

Comunicación

Habilidad de los modelos climáticos para simular las heladas meteorológicas ocurridas en Santa Rosa La Pampa, Argentina

Méndez, Mariano Javier^{1,2} , Vergara, Graciela¹  y Casagrande, Guillermo¹ 

1 Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Agronomía, La Pampa Argentina.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, La Pampa Argentina.

mendez@agro.unlpam.edu.ar

Recibido: 25/04/2025

Aceptado: 19/06/2025

Resumen. El objetivo del trabajo fue evaluar la habilidad de los modelos de cambio climático para simular los índices bioclimáticos de heladas en Santa Rosa La Pampa, ubicada en el oeste de la región pampeana central de la Argentina. Para esto se utilizaron las temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas por los modelos climáticos CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), MRI (Meteorological Research Institute) y CMCC (Centro Euro-Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici) del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Los días de primera y última helada del año simulados por los modelos CNRM y CSIRO estuvieron dentro del rango de días de primera y última helada del año observados durante el periodo 1977-2010. En cambio, los simulados por los modelos MRI y CMCC estuvieron fuera del rango de días observados. Las fechas medias de primera y última helada simuladas por los modelos CNRM, CSIRO y CMCC no se diferenciaron de las observadas. La variabilidad observada en las fechas medias fue adecuadamente simulada por los modelos CNRM y CSIRO, pero no por los modelos MRI y CMCC. El periodo medio libre de heladas observado no se diferenció del simulado por los modelos CNRM y CSIRO. Estos dos modelos fueron los que mejor modelaron las fechas extremas de helada (primera y última) y el número medio de días con heladas al año. En general, índices bioclimáticos de heladas evaluados fueron adecuadamente simulados por los modelos CNRM y CSIRO para Santa Rosa en el periodo 1977-2010. Estos resultados permiten concluir que las proyecciones de los modelos CNRM y CSIRO podrán ser utilizadas para estudiar la evolución futura de los índices bioclimática heladas y su variabilidad en el contexto de distintos escenarios de cambio climático en el sitio estudiado.

Palabras clave: Adversidades meteorológicas; validación local de modelos climáticos; cambio climático; Índices bioclimáticos de heladas.

Abstract. Ability of the climate model to simulate meteorological frosts in Santa Rosa La Pampa, Argentina.

The objective of this study was to evaluate the ability of climate change models to simulate bioclimatic frost indices in Santa Rosa La Pampa Argentina. Daily minimum temperatures observed and simulated by the CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), MRI (Meteorological Research Institute), and CMCC (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici) climate models of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) were used. The CNRM and CSIRO models simulated first and last frost days that were within the range of observed first and last frost days during the period 1977–2010. The MRI and CMCC models simulated first and last frost days outside the range of observed days. The mean first and last frost dates simulated by the CNRM, CSIRO, and CMCC models did not differ from the observed dates. The observed variability in mean dates was adequately simulated by the CNRM and CSIRO models, but not by the MRI and CMCC models. The observed mean frost-free period did not differ from that simulated by the CNRM and CSIRO models, but did differ from that simulated by the MRI model. The CNRM and CSIRO models best simulated extreme frost dates (first and last) and the average number of frost days per year. Overall, the CNRM and CSIRO models adequately simulated daily minimum temperatures and bioclimatic frost indices in the western Pampas region of Argentina during the period 1977–2010. These results allow to conclude that the minimum temperature projections from the CNRM and CSIRO models can be used to study the future evolution of bioclimatic frost indices and their variability in the context of different climate change scenarios.

Key words: Adversity in weather; Local validation of climate models; climate change; bioclimatic frost indices.

INTRODUCCIÓN

Las regiones semiáridas y subhúmedas del mundo, como el oeste de región pampeana Argentina, tienen un rol fundamental en la alimentación humana, a través de la producción

Cómo citar este trabajo:

Méndez, M., Casagrande, G. y Vergara, G. (2025). Habilidad de los modelos climáticos para simular las heladas meteorológicas ocurridas en Santa Rosa La Pampa, Argentina. *Semiárida*, 35(2), 79-87.

de granos y carnes (Anapalli et al., 2016). La agricultura es una de las actividades humanas más condicionadas por el ambiente; la acción meteorológica y climática provoca fluctuaciones marcadas en la producción primaria (Holleman et al., 2020). Las fluctuaciones en la producción son particularmente importantes en las regiones semiáridas y subhúmedas, debido a que estas son áreas marginales expuestas a diferentes adversidades como sequías, inundaciones, granizo, viento, altas temperaturas y bajas temperaturas (heladas).

