierarchical clustering analysis. *Environmental Processes*, 1(4), 517-532.

- Davey, M.K., Brookshaw, A., y Ineson, S. 2014. The probability of the impact of ENSO on precipitation and near-surface temperature. *Climate Risk Management*, 1, 5-24.
- De Castro, M., Gallardo, C., Jylha, K. y Tuomenvirta, H. 2007. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. *Climatic Change*, 81, 329-341.
- De la Flor, F.J.S., Domínguez, S.Á., Félix, J.L. M. y Falcón, R.G. 2008. Climatic zoning and its application to Spanish building energy performance regulations. *Energy and Buildings*, 40(10), 1984-1990.
- Díaz, R.A. 2001. Calidad de las series mensuales de temperaturas y lluvias en Argentina. Actas de la III Reuniao Latino-Americana de Agrometeorología, Fortaleza, Brasil, pp. 641-642.
- Díaz, R.A. y Mormeneo, I. 2002. Zonificación del clima de la Región Pampeana mediante análisis de conglomerados con consenso. *Revista Argentina de Agrometeorología* 2 (2), 125-131.
- Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Moghaddam, M., Jahanbakhsh, S. y Mirnia, M. 2004. Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods. *Journal of Hydrology*, 297(1), 109-123
- Diovisalvi, N., Bohn, V.Y., Piccolo, M.C., Perillo, G.M., Baigún, C. y Zagarese, H.E. 2015. Shallow lakes from the Central Plains of Argentina: an overview and worldwide comparative analysis of their basic limnological features. *Hydrobiology*, 752(1), 5-20.
- Dixon, P.G., Allen, M., Gosling, S.N., Hondula, D.M., Ingole, V., Lucas, R. y Vanos, J. 2016. Perspectives on the synoptic climate classification and its role in interdisciplinary research. *Geography Compass*, 10(4), 147-164.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos (Vol. 24). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Doran, J. W. y Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment, 1-21.
- Doyle, M., Saurral, R. y Barros, V.R. 2012. Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the Plata Basin. *International Journal of Climatology*, 32, 2149-2162.
- Dube, T., Mutanga, O., Seutloali, K., Adelabu, S. y Shoko, C. 2015. Water quality monitoring in sub-Saharan African lakes: a review of remote sensing applications. *African Journal of Aquatic Science*, 40(1), 1-7.

- Dukat, F., Ferrati, R. y Canziani, G. 2005. Clasificación de lagos someros pampeanos mediante imágenes LANDSAT TM, *Biología Acuática*, vol. 22: 95-101.
- Edwards, D. y Mckee, T. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*, Colorado State University.
- Eludoyin, O.M., Adelekan, I.O., Webster, R. y Eludoyin, A.O. 2014. Air temperature, relative humidity, climate regionalization and thermal comfort of Nigeria. *Int. J. Climatol.*, 34: 2000–2018.
- Falasca, S.L., Del Fresno, M. C. y Waldman, C. 2014. Developing an agro-climatic zoning model to determine potential growing areas for *Camelina sativa* in Argentina. *QScience Connect*, 4.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1997), "Zonificación agro-ecológica. Guía general", *Boletín de suelos*, núm. 73, Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, Roma, Italia.
- Fay, P.A., Blair, J.M., Smith, M.D., Nippert, J.B., Carlisle, J.D. y Knapp, A.K. 2011. Relative effects of precipitation variability and warming on tall grass prairie ecosystem function. *Biogeosciences*, 8, 3053-3068.
- Fazel, N., Berndtsson, R., Uvo, C.B., Madani y K., Kløve, B. 2017. Regionalization of precipitation characteristics in Iran's Lake Urmia basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-11.
- Fernández Long, M.E., Spescha, L., Hurtado, R. y Murphy, G.M. 2011. Impact of the ENSO on corn yields in the Argentinean pampas region. *Agriscientia*, 28(1), 31-38.
- Ferrelli, F. 2016. Efectos de eventos El Niño y La Niña sobre las lagunas del sur de la Región Pampeana (Argentina). *InterEspaço*, 2(6).122-142.
- Ferrelli, F., Bohn, V.Y. y Piccolo, M.C. 2011. Aplicación de geotecnologías al estudio de las precipitaciones y su relación con las coberturas del suelo (Pcia. de Buenos Aires, Argentina). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (11), 355-374.
- Fischer, G. y Van Velthuisen, H. 2016. National Agro-economic Zoning for Major Crops in Thailand (NAEZ) Project TCP/THA/3403)–NAEZ Model Implementation and Results.
- Flaounas, E., Drobinski, P., Vrac, M., Bastin, S., Lebeaupin-Brossier, C., Stéfanon, M. y Calvet, J.C. 2013. Precipitation and temperature space–time variability and extremes in the

- Mediterranean region: evaluation of dynamical and statistical downscaling methods. *Climate dynamics*, 40(11-12), 2687-2705.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W. J. y Forest, C. 2013. Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change* 2013, 5, 741-866.
- Fornerón, C.F., Piccolo, M.C. y Carbone, M.E. 2010. Análisis morfométrico de la laguna Sauce Grande (Argentina). *Huellas* 11 – 30.
- Forte Lay, J., Scarpati, O. y Capriolo, A. 2008. Precipitation variability and soil water content in Pampean Flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional*, 47 (4), 341-354.
- Fuschini Mejía, M.C. y Mejía, M.C.F. 1994. El agua en las llanuras. UNESCO/ORCYT. Montevideo. Uruguay. 54 pp.
- Gabella, J.I. y Zimmermann, F.M. 2016. Territorial Management, Environmental Degradation and Resilience in Rural Areas of the Argentinian Temperate Arid Diagonal. *American Journal of Rural Development*, 4(2), 49-58.
- Gandini, M.L., Lara, B.D. y Scaramuzzino, R. 2014. Zonificación basada en la respuesta de ecosistemas a oscilaciones climáticas. *Revista Estudios Ambientales*, 2(2), 4-24
- García, M.C. 2009. El clima urbano costero de la zona atlántica comprendida entre 37° 40' y 38° 50'S y 57 y 59° W. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, tesis doctoral, 225 p.
- Garrido del Pozo, N., Mora García, M., Ortíz de Galisteo, J.P., Álvarez Alonso, J.P. y Buendía Moya, G. 2006. Las sequías climáticas en la cuenca del Duero. En Congreso homenaje al Douro/Duero y sus ríos: Memoria, cultura y porvenir, Centro Meteorológico de Castilla y León MMAM, Zamora.
- Gasca Zamora, J. 2009. Geografía regional. La región, la regionalización y el desarrollo regional. Instituto de Geografía – UNAM. México.
- George, D.G. 2000. Using climate indicators to monitor patterns of change in freshwater lakes and reservoirs, En: J. A. A. Jones, K. Gilman, A. Jigorel and J. H. Griffin (eds.), *Water in the Celtic World: Managing Resources for the 21st Century*, British Hydrological Society, Occasional Paper No. 11, pp. 93–102.
- Geraldi, A. 2009. Estudio geoambiental de la cuenca lagunar las encadenadas del oeste. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, tesis doctoral, 330 p.

