



Tendencias y anomalías termo-pluviométricas actuales y futuras de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana Argentina: un análisis orientado a reducir los impactos socio-ambientales

Current and future thermo-pluviometric trends and anomalies of a basin of the Pampas: an analysis aimed at reducing socio-environmental impacts

Brendel, Andrea Soledad

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-Instituto Argentino de Oceanografía (IADO)-Universidad Nacional del Sur (UNS). Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS). andreabrendeluns@gmail.com; asbrendel@iado-conicet-gov.ar

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar las tendencias y anomalías termo-pluviométricas actuales y futuras de la cuenca hidrográfica del río Sauce Grande, localizada en el sur de la Región Pampeana (Argentina). Se utilizó información de precipitación y temperatura in situ y modelada. En este trabajo, se identificaron cuatro períodos de estudio: pasado (1980-1999), presente (2000-2019), futuro cercano (2020-2039) y futuro lejano (2080-2099). La información futura fue considerada teniendo en cuenta dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (RCP 4.5 y 8.5). En cada uno de los períodos analizados, se aplicó un test de Fisher para comparar la diferencia en los valores medios y, además, se calculó la tendencia y las anomalías interanuales de precipitación y temperatura. El área de estudio presentó señales de calentamiento atmosférico hacia el futuro, que fue de mayor magnitud en el futuro lejano bajo el escenario más extremo (RCP 8.5), como así también un aumento de la precipitación durante ese mismo período. Los resultados encontrados en esta investigación constituyen una base de datos fundamental para el diseño de medidas de adaptación y mitigación, orientadas a reducir los posibles impactos sobre las economías regionales, la población y el ambiente.

ABSTRACT

The present study aimed at analyzing the trends and anomalies current and future thermal and rainfall variability, in the Sauce Grande river basin, located in the south of Pampas. In situ and modeled precipitation and temperature information were used. In this work, four study periods were identified as past (1980-1999), present (2000-2019), near future (2020-2039), and far future (2080-2099). The future information was considered in two Representative Concentration Pathways (RCP 4.5 and 8.5). In each of the analyzed periods, a Fisher test was applied to compare the difference in the mean values and in the interannual precipitation and temperature. Moreover, temperature anomalies were calculated. The study area presented signs of global warming towards the future, which was of greater magnitude in the far future under the most extreme scenario (RCP 8.5) and an increase in precipitation during that same period. The results found in this research constitute a central database for the design of adaptation and mitigation measures aimed at reducing possible impacts on regional economies, the population and the environment.

Palabras Claves:

Cuenca del río Sauce Grande
Modelos climáticos
Gases de efecto invernadero
Actividades agropecuarias
Tendencia

Keywords:

Sauce Grande river basin
climate models
greenhouse gases
agricultural activities
trend

Recibido: 14/07/2020

Aceptado: 23/09/2020

1. Introducción

El clima es un sistema forzado, disipativo, no lineal, complejo y heterogéneo que está fuera del equilibrio termodinámico. Presenta una variabilidad natural, tanto en el tiempo como en el espacio, y está sujeto a forzamientos externos naturales como antropogénicos (Ghil y Lucarini, 2020). Los estudios climáticos de una región consideran diferentes escalas espaciales y temporales. Éstas van a definir las variables meteorológicas dominantes a partir de sus distintos niveles de resolución espacial (Capelli de Steffens *et al.*, 2006; Ferrelli, 2016). Las escalas espaciales constituyen una de las herramientas más importantes para comprender las variaciones naturales del clima, mientras que las temporales permiten analizar los cambios originados desde los paleoclimas (millones de años) hasta las escalas atmosféricas que generan modificaciones en períodos de, por ejemplo, décadas, años y horas (Poveda, 2004).

El clima evoluciona en el tiempo como consecuencia de factores externos al mismo, como, por ejemplo, la latitud, la altitud, la distancia al mar, el relieve, la dirección de los vientos y las corrientes oceánicas. Estos factores y sus variaciones en el tiempo producen cambios en los elementos del clima, como la temperatura, la presión atmosférica, los vientos, la humedad atmosférica y las precipitaciones (Useros Fernández, 2012). La variabilidad climática depende de numerosos factores, dado que es producto de eventos meteorológicos que se producen en diferentes escalas espaciales y temporales (décadas, años, estaciones). Es una fluctuación a corto plazo dentro de un cambio climático de mayor duración (Houghton, 2002). En América del Sur, uno de los fenómenos determinantes de variabilidad climática interanual es el fenómeno “El Niño Oscilación Sur” (ENOS) (Grimm, 2011). El mismo tiene impacto, por ejemplo, sobre las precipitaciones de la Región Pampeana, Argentina. Durante la fase negativa del ENOS (El Niño), las precipitaciones aumentan, mientras que durante la positiva (La Niña) se producen extensos períodos de sequía (Aliaga *et al.*, 2017).

Los parámetros más utilizados en el estudio de la variabilidad climática actual y futura son la temperatura y la precipitación (Aliaga *et al.*, 2016; Sharma *et al.*, 2016; Ongoma y Chen, 2017). Durante los últimos 50 años, estas variables han presentado rápidas modificaciones, por lo cual son objeto de estudio de numerosas investigaciones (Chen *et al.*, 2018). A escala mundial, la temperatura aumentó 0,8 °C durante 1880-2012 (Panel Intergubernamental del Cambio Climático, IPCC, 2013). En Argentina, el aumento encontrado durante el período 1960-2010 fue de hasta 0,5 °C en la mayor parte del territorio, excepto en la Patagonia, donde el aumento superó 1 °C (IPCC, 2013). En el caso de las precipitaciones, la tendencia es positiva en la mayor parte del mundo, pero su patrón de distribución espacial es más complejo en comparación con lo que ocurre con la temperatura (Chen *et al.*, 2018). En nuestro país, la precipitación aumentó en casi todo su territorio durante el período 1960-2010. El estudio de los cambios termo-pluviométricos es fundamental debido a los impactos que generan sobre la actividad agrícola, la salud humana, la disponibilidad de nutrientes y carbono, la estabilidad política regional, las coberturas del suelo, entre otros (Yan *et al.*, 2014; Ferrelli, 2017; Chen *et al.*, 2018). En las cuencas hidrográficas localizadas sobre la Región Pampeana, las actividades relacionadas con la agricultura, como el riego, la fertilización o la selección del sitio de cultivo se ven altamente afectadas por variaciones en la precipitación y la temperatura (Fernández-Long *et al.*, 2013; Brendel *et al.*, 2019). Además, generan impacto sobre la accesibilidad al agua potable, la provisión de energía, el desplazamiento y pérdidas de animales y recursos pesqueros, entre otros (Houghton, 1993; Ferrelli, 2017). La importante alternancia de eventos secos y húmedos que presenta la Región Pampeana, ocasiona frecuentemente cambios significativos en el caudal de los ríos y en los servicios ecosistémicos que brindan las cuencas hidrográficas (Palmer *et al.*, 2008; Brendel, 2020). Por otro lado, el aumento de la temperatura afecta la floración y el ciclo de los cultivos y, como consecuencia, se reducen los rendimientos (Fernández-Long *et al.*, 2013). Dependiendo de la extensión de las cuencas hídricas, estas pueden presentar diferentes respuestas a la variabilidad térmica y pluviométrica, y si a ello se le suma que pueden formar parte de varias unidades administrativas (partidos, municipios), provincias o países, las consecuencias en las diversas comunidades involucradas pueden ser diferentes.