Las heladas se han identificado a nivel mundial como uno de los principales peligros agrícolas, ya que pueden ocurrir en casi cualquier lugar fuera de las zonas tropicales (Papagiannaki et al., 2014). Estas provocan más pérdidas económicas a la agricultura que cualquier otro peligro relacionado con el clima (Lamichhane, 2021). Desde el punto de vista meteorológico, se considera helada a todo descenso térmico igual o inferior a 0.0 °C medido en abrigo meteorológico (Fernández Long et al., 2016). Existen diferentes indicadores bioclimáticos que permiten valorar el impacto de las heladas sobre los sistemas naturales y productivos. El número de días medio con heladas en el año es uno de los indicadores más comúnmente utilizados, por sus efectos sobre los ecosistemas, la naturaleza y las actividades humanas (Altieri y Nicholls, 2017; Biazar y Ferdosi, 2020). La fecha media de última helada es un indicador de las heladas tardías ocurridas en primavera. Estas son importantes porque ocurren después de la germinación y brotación de los cultivos de verano, cuando las plantas son especialmente susceptibles al daño por heladas. Las heladas de primavera han mostrado tener un impacto ecológico y económico significativo en la agricultura de diferentes partes del mundo (Anandhi et al., 2013; Biazar y Ferdosi, 2020; Charalampopoulos, 2021; Erlat & Türkes, 2016; Ruml et al., 2012; Wypych et al., 2017). El periodo medio libre de heladas es un índice bioclimático relacionado con la duración de la estación de crecimiento de los cultivos sensibles a las heladas (Charalampopoulos y Droulia, 2022; Xia et al., 2013). La duración de la estación de crecimiento determina en gran medida los cultivos que se pueden realizar y el calendario agrícola de un lugar.

Dada la importancia de las heladas en los sistemas de producción y en los sistemas naturales es que en las últimas décadas se han estudiado diferentes indicadores bioclimáticos en el contexto de cambio climático (Charalampopoulos y Droulia, 2022; Xia et al., 2013). El cambio climático es un fenómeno global que provoca cambios en los valores medios de los elementos del clima, en su variabilidad y en los valores extremos a escala planetaria, regional y local. Entre los muchos efectos potenciales del cambio climático está el cambio en la frecuencia y distribución de las heladas. Los índices bioclimáticos de heladas en el contexto de cambio climático se pueden analizar en tiempo pasado y en el futuro. Para estudiar la evolución futura de los índices bioclimáticos de heladas se deben utilizar las proyecciones de los modelos climáticos. Sin embargo, antes de utilizar las proyecciones futuras de los índices bioclimáticos de heladas se debe evaluar la habilidad de los modelos climáticos para simular las temperaturas mínimas y dichos índices de heladas en el pasado. La habilidad de los modelos climáticos para simular la climatología pasada de las temperaturas medias y precipitaciones ha sido evaluada a escala global, regional y local en estudios previos (Lovino et al., 2018; Miao et al., 2014; Moise et al., 2015; Raghavan et al., 2018; Rupp et al., 2013). Sin embargo, no se han encontrado evaluaciones de la habilidad de los modelos climáticos para simular los índices bioclimáticos de heladas. Es por esto que, el objetivo del presente trabajo es evaluar la habilidad de los modelos de cambio climático para simular los índices bioclimáticos de heladas en Santa Rosa La Pampa, ubicada en el oeste de la región pampeana central de la Argentina.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se llevó a cabo utilizando datos de Santa Rosa, capital de la provincia de La Pampa, ubicada en el oeste de región pampeana central de la Argentina (Figura 1). El clima de la región es de tipo templado, con estaciones bien definidas. La temperatura anual media es de 15,7 °C, la temperatura mensual media del mes más cálido (enero) de 23,3 °C y la temperatura mensual media del mes más frío (julio) de 7,8°C (Méndez et al., 2022). La precipitación anual media es de 728,8 mm y el régimen de precipitación es con tendencia monzónica producto de que en el semestre

estival se concentran el 73 % de las precipitaciones anuales (Méndez et al., 2022). El clima clasifica como Cfa (Clima templado húmedo sin estación seca y con verano cálido) según la clasificación climática de Köppen y como C1dB'2a' (Clima subhúmedo seco, con nulo o pequeño exceso de agua, mesotermal templado frío con una concentración estival de la eficiencia térmica menor al 48 %), según la clasificación climática de Thornthwaite (Méndez et al., 2021).

