



## Estudio Comparativo de Tres Modelos Climáticos en Argentina Comparative Study of Three Climatic Models Applied to Argentina

María Luján Bustos<sup>1</sup>; Federico Ferrelli<sup>2</sup> & María Cintia Piccolo<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo.

12 de Octubre y San Juan, 4° piso - Bahía Blanca, 8000. Pcia. Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Instituto Argentino de Oceanografía. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IADO-CONICET).

Camino La Carrindanga Km 7,5 - Bahía Blanca, 8000. Pcia. Buenos Aires, Argentina

E-mails: [lujan.bustos@uns.edu.ar](mailto:lujan.bustos@uns.edu.ar); [fferrelli@criba.edu.ar](mailto:fferrelli@criba.edu.ar); [ofpiccol@criba.edu.ar](mailto:ofpiccol@criba.edu.ar)

Recibido em: 18/11/2016 Aprobado em: 13/01/2017

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_1\\_34\\_43](http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_34_43)

### Resumen

En algunas regiones del planeta, la escasez de estaciones meteorológicas con largas series de datos, ocasiona problemas para la caracterización del clima. En este contexto, adquieren importancia los modelos numéricos de obtención de datos climáticos. Uno de los mayores problemas que se presentan en Argentina es la desigual distribución espacial de las estaciones meteorológicas con registros de 50 años, lo que dificulta el estudio de su clima. El objetivo de esta investigación fue establecer para Argentina el modelo numérico que mejor represente las variables de: precipitación, humedad relativa, temperatura media, máxima y mínima del aire. Para ello, se analizaron datos históricos in situ pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional para el período 1950-2010 y se consideraron los resultados obtenidos de los modelos Reanálisis (NCEP/NCAR), WorldClim y el NEW01. Para su comparación se aplicaron diferentes técnicas estadísticas (análisis de varianza, test de diferencia mínima significativa, análisis de regresión, coeficientes de correlación, determinación y concordancia). Además, se utilizaron métodos de interpolación para la representación gráfica de los resultados mediante un SIG. Los modelos resultaron útiles para caracterizar variables climáticas en zonas carentes de registros. El WorldClim tuvo un mejor ajuste para los datos de temperatura media del aire, mientras que el NEW01 fue mejor para la caracterización de las precipitaciones.

**Palabras-clave:** Modelos climáticos; análisis estadístico; variables meteorológicas; Argentina

### Abstract

The lack of meteorological data, with a long time series in some areas all over the world, generate difficulties when we have to characterize the climate. In this context, climate models are relevant to obtain these type of data. Particularly, in Argentina there are no meteorological stations that are distributed equidistantly with records over fifty years, therefore it climatic characterization is complicated. In this context, the aim of this study was to set for Argentina the climatic model that best represent the following variables: precipitation, relative humidity, mean, minimum and maximum temperature. To carry it out, historical meteorological data (from Servicio Meteorológico Nacional) registered In Situ and those who belong to three climatic models (Reanalysis NCEP/NCAR, WorldClima and NEW01) were analyzed for the period 1950-2010. For comparison, different statistical techniques were applied (Analysis of the variance, Fisher tests, regression analysis, correlation coefficients, determination and consistency). In addition, interpolation methods were applied in order to analyze the spatial distribution of each meteorological variable. As a result, climatic models are useful to characterize the climate in those areas with lack of information. Wordclim has the best fit for mean temperature, while NEW01 for precipitation.

**Keywords:** Climatic models; statistical analysis; meteorological variables; Argentina

## 1 Introducción

Para analizar climáticamente un área es necesario tener información de estaciones meteorológicas distribuidas de manera equidistante y con una serie de tiempo superior a 30 años (Celemin, 1984; Strahler & Strahler, 1989; Ferrelli *et al.*, 2016). La escasez de estos datos genera inconvenientes al momento de caracterizar el clima de una región. Por tal motivo, se han desarrollado métodos indirectos de obtención de información que son herramientas útiles para el estudio de una variable climática. A través de la validación de herramientas como imágenes satelitales, datos aeronavales, modelos numéricos, entre otros, se ha logrado obtener datos meteorológicos de largas series de tiempo (Klister *et al.*, 2001; New *et al.*, 2002; Hijmans *et al.*, 2005).