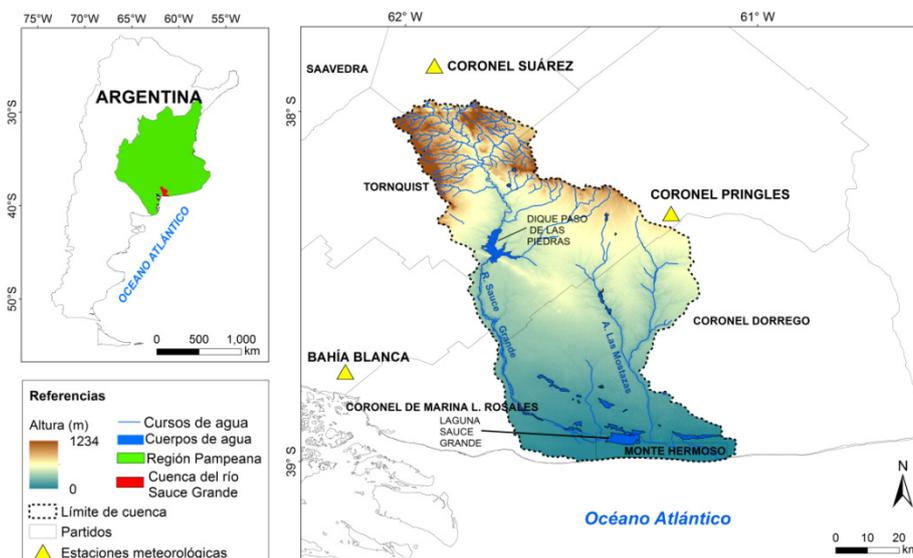
El calentamiento global, principal causa del cambio climático, ha ocasionado el incremento de la temperatura atmosférica impulsada por la emisión de gases de efecto invernadero (Padhiary *et al.*, 2018). Como consecuencia, se han registrado cambios en el régimen y la intensidad de las precipitaciones en gran parte de las cuencas hidrográficas del mundo debido a la mayor disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera resultante del aumento de la temperatura (Bekele *et al.*, 2017; Muthuwatta *et al.*, 2018). Según el IPCC (2013), las precipitaciones se incrementarán en el futuro, aún en aquellas regiones en donde este parámetro no ha presentado cambios significativos. Por lo tanto, el análisis de la tendencia de la precipitación y temperatura actual y futura es fundamental dado que podría afectar la disponibilidad de agua necesaria para la producción agrícola (Worku *et al.*, 2019), aumentar la escorrentía superficial de las cuencas (Tan *et al.*, 2017), intervenir en la capacidad de infiltración, la disponibilidad de nutrientes y el suministro de los servicios ecosistémicos (Yan *et al.*, 2014), entre otros.

El área de estudio es la cuenca hidrográfica del río Sauce Grande (4856 km²) localizada al sur de la Región Pampeana, Argentina (Figura 1). En numerosas ocasiones, la variabilidad termo-pluviométrica genera una drástica reducción de los rendimientos agrícolas (Brendel *et al.*, 2019), modifica la calidad del agua de sus recursos hídricos (Alfonso *et al.*, 2018), limita la disponibilidad de agua potable para la población (Casado y Campo, 2019), produce pérdidas humanas y económicas por crecidas de los ríos (Volonté, 2018; Brendel, 2020), entre otros. Son escasas las investigaciones sobre las tendencias y anomalías termo-pluviométricas actuales de la cuenca. Además, no se han realizado estudios que analicen las proyecciones térmicas y pluviométricas futuras bajo diferentes escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue analizar las tendencias y anomalías termo-pluviométricas actuales y futuras de la cuenca hidrográfica del río Sauce Grande, localizada en el sur de la Región Pampeana (Argentina). Los resultados encontrados constituyen un aporte fundamental para los productores agropecuarios y los tomadores de decisión, dado que sirven de base para el diseño de medidas de mitigación y adaptación, destinadas a garantizar la permanencia de las actividades agropecuarias y mejorar la calidad de la población y el ambiente.

2. Area de estudio

La cuenca del río Sauce Grande es exorreica y está compuesta por el río homónimo, que nace en el sistema serrano de Ventania (1243 msnm) y desemboca en el Océano Atlántico (Figura 1). Presenta dos cuerpos de agua importantes para la región: el dique Paso de Las Piedras y la laguna Sauce Grande (Figura 1). El primero, constituye la principal fuente de agua potable para las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta, abasteciendo a más de 500.000 habitantes, como así también es fuente de agua cruda para el polo industrial cercano (Casado *et al.*, 2016). Por su parte, la laguna Sauce Grande tiene como principal atractivo turístico la pesca deportiva del pejerrey, los deportes náuticos y el avistaje de aves (Arnaudo y Corbella, 2013). Los períodos secos y húmedos son frecuentes y constituyen uno de los fenómenos de mayor impacto sobre la actividad agrícola, la población y el ambiente (Aliaga *et al.*, 2017; Brendel, 2020). La principal actividad económica de la cuenca es la agricultura de secano con rotación de cultivos y pastoreo de ganado en pastizales naturales o semi-naturales. El trigo es el principal cultivo, seguido de la cebada y avena (Brendel *et al.*, 2019).

Figura 1. Localización de la cuenca del río Sauce Grande y de las estaciones meteorológicas utilizadas.



Fuente: elaboración propia.

3. Materiales y métodos

3.1. Datos *in situ*

Para el estudio de la variabilidad térmica y pluviométrica actual de la cuenca del río Sauce Grande, se utilizaron datos meteorológicos anuales de precipitación (mm) y temperatura (°C) de tres

estaciones: Coronel Suárez, Coronel Pringles y Bahía Blanca durante dos períodos de 20 años de extensión (Figura 1). Uno se denominó pasado (1980-1999) y el otro presente (2000-2019). Los datos fueron cedidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Si bien las estaciones meteorológicas no se encuentran dentro del límite hidrográfico de la cuenca, ellas se seleccionaron dado que son las más próximas y presentan los períodos más extensos de datos. De esta manera, Coronel Suárez se utilizó para caracterizar el sector norte, mientras que Coronel Pringles y Bahía Blanca para caracterizar el sector centro y sur, respectivamente (Figura 1).

Inicialmente, se aplicó una prueba de calidad y homogeneidad de los datos meteorológicos. Para realizar la prueba de calidad se utilizó el software estadístico R, aplicando el paquete RclimDex (Zhang y Yang, 2013), mientras que la homogeneidad se probó con el paquete RHTest V4 (Wang et al., 2010). La aplicación de ambos permitió calcular el porcentaje de información perdida y el número de valores atípicos. En las estaciones utilizadas estos fueron inferiores al 5 y al 0,5 %, respectivamente. Posteriormente, se aplicó un Análisis de Componentes Principales con el objetivo de rellenar las series y generar un nuevo set de datos derivado de la combinación de variables, capturando la mayor varianza observada en la serie original (Taylor et al., 2013; Ferrelli et al., 2019).

3.2. Datos modelados

Para analizar la variabilidad climática futura, se utilizaron datos de precipitación y temperatura provistos por el modelo global CCSM4 (Community Climate System Model 4) perteneciente a Centro Nacional de Estudios de la Atmósfera (NCAR, Estados Unidos). Los mismos fueron obtenidos de la página del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera de Argentina (CIMA - <http://3cn.cima.fcen.uba.ar>), seleccionando el punto de la grilla más próximo a cada estación meteorológica *in situ* (Figura 1). La selección del CCSM4, se basó considerando un estudio de validación de 24 modelos climáticos realizado por el CIMA en el marco de los estudios de base para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. El índice de validación propuesto por el CIMA oscila entre 0 y 1, donde los valores cercanos a cero corresponden a un ajuste bajo y los próximos a 1 indican buen ajuste. El modelo CCSM4 presentó un valor de 0,91 lo que indica que, del total de 24 modelos, es el más preciso para representar las condiciones hídricas y térmicas futuras de la Región Pampeana (Maenza et al., 2017; Rolla et al., 2018; Rolla et al., 2019; Ferrelli et al., 2020).

Las series de precipitación y temperatura fueron analizadas en dos períodos de tiempo. Uno se denominó futuro cercano (2020-2039) y el otro futuro lejano (2080-2099). Además, ambas series de tiempo se obtuvieron para dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (RCP – Representative Concentration Pathways, por sus siglas en inglés), contabilizando un total de cuatro series de tiempo. Por un lado, el RCP 4.5 corresponde a un escenario de mitigación que estabiliza el forzamiento radiativo en 4.5 W/m², mientras que el RCP 8.5 indica un escenario con emisiones de efecto invernadero muy elevadas con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m². Las cuatro series de tiempo fueron corregidas aplicando una corrección Bias. La misma tiene como objetivo cuantificar las diferencias entre los datos provistos por el modelo y los registrados *in situ* (Baimoung et al., 2014). Para ello, se utilizó el período de referencia (1960-2010) proporcionado por el modelo CCSM4.