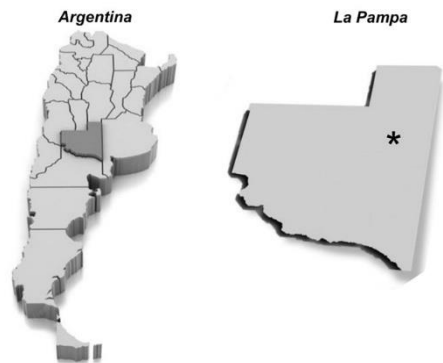


Figura 1. Mapa de la Argentina y La Pampa con la ubicación de Santa Rosa. El *** indica la ubicación de Santa Rosa en el mapa de La Pampa

Figure 1. Maps of Argentina and La Pampa showing the study area. The *** shows the location of Santa Rosa in the map of La Pampa.

Para alcanzar el objetivo del trabajo se utilizaron los registros de temperaturas mínimas diarias en abrigo meteorológico a 1.5 m de altura para el periodo 1977-2010. Los registros se obtuvieron de la estación meteorológica “Ing. Agr. Juan Carlos Lasalle” ubicada en la Facultad de Agronomía de la UNLPam (36°37’S, 64°17’O y 165 msnm), 10 km al norte de la ciudad de Santa Rosa, capital de provincia de La Pampa. Para el mismo lugar y periodo se obtuvieron las temperaturas mínimas diarias estimadas por los modelos del “Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)” publicados por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2014) en la Base de Datos Climáticos de la tercera comunicación para el cambio climático (3CN, http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php). La información de los datos observados y los simulados por los modelos del CMIP5 utilizados en este trabajo se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1. Fuente de información de temperaturas mínimas
Table 1. Source of information of minimum temperatures

Fuente	Institución	Tipo de dato	Nombre	Identificación en el presente trabajo	Periodo utilizado
Cátedra de Agrometeorología (UNLPam.)	Facultad de Agronomía- Universidad Nacional de La Pampa	Observados	Observatorio Agrometeorológico	Obs.	1977-2010
Base de Datos Climáticos de la 3CN (http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php)	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre European de Recherche et Formation	Simulados	CNRM- CM5_historical_PR_DD	CNRM	1977-2010
Base de Datos Climáticos de la 3CN (http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php)	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	Simulados	CSIRO-Mk3-6-0_historical_PR_DD	CSIRO	1977-2010
Base de Datos Climáticos de la 3CN (http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php)	Meteorological Research Institute	Simulados	MRI- CGCM3_historical_PR_DD	MRI	1977-2010
Base de Datos Climáticos de la 3CN (http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php)	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Simulados	CMCC- CM_historical_PR_DD	CMCC	1977-2010

http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php ultimo acceso 20250422

A partir de los registros de temperaturas mínimas (observados y simulados por los modelos CMIP5) se determinaron los siguientes índices bioclimáticos de heladas: 1- fechas medias de primera y última helada y sus respectivos desvíos, 2- fecha extrema de primera y última helada, 3- el periodo medio libre de heladas 4- periodo mínimo y máximo libre de heladas y 5- número medio de heladas al año y su desvío. Para obtener los índices bioclimáticos de heladas (promedio o valores extremos de la serie de años analizada) se calcularon los siguientes índices biometeorológicos (valores para un año específico de la serie): 1- día de última helada del año (DUH, heladas de primavera), 2- día de primera helada del año (DPH, heladas de otoño), 3- días con heladas en el año o días con heladas (DCH) y 4- periodo libre de heladas del año (PLHA).

A continuación, se definen y muestran las fórmulas utilizadas para calcular los diferentes índices bioclimáticos y biometeorológicos de heladas utilizados en este estudio.