- Geraldi, A., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2011. El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Ciencia Hoy*, 22.
- Gerten D. y Adrian R. 2000. Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1058–1066.
- Gerten D. y Adrian R. 2001. Differences in the persistency of the North Atlantic Oscillation signal among lakes. *Limnol. Oceanogr.* 46: 448–455.
- Gocic, M. y Trajkovic, S. 2014. Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia. *Journal of Hydrology*, 510, 110-123.
- Gong, X. y Richman M.B. 1995. On the application of cluster analysis to growing season in precipitation data in North America East of the Rockies. *Journal of Climate*, 8, 897-931.
- González Uriarte, M. y Orioli, G.A. 1998. Carta Geoambiental del partido de Guaminí (provincia de Buenos Aires) (No. 631.478212). EdiUNS, Editorial de la Universidad Nacional del Sur.
- González, A.O. 2010. Reconsidering the role of Rossby waves and inertia-gravity waves in the Madden-Julian Oscillation (MJO). In 9th Annual Student Conference. American Meteorology Society.
- Grimm, A.M. 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 537-554.
- Grimm, A.M. y Tedeschi, R.G. 2009. ENSO and extreme rainfall events in South America. *Journal of Climate*, 22(7), 1589-1609.
- Grimm, A.M., Barros, V.R. y Doyle, M.E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, 13(1), 35-58.
- Hannachi, A., Jolliffe, I.T. y Stephenson, D. 2007. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review, *Int. J. Climatol*, 27, 1119-1152.
- Hatcher, L. 1997. A step by step approach to using SAS for factor analysis and structural equation modeling. SAS Institute Inc, Cary, NC.
- Hermida, L., López, L., Merino, A., Berthet, C., García-Ortega, E., Sánchez, J.L. y Dessens, J. 2015. Hailfall in southwest France: Relationship with precipitation, trends and wavelet analysis. *Atmospheric Research*, 156, 174-188.

- Hoffmann, J., Nuñez, S. y Vargas, W. 1997. Temperature, humidity and precipitation variations in Argentina and the adjacent sub-antarctic region during the present century. *Meteorol, Z*, 6:3–11
- Hulme, M. y Sheard, N. 1999. Climate change scenarios for Argentina. *Climatic Research Unit*, Norwich, UK.
- Hurtado, R., Spescha, L., Maio, S. y Fernández Long, M.E. 2002. Zonificación de almacenamiento de agua en el suelo en la región de secano argentina. Actas de la IV reunión argentina de Agrometeorología. Vaquerías, Córdoba. P 167-168
- IGN (Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina). 2013. Proyecto “SIG-250”. <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/>
- Imbellone, P.A., Giménez, J.E. y Panigatti, J.L. 2010. Suelos de la Región Pampeana. Procesos de formación (No. P33 INTA 18288). INTA.
- INTA. 1998. Carta de suelos y vegetación de la Provincia de San Luis. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Luis.
- INTA-SAGyP (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca), 1989. Atlas de suelos de la República Argentina. INTA-SAGyP, Buenos Aires.
- INTA-SAGyP (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca), 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. INTA-SAGyP, Buenos Aires.
- INTA-UNLP (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Universidad Nacional de La Pampa, Buenos Aires). 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la Provincia de La Pampa.
- Iriondo, A., Premo, W.R., Martínez–Torres, I.M., Budahn, J.R., Atkinson, W.W., Siems, D.F. y Guarás–González, B. 2004. Isotopic, geochemical and temporal characterization of Proterozoic basement rocks in the Quitovac region, northwestern Sonora, Mexico: Implications for the reconstruction of the southwestern margin of Laurentia: *Geological Society of America Bulletin*, 116: 154–170.
- Izaguirre, I., Miranda, L.A., Perillo, G.M., Piccolo, M.C. y Zagarese, H.E. 2015. Preface: Shallow lakes from the Central Plains of Argentina. *Hydrobiology*, 752(1), 1-3.
- Jaramillo, R.A. y Chaves, C.B. 2000. Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé* 51(2), 102-113

- Jeppesen, E., Jensen, J.P., Søndergaard, M., Lauridsen, T., Pedersen, L.J., y Jensen, L. 1997. Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia*, 342/343: 151-164.
- Jolliffe, I. T. y Philipp, A. 2010. Some recent developments in cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(9), 309-3.
- Jolliffe, I.T. 2002. Principal Component Analysis, 2nd Ed. Springer, 487 pp.
- Kaiser, H.F. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187-200.
- Karlin, M.S. 2012. Cambios temporales del clima en la subregión del Chaco Árido. *Multequina*, 21(1), 3-16.
- Kenawy, A., López-Moreno, J.I. y Vicente-Serrano, S.M. 2013. Summer temperature extremes in northeastern Spain: spatial regionalization and links to atmospheric circulation (1960–2006). *Theoretical and applied climatology*, 113(3-4), 387-405.
- Keskin, M., Dogru, A.O., Balcik, F.B., Goksel, C., Ulugtekin, N. y Sozen, S. 2015. Comparing spatial interpolation methods for mapping meteorological data in Turkey. En *Energy Systems and Management*, 33-42.
- Klees R. y Haagmans, R. 2000. Wavelets in the Geosciences. Springer-Verlag, Berlin, 241 pp.
- Knapp, P.A, Grissino-Mayer, H.D. y Soulé, P.T. 2002. Climatic Regionalization and the Spatio-Temporal Occurrence of Extreme Single-Year Drought Events (1500-1998) in the Interior Pacific Northwest, USA. *Quaternary Research*. 58, 226-233.
- Köppen, W. 1936. The geographical system of climate. Germany, Berlin.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263.
- Kozjek, K., Dolinar, M. y Skok, G. 2017. Objective climate classification of Slovenia. *Int. J. Climatol*, 37: 848–860.
- Kruse, E. y Laurencena, P. 2005. Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento. In Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata, Argentina.
- Labraga, J.C., Brandizi, L.D. y López, M.A. 2011. Avances en el pronóstico climático de las anomalías de lluvia en la Región Pampeana. *Meteorológica*, 36(2), 59-71.

- Laura, E.J. y Obando, O.G.F. 2015. Análisis de frecuencia regional de las precipitaciones máximas diarias en la región hidrográfica del Titicaca. *Revista de Investigación Altoandina* 17 (1), 53-64.
- Lentini, C.A.D., Podestá, G.G., Campos, E.J.D. y Olson, D.B. 2001. Sea surface temperature anomalies on the Western South Atlantic from 1982 to 1994. *Continental Shelf Research*, 21(1), 89-112.
- León, R.J.C., Burkart, S.E. y Movia, C.P. 1979. Relevamiento Fitosociológico del Pastizal del Norte de la Depresión del Salado: La Vegetación de la República Argentina. Serie Fitogeográfica N°17. Buenos Aires, INTA, 90 p.
- Lorda, H., Roberto, Z., Saibene, Y.B., Sipowicz, A. y Belmonte, M.L. 2008. Descripción de zonas y subzonas agroecológicas RIAP. Boletín de Actualización Técnica, (96).
- Magrin G.O, Travasso M.I. y Rodríguez G.R. 2005. Changes in climate and crops production during the 20th century in Argentina. *Clim Change*, 72:229–249.
- Magrin, G.O., Travasso, M.I., Rodríguez, G.R. y Solman, S.M. 2009. Climate change and wheat production in Argentina. *Int J Global Warm*, 1:214–226.
- Magrin, G.O., Grondona, M.O., Travasso, M., Boullón, D.R., Rodríguez, C.D. y Messina, C.D. 1998. Impacto del Fenómeno “El Niño” sobre la Producción de Cultivos en la Región Pampeana. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua, Castelar, Argentina.
- Magrin, G.O., Travasso, M.I., Baethgen, W.E. y Boca, R.T. 2007. Improving applications in agriculture of ENSO-based seasonal rainfall forecasts considering Atlantic Ocean surface temperatures. In *Climate Prediction and Agriculture*, 249-257.
- Mallat, S. 1999. A Wavelet tour of Signal Processing. Wavelet Analysis & Its Applications. *Academic Press*, San Diego, 637 pp.
- Martins, D.S., Raziei, T., Paulo, A.A. y Pereira, L.S. 2012. Natural Hazards and Earth System Sciences; Katlenburg-Lindau, (12), 5, 1493.
- Marzban, C. y Sandgathe, S. 2005. Cluster analysis for verification of precipitation fields. *Weather and Forecasting*, 21, 824-838.
- Mckee, T., Doeksen, N.J. y Kliest, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to times scales. California, EE.UU. Preprint 8 th Conference on Applied Climatology, 17-22, 179-184.