3.3. Análisis estadístico de la información meteorológica

Las series de tiempo se subdividieron en períodos de 20 años con el objetivo de poder compararlas entre sí. Los mismos fueron: i) pasado (1980-1999), ii) presente (2000-2019), iii) futuro cercano RCP 4.5 (2020-2039), iv) futuro cercano RCP 8.5 (2020-2039), v) futuro lejano RCP 4.5 (2080-2099) y vi) futuro lejano RCP 8.5 (2080-2099). En el caso de la estación Coronel Pringles, el total de períodos fueron cinco, dado que no se contó con información provista para el pasado. Para demostrar si el valor medio de temperatura y precipitación de los diferentes períodos analizados se modificó, se aplicó el test de Fisher (1915), considerando un $\alpha < 0,05$. Para ello, se consideraron las seis series de tiempo en el caso de Coronel Suárez y Bahía Blanca y cinco, en el caso de Coronel Pringles (Figura 1).

Posteriormente, se calculó la tendencia de la precipitación y la temperatura anual utilizando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall 1975) en cada período de estudio. La utilización del test de Mann-Kendall para una serie de n datos independientes e idénticamente distribuidos supone que la hipótesis nula no debe ser rechazada. La hipótesis nula (H_0) y alterna (H_a) para cada una de las estaciones de análisis son: H_0 : no se presenta una tendencia lineal en la serie; H_a : hay una tendencia lineal en la serie. La prueba de Mann Kendall se mide con el estadístico Tau-b de Kendall. Si dicho valor es positivo, entonces

la serie presenta una tendencia positiva y si ese valor es negativo, la serie posee una tendencia negativa. La tendencia es estadísticamente significativa si el valor de p es $< 0,05$. Esta metodología fue aplicada con el software R Studio mediante la utilización del paquete Trend (Pohlert, 2017) ampliamente utilizado en estudios climatológicos (Brendel *et al.*, 2017; Shrestha *et al.*, 2017; Ferrelli *et al.*, 2019). Por último, se calcularon las anomalías anuales de precipitación y temperatura en el norte, centro y sur del área de estudio. Para ello, se realizó la diferencia entre el valor anual de la variable registrada y el valor medio del período de estudio.

4. Resultados

4.1. Análisis de la temperatura

La temperatura media del área de estudio y su desvío estándar en los diferentes períodos analizados, se presenta en la [Tabla 1](#), mientras que la comparación estadística de los valores medios resultantes del test de Fisher, en la [Tabla 2](#). El área de estudio se caracterizó por presentar un gradiente regional creciente en sentido N-S, considerando el período presente, dado que fue $13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el norte, $14,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro y $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sur ([Tabla 1](#)). Además, se observó que la temperatura media aumentó paulatinamente hacia el futuro en las tres estaciones meteorológicas ([Tabla 1](#)). Los períodos donde el valor medio de temperatura fue estadísticamente diferente fueron el pasado, el presente y el futuro lejano bajo los dos escenarios de concentración de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5) ([Tabla 2](#)). En todos los casos descritos, se encontró una significancia estadística alta (estadígrafo de Fisher $< 0,001$), considerando un α del 5%. Es importante destacar que la temperatura media presentó una diferencia de $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el norte, $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro y de $+3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sur, entre el pasado y el futuro lejano RCP 8.5 ([Tabla 1](#)).

Tabla 1. Temperatura media y su desvío estándar en los diferentes períodos considerados.

	Pasado	Presente	Futuro cercano RCP 4.5	Futuro cercano RCP 8.5	Futuro lejano RCP 4.5	Futuro lejano RCP 8.5
Norte	$13,5 \pm 0,4$	$13,9 \pm 0,6$	$15,3 \pm 0,4$	$15,4 \pm 0,4$	$16 \pm 0,6$	$17,5 \pm 0,4$
Centro		$14,1 \pm 0,4$	$15,6 \pm 0,4$	$15,5 \pm 0,4$	$16,1 \pm 0,5$	$17,6 \pm 0,4$
Sur	$15,4 \pm 0,4$	$15,6 \pm 0,4$	$17 \pm 0,4$	$17,1 \pm 0,4$	$17,6 \pm 0,5$	$19,3 \pm 0,4$

Fuente: elaboración propia.

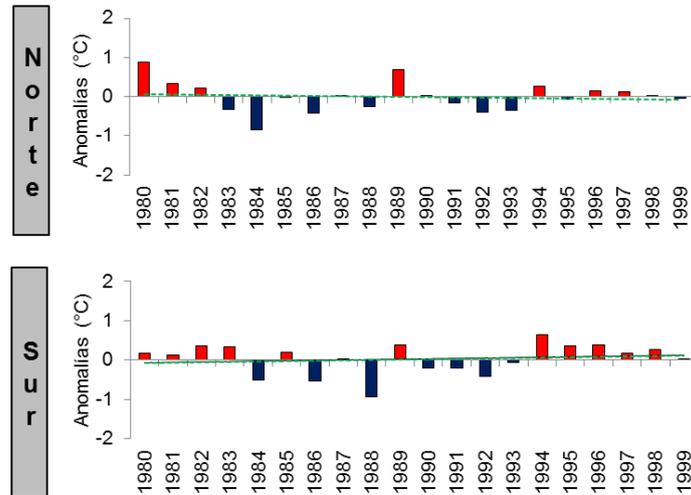
Tabla 2. Resultado del test de Fisher ($\alpha < 0,05$) aplicado a la temperatura media de las tres estaciones meteorológicas en los diferentes períodos analizados. Las letras indican la semejanza en el valor medio de los períodos estudiados.

	Pasado	Presente	Futuro cercano RCP 4.5	Futuro cercano RCP 8.5	Futuro lejano RCP 4.5	Futuro lejano RCP 8.5
Norte	a	b	c	c	d	e
Centro	-----	a	b	b	c	d
Sur	a	b	c	c	d	e

Fuente: elaboración propia.

Durante el pasado (1980-1999), la tendencia en el norte fue negativa ($-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/20$ años analizados) pero sin evidencia estadística ($p = 0,87$), mientras que en el sur, la tendencia fue positiva y estadísticamente significativa ($+0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/20$ años, $p = 0,042$). En general, el comportamiento interanual de las anomalías fue similar en el norte y el sur ([Figura 2](#)). Sin embargo, el valor extremo fue detectado en años diferentes. En el norte, el año 1984 fue el que registró el valor más extremo de anomalías negativas ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que en el sur ocurrió en 1988 ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) ([Figura 2](#)). En el caso de las positivas, la de mayor magnitud ocurrió en 1980 en el norte ($+0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) y en 1994 en el sur ($+0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) ([Figura 2](#)).

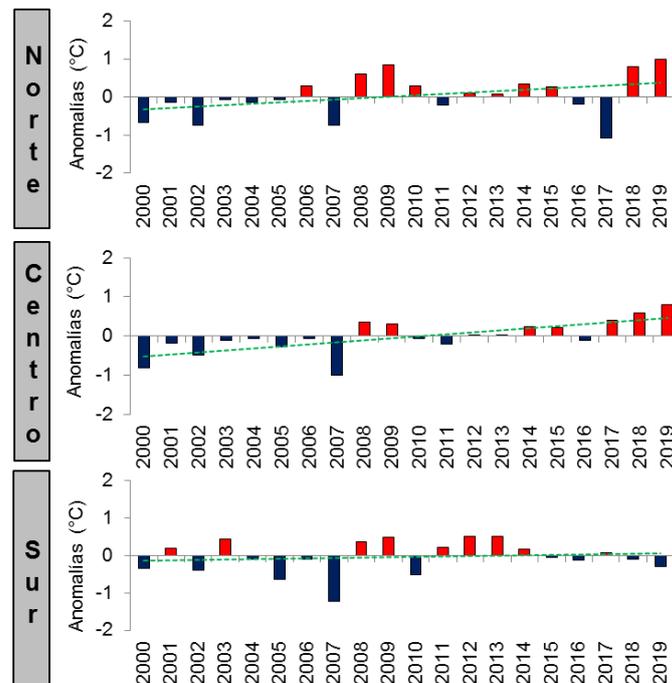
Figura 2. Comportamiento interanual de las anomalías de temperatura y su tendencia durante el pasado (1980-1999) en el norte y el sur del área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