A escala global, se han realizado estudios para desarrollar modelos numéricos que permitan describir las situaciones atmosféricas. Xue *et al.* (1991) diseñaron uno basado en las interacciones entre la tierra y la atmósfera, pudiendo indicar las variaciones diurnas, el albedo, etc. Ritter & Geleyn (1992) generaron esquemas de radiación con potenciales aplicaciones en simulaciones climáticas. Con el modelo Reanálisis NCEP/NCAR se han logrado validar datos climáticos en series de 40 y 50 años para todo el planeta (Kalnay *et al.*, 1996; Klister *et al.*, 2001). Basist & Cheliah (1997) compararon la temperatura troposférica derivada del modelo mencionado, con análisis operacionales del NCEP y con unidades de sondeos. Simmonds & Keay (2000) lo aplicaron para estudiar los ciclones en el área subtropical del Hemisferio Sur. Mientras que en Argentina lo han aplicado Rusticucci & Kousky (2002) para estudiar eventos extremos, Ferrelli *et al.* (2016) para estudios de diversos elementos meteorológicos a escala regional y Bustos *et al.* (2016) para caracterizar distintos ambientes del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) considerando la mínima escala espacial del modelo.

El territorio continental de Argentina se extiende entre los 22° y los 55° de Latitud Sur. Esta extensión latitudinal y la variedad del relieve favorecen el desarrollo de distintos tipos de climas que van desde el subtropical hasta el frío nival (Figura 1). La problemática generada por la ausencia de mediciones meteorológicas en amplias regiones dificulta sus estudios climáticos. Por este motivo,

el objetivo de este trabajo fue analizar y comparar la información obtenida de diversos modelos numéricos (Reanálisis NCEP/NCAR, WorldClim y NEW01) con datos medidos en Argentina para establecer el más adecuado para caracterizar las variables de temperatura media, máxima y mínima del aire, precipitación y humedad relativa.

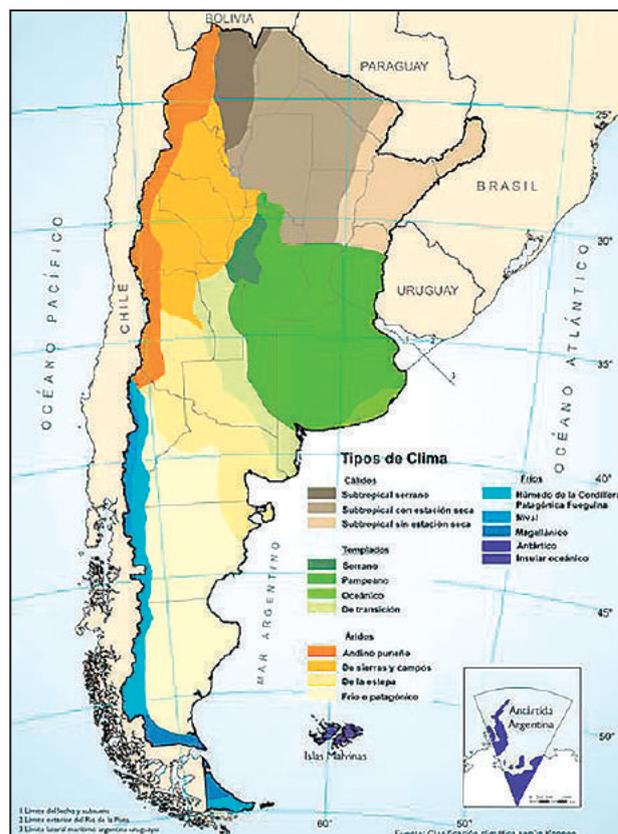


Figura 1 Climas de la República Argentina según la clasificación de Köppen (en: [http://www.imhichihu-conicet.gov.ar/ARGENTINAenMAPAS/caste/rn\\_clim.htm](http://www.imhichihu-conicet.gov.ar/ARGENTINAenMAPAS/caste/rn_clim.htm))

## 2 Metodología

Se recopilieron datos medios mensuales de temperatura media, mínima y máxima del aire, humedad relativa y precipitación de 49 estaciones (Figura 2) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina) para el período 1950-2010 (Tabla 1). Se trabajó con un total de 35.280 datos. La calidad de ellos fue analizada por Díaz (2001) para el período 1961-1990. Aquellos correspondientes al período 1991-2010 fueron sometidos a pruebas de normalidad, tendencia y consistencia teniendo en cuenta la guía de control de calidad de datos climatológicos utilizando la metodología expuesta

por Rusticucci & Barrucand (2001) aplicada en los estudios de Aliaga *et al.* (2016) y Ferrelli *et al.* (2016). Si bien no se observó una distribución espacial homogénea entre las estaciones del SMN, fueron los únicos datos disponibles para el estudio.