- Menafoglio, A., Secchi, P. y Dalla Rosa, M. 2013. A Universal Kriging predictor for spatially dependent functional data of a Hilbert Space. *Electronic Journal of Statistics*, 7, 2209-2240.
- Minetti, J.L. y Vargas, W.M. 1998. Trends and jumps in the annual precipitations in South America, south of the 15°S. *Atmósfera*, 11:205–221.
- Minetti, J.L., Albarracín, S.A., Bobba, M.E., Hernández, C.M., López, E.R., Acuña, L.A. y Mendoza, E. 1999. Atlas climático del noroeste argentino.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., Vega, B. y Costa, M.C. 2007. Las sequías en la Pampa Húmeda: Impacto en la productividad del maíz. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22(2), 218-232.
- Mo, K.C. 2000. Relationships between Low-Frequency Variability in the Southern Hemisphere and Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, 13(16), 3599-3610.
- Modarres, R. 2006. Regional Precipitation Climates of Iran. *Journal of Hydrology (NZ)* 45 (1), 13-27.
- Modarres, R. y Sarhadi, A. 2011. Statistically-based regionalization of rainfall climates of Iran. *Global and Planetary Change*, 75(1), 67-75.
- Mooij, W.M., Hulsmann, S., De Senerpont domis, L.N., Nolet, B.A., Bodelier, P.L.E., Boers, P. C.M., Dionisio Pires, M.L., Gons, H.J., Ibelings, B.W., Noordhuis, R., Portielje, R., Wolfstein, K. y Lammens, E.H.R.R. 2005. The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquatic Ecology*, 39: 381–400.
- Morales, L., Canessa, F., Mattar, C., Orrego, R. y Matus, F. 2006. Caracterización y zonificación edáfica y climática de la Región de Coquimbo, Chile. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(3), 52-74.
- Morello, J., Matteucci, S.D., Rodriguez, A.F., Silva, M.E., Mesopotámica, P., Llana, P. y Medanosa, P. 2012. Ecorregiones y complejos Ecosistémicos de Argentina. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires.
- Moschini, R.C., Conti, H.A., Alonso, M., Traverso, J.R., Nakama, V. y Alfieri, A. 2000. Delimitación de áreas de aptitud climática para el cultivo de los eucaliptos en la región pampeana. *SAGPyA Forestal*, 15, 2-11.

- Ninyerola, M., Pons, X. y Roure, J.M. 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20(14), 1823-1841.
- Nojarov, P. 2017. Genetic climatic regionalization of the Balkan Peninsula using cluster analysis. *Journal of Geographical Sciences*, 27(1), 43-61.
- Ogungbenro, S.B. y Morakinyo, T.E. 2014. Rainfall distribution and change detection across climatic zones in Nigeria. *Weather and Climate Extremes*, 5, 1-6.
- Ojeda, G., Lacreu H. y Sosa G. 2007. *Atlas de Recursos Geoambientales*. Potrero de los Funes, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina. ISBN: 978-987-23360-5-9.
- Oke, T. 1992. *Boundary Layer Climates*. Routledge, Inglaterra.
- Olcina Cantos, J. 1996. El clima: factor de diferenciación espacial. Divisiones regionales del mundo desde la antigüedad al S. XVIII". *Investigaciones geográficas*. 15, 79-98.
- OPDS (Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible) 2012. Proyecto "Incremento de la Resiliencia Climática y Mejora de la Gestión Sustentable del Suelo en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires". Secretaria de Medio Ambiente y desarrollo sustentable de la Nación. Análisis y evaluación social, Anexo V. Disponible en: <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/DCSyLD/file/Joaquin/Evaluacion%20Social%20Anexo%20V.pdf>
- Pántano, V.C., Spescha, L.B., Penalba, O.C. y Murphy, G.M. 2014. Influencia de la variabilidad de temperatura y precipitación en la situación hídrica del suelo, en la región oriental de secano de la Argentina. *Meteorologica*, 39(2), 21-36.
- Parmesan, C., Root, T.L. y Willig, M.R. 2000. Impacts of extreme weather and climate on terrestrial biota. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 443-450.
- Paparotti, O. y Gvozdenovich, J. 2007. Caracterización de zonas y subzonas RIAP Entre Ríos Jorge RIAN-RIAP. Centro Regional Entre Río. Informe
- Passucci, V., Carmona, F. y Rivas, R. 2017. Identificación de zonas anegadas y no anegadas mediante técnicas de teledetección. Flooded and non-flooded areas identification by remote sensing techniques. *Environmental Studies Journal*, 5(2), 51-78.
- Pédelaborde, P. 1970. *Introduction a l'étude scientifique du climat*. Edit. Sedes, Paris, Francia.

- Penalba, O.C. y Rivera, J.A. 2016. Regional aspects of future precipitation and meteorological drought characteristics over Southern South America projected by a CMIP5 multi-model ensemble. *International Journal of Climatology*, 36(2), 974-986.
- Penalba, O.C. y Vargas, W.M. 2004. Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of Climatology*, 24(12), 1565-1580.
- Peña Gallardo, M., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y. y Esteban-Parra, M.J. 2016. Análisis comparativo de índices de sequía en Andalucía para el período 1901–2012. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42.
- Pineda Martínez, L.F., Carbajal, N. y Medina-Roldan, E. 2007. Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal component analysis (PCA). *Atmósfera*, 20(2), 133-145.
- Pita López, M. F. 2001. Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens: application au bassin du Guadalquivir (sudeste de l'Espagne). En 13e colloque de l'Association internationale de climatologie, 225-233. *Association Internationale de Climatologie*.
- Posada, J.M. y Schuur, E.A.G. 2011. Relationships among precipitation regime, nutrient availability, and carbon turnover in tropical rain forests. *Oecologia*, 165 (3), 783-795.
- Preisendorfer, R.W. 1988. *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*, Elsevier, Amsterdam.
- Quirós, R. 2005. La ecología de las lagunas de las Pampas. *Investigación y Ciencia*, 1(6), 1-13.
- Quirós, R., Boveri, M.B., Petracchi, C.A., Rennella, A.M., Rosso, J.J., Sosnovsky, A. y Von Bernard, H.T. 2006. Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas. En Tundizi, J.G., Matsumura-Tundisi, T. y Sidagis Galli, C. (Eds), *Eutrofização na América do Sul: Causas, consequências e tecnologias de gerenciamento e controle*: 1–16.
- Quirós, R., Rennella, A.M., Boveri, M.A., Rosso, J.J. y Sosnovsky, A. 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología austral*, 12(2), 175-185.