En el presente (2000-2019), las tres estaciones meteorológicas mostraron una tendencia positiva y estadísticamente significativa (Figura 3). Durante este período el incremento fue mayor en el centro (+1 °C durante los 20 años) y de +0,8 y +0,6 °C en el norte y sur, respectivamente. Durante el período 2000-2007 predominaron las anomalías negativas y se destaca el año 2007 por ser el más frío en las tres estaciones meteorológicas (-0,7 °C en el norte, -1 °C en el centro y -1,2 °C en el sur) (Figura 3). Los años 2008 y 2009 presentaron anomalías positivas de temperatura en toda el área de estudio y fueron de mayor magnitud en el norte (+0,6 °C en el año 2008 y +0,9 °C en 2009). Desde 2010 a 2019 las anomalías fueron principalmente positivas, indicando un claro calentamiento del área de estudio. Los años 2018 y 2019 se caracterizaron como cálidos en el norte (+0,8 y +1 °C, respectivamente) y en el centro (+0,6 y +0,8 °C, respectivamente). En el sur, estos dos años presentaron anomalías negativas pero de menor diferencia con respecto al valor medio (-0,1 °C en el 2018 y -0,3 °C en el 2019) (Figura 3).

Figura 3. Comportamiento interanual de las anomalías de temperatura y su tendencia durante el presente (2000-2019) el área de estudio.

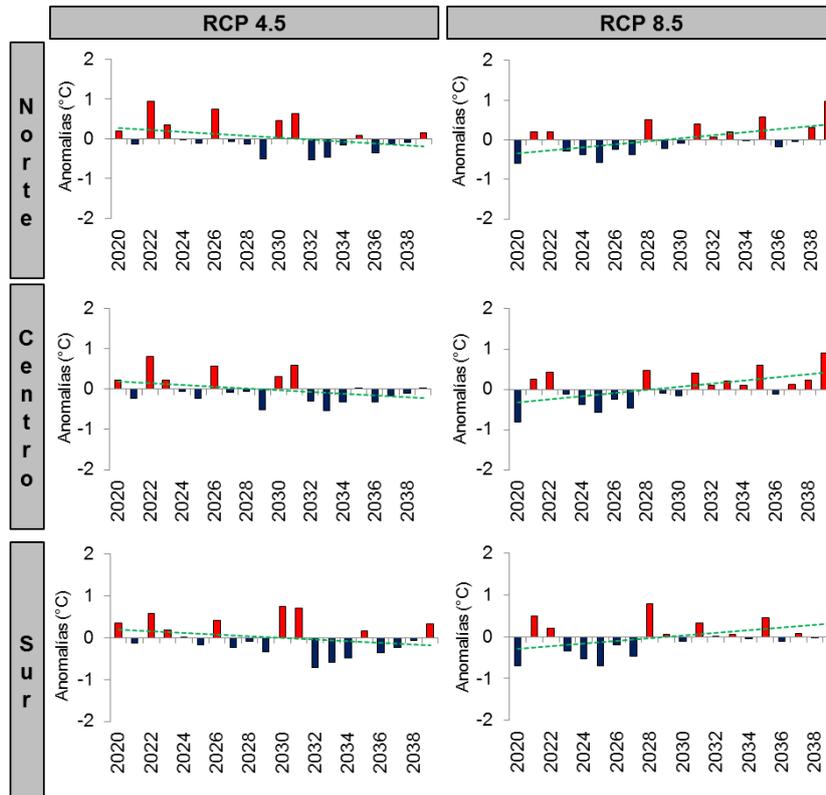


Fuente: elaboración propia.

En el futuro cercano (2020-2039) bajo el escenario RCP 4.5, la tendencia de la temperatura fue negativa pero sin evidencia estadística (-0,3 °C durante los 20 años en las tres estaciones analizadas) (Figura 4). En contraposición, considerando el escenario de mayor concentración de gases de efecto

invernado (RCP 8.5), la temperatura presentó una tendencia positiva y estadísticamente significativa en la totalidad del área de estudio (Figura 4). El incremento en el período de estudio fue de +0,8 °C en el norte y en el centro ($p= 0, 01578$ y $0, 02729$, respectivamente) y +0,7 °C en el sur ($p = 0,03982$). Las anomalías en el futuro cercano RCP 8.5 fluctuaron de manera similar en los tres sitios analizados. En este sentido, se destaca el año 2020, dado que presentó anomalías negativas en todo el área de estudio (-0,6 °C en el norte, -0,8 °C en el centro y -0,7°C en el sur), mientras que el año 2039 se caracterizó como el más cálido (+1 °C en el norte y +0,9 °C en el centro y sur, respectivamente) (Figura 4).

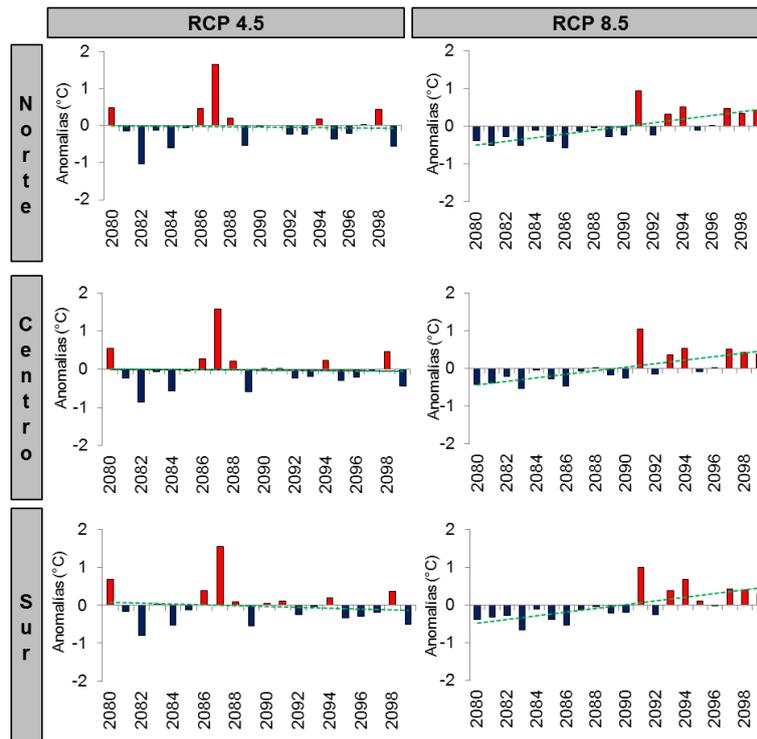
Figura 4. Comportamiento interanual de las anomalías de temperatura y su tendencia durante el futuro cercano (2020-2039) considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el futuro lejano (2080-2099) presentó en ambos escenarios RCP la misma tendencia que el futuro cercano (Figura 5). La misma fue negativa bajo el RCP 4.5 pero sin evidencia estadística ($p = 0,824$). Considerando el escenario RCP 8.5, toda el área de estudio presentó una tendencia positiva y estadísticamente significativa, aumentando +0,9 °C durante los 20 años (Figura 5). Durante este período, las anomalías positivas fueron más extremas que las negativas. Además, se registraron dos períodos de anomalías distintos en el futuro lejano RCP 08.5. El primero, se extendió desde 2080 a 2090 con anomalías principalmente negativas que presentaron valores extremos de -0,6 °C en el norte y -0,5 °C en el centro durante el año 2086 (2086) y de -0,7 °C en el sur en el año 2083 (Figura 5). El segundo período ocurrió desde 2091 hasta el 2099, con anomalías predominantemente positivas. El año 2091 se caracterizó como el más cálido en los tres sitios analizados. Las diferencias térmicas anuales fueron de +0,9 °C en el norte y +1 °C en el centro y sur (Figura 5). Finalmente, se detectaron tres años consecutivos con valores de temperatura superiores al promedio en todo el área de estudio que oscilaron entre +0,3 °C y +0,5 °C en el norte, +0,4 °C y +0,5 °C en el centro y +0,3°C y +0,5 °C en el sur (Figura 5).