Posteriormente, se seleccionaron tres modelos de predicción climática: Reanálisis NCEP/NCAR, WorldClim y NEW01. Todos ellos son de libre acceso y la información está disponible de forma digital para períodos superiores a 30 años. Cada uno de ellos permite obtener información de distintas variables y para diferentes períodos (Tabla 2).

El Reanálisis NCEP/NCAR (de aquí en adelante Reanálisis), se compone de un grupo de productos del Centro de Predicción del Medio Ambiente Nacional (NCEP), el Centro Nacional de

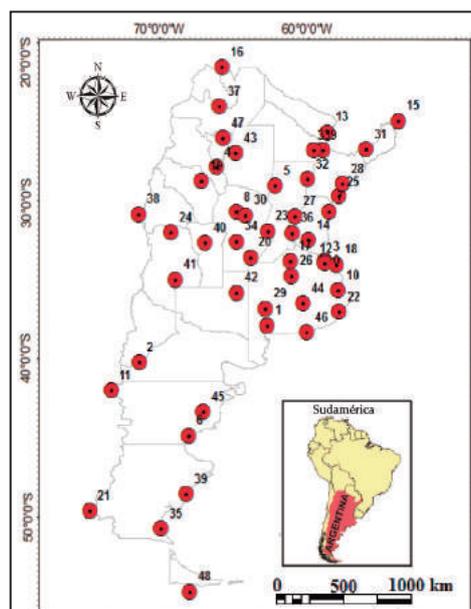


Figura 2 Localización de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio. Referencias de las estaciones en Tabla 1.