- Ramos Soto, J.C. 2011. Determinación de eventos de precipitación significativa usando análisis de conglomerados (cluster análisis) para México durante los últimos 40 años. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 128 pp.
- Ravello, A., Santa, J.A. y Irastorza, R.O. 2001. Aspectos termo-hídricos de la variabilidad agroclimática del Valle de Calamuchita, Córdoba (Argentina). *Rev. Arg. de Agrometeorología*, 1(1), 17-21.
- Raziei, T., Bordi, I. y Pereira, L.S. 2008. A precipitation-based regionalization for Western Iran and regional drought variability. *Hydrology and earth system sciences*, 12(6), 1309-1321.
- Regonda, S.K., Zaitchik, B.F., Badr, H.S. Rodell, M. 2016. Using climate regionalization to understand Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) precipitation performance for the Conterminous United States (CONUS), *Geophys. Res. Lett.* 43, 6485–6492.
- Ringuelet, R.A., Salibian, A., Claverie, E. e Ilhero, S. 1967. Limnología química de las lagunas pamasicas (provincias de Buenos Aires). *Physis*, Tomo XXVII 74: 201-221
- Rivera, J.A., Penalba, O.C. y Betolli, M.L. 2013. Inter-annual and inter-decadal variability of dry days in Argentina. *International Journal of Climatology*, 33(4), 834-842.
- Roccatagliata, J.A. 1988. La Argentina: Geografía general y los marcos regionales. Buenos Aires, Planeta, 783 pp.
- Rodríguez A.R. y De la Casa A.C. 1990. Regiones hídricas de la República Argentina. *Revista de ciencias agropecuarias*. VII: 31-40.
- Rodríguez, C.I., de Galarreta, V.R., y Kruse, E.E. 2015. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. *Journal of Cleaner Production*, 90,
- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A. y Hanson, C.E. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Climate change*, 2007, 79.
- Rossi, M.M.S., del Carmen Rollán, A.A., y Bachmeier, O.A. 2013. Disponibilidad de fósforo en el área central de la Región Pampeana Argentina. 1: Relación entre los parámetros edáficos, los procesos de adsorción y los rendimientos de trigo, soja y maíz en diferentes ambientes de suelo y de manejo del cultivo. *Spanish Journal of Soil Science*, 3(1), 1-1.

- Rotondo, V.H., y Seyler, R.A. 2001. Red agrometeorológica, mediciones y representatividad espacial para la caracterización del clima regional: un caso de estudio para el sur de Córdoba. *RADA*, I, 95-99.
- Rousseeuw, P.J. y Kaufman, L. 1990. *Finding Groups in Data: An Introduction to Clúster Analysis*. Wiley.
- Rubel, F., y Kottek, M. 2010. Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141.
- Russell, J.S. y Moore, A.W. 1976. Classification of climate by pattern analysis with Australasian and southern African data as an example. *Agricultural Meteorology*, 16(1), 45-70.
- Sáenz, C.A. y Colazo, J.C. 2015. Gestión de suelo y agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis (No. 631.4). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina).
- Saikranthi, K., Rao, T.N., Rajeevan, M. y Bhaskara Rao, S.V. 2013. Identification and validation of homogeneous rainfall zones in India using correlation analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), 304-317.
- Salathé, E.P. 2003. Comparison of various precipitation downscaling methods for the simulation of streamflow in a rainshadow river basin. *International Journal of Climatology*, 23(8), 887-901.
- Sánchez, M.L., Rodríguez, P., Torremorell, A.M., Izaguirre, I., y Pizarro, H. 2017. Phytoplankton and Periphyton Primary Production in Clear and Turbid Shallow Lakes: Influence of the Light environment on the interactions between these communities. *Wetlands*, 37(1), 67-77
- Schmidt, G. y Schröder, W. 2011. Regionalisation of climate variability used for modelling the dispersal of genetically modified oil seed rape in Northern Germany. *Ecological indicators*, 11(4), 951-963.
- Schroeder, T., Cohen, W., Song, C., Canty, M.J. y Yang, Z. 2006. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*. 103(1), 16-26.
- Scian, B. 2002. Variabilidad de las condiciones hídricas en la región semiárida pampeana Argentina. *Geoacta*, 27:30-52.

- Scian B, Labraga JC, Reimers W, Frumento O. 2006. Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa Region, Argentina, under non-ENSO conditions. *Theor. Appl. Climatol.* 85(1–2): 89–106.
- Scian, B., y Pierini, J. 2013. Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. A retrospective analysis. *Atmósfera*, 26(1), 3-26.
- Severov, D.N., Mordecki, E. y Pshennikov, V.A. 2004. SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/Southern oscillation. *Advances in Space Research*, 33(3), 343-347.
- Shahriar, F., Montazeri, M., Momeni, M. y Freidooni, A. 2015. Regionalization of the climatic areas of Qazvin province using multivariate statistical methods. *Modern Applied Science*, 9(2), 123.
- Shi, P.J., Sun, S., Wang, M. 2014. Climate change regionalization in China (1961–2010). *Science China: Earth Sciences*, 57: 2676–2689.
- Sierra, E.M., Hurtado, R.H. y Spescha, L. 1994. Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la Región Pampeana 1941-1990. *Rev. Fac. Agr*, 14(2), 139-144.
- Sierra, E., Hurtado, R., SPECHA, L., BARNATAN, I. y Messina, C. 1995. Corrimiento de las isoyetas semestrales medias decenales (1941-1990) en la Región Pampeana. *Rev. Fac. Agr*, 15(2-3), 137-143.
- Solana, M.X., Quiroz Londoño, O.M. y Martinez, D. 2016. Evolución y origen de lagunas en la Llanura Interserrana mediante el uso de trazadores y sensores remotos. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, (Catamarca, Argentina, 2016). ISBN 978-987-661-225-8
- Soltani, S., Modarres, R. y Eslamian, S.S. 2007. The use of time series modeling for the determination of rainfall climates of Iran. *International Journal of Climatology*, 27(6), 819-829.
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K., Lenney, M.P. y Macomber, S. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Enviroment*. 75(2), 230-244.
- Soriano, A. 1956. Los distritos florísticos de la Provincia Patagónica. *Revista de investigaciones agrícolas*, 10(4), 323-347.

- SRH-INA (Subsecretaría de Recursos Hídricos e Instituto Nacional del Agua). 2002. Atlas digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina. CD-ROM. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Buenos Aires.
- Stewart, I.D., Oke, T.R. y Krayenhoff, E.S. 2014. Evaluation of the 'local climate zone'scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062-1080.
- Strahler, A. y Strahler, A. 1997. *Physical Geography. Science and Systems of the Human Environment*. Wiley & Sons. Estados Unidos.
- Taboada, M. A., Damiano, F. y Lavado, R.S. 2009. Inundaciones en la Región Pampeana. Consecuencias sobre los suelos. Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidro-morfismo y las inundaciones. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 103-127.
- Tamarís-Turizo, C.E. y López-Salgado, H.J. 2006. Aproximación a la zonificación climática de la cuenca del río Gaira. *Intropica*, 3, 69.
- Tedeschi, R.G., Grimm, A.M. y Cavalcanti, I.F. 2016. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *International Journal of Climatology*, 36(15), 4797-4814.
- Teo, C.K., Koh, T.Y., Chun-Fung Lo, J. y Chandra Bhatt, B. 2011. Principal component analysis of observed and modeled diurnal rainfall in the Maritime Continent. *Journal of Climate*, 24(17), 4662-4675.
- Terzer, S., Wassenaar, L.I., Araguás-Araguás, L.J. y Aggarwal, P.K. 2013. Global isoscapes for  $[\delta] 18O$  and  $[\delta] 2H$  in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4713.
- Thomas, A. 1992. Agricultural water balance of Yunnan Province, PR China: agroclimatic zoning with a Geographical Information System. *Agricultural water management*, 21(4), 249-263.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y. C. y Hughes, L. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148.
- Torremorel, A., Bustigorry, J., Escaray, R. y Zagarese, H. 2007. Seasonal dynamics of a large, shallow lake, laguna Chascomús: The role of light limitation and other physical variables. *Limnologica*, 37: 100–108.