Figura 5. Comportamiento interanual de las anomalías de temperatura y su tendencia durante el futuro lejano (2080-2099) considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis de la precipitación

La precipitación media de cada sitio analizado y su desviación estándar en los diferentes períodos, se presenta en la [Tabla 3](#), mientras que la comparación estadística de los valores medios resultantes del test de Fisher, en la [Tabla 4](#). Considerando el período presente, el área de estudio presentó un gradiente de precipitación decreciente en sentido N-S, dado que fue 742 mm en el norte, 720 mm en el centro y 618 mm en el sur ([Tabla 3](#)). El norte presentó dos períodos donde el valor medio fue estadísticamente similar. Estos fueron el pasado y el futuro cercano RCP 8.5 (742 y 744 mm, respectivamente) y también se registró igualdad en su valor medio en el futuro cercano y lejano bajo RCP 4.5 (824 y 818 mm, respectivamente). El pasado y el futuro lejano RCP 8.5 fueron dos períodos estadísticamente diferentes y se destaca este último por presentar un valor medio de precipitación elevado que alcanzó una diferencia con respecto al presente de +193 mm ([Tabla 3](#)). Por otro lado, el centro presentó similares valores medios en el presente y el futuro lejano RCP 8.5 (720 y 757 mm, respectivamente) y durante el futuro cercano y lejano bajo RCP 4.5 (666 y 661 mm, respectivamente). Por su parte, el futuro cercano bajo el escenario RCP 8.5 no presentó similitudes con respecto a los demás períodos, dado que su valor fue de 622 mm ([Tabla 3](#) y [4](#)). El sur presentó cinco momentos de cambios en su valor medio ([Tabla 4](#)). El pasado y el futuro lejano RCP 4.5 tuvieron montos estadísticamente iguales, dado que fueron de 660 y 657 mm anuales, respectivamente. Al igual que en el norte, se destaca el futuro lejano RCP 8.5 por presentar un valor medio de precipitación de +121 mm/período con respecto al presente ([Tabla 3](#)).

Tabla 3. Precipitación media y desvío estándar de cada sitio en los diferentes períodos considerados.

	Pasado	Presente	Futuro cercano RCP 4.5	Futuro cercano RCP 8.5	Futuro lejano RCP 4.5	Futuro lejano RCP 8.5
Norte	841 ± 176	742 ± 208	824 ± 114	744 ± 134	818 ± 99	935 ± 119
Centro		720 ± 168	666 ± 99	622 ± 110	661 ± 74	757 ± 96
Sur	660 ± 141	618 ± 147	637 ± 90	606 ± 112	657 ± 76	739 ± 103

Fuente: elaboración propia.

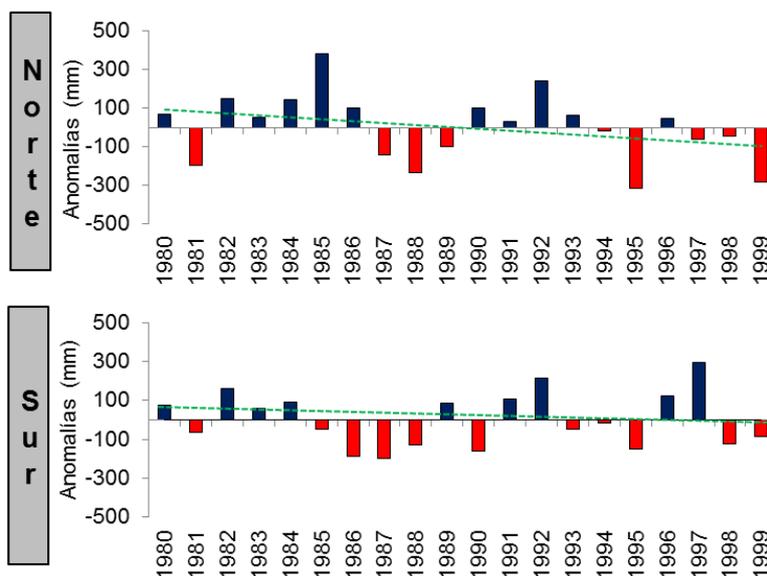
Tabla 4. Resultados del estadístico de Fisher aplicado a la precipitación media de las tres estaciones meteorológicas ($\alpha < 0,05$). Las letras indican la semejanza en el valor medio de los períodos considerados.

	Pasado	Presente	Futuro cercano RCP 4.5	Futuro cercano RCP 8.5	Futuro lejano RCP 4.5	Futuro lejano RCP 8.5
Norte	a	b	c	b	c	e
Centro	-----	a	b	c	b	a
Sur	a	b	c	d	a	e

Fuente: elaboración propia.

La **Figura 6** muestra el comportamiento interanual de las anomalías de precipitación durante el pasado en el norte y sur del área de estudio. Esta variable mostró una tendencia negativa y estadísticamente significativa ($p = 0,046$) (**Figura 6**). En el norte, la precipitación disminuyó 177 mm durante los 20 años analizados, mientras que en el sur fue de 96 mm. En general, durante este período, las anomalías presentaron el mismo comportamiento en los dos sitios, excepto en los años 1985, 1986 1990 y 1993 que registraron montos superiores al valor medio en el norte (de hasta 381 mm en 1985) y negativos en el sur. También se identificaron diferencias en el año 1997. La precipitación estuvo por debajo del promedio en el norte, con un total de -67 mm y lo puesto ocurrió en el sur (+294 mm) (**Figura 6**).

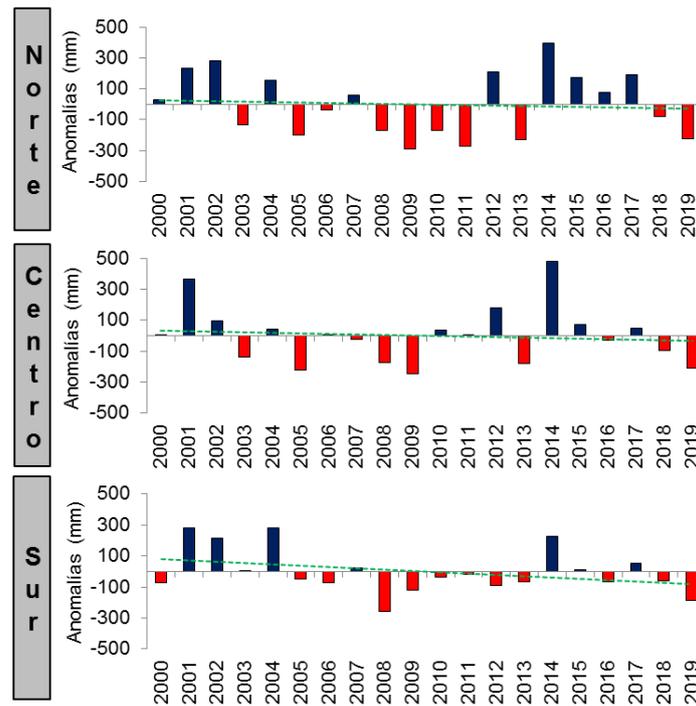
Figura 6. Comportamiento interanual de las anomalías de precipitación y su tendencia durante el período pasado (1980-1999) en el norte y el sur del área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

El presente (2000-2019) mostró, al igual que el pasado, una tendencia de la precipitación negativa y estadísticamente significativa en toda el área de estudio ($p > 0,05$) (**Figura 7**). Durante los 20 años analizados, la precipitación disminuyó -113 mm en el norte, -84 mm en el centro y -111 mm en el sur. Las anomalías fluctuaron de manera similar en los tres sitios y además, se presentó una marcada variabilidad pluviométrica. Se destacan los años 2008 y 2009 por presentar precipitaciones inferiores al valor promedio, que en el caso del sur, fueron más extremas durante el año 2008 (-259 mm), mientras que en el norte y el centro durante el año 2009 (-289 y -250 mm, respectivamente). Los años 2001, 2002 y 2014 registraron precipitaciones superiores al valor medio en la totalidad del área estudiada (**Figura 7**). En este sentido, el año 2014 se caracterizó como el más extremo en el norte y el centro, dado que registró +397 y +483 mm, respectivamente. En el sur, esta situación fue observada durante el año 2001 (+280,1 mm) (**Figura 7**).