| Estación N° | Nombre                       | Latitud | Longitud | Altitud msnm (m) | Parámetros meteorológicos - Período 1950-2010 |                   |                   |                      |                    |
|-------------|------------------------------|---------|----------|------------------|---|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
|             |                              |         |          |                  | Temp. media (°C)                              | Temp. máxima (°C) | Temp. mínima (°C) | Humedad Relativa (%) | Precipitación (mm) |
| 1           | Aeroparque Buenos Aires Aero | -34,34  | -58,25   | 6                | 17,7  | 19,8              | 15,5              | 72,6                 | 1039,3             |
| 2           | Bahía Blanca Aero            | -38,44  | -62,1    | 83               | 15,2  | 18,9              | 11,7              | 64,5                 | 636,2              |
| 3           | Dolores Aero                 | -36,21  | -57,44   | 9                | 15,0  | 18,9              | 11,1              | 79,0                 | 938,1              |
| 4           | Ezeiza Aero                  | -34,49  | -58,32   | 20               | 16,5  | 19,8              | 13,3              | 74,2                 | 838,1              |
| 5           | Junín Aero                   | -34,33  | -60,55   | 81               | 16,0  | 19,5              | 12,7              | 73,8                 | 860,7              |
| 6           | La Plata Aero                | -34,58  | -57,54   | 23               | 15,9  | 18,6              | 12,9              | 77,3                 | 1040,2             |
| 7           | Mar del Plata Aero           | -37,56  | -57,35   | 21               | 13,9  | 18,5              | 10,8              | 79,5                 | 929,0              |
| 8           | Nueve de Julio               | -35,27  | -60,53   | 76               | 16,1  | 19,6              | 12,7              | 71,7                 | 1028,4             |
| 9           | Pigüé Aero                   | -37,36  | -62,23   | 304              | 13,6  | 17,8              | 9,6               | 69,4                 | 753,1              |
| 10          | Tandil Aero                  | -37,14  | -59,15   | 175              | 13,6  | 16,4              | 10,8              | 76,1                 | 894,5              |
| 11          | Tres Arroyos                 | -38,2   | -60,15   | 115              | 14,3  | 17,8              | 11,0              | 68,4                 | 801,2              |
| 12          | Buenos Aires                 | -34,35  | -58,29   | 25               | 17,7  | 20,5              | 15,1              | 71,5                 | 1169,5             |
| 13          | Catamarca Aero               | -28,36  | -65,46   | 454              | 20,7  | 24,3              | 16,9              | 55,7                 | 428,9              |
| 14          | Resistencia Aero             | -27,27  | -59,03   | 52               | 21,1  | 24,5              | 18,1              | 74,7                 | 1363,8             |
| 15          | Comodoro Rivadavia Aero      | -45,47  | -67,3    | 46               | 13,0  | 16,0              | 10,0              | 48,8                 | 236,6              |
| 16          | Esquel Aero                  | -42,56  | -71,09   | 785              | 8,2   | 12,2              | 4,4               | 61,2                 | 484,4              |
| 17          | Trelew Aero                  | -43,12  | -65,16   | 43               | 13,7  | 17,3              | 10,1              | 52,2                 | 199,2              |
| 18          | Córdoba Aero                 | -31,19  | -64,13   | 474              | 17,4  | 21,2              | 13,7              | 67,1                 | 839,9              |
| 19          | Laboulaye Aero               | -34,08  | -63,22   | 137              | 16,3  | 20,3              | 12,5              | 70,0                 | 865,1              |
| 20          | Marcos Juárez Aero           | -32,42  | -62,09   | 114              | 17,1  | 20,9              | 13,5              | 74,5                 | 907,7              |
| 21          | Pilar Observatorio           | -31,40  | -63,53   | 338              | 17,7  | 21,0              | 13,7              | 68,4                 | 782,1              |
| 22          | Río Cuarto Aero              | -33,07  | -64,14   | 420              | 16,5  | 20,1              | 13,2              | 65,9                 | 838,5              |
| 23          | Corrientes Aero              | -27,27  | -58,46   | 62               | 21,3  | 24,7              | 18,3              | 73,9                 | 1425,6             |
| 24          | Monte Caseros Aero           | -30,16  | -57,39   | 54               | 19,7  | 22,9              | 16,6              | 73,3                 | 1428,1             |
| 25          | Paso de los Libres Aero      | -29,41  | -57,1    | 70               | 19,8  | 22,9              | 16,7              | 74,0                 | 1504,9             |
| 26          | Concordia Aero               | -31,18  | -58,01   | 38               | 18,9  | 22,3              | 15,7              | 72,2                 | 1343,3             |
| 27          | Galeguaychú Aero             | -33     | -59,37   | 21               | 17,7  | 21,1              | 14,4              | 73,5                 | 1086,9             |
| 28          | Paraná Aero                  | -31,47  | -60,29   | 78               | 18,1  | 21,6              | 14,9              | 73,1                 | 1085,5             |
| 29          | Formosa Aero                 | -26,12  | -58,14   | 60               | 22,3  | 25,6              | 19,4              | 74,3                 | 1408,9             |
| 30          | Jujuy Aero                   | -24,23  | -65,05   | 905              | 18,2  | 22,7              | 14,7              | 69,5                 | 792,1              |
| 31          | Santa Rosa Aero              | -36,34  | -64,16   | 191              | 15,5  | 19,6              | 11,4              | 66,4                 | 695,0              |
| 32          | La Rioja Aero                | -29,23  | -66,49   | 429              | 20,1  | 24,5              | 16,3              | 59,3                 | 373,7              |
| 33          | Mendoza Aero                 | -32,5   | -68,47   | 704              | 16,9  | 20,7              | 13,3              | 55,8                 | 214,4              |
| 34          | San Rafael Aero              | -34,35  | -68,24   | 748              | 15,3  | 19,5              | 11,8              | 58,0                 | 346,4              |
| 35          | Iguazú Aero                  | -25,44  | -54,28   | 270              | 21,0  | 24,7              | 17,6              | 80,3                 | 1829,0             |
| 36          | Posadas Aero                 | -27,22  | -55,58   | 125              | 21,6  | 24,8              | 18,5              | 74,0                 | 1762,0             |
| 37          | Bariloche Aero               | -41,09  | -71,1    | 840              | 8,2   | 11,6              | 4,8               | 69,5                 | 806,7              |
| 38          | Salta Aero                   | -24,47  | -65,29   | 1.221            | 16,8  | 20,9              | 13,1              | 72,6                 | 727,6              |
| 39          | San Juan Aero                | -31,34  | -68,25   | 596              | 17,8  | 22,3              | 13,6              | 50,4                 | 88,4               |
| 40          | San Luis Aero                | -33,16  | -66,21   | 713              | 17,3  | 21,2              | 13,5              | 55,4                 | 619,6              |
| 41          | Río Gallegos Aero            | -51,37  | -69,17   | 19               | 7,6   | 10,6              | 4,6               | 65,8                 | 247,6              |
| 42          | Lago Argentino Aero          | -50,2   | -72,18   | 220              | 7,6   | 10,3              | 5,0               | 58,2                 | 213,9              |
| 43          | San Julián Aero              | -49,19  | -67,47   | 62               | 9,6   | 12,4              | 7,0               | 60,7                 | 251,2              |
| 44          | Ceres Aero                   | -29,53  | -61,57   | 88               | 19,0  | 23,0              | 15,6              | 73,0                 | 922,6              |
| 45          | Reconquista Aero             | -29,11  | -59,42   | 53               | 20,1  | 23,5              | 17,4              | 76,4                 | 1232,1             |
| 46          | Rosario Aero                 | -32,55  | -60,47   | 25               | 17,3  | 20,9              | 13,9              | 74,7                 | 1020,1             |
| 47          | Santiago del Estero Aero     | -27,46  | -64,18   | 199              | 20,5  | 24,6              | 16,6              | 65,0                 | 601,6              |
| 48          | Ushuaia Aero                 | -54,48  | -68,19   | 57               | 7,4   | 10,1              | 5,2               | 75,6                 | 748,1              |
| 49          | Tucumán Aero                 | -26,51  | -65,06   | 450              | 19,6  | 23,1              | 16,4              | 72,3                 | 1043,2             |