- Torrence, C. y Compo, G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 61-78.
- Tricart, J. L. 1973. Geomorfología de la Pampa Deprimida. INTA, Buenos Aires.
- Turner, K.W., Wolfe, B.B., Edwards, T.W., Lantz, T.C., Hall, R.I. y Larocque, G. 2014. Controls on water balance of shallow thermokarst lakes and their relations with catchment characteristics: a multi-year, landscape-scale assessment based on water isotope tracers and remote sensing in Old Crow Flats, Yukon (Canada). *Global change biology*, 20(5), 1585-1603.
- Urrutia, R. y Vuille, M. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, *J. Geophys*, 114.
- Varni, M. y Rivas, R. 2000. Análisis de la relación entre un cuerpo de agua superficial y las aguas subterráneas en la llanura pampeana, Argentina. XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, 1-13.
- Veltcheva, A. y Guedes Soares, C. 2015. Wavelets analysis of non-stationary sea waves during Hurricane Camille. *Ocean Engineering*, 95, 166-174.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J.J., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C. y Sanchez-Lorenzo, A. 2012. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27.
- Viglizzo, E.F., Lértora, F., Pordomingo, A. J., Bernardos, J. N., Roberto, Z. E. y Del Valle, H. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83:65-81.
- Vincent, L.A., Peterson, T.C., Barros, V.R., Marino, M.B., Rusticucci, M., Carrasco, G., Ramirez, E., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Berlato, M.A. 2005. Observed trends in índices of daily temperature extremes in South America. *J Climate*, 5011–5023.
- Volante, J., Mosciaro, J., Morales Poclava, M., Vale, L., Castrillo, S., Sawchik, J. y Paruelo, J. 2015. Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010: Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41 (2), 179-191.
- Von Storch, H., Langenberg, H. y Feser, F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Monthly weather review*, 128(10), 3664-3673.

- Ward, J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal American Statistical Association*. 58, 236-244.
- Wilcke, R. A. y Barring, L. 2016. Selecting regional climate scenarios for impact modelling studies. *Environmental Modelling & Software*, 78, 191-201.
- Williamson, C.E., Dodds, W., Kratz, T.K. y Palmer, M.A. 2008. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Front. Ecol. Environ.* 6: 247–254.
- Yan, L., Chen, S., Xia, J. y Lou, Y. 2014. Precipitation regime shift enhanced the rain pulse effect on soil respiration in a semi-arid steppe. *PLoS ONE* 9 (8) e104217. Doi: 10.1371/journal.pone.0104217.
- Yang, Q., Zheng, X.N. y HE, L.H. 2017. Spatial-temporal shift for major boundary of climate regionalization based on meteorological data stimulated by HadCM3 during from 1950-2059 in China. *Arid Land Geography*, 1, 003.
- Yin, D., Yin, H. y Zhang, X.D. 2011. Climate Regionalization of Wen Radix Codonopsis Planting Based on GIS in Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2, 017.
- Zhang, L., Lu, Z. y Wang, P. 2015. Efficient structural reliability analysis method based on advanced Kriging model. *Applied Mathematical Modelling*, 39(2), 781-793.
- Zhang, X. y Yan, X. 2004. Temporal change of climate zones in China in the context of climate warming. *Theor Appl Climatol*, 115: 167.
- Zhao, Q., Liu, S., Deng, L., Dong, S., Yang, J. y Wang, C. 2012. The effects of dam construction and precipitation variability on hydrologic alteration in the Lancang River Basin of southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26, 993-1011.
- Zheng J., Bian J., Ge Q., Hao Z., Yin Y. y Liao Y. 2013. The climate regionalization in China for 1981-2010. *Chinese Science Bulletin*, 58(30), 3088-3099.
- Zheng J., Yin Y. y Li B. 2010. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 65(1), 3-12.

# *A N E X O*

**Anexo 2.1. Datos utilizados de las estaciones en las clasificaciones de los Capítulos 2 al 4.**

N°	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Precipitación (mm/año)	Temperatura (°C)	Viento (km/h)	Humedad Relativa (%)
1	RECONQUISTA	-29,11	-59,42	53	1258,8	19,9	11	77
2	CERES	-29,53	-61,57	88	935,5	19,0	12	74
3	MONTE CASEROS	-30,16	-57,39	54	1458,2	19,6	10	74
4	CONCORDIA	-31,18	-58,01	38	1353,4	18,9	10	72
5	CORDOBA	-31,19	-64,13	493	856,8	17,1	11	73
6	PILAR	-31,40	-63,53	338	860,6	17,1	8	68
8	PARANA	-31,44	-60,29	87	937,4	15,3	17	72
7	SAUCE VIEJO	-31,46	-60,49	18	994,5	18,6	12	76
9	CONCEP.URUGUAY	-32,29	-58,14	25	1115,5	18,1	10	73
10	GALEGUAYCHU	-33,00	-58,37	21	1094,0	17,7	10	74
11	RIO CUARTO	-33,07	-64,14	421	843,9	16,3	16	66
12	VILLA REYNOLDS	-33,44	-65,23	486	714,7	15,7	11	68
13	PERGAMINO INTA	-33,53	-60,34	65	993,8	16,6	11	74
14	LABOULAYE	-34,08	-63,22	137	873,3	16,1	13	71
15	JUNIN	-34,33	-60,55	81	1012,9	15,9	12	74
16	BUENOS AIRES	-34,35	-58,29	25	1180,2	17,7	11	72
17	CASTELAR	-34,40	-58,40	22	1037,4	16,8	8	72
18	EZEIZA	-34,49	-58,32	20	997,2	16,5	13	74
19	LA PLATA	-34,58	-57,54	23	1019,8	15,8	15	78
20	PUNTA INDIO	-35,22	-57,17	22	951,5	16,0	15	81
21	9 DE JULIO	-35,27	-60,53	76	1018,4	16,1	11	73
22	GRAL PICO	-35,42	-63,45	145	862,6	16,2	12	69
23	PEHUAJO	-35,52	-61,54	78	1034,2	18,3	13	75
24	DOLORES	-36,21	-57,44	9	950,4	14,8	11	79
25	SANTA ROSA	-36,34	-64,16	191	706,1	15,5	12	67
26	TANDIL	-37,14	-59,15	175	925,0	13,9	15	76
27	CNEL SUAREZ	-37,28	-61,56	233	779,1	13,5	13	72
28	LAPRIDA	-37,32	-60,49	212	827,3	14,2	10	67
29	PIGUE	-37,37	-62,25	304	894,0	14,2	11	74
30	MAR DEL PLATA	-37,56	-57,35	21	937,3	13,9	17	79
31	TRES ARROYOS	-38,23	-60,16	115	816,3	14,6	13	66
32	BAHIA BLANCA	-38,44	-62,10	83	654,5	15,4	22	69
33	VIEDMA	-40,80	-63,00	7	369,4	14,5	20	61

**Tabla 2.1.** Datos medios para las estaciones del SMN utilizadas (período 1960–2010). Los números se corresponden al mapa de la Figura 2.1 (Capítulo 2).