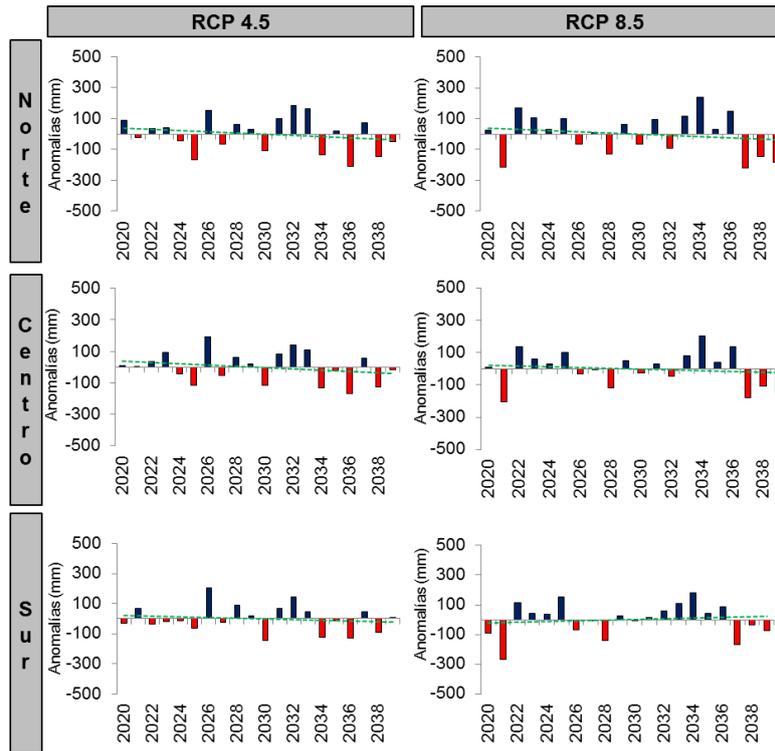
Figura 7. Comportamiento interanual de las anomalías de precipitación y su tendencia durante el presente en el área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

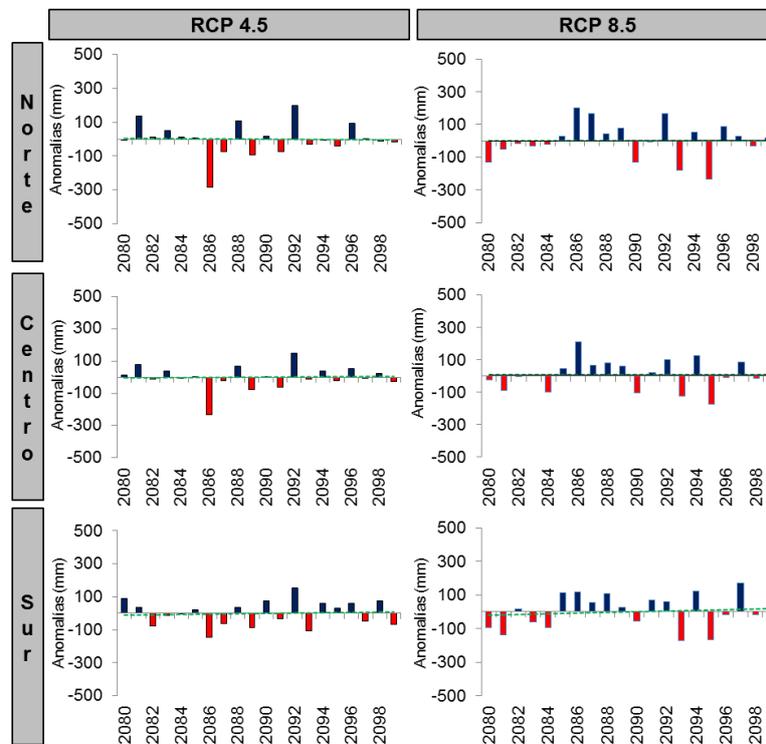
Por otro lado, en el futuro cercano bajo el RCP 4.5 la precipitación presentó una tendencia negativa pero no significativa en los tres sitios analizados ($p < 0,05$). En el escenario RCP 8.5, la tendencia fue negativa en el norte y centro y positiva en el sur, pero al igual que en el escenario RCP 4.5, no presentó significancia estadística (Figura 8). Esta misma situación se registró en el futuro lejano bajo el RCP 4.5 (Figura 9). Finalmente, la precipitación mostró una tendencia positiva y estadísticamente significativa en el futuro lejano RCP 8.5 ($p = 0,046$ en el norte; $0,042$ en el centro y $0,01$ en el sur) (Figura 9). Durante los 20 años considerados, el aumento registrado en el sur fue de $+59$ mm, mientras que en el norte y el centro fue de $+22$ y $+16$ mm, respectivamente. En este período la precipitación evidenció los mismos períodos de incremento y reducción de sus montos (Figura 9). En el norte, las anomalías oscilaron entre los $+202$ mm (2086) y -236 mm (2095), mientras que en el centro durante los mismos años que en el norte pero con valores distintos ($+211$ y -175 mm). En el sur, las anomalías fluctuaron entre $+172$ mm (2097) y -171 (2093) (Figura 9).

Figura 8. Comportamiento interanual de las anomalías de precipitación y su tendencia durante el futuro cercano (2020-2039) considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Comportamiento interanual de las anomalías de precipitación y su tendencia durante el futuro lejano (2080-2099) en el área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

5. Discusión

El clima es un factor clave para determinar las diferentes características y distribución de los sistemas

naturales (Aliaga, 2020). La precipitación y la temperatura son variables moderadoras del clima, por lo que una pequeña variación en su comportamiento puede tener consecuencias sobre la salud humana, los ecosistemas, las plantas y animales, entre otros (Uribe y Zavaleta, 2017). El estudio de los cambios térmicos y pluviométricos pasados, actuales y futuros es fundamental, dado que se vinculan directamente con las actividades productivas que se desarrollan en numerosas regiones del mundo (Ayalew *et al.*, 2012). En este sentido, cobran importancia los modelos de predicción del clima. Estos constituyen una herramienta vital para proyectar y predecir con exactitud las variaciones futuras del clima en distintas partes del mundo (Peacock, 2012; Ferrelli *et al.*, 2020). Además, le permiten a la población contar con información fundamental y prepararse para afrontar los riesgos que las variaciones del clima les plantean (Liu *et al.*, 2019). El modelo CCSM4 resultó ser una herramienta útil para analizar las tendencias y anomalías termo-pluviométricas futuras de la cuenca del río Sauce Grande, al igual que en lo reportado en numerosos trabajos de investigación a escala mundial y nacional (Maenza *et al.*, 2017; Rolla *et al.*, 2018; Ferrelli *et al.*, 2020).

Durante el período presente (2000-2019), el área de estudio presentó un gradiente térmico creciente en sentido N-S, mientras que la precipitación disminuye (Tabla 1). Este gradiente coincide con el de la Región Pampeana, dado que la cuenca del río Sauce Grande se localiza al sur de la misma (Aliaga, 2018). Además, es importante destacar que la temperatura y la precipitación se incrementaron durante los últimos 20 años en toda la Región Pampeana. Esta situación generó múltiples impactos en distintos sistemas socioeconómicos (Aliaga, 2020). La cuenca del río Sauce Grande presentó una tendencia similar a la registrada en la Región Pampeana, durante el presente (2000-2019) (Aliaga, 2020; Ferrelli *et al.*, 2020). Es decir, la temperatura presentó una tendencia positiva y estadísticamente significativa en las tres estaciones meteorológicas analizadas. Hacia el futuro, el área de estudio también mostró señales de calentamiento atmosférico, pero fue estadísticamente significativo en el escenario RCP 8.5. El aumento de mayor magnitud fue registrado en el futuro lejano RCP 8.5 y fue de +0,9 °C durante los 20 años en las tres estaciones analizadas. Estos resultados coinciden con lo hallado por diversos autores a escala mundial y nacional, quienes indicaron que a medida que aumentan los gases de efecto invernadero en la atmósfera, la temperatura se incrementará (Castillo *et al.*, 2018; Rolla *et al.*, 2018). Esta situación se debe a que el RCP 8.5 combina el supuesto de una alta población con crecimiento de sus ingresos relativamente lento, baja tasas de cambios tecnológicos y escasas mejoras en el consumo energético lo que genera, a largo plazo, una alta demanda energética y elevadas emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas de cambio climático (Riahi *et al.*, 2011).