El índice bioclimático “fecha media de primeras heladas de otoño (FMPHO)” se calculó utilizando la ecuación 1.

$$DMPH = \frac{\sum_i^n DPH}{n} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde DMPH, día medio de primeras heladas (heladas de otoño) para el periodo analizado, DPH día de primera helada del año (definido como el día del año en que ocurre la helada más cercana al 1 de enero) para el año x, n números de años analizados. Transformando el DMPH en una fecha se obtuvo la “fecha media de primeras heladas de otoño (FMPHO)”.

El índice bioclimático “fecha media de ultimas heladas de primavera (FMUHP)” con la ecuación 2.

$$DMUH = \frac{\sum_i^n DUHP}{n} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde DMUH, día medio de últimas heladas (heladas de primavera) para el periodo analizado, DUH día de última helada (definida como el día del año en que ocurre la helada más cercana al 31 de diciembre) para el año “X”, n números de años analizados. Transformando el DMUH en una fecha se obtuvo la “fecha media de últimas heladas de primavera (FMUHP)”.

Para ambas fechas medias se calcularon los desvíos estándares utilizando la ecuación 3

$$\text{Desvío standar} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (DP/UH - DMP/UH)^2}{n}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde DMP/UH, día medio de primera/ultima helada del año del periodo analizado, DP/UH día de primera/ultima helada del año para un año determinado, n números de años analizados.

El índice climático “fecha extrema de primera helada (FEPH)” es la fecha de la helada que ocurrió más cerca de comienzo del año (1 de enero) en el periodo analizado (1977-2010). En tanto que, el índice climático “fecha extrema de última helada (FEUH)” es la fecha de la helada que ocurrió más cerca de fin de año (31 de diciembre) en el periodo analizado (1977-2010).

El índice biometeorológico “días con heladas en el año o días con heladas (DCH)” se define como la suma de los días en el año en que la temperatura mínima del aire es igual o inferior a 0.0 °C en abrigo meteorológico a 1,5 m de altura. Este índice biometeorológico fue utilizado para calcular el índice bioclimático “número medio de días con heladas” a partir de ecuación 4

$$NMDCH = \frac{\sum_i^n DCH}{n} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde NMDCH número medio de días con heladas por año para el periodo 1977-2010, DCH días con heladas en el año “i”, n números de años analizados

Los índices biometeorológicos DUH y DPH se utilizaron para calcular el periodo libre de heladas del año (PLHA) con la ecuación 5.

$$PLHA_i = 365 - (DUH_i - DPH_i) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde $PLHA_i$, periodo libre de heladas del año “i”, DUH día última helada de primavera del año “i” y DPH día de primera helada de otoño del año “i”.

El índice $PLHA_i$ para cada uno de los años estudiados se utilizó para obtener los índices bioclimáticos “periodo mínimo y máximo libre de heladas” como el menor y mayor valor de $PLHA$ respectivamente. A partir de los $PLHA$ se calculó el índice bioclimático “periodo medio libre de heladas” utilizando la siguiente formula:

$$PMLH = \frac{\sum_i^n PLHA_i}{n} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde $PMLH$, es el número de días promedio libre de heladas para el periodo analizado, $PLHA$ periodo libre de heladas del año “i” y n el número de años analizados.

Los índices bioclimáticos de heladas se compararon entre modelos y con los datos observados a través de ANAVA y prueba de diferencia de medias LSD (Least significant difference) de Fisher. Las tendencias de los índices biometeorológicos de heladas en el periodo 1977-2010 se evaluaron a través de regresiones lineales simples. Para el análisis estadístico se utilizó el programa INFOTAT (Di Rienzo et al., 2017).

RESULTADOS

Los días del año de primera helada (DPH, heladas de otoño) y los días del año de última helada (DUH, heladas de primavera) simulados por los modelos CNRM y CSIRO se encontraron dentro del rango de días observados en el periodo 1977-2010. En cambio, los DPH y DUH simulados por los modelos MRI y CMCC se encontraron fuera del rango de días observados (Figura 2). Las temperaturas mínimas simuladas por el modelo CMCC determinaron que en el 10 % de los años del periodo 1977-2010 no ocurrieran heladas. Estos resultados no concuerdan con los datos observados y la bibliografía, que muestran que, para Santa Rosa y el oeste de la región pampeana el porcentaje de años con heladas (número de años con heladas respecto del total de años analizados) es del 100 % (Murphy, 2008). Los DPH y los DUH simulados y observados no mostraron tendencia a retrasarse o adelantarse en el periodo estudiado (1977-2010). La excepción fueron los DPH simuladas por el modelo CSIRO, que mostraron una leve tendencia al retraso en el periodo de estudio (Figura 2).