**Anexo 3.1. Pruebas de homogeneidad en la precipitación y la temperatura del aire en cada grupo.**

<b>KMO y prueba de Bartlett</b>		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,752
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	4722,910
	gl	3
	Sig.	,000

<b>Varianza total explicada</b>						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2,972	99,081	99,081	2,972	99,081	<b>99,081</b>
2	,021	,684	99,765			
3	,007	,235	100,000			

**a).** Pruebas KMO y resultado del ACP de la Temperatura en el Grupo1.

<b>KMO y prueba de Bartlett</b>		
Medida de adecuación muestral		,718
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	807,750
	gl	3
	Sig.	,000

<b>Varianza total explicada</b>						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2,508	83,650	83,650	2,508	83,650	<b>83,650</b>
2	,279	9,325	92,975			
3	,213	7,025	100,000			

**b).** Pruebas KMO y resultado del ACP de la Precipitación en el Grupo 1.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,931
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	11303,904
	gl	15
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	5,898	98,307	98,307	5,898	98,307	98,307
2	,036	,605	98,912			
3	,027	,443	99,355			
4	,019	,318	99,673			
5	,014	,235	99,908			
6	,006	,092	100,000			

c). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Temperatura en el Grupo2.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,835
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	2176,134
	gl	15
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	4,668	77,841	77,841	4,668	77,841	77,841
2	,414	6,900	84,741	,414	6,900	84,741
3	,365	6,083	90,824	,365	6,083	90,824
4	,312	5,200	96,024			
5	,205	3,416	99,440			
6	,036	,560	100,000			

d). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Precipitación en el Grupo 2.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,906
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	10539,535
	gl	10
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	acumulado
1	4,953	99,065	99,065	4,953	99,065	99,065
2	,024	,485	99,550			
3	,013	,261	99,811			
4	,007	,136	99,947			
5	,003	,053	100,000			

e). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Temperatura en el Grupo 3.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,847
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	2225,118
	gl	10
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	3,730	74,591	74,591	3,730	74,591	74,591
2	,520	10,396	84,987			
3	,356	7,112	92,099			
4	,237	4,741	96,841			
5	,158	3,159	100,000			

f). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Precipitación en el Grupo 3.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,919
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	10960,666
	gl	10
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	4,964	99,288	99,288	4,964	99,288	99,288
2	,017	,331	99,619			
3	,011	,210	99,829			
4	,005	,105	99,933			
5	,003	,067	100,000			

g). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Temperatura en el Grupo 4.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,861
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	2819,271
	gl	10
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	3,885	77,704	77,704	3,885	77,704	77,704
2	,560	11,199	88,903	,560	11,199	88,903
3	,293	5,862	94,765	,293	5,862	94,765
4	,174	3,484	98,249			
5	,088	1,751	100,000			

h). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Precipitación en el Grupo 4.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,730
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	4414,415
	gl	3
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2,962	98,724	98,724	2,962	98,724	98,724
2	,030	1,011	99,736			
3	,008	,264	100,000			

i). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Temperatura en el Grupo 5.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,604
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado	258,536
	gl	3
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2,543	84,766	84,766	2,543	84,766	84,766
2	,368	12,266	97,032	,368	12,266	97,032
3	,089	2,968	100,000	,089	2,968	100,000

j). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Precipitación en el Grupo 5.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,947
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	10804,801
	gl	21
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6,367	90,950	90,950	6,367	90,950	90,950
2	,507	7,237	98,187			
3	,044	,627	98,815			
4	,035	,505	99,320			
5	,019	,269	99,589			
6	,017	,237	99,826			
7	,012	,174	100,000			

k). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Temperatura en el Grupo 6.

KMO y prueba de Bartlett		
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,866
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	2335,840
	gl	21
	Sig.	,000

Varianza total explicada						
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	4,668	77,841	77,841	4,668	77,841	77,841
2	,414	6,900	84,741			
3	,365	6,083	90,824			
4	,312	5,200	96,024			
5	,205	3,416	99,440			
6	,036	,560	100,000			

L). Pruebas KMO y resultado del ACP de la Precipitación en el Grupo 6.