El aumento de la temperatura en el área de estudio registrado durante el presente y el futuro es fundamental tenerlo en cuenta, dado que podría impactar en las primeras etapas fenológicas de cultivos como el girasol, maíz y soja, y sobre la espigazón y floración de los cereales de invierno, generando variaciones en los rendimientos de los mismos (Fernández-Long *et al.*, 2008). Por otro lado, el aumento térmico provoca una mayor frecuencia e intensidad de las olas de calor que podrían generar un cambio sustancial en el balance hidrológico de la laguna Sauce Grande, el principal recurso hídrico de la cuenca baja (Alfonso *et al.*, 2020), como así también provocar graves impactos sobre la salud de la población (Ferrelli, 2016).

Por otro lado, la precipitación es uno de los elementos esenciales del clima dado que determina el normal desarrollo las actividades agropecuarias y su posterior rendimiento (Mesike y Agbonaye, 2014; Ferrelli *et al.*, 2020). El conocimiento de su variabilidad es vital para garantizar la sustentabilidad económica y alimenticia de las regiones con importancia agrícola (Ferrelli *et al.*, 2020). El área de estudio presentó una marcada variabilidad pluviométrica durante los últimos 40 años (Figuras 6 y 7), característica típica de la Región Pampeana (Aliaga, 2020). Durante el presente, la precipitación mostró tendencia negativa y estadísticamente significativa (Figura 7). Esta situación es importante considerarla, dado que la marcada reducción de las precipitaciones produjo, en numerosas ocasiones, pérdidas de cosechas y baja en los rendimientos de los cultivos de hasta el 80 %, cambios en la calidad del agua de los recursos hídricos de la cuenca del río Sauce Grande, variación morfométrica de los cuerpos de agua, mortandad de peces, entre otros (Fornerón, 2012; Brendel, 2020).

Hacia el futuro, la precipitación registró significancia estadística sólo en el futuro lejano RCP 8.5 y su tendencia fue positiva. Esto se debe a que el aumento de la temperatura producto de un escenario con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m² generará una mayor disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera y, por lo tanto, las precipitaciones se incrementarán (Muller y Gorman, 2011). La mayor disponibilidad hídrica futura podría afectar el rendimiento del cultivo de trigo, el más importante de la cuenca (Rolla *et al.*, 2018). Para ello, se propone adelantar la fecha de siembra de los cultivos de invierno, aproximadamente 20 días, con el objetivo de reducir el riesgo hídrico en las etapas fenológicas críticas (Rolla *et al.*, 2018). Además, es fundamental considerar que el aumento de las precipitaciones expone a la población a un mayor riesgo de inundaciones, afectando su acceso al recurso (Ferrelli *et al.*, 2020). En numerosas ocasiones, la cuenca del río Sauce Grande se vio afectada por desbordes de ríos y crecimiento lagunar, que generaron

importantes pérdidas económicas y humanas (Volonté, 2017; Brendel, 2020). Por lo tanto, el conocimiento de la variabilidad termo-pluviométrica actual y futura del área de estudio es fundamental para lograr un eficaz manejo de los recursos naturales y garantizar la permanencia de las actividades económicas (Ferrelli et al., 2019).

6. Consideraciones finales

En este trabajo se analizó, por primera vez, las tendencias y anomalías termo-pluviométricas actuales y futuras de una cuenca de gran importancia económica para la Región Pampeana Argentina. Al igual que en lo registrado en la mayor parte del mundo, la cuenca del río Sauce Grande presentó señales de calentamiento atmosférico hacia el futuro, que fue de mayor magnitud en el futuro lejano bajo el escenario más extremo (RCP 8.5). La precipitación fue variable y con tendencia negativa, pero sin evidencia estadística. Sin embargo, su tendencia fue positiva y estadísticamente significativa, al igual que la temperatura, en el futuro lejano RCP 8.5.

En numerosas ocasiones, la variabilidad térmica y pluviométrica afectó la calidad de los recursos hídricos, la producción de cultivos y hasta generó pérdidas humanas. Por lo tanto, los resultados encontrados en esta investigación constituyen una base de datos fundamental para los tomadores de decisión y los productores agropecuarios, dado que sirven de base para el diseño de medidas de adaptación y mitigación, orientadas a reducir los efectos adversos de la variabilidad termo-pluviométrica sobre las economías regionales, la población y el ambiente.

7. Agradecimientos

La autora agradece al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina), al Instituto Nacional del Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina) y al Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera de Argentina (CIMA, Argentina) por el suministro de datos analizados para realizar este trabajo. Además, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS) por el financiamiento de este estudio. Finalmente, al Dr. Federico Ferrelli por los aportes y sugerencias en la elaboración de este manuscrito.

Referencias bibliográficas

- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi-Algarañaz, E. D., Bohn, V. Y., Piccolo, M. C. (2016). Distribution and variability of precipitation in the Pampas, Argentina. *Cuadernos de investigación Geográfica*, 42(1), 261-280. doi: [10.18172/cig.2867](https://doi.org/10.18172/cig.2867).
- 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. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5079>
- Aliaga, V.S. (2020). Tendencia y variabilidad climática: subregiones Pampeanas, Argentina (1960-2010). *Boletín Geográfico*, 42(1),13-32.
- Alfonso, M.B., Brendel, A.S, Vitale, A.J, Seitz, C., Piccolo, M.C., y Perillo, G.M.E. (2018). Drivers of Ecosystem Metabolism in Two Managed Shallow Lakes with Different Salinity and Trophic Conditions: The Sauce Grande and La Salada Lakes (Argentina). *Water*, 10(9), 1136. doi: [10.3390/w10091136](https://doi.org/10.3390/w10091136)
- Alfonso, M. B., Brendel, A. S., Vitale, A. J., y Piccolo, M. C. (2020). Impact of heatwave events on latent and sensible surface heat flux and future perspectives in shallow lakes based on climate change models. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47. doi: <https://doi.org/10.18172/cig.4456>
- Arnaudo, M.F. y Corbella, V. (2013). Análisis de la potencialidad de Monte Hermoso para lograr el desarrollo local a partir de bienes culturales. *Revista de Investigación en Turismo y desarrollo local*, 6(15), 1-11.
- Ayalew, D., Tesfaye, K., Mamo, G., Yitaferu, B., y Bayu, W. (2012). Variability of rainfall and its current trend in Amhara region, Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 7(10), 1475-1486. doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR11.698>
- Baimoung, S., Oki, T., Archevarahuprok, B., Yuttaphan, A., y Pangpom, M. (2014). Bias correction techniques for meteorological data of A2 scenario climate model output in Chao Phraya River Basin of Thailand. *Hydrological Research Letters*, 8(1), 71-76. doi: <https://doi.org/10.3178/hrl.8.71>