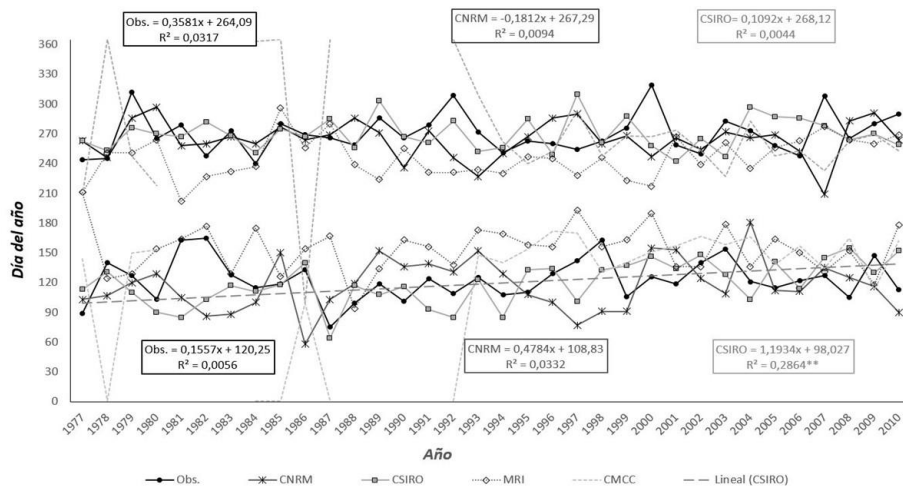


Figura 2. Fechas de primera helada de otoño y última helada de primavera. ** Tendencia significativa al $p < 0.01$.

Figure 2. Dates of first autumn frost and last spring frost. **Significant trend at $p < 0.01$

La fecha media de primeras heladas de otoño (FMPHO) simulada por los modelos CNRM, CMCC y CSIRO fue 6, 5 y 5 días antes que la fecha media observada respectivamente (Tabla 2). Estas FMPHO simuladas no se diferenciaron estadísticamente de la observada $p < 0.05$ (Tabla 2). El modelo MRI simuló una FMPHO 30 días posterior a la observada, siendo la fecha simulada diferente a la observada ($p > 0.05$, Tabla 2). La fecha media de últimas heladas de primavera (FMUHP) simuladas por los modelos CSIRO, CNRM y CMCC fue igual, 6 días antes y 3 días después a la fecha observada respectivamente (Tabla 2). Estas FMUHP simuladas y observada no se diferenciaron estadísticamente ($p < 0.05$). El modelo MRI simuló una FMUHP 25 días antes que la observada, siendo la fecha simulada diferente a la observada ($p > 0.05$, Tabla 2).

La variabilidad de las fechas medias de heladas fue evaluada a través del desvío estándar. Los resultados muestran que, la variabilidad de la FMPHO y FMUHP simulada por los modelos CNRM y CSIRO fue similar a la observada (Tabla 2). En tanto que, la variabilidad de la FMPHO y FMUHP simulada por el modelo CMCC fue de ± 62 y ± 60 días respectivamente. Estos valores de variabilidad fueron muy superiores a los observados, los cuales se encontraron en ± 20 días para la FMPHO y en ± 21 días para la FMUHP (Tabla 2).

La fecha extrema de primera helada (FEPH) simulada por los modelos CNRM CSIRO y CMCC fue 16, 11 y 74 días antes que la FEPH observada (Tabla 2). El modelo MRI fue el único que simuló un retraso en la FEPH, la cual fue simulada 19 días después que la observada (Tabla 2). Respecto de la fecha extrema de última helada (FEUH), los modelos CNRM, CSIRO, y MRI la simularon 22, 9 y 23 días antes que la observada respectivamente (Tabla 2). El modelo CMCC fue el único que simuló un retraso en la FEUH de 46 días respecto de la fecha observada (Tabla 2).