### Anexo 4.1. Características de la dirección del viento decádica en las estaciones estudiadas.

	1960-1970			1971-1980			1981-1990			1991-2000			2001-2010		
	Dirección de mayor frecuencia	Estación	Frecuencia (escala de 1000)	Dirección de mayor frecuencia	Estación	Frecuencia (escala de 1000)	Dirección de mayor frecuencia	Estación	Frecuencia (escala de 1000)	Dirección de mayor frecuencia	Estación	Frecuencia (escala de 1000)	Dirección de mayor frecuencia	Estación	Frecuencia (escala de 1000)
9 DE JULIO	N - NE	todas - pri	179-135	N - NE	todas - pri	151-142	NE - N	todas - ver	162-149	NE - SE	todas	209-157	NE - N	todas - ver	175-131
BAHIA BLANCA	N - NW	todas - oto	239-153	NW - W	inv - ver	224-136	N - NW	todas - inv	241-172	NE - N	todas - ver	341-104	NW - N	todas	355-107
BUENOS AIRES	NE - N	ver - todas	185-137	N - NE	todas - pri	177-141	NE - S	todas - pri	199-134	NE - SE	ver - ver	199-128	NE - N	todas	183-154
CASTELAR	N - E	ver - pri	159-145	N - S	ver - pri	170-151	NE - E	pri - todas	152-139	NE - S	ver - pri	150 -125	NE - E	ver - pri	165-151
CERES	NE - S	oto - pri	211-170	NE - S	pri - ver	195-177	S - N	inv - pri	237-184	S - N	inv - todas	229-155	S - E	inv - ver	224-146
CONEL SUAREZ	N - SE	ver - pri	109-77	N - W	pri - ver	123-71	N - NW	ver - inv	141-98	N - NW	ver - inv	121-108	N - W	pri - ver	133-110
CONCEP.URUGUAY	SE - NE	pri - ver	201-186	SE - NE	pri - ver	215-203	NE - SE	todas - pri	196-194	NE - SE	todas - pri	174-150	NE - SE	pri - ver	208-118
CONCORDIA	S - E	pri - pri	166-147	SE - NE	ver - ver	215-203	S - N	todas - inv	149-147	S - SE	todas	153-126	NE - S	ver - todas	127-127
CORDOBA	N - NE	todas - pri	209-164	N - NE	oto - pri	201-169	N - NE	oto - ver	210-175	N - NE	todas	211-205	N - NE	todas	248-161
DOLORES	N - NE	todas - ver	152-149	N - NE	todas - pri	168-129	N - S	ver - pri	171-149	NE - N	todas - ver	153-119	NE - N	ver	153-104
EZEIZA	NE - N	ver - pri	138-122	NE - N	ver - todas	162-126	NE - E	pri - ver	169-156	NE - E	todas - ver	175-124	NE - SE	todas - ver	221-127
GRAL PICO	N - NE	todas - pri	156-126	N - NE	todas - pri	217-191	NE - N	pri - ver	169-155	NE - N	pri - ver	152-136	N - NE	ver	194-151
GUALEGUAYCHU	NE - SW	todas - pri	235-132	S - NE	todas	126-124	NE - E	inv - ver	124-119	NE - SE	todas	178-118	NE - SE	todas	170-116
JUNIN	N - E	todas - pri	183-151	N - NE	todas - pri	164-140	NE - N	todas - ver	152-147	NE - N	todas	172-132	NE - N	todas	177-134
LA PLATA	E - NE	pri - ver	166-158	E - N	pri - ver	152-136	E - NE	pri - ver	144-116	E - NE	ver - ver	140-117	E - NE	ver	175-133
LABOULAYE	N - E	todas - pri	404-193	N - S	todas - pri	340-187	N - S	todas - pri	297-159	N - NE	todas - ver	198-166	NE - N	ver - todas	206-172
LAPRIDA	N - NE	todas - pri	250-160	N - S	pri - ver	451-240	N - NE	pri - ver	141-98	N - NE	todas - pri	210-163	N - NE	todas - pri	250-180
MAR DEL PLATA	NW - N	oto - inv	178-121	N - NW	todas - pri	140-111	N - W	ver - inv	180-170	NW - N	todas	219-125	NW - SW	todas	202-130
MONTE CASEROS	E - S	ver - inv	233-183	E - S	ver - pri	270-178	E - S	todas - inv	239-191	E - S	pri - ver	183-137	E - S	ver - todas	140-139
PARANA	N - E	Inv - ver	172-167	NE - SE	todas - ver	287-203	NE - E	todas - ver	232-171	S - NE	todas	180-158	SE - NE	todas	164-149
PEHUAIJO	N-NE	todas - pri	226-145	N - E	todas - pri	205-111	N - E	todas - pri	191-118	N-NE	todas - pri	215-101	N - NE	ver	220-137
PERGAMINO INTA	N - NE	oto - todas	180-172	E - N	ver - todas	226-225	E - N	pri - ver	224-179	N - NE	pri - ver	201-150	E - NE	ver	224-110
PIGUE	S - N	inv - ver	131-126	S - N	todas - pri	128-114	E - NE	inv - pri	130-101	E - N	todas - ver	146-111	E - N	todas	185-126
PILAR	S - NE	inv - ver	216-210	N - S	todas - pri	279-209	N - S	todas - inv	329-192	N - S	todas	251-175	N - S	todas	276-213
PUNTA INDIO	NE - N	ver - pri	149-146	E - N	pri - ver	126-124	E - N	ver - todas	131-130	E - N	ver - todas	150-145	E - N	ver	175-163
RECONQUISTA	E - SE	pri - oto	226-223	E-SE	pri - ver	206-162	SE - NE	pri - ver	271-232	NE - SE	ver - todas	219-175	NE - SE	todas	206-186
RIO CUARTO	N - NE	todas - pri	331-181	N - NE	todas - pri	323-137	N - NE	todas - pri	291-191	N - NE	todas	339-165	N - NE	todas	387-144
SANTA ROSA	N - NE	todas - pri	195-132	N - S	todas - pri	248-124	N - S	ver - ver	291-141	N - NE	todas	200-182	N - NE	todas - ver	277-135
SAUCE VIEJO	NE - S	Inv - pri	157-154	SE - NE	todas - ver	132-111	S - NE	inv - pri	124-113	NE - S	ver - ver	133-125	NE - S	ver - ver	141-116
TANDIL	NE - N	pri - ver	92-81	S - N	pri - ver	116-91	E - N	pri - ver	145-144	N - S	todas	125-124	S - SW	todas	130-129
TRES ARROYOS	NW - N	oto - onv	241-221	NW - N	inv - todas	247-177	N - NW	todas - ver	228-202	N - NW	ver - todas	286-175	N - NW	todas	313-153
VEDMA	W - N	oto - inv	196-188	NW - N	inv - todas	151-130	NW - W	inv - inv	202-168	NW - SW	ver - todas	294-113	NW - N	todas	260-161
VILLA REYNOLDS	E - N	pri - inv	186-140	E - N	pri - ver	144-93	E - NE	pri - ver	136-128	NE - E	todas	144-122	NE - E	ver - todas	172-152

**Tabla 4.1.** Dirección de viento, sus frecuencias en escala de 1000 y estacionalidad de las mismas medias decádicas para el período 1960-2010 (Ver: verano, inv: invierno, oto: otoño; pri: primavera, todas: las cuatro estaciones).

**Anexo Tabla 6.1. Dinámica espacio temporal en lagunas pampeanas.**

SUBREGION	Path - Row	Imágenes utilizadas
1	226-081	LT52260812002034COA00 LT52260812003007COA00 LT522608120060424L1TP LT52260812008013COA02 LT52260812009013COA02
2	227-082	LT52270822002328CUB00 LT52270822003006COA00 LT522708220060415 L1TP LT52270822008047COA01 LT52270822009047COA01
3	227-084	LT52270842002336XXX02 LT52270842003014COA00 LT5227084_20060821 L1TP LT52270842008047CUB00 LT52270842009047CUB00
4	224-085	LT52240852002363XXX02 LT52240852003051CUB00 LT0522908420060819L1TP LT52240852008036COA00 LT52240852009036COA00
5	229-084	LT52290842002002CUB00 LT52290842003007COA00 LT0522708620060311L1TP LT52290842008024CUB00 LT52290842009024CUB00
6	228-085	LT52280812002002CUB00 LT52280812003024CUB00 LT0522408520060205 L1TP LT52280812008007COA00 LT52280812009007COA00
7	227-086	LT52270862002002CUB00 LT52270862003024CUB00 LT0522708720061211 L1TP LT52270862008007COA00 LT52270862009007COA00
8	227-087	LT52270872002002CUB00 LT52270872003024CUB00 LT0522808520061015 L1TP LT52270872008007COA00 LT52270872009007COA00

**Tabla 6.1.** Imágenes satelitales analizadas para el estudio de la respuesta espacial de las lagunas. Los números de región se corresponden a los de la Figura 6.1.

## Anexo 6.2. Correcciones geométricas y radiométricas a las imágenes Landsat TM.

Inicialmente se realizó la corrección geométrica de las imágenes con la técnica de puntos de control (Carmona *et al.*, 2011), considerando puntos estratégicos seleccionados equidistantemente entre sí. Posteriormente se realizó la calibración radiométrica, la cual se le aplica a las imágenes para convertir los valores digitales a valores de radiancia ( $L_{\text{sat}}$ ) por medio de

$$L_{\text{sat}} = G_{\lambda}ND_{\lambda} + B_{\lambda} \quad (1)$$

donde el subíndice  $\lambda$  indica el número de la banda,  $G_{\lambda}$  (Gain) y  $B_{\lambda}$  (Biase) son los coeficientes de transformación de niveles digitales a valores de radiancia. En las bandas 1, 2, 3 y 4 los  $L_{\text{sat}}$  se convierten a valores de reflectividad al tope de la atmósfera sin considerar los efectos de la atmósfera y considerando una superficie lambertiana bajo condiciones libres de nubes (Carmona *et al.*, 2011). Para las bandas 5 y 7 de los sensores del LANDSAT 5 TM, la atmósfera no introduce efectos significativos por lo que puede estimarse la reflectividad a partir de la ecuación de Carmona *et al.*, (2011). Para las bandas del visible e IRC (bandas 1-4 de LANDSAT 5), los efectos atmosféricos de dispersión no pueden despreciarse y por ello se estima teniendo en cuenta la siguiente ecuación (Schroeder *et al.*, 2006):

$$\rho_{\lambda S} = \frac{[\pi(L_{\lambda \text{sat}} - L_{\lambda p})]}{(T_{\lambda v}(E_{\lambda 0}d^{-2}\cos\theta_z T_{\lambda z} + E_{\text{down}}))} \quad (2)$$

donde  $L_{\lambda p}$  ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) es la radiancia registrada como resultado de la interacción entre la radiación electromagnética y los componentes atmosféricos,  $T_{\lambda v}$  es la trasmisividad atmosférica desde la superficie hacia el sensor,  $T_{\lambda z}$  es la trasmisividad atmosférica en la dirección de la iluminación solar y  $E_{\text{down}}$  es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ).