- Bekele, F., Mosisa, N., y Terefe, D. (2017). Analysis of current rainfall variability and trends over BaleZone, South Eastern highland of Ethiopia. *Climate Change*, 3(12), 889-902. doi: [10.23959/sfigw-1000007](https://doi.org/10.23959/sfigw-1000007)
- Brendel, A.S., Mora, F., y del Barrio, R.A. (2017). Aptitud agroclimática actual y potencial de la región patagónica para el cultivo de nogal (*Juglans regia* L.) en un contexto de cambio climático. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 8, 15-27.
- Brendel, A.S., Ferrelli, F., Piccolo, M.C., y Perillo, G.M.E. (2019). Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014503. doi: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.014503>
- Brendel, A.S. (2020). *Estudio integral de los recursos hídricos y las coberturas del suelo de la cuenca media y baja del Río Sauce Grande (Argentina)*. (Tesis de Doctor en Geografía). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Recuperado de: <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4866>
- Capelli de Steffens, A. M., Piccolo, M. C., y Campo de Ferreras, A. M. (2006). Clima urbano de Bahía Blanca. *Revista Universitaria de Geografía*, 15(1), 183-186.
- Casado, A., Peiry, J.L., y Campo, A. M. (2016). Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grande River, Argentina. *Geomorphology*, 268, 21-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.036>
- Casado, A., y Campo, A. M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 58(1), 6-26. doi: <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>
- Castillo, R., Montero, R., y Rica, C. (2017). Proyecciones de cambio climático del sistema ártico basado en el análisis de multi-modelos de los escenarios de emisiones de CO₂. *Revista de Climatología*, 17, 29-39.
- Chen, A., He, X., Guan, H., y Cai, Y. 2018. Trends and periodicity of daily temperature and precipitation extremes during 1960–2013 in Hunan Province, central south China. *Theoretical and applied climatology*, 132 (1-2), 71-88. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2069-x>
- Fernández-Long, M. E., Barnatán, I., Serio, L., y Murphy, G. (2008). Cambios en la disponibilidad térmica para los cultivos de la Región Pampeana argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 28(2-3), 111-120.
- Fernández-Long, M. E., Müller, G. V., Beltrán-Przekurat, A., y Scarpati, O. E. (2013). Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1673-1686. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3541>
- Ferrelli, F. (2016). *Análisis del clima local y micro-local de la ciudad de Bahía Blanca*. (Tesis de Doctor en Geografía). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Ferrelli, F. (2017). Variabilidad pluviométrica y sus efectos sobre las coberturas del suelo al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1), 26-37.
- Ferrelli, F., Brendel, A.S., Aliaga, V.S., Piccolo, M.C., y Perillo, G.M.E. (2019). Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(1), 393-416. doi: <https://doi.org/10.18172/cig.3707>
- Ferrelli, F., Brendel, A.S., Piccolo, M.C., y Perillo, G. M. E. (2020). Tendencia actual y futura de la precipitación en el sur de la Región Pampeana (Argentina). *Investigaciones Geográficas (UNAM)*, 102, e59919. doi: [dx.doi.org/10.14350/ig.59919](https://doi.org/10.14350/ig.59919)
- Fisher, R. A. (1915). Frequency distribution of the values of the correlation coefficient in samples from an indefinitely large population. *Biometrika*, 10(4), 507-21. doi: [10.2307/2331838](https://doi.org/10.2307/2331838)
- Forneron, C.F. (2012). *Hidrografía de la laguna Sauce Grande (provincia de Buenos Aires) en época de sequía*. (Tesis de Doctor en Geografía). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Ghil, M. y Lucarini, V. (2020). The physics of climate variability and climate change. *Reviews of Modern Physics*, 92(3), 035002. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.035002>
- 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1>
- Houghton, R. A. (1993). Is carbon accumulating in the northern temperate zone?. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(3), 611-617. doi: <https://doi.org/10.1029/93GB01163>

- Houghton, D.D. (2002). *Introduction to climate change: Lecture notes for meteorologists*. Ginebra: World Meteorological Organization.
- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. En: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1535 p). Cambridge University Press: Cambridge, UK, y New York, USA. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin, London.
- Liu, Y., Donat, M.G., Rust, H.W., Alexander, L.V., y England, M.H. (2019). Decadal predictability of temperature and precipitation means and extremes in a perfect-model experiment. *Climate Dynamics*, 53(7-8), 3711-3729. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04734-z>
- Maenza, R. A., Agosta, E. A., y Bettolli, M. L. (2017). Climate change and precipitation variability over the western 'Pampas' in Argentina. *International Journal of Climatology*, 37, 445-463. doi: <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrika*, 13, 245-259.
- Mesike, C. S., y Esekhide, T. U. (2014). Rainfall variability and rubber production in Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 8(1), 54-57. doi: [10.5897/AJEST2013.1593](https://doi.org/10.5897/AJEST2013.1593)
- Muller, C. J., y O'Gorman, P.A. (2011). An energetic perspective on the regional response of precipitation to climate change. *Nature Climate Change*, 1(5), 266-271. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate1169>
- Muthuwatta, L., Sood, A., McCartney, M., Silva, N. S., y Opere, A. (2018). Understanding the impacts of climate change in the Tana River Basin, Kenya. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 379, 37-42. doi: <https://doi.org/10.5194/piahs-379-37-2018>
- Ongoma, V., Chen, H. (2017). Temporal and spatial variability of temperature and precipitation over East Africa from 1951 to 2010. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(2), 131-144. doi: <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0462-0>
- Padhiary, J., Das, D. M., Patra, K. C., Sahoo, B. C., y Singh, K. K. (2018). Prediction of climate change impact on streamflow and evapotranspiration in Baitarani basin using SWAT model. *Journal of Agrometeorology*, 20(4), 325.
- Palmer, M. A., Reidy Liermann, C. A., Nilsson, C., Flörke, M., Alcamo, J., Lake, P. S., y Bond, N. (2008). Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2), 81-89. doi: <https://doi.org/10.1890/060148>
- Peacock, S. (2012). Projected twenty-first-century changes in temperature, precipitation, and snow cover over North America in CCSM4. *Journal of Climate*, 25(13), 4405-4429. doi: [10.1175/JCLI-D-11-00214.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00214.1)
- Pohlert, T. (2017). Trend: non-parametric trend tests and change-point detection. *R package version 0.2.0*.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, Kindermann, G., Nakicenovic, N., y Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Rolla, A. L., Nuñez, M. N., Guevara, E. R., Meira, S. G., Rodriguez, G. R., y de Zárate, M. I. O. (2018). Climate impacts on crop yields in Central Argentina. Adaptation strategies. *Agricultural Systems*, 160, 44-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.08.007>
- Rolla, A. L., Nuñez, M. N., Ramayón, J. J., y Ramayón, M. E. (2019). Impacts of climate change on bovine livestock production in Argentina. *Climatic Change*, 153(3), 439-455. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02399-5>
- Sharma, C. S., Panda, S. N., Pradhan, R. P., Singh, A., y Kawamura, A. (2016). Precipitation and temperature changes in eastern India by multiple trend detection methods. *Atmospheric Research*, 180, 211-225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.019>
- Shrestha, A.B., Bajracharya, S.R., Sharma, A.R., Duo, C., y Kulkarni, A. (2017). Observed trends and changes in daily temperature and precipitation extremes over the Koshi river basin 1975-2010. *International Journal of Climatology*, 37(2), 1066-1083. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.4761>

Tan, M. L., Yusop, Z., Chua, V. P., y Chan, N.W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.01.008>

Taylor, M.H., Losch, M., Wenzel, M., y Schröter, J. (2013). On the sensitivity of eld reconstruction and prediction using empirical orthogonal functions derived from Gappy data. *Journal of Climate*, 26(22), 9194-9205. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00089.1>

Uribe, I. M., y Zavaleta, M.V. (2017). Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero. *Ingeniería*, 21(1), 13-30.

Volonté, A. (2018). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas: cuenca del arroyo San Bernardo, sistema de Ventania, Argentina*. (Tesis de Doctor en Geografía). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Wang, X.L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y., y Pu, Q. (2010). New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12), 2416-2436. doi: <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>

Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., y Dile, Y. T. (2019). Observed changes in extremes of daily rainfall and temperature in Jemma Sub-Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3-4), 839-854. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2412-x>

Yan, L., Chen, S., Xia, J., y Luo, Y. (2014). Precipitation regime shift enhanced the rain pulse effect on soil respiration in a semi-arid steppe. *PloS one*, 9(8), e104217. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104217>.

Zhang, X., Yang, F. (2013). RCLimDex (1.1) user manual. Recuperado de: <http://cccma.Seos.Uvic.Ca/ETCCDI/software.shtml>.