El período medio libre de heladas (PMLH) observado no presentó diferencias significativas respecto a las simulaciones de los modelos CNRM y CSIRO ($p > 0,05$); sin embargo, fue significativamente diferente de las simulaciones generadas por los modelos MRI y CMCC ($p < 0,05$; Tabla 2). El PMLH simulado por el modelo MRI fue 55 días mayor que el observado y el simulado por el modelo CMCC fue 8 días menor (Tabla 2). El período máximo libre de heladas (PMLH) observado fue 9 días menor que el simulado por el modelo CNRM y 24 días mayor que el simulado por el modelo CSIRO. En el caso de los modelos MRI y CMCC, el PMLH simulado superó al observado en 183 días (Tabla 2). En cuanto al período mínimo libre de heladas (PMiLH), el valor observado fue 13, 21 y 164 días mayor que el simulado por los modelos CNRM, CSIRO y CMCC, respectivamente. Por su parte, el modelo MRI simuló un PMiLH 30 días superior al observado. De los modelos climáticos evaluados, el CNRM fue el que mejor simuló las fechas extremas de heladas para Santa Rosa en el periodo analizado, seguido por el modelo CSIRO. Los modelos CMCC y MRI simulaban fechas extremas de heladas muy diferentes a las observadas (Tabla 2).

El número medio de días con heladas en el año (NMDCH) observado fue mayor al reproducido por 3 de los 4 modelos utilizados en este estudio (Tabla 2). Los modelos CNRM, CSIRO y MRI simulaban un NMDCH de 10, 13 y 28 días menor que el observado respectivamente. En tanto que, el modelo CMCC simuló un NMDCH que fue 18 días mayor que el observado (Tabla 2). La variabilidad observada en el NMDCH (evaluada a través del desvío estándar) fue de ± 13 días, siendo la variabilidad simulada por el modelo CNRM similar a la observada (Tabla 2). Los modelos CSIRO y MRI simulaban una variabilidad del NMDCH que fue 5 y 8 días menor que la observada, respectivamente. Por su parte, el modelo CMCC simuló una variabilidad del NMDCH que fue 90 días mayor que la observada. Estos resultados muestran que los modelos CNRM y CSIRO fueron los que mejor simulaban el NMDCH y su variabilidad en Santa Rosa durante el periodo estudiado (1977-2010). Mientras que, los modelos CMCC y MRI no reprodujeron de manera aceptable los valores observados de NMDCH y su variabilidad.

Tabla 2. Índices bioclimáticos de heladas para el periodo 1977-2010.**Table 2.** Bioclimatic frost indices for the period 1977-2010.

	Periodo 1977-2010				
	Observado	CNRM	CSIRO	MRI	CMCC
Fecha media de primeras heladas de otoño	01-May ^a	26-Abr ^a	27-Abr ^a	01-Jun ^b	27-Abr ^a
Desvío estandar	21	26	22	24	62
Fecha extrema primera helada de otoño	15-Mar	27-Feb	04-Mar	03-Abr	01-Ene
Fecha media de ultimas heladas de primavera	26-Sep ^a	20-Sep ^a	26-Sep ^a	1-Sept ^b	29-Sep ^a
Desvío estandar	20	19	16	21	60
Fecha extrema ultima helada de primavera	14-Nov	23-Oct	05-Nov	22-Oct	30-Dic
Periodo medio libre de heladas	218 ^a	218 ^a	214 ^a	273 ^c	210 ^b
Periodo maximo libre heladas	282	291	258	365	365
Periodo minimo libre heladas	165	152	144	195	1
Dias con heladas	40 ^a	30 ^b	27 ^b	12 ^c	58 ^d
Desvío estandar	13	12	8	5	103

Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas $p < 0.05$ (LSD)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los modelos CNRM y CSIRO son los que mejor simulan los índices bioclimáticos de heladas en el periodo 1977-2010 en Santa Rosa La Pampa, ubicada en el oeste de la región pampeana, siendo sus índices bioclimáticos simulados comparables a los observados. Los modelos climáticos MRI y CMCC en general no pudieron reproducir los índices bioclimáticos de heladas observados en el periodo evaluado en la localidad analizada. Estudios llevados a cabo en Oceanía, Asia y en el Norte de América han encontrado que no todos los modelos del CMIP5 pueden simular de manera adecuada la climatología pasada (Miao et al., 2014; Moise et al., 2015; Raghavan et al., 2018; Rupp et al., 2013). Estos estudios también muestran que los modelos que mejor describen la climatología difieren entre regiones y en una misma región difieren entre variables. Al respecto, en el noreste de la Argentina se ha encontrado que los modelos CCSM4 y CESM1-BGC son los que mejor simulan la climatología de la temperatura media anual y media mensual a nivel regional (Lovino et al., 2018). En tanto que, 4 modelos diferentes a los anteriores son los que mejor simulan la climatología de la precipitación anual y estacional (Lovino et al., 2018). Estos autores evaluaron 25 modelos entre los cuales se encontraron los 4 evaluados en el presente estudio. El modelo CMCC fue el único de los modelos, evaluados en ambos estudios, que se encontró entre los 9 mejores modelos que simulaban la marcha anual de la temperatura en el noreste de Argentina (Lovino et al., 2018). Como muestran los resultados del presente trabajo el modelo CMCC no pudo simular de manera adecuada los distintos índices bioclimáticos de heladas en Santa Rosa La Pampa (en el oeste de la región pampeana central de Argentina). Los modelos que mejor simulaban los índices bioclimáticos de heladas en Santa Rosa La Pampa (CNRM y CSIRO) no se encontraron dentro del núcleo de los 9 mejores modelos que describieron la temperatura media anual y mensual en el noreste de la Argentina. Es importante considerar que, en el estudio conducido por Lovino et al. (2018) se evaluó la performance de los modelos para simular las temperaturas medias mientras que en el presente estudio se evaluó la performance de los modelos para simular los índices bioclimáticos de heladas que se desprenden de las temperaturas mínimas diarias.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que los modelos MRI y CMCC no fueron capaces de reproducir las temperaturas mínimas diarias y los índices bioclimáticos derivadas de las mismas en Santa Rosa La Pampa durante el periodo 1977-2010. Por lo cual, estos modelos no deberían ser considerados en Santa Rosa y posiblemente en el oeste de la región pampeana Argentina para evaluar el comportamiento/tendencia futura de los índices bioclimáticos bajo distintos escenarios de cambio climático.

Los modelos CNRM y CSIRO fueron los que mejor simulaban las temperaturas mínimas diarias en el periodo 1977-2010 en Santa Rosa La Pampa. Esto permitió que los modelos CNRM y CSIRO reproduzcan adecuadamente los índices bioclimáticos de heladas más importantes como la fecha