Para calcular los parámetros ( $L_{\lambda p}$ ,  $T_{\lambda v}$ ,  $T_{\lambda z}$  y  $E_{\text{down}}$ ) se aplicó el método de Resta de Superficies Oscuras (Song *et al.*, 2001). El mismo supone que en la imagen se encuentran ciertos píxeles con una reflectividad cercana a cero (zonas oscuras) como lo son las aguas claras o profundas, zonas altamente forestadas o regiones de sombras. En estos píxeles fue posible observar los efectos de la atmósfera (Carmona *et al.*, 2011). De esta manera, se sustrajo a cada  $L_{\text{sat}}$  el valor de  $L_{\lambda p}$  introducido por la atmósfera, para ello se aplicó la siguiente expresión (Schroeder *et al.*, 2006):

$$L_{\lambda p} = ND_{\lambda \text{dark}} G_{\lambda} + B_{\lambda} - 0.01 \frac{(E_{\lambda 0} \cos \theta_z T_{\lambda z} T_{\lambda y})}{(d^2 \pi)} \quad (3)$$

donde  $ND_{\text{dark}}$  es el  $ND_{\lambda}$  mínimo en cada banda espectral para cada sector de interés (de al menos 1000 píxeles) seleccionado. El método supone una atmósfera Rayleigh sin aerosoles y una reflectividad en superficie del 1 % para el objeto oscuro (Carmona *et al.* 2011).  $T_{\lambda v}$ , y  $T_{\lambda z}$  se calcularon a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T_{\lambda v} = \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda s}}{\cos \theta_v}\right) \quad (4)$$

$$T_{\lambda z} = \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda r}}{\cos \theta_z}\right) \quad (5)$$

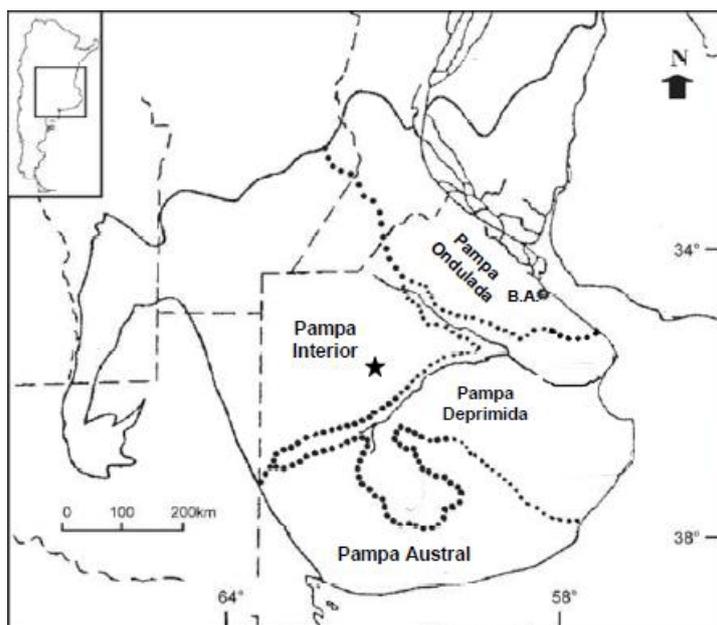
siendo  $\tau_{\lambda r}$  el espesor óptico para la dispersión Rayleigh obtenido por medio de la siguiente ecuación (Carmona *et al.*, 2011):

$$T_{\lambda r} = \frac{0.008569}{(\lambda_m^4 (1 + 0.0113 \lambda_m^2 + 0.0013 \lambda_m^4))} \quad (6)$$

donde  $\lambda_{ef}$  (en  $\mu\text{m}$ ) es la longitud de onda efectiva de onda de cada banda,  $E_{\lambda \text{down}}$  fue considerado un parámetro nulo debido a que su contribución es insignificante (Song *et al.* 2001).

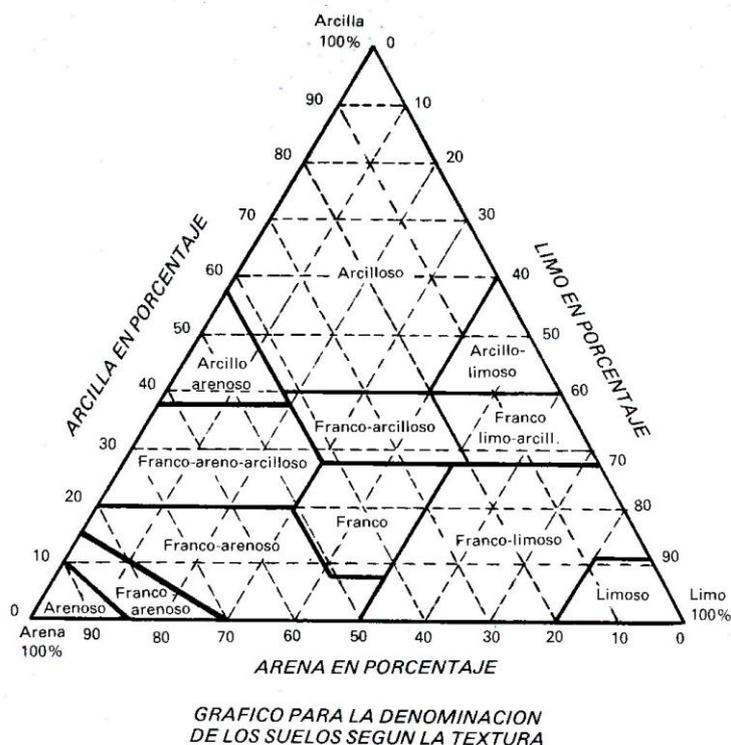
Se seleccionaron Regiones de Interés (ROI) para obtener el valor medio de reflectividad, con lo que fue posible graficar las curvas espectrales para cada una de las imágenes seleccionadas en función de su longitud de onda. Para su elaboración se utilizaron las bandas 1-4, las bandas pertenecientes al sector del Infrarrojo Medio (IM, bandas 5 y 7) se desestimaron debido a que no contribuyen a la caracterización espectral dada la absorción de energía provocada por los cuerpos de agua (Carmona *et al.*, 2011).

### Anexo 6.3. Regiones ambientales pampeanas



Límite de los pastizales pampeanos y sus subregiones (León et al., 1979).

### Anexo 6.4. Triángulo de textura de suelos



Clasificación del triángulo textural del departamento de agricultura de los EEUU (USDA).