media de primera helada, fecha media de última helada, variabilidad de las fechas medias y el periodo medio libre de heladas. De esta manera las proyecciones futuras de temperaturas mínimas de los modelos CNRM y CSIRO podrán ser utilizadas para inferir el posible comportamiento de los principales índices bioclimáticos y su variabilidad futura bajo distintos escenarios de cambio climático en el oeste de la región pampeana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anapalli, S. S., Ahuja, L. R., Gowda, P. H., Ma, L., Marek, G., Evett, S. R., & Howell, T. A. (2016). Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. *Agricultural Water Management*, 177, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.009>
- Altieri, M.A., & Nicholls, C.I. (2017). The Adaptation and Mitigation Potential of Traditional Agriculture in a Changing Climate. *Climatic Change*, 140, 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>
- Anandhi, A., Perumal, S., Gowda, P. H., Knapp, M., Hutchinson, S., Harrington, J., Murray, L., Kirkham, M. B., & Rice, C.W., (2013). Long- Term Spatial and Temporal Trends in Frost Indices in Kansas, USA. *Climatic Change*, 120, 169-181. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0794-4>
- Biazar, S. M., & Ferdosi, F. B. (2020). An Investigation on Spatial and Temporal Trends in Frost Indices in Northern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 907-920. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03248-7>
- Charalampopoulos, I., (2021). Agrometeorological Conditions and Agroclimatic Trends for the Maize and Wheat Crops in the Balkan Region. *Atmosphere*, 12, 671. <https://doi.org/10.3390/atmos12060671>
- Charalampopoulos, I., & Droulia, F. (2022). Frost Conditions Due to Climate Change in South-Eastern Europe via a High-Spatiotemporal-Resolution Dataset. *Atmosphere*, 13, 1407. <https://doi.org/10.3390/atmos13091407>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L. y Robledo, C. W. (2017). InfoStat v. 2017. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/>
- Erlat, E., & Türkeş, M. (2016). Dates of Frost Onset, Frost End and the Frost-Free Season in Turkey: Trends, Variability and Links to the North Atlantic and Arctic Oscillation Indices, 1950-2013. *Climate Research*, 69, 155-176. <https://doi.org/10.3354/cr01397>
- Fernández-Long, M. E., Barnatán, I., Dominici, C., y Murphy, G. (2016). Información agroclimática de las heladas en la argentina: generación y uso. *Meteorológica*, 41, 7-31. http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2017/03/Fernandez-Long_Vol42N2.pdf
- Holleman, C., Rembold, F., Crespo, O. & Conti, V. (2020). The impact of climate variability and extremes on agriculture and food security – An analysis of the evidence and case studies. Background paper for The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 4. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb2415en>
- Lamichhane, J. R., (2021). Risks of Late-Spring Frosts in a Changing Climate. *Nature Climate Change*, 11, 554-555. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01090-x>
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2018). Evaluation of CMIP5 retrospective simulations of temperature and precipitation in northeastern Argentina. *International Journal of Climatology*, 38, e1158-e1175. <https://doi.org/10.1002/joc.5441>
- Méndez, M., Vergara, G., Casagrande, G., y Bongianino, S. (2021). Clasificación climática de la región agrícola de la provincia de La Pampa, Argentina. *Semiárida*, 31(2), 9–20. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiariada/article/view/5988>
- Méndez, M., Vergara, G., y Casagrande, G. (2022). SUPLEMENTO 1: Estadísticas agroclimáticas de la Facultad de Agronomía, Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Periodo 1977-2021. *Semiárida*, 32, 7-41. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiariada/article/view/6559>
- Miao, C., Duan, Q., Sun Q. Huang, Y., Kong, D., Yang, T., Ye, A., Di, Z., & Gong, W. (2014). Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, 9, 5, Article ID 055007. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/5/055007>
- Moise, A., Wilson, L., Grose M., Whetton, P., Watterson, I., Bhend, J., Bathols, J., Hanson, L., Erwin, T., Bedin, T., Heady, C., & Rafer, T. (2015) "Evaluation of CMIP3 and CMIP5 models over the Australian region to inform confidence in projections." *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 65(1),19-53. <https://doi.org/10.22499/2.6501.004>
- Murphy, G. M. (2008). Atlas agroclimático de la Argentina. Editorial de la Facultad Agronomía Universidad Nacional de Buenos Aires. https://ciag.agro.uba.ar/static/pdf/Atlas_2000.pdf
- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Papagiannakis, G. (2014) Agricultural Losses Related to Frost Events: Use of the 850 hPa Level Temperature as an Explanatory Variable of the Damage Cost. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 2375-2386. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2375-2014>
- Raghavan, S.V., Liu, J., Nguyen, N.S., Vu, M.T., & Liang, S., (2018). Assessment of CMIP5 historical simulations of rainfall over Southeast Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(3-4), 989-1002. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2111-z>

- Ruml, M., Vuković, A., Vujadinović, M., Djurdjević, V., Ranković-Vasić, Z., Atanacković, Z., Sivčev, B., Marković, N., Matijašević, S., & Petrović, N., (2012). On the Use of Regional Climate Models: Implications of Climate Change for Viticulture in Serbia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 158-159, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.02.004>
- Rupp, D. E., Abatzoglou, J. T., Hegewisch, K. C., Mote, P. W. (2013). Evaluation of CMIP5 20th century climate simulations for the Pacific northwest USA. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 10884-10906. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50843>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, (2014). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. "Cambio Climático en Argentina, Tendencias y Proyecciones" (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Buenos Aires, Argentina. http://3cn.cima.fcen.uba.ar/3c_inicio.php
- Wypych, A., Ustrnul, Z., Sulikowska, A., Chmielewski, F. M., & Bochenek, B. (2017). Spatial and Temporal Variability of the Frost-Free Season in Central Europe and Its Circulation Background. *International Journal of Climatology*, 37, 3340-3352. <https://doi.org/10.1002/joc.4920>
- Xia, J., Yan, Z., & Wu, P., (2013). Multidecadal variability in local growing season during 1901-2009. *Climate Dynamics*, 41, 295-305. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1438-5>