Tabla 1 Estaciones meteorológicas del SMN en Argentina.

| Modelos              | Variables Meteorológicas   | Período    | Resolución Espacial                  |
|----------------------|--|------------|--------------------------------------|
| Reanálisis NCEP/NCAR | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación</li> <li>• Temperatura media</li> <li>• Humedad relativa</li> </ul>                                 | 1950 -2010 | 2.5° de latitud por 2.5° de longitud |
| WorldClim            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación</li> <li>• Temperatura media</li> <li>• Temperatura máxima</li> <li>• Temperatura mínima</li> </ul> | 1950 -2000 | 1 km <sup>2</sup>                    |
| NEW01                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación</li> </ul>  | 1961 -1990 | 0.5° de latitud por 0.5° de longitud |

Tabla 2 Procedencia, escala temporal y espacial de los datos de los modelos numéricos considerados.

Investigación Atmosférica y la National Oceanic and Atmospheric Administration / Climate Diagnostics Center (NOAA / CDC) (<http://wesley.wwb.noaa.gov/Reanalysis.html>). Este modelo permite obtener información de distintas variables climáticas de forma mensual para el período 1948-2014 con una resolución espacial de 2° 30' de latitud por 2° 30' de longitud. El WorldClim<sup>1</sup> brinda información climática, en valores medios, con alta resolución espacial (1 km<sup>2</sup>) para el período 1950-2000 (<http://www.worldclim.org/>). El modelo NEW01<sup>2</sup> caracteriza las precipitaciones medias de un área con una resolución espacial de 30' de latitud por 30' de longitud para el período 1961-1990 (<http://www.cru.uea.ac.uk>) (Tabla 2).

Las series de datos observadas en superficie (en adelante SMN) fueron promediadas para distintos períodos, coincidentes con los de cada modelo seleccionado. Para su análisis y comparación se aplicaron diversas técnicas estadísticas: cálculo de la media, desviación estándar y análisis de la varianza, coeficientes de correlación de Pearson y Concordancia. Para analizar las variaciones entre los valores medios y su significado respecto a los datos del SMN se aplicó el test de diferencia mínima significativa (DMS-Fisher) con un  $\alpha = 0,05$ . La representación gráfica de los resultados

1 Más información acerca de los métodos usados para generar los datos en el modelo WorldClim se encuentran en Hijmans *et al.* (2005).

2 Más información acerca de los métodos usados para generar los datos en el modelo NEW01 se encuentran en New *et al.* (2002).

se realizó a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) (ArcGIS 9.3) mediante el método Kriging esférico. Debido a que el NEW01 posee un período de datos menor a los otros modelos, en el caso de la precipitación, se dividió el análisis en tres etapas en las que se realizaron los mismos análisis estadísticos representados en la misma figura. En la primera, se compararon los datos del SMN con los del NEW01 para el período 1961-1990. En la segunda, se analizaron los datos del SMN con los obtenidos del WorldClim para el período 1950-2000 y finalmente la información del período 1950-2010 con los del Reanálisis.

### 3 Resultados

#### 3.1 Temperatura Media del Aire

Estadísticamente no se observaron diferencias significativas entre los valores medios de este parámetro (Tabla 3). Los resultados fueron mayores para el WorldClim, marcando 0,95 para Pearson y 0,94 para la Concordancia. La diferencia entre los valores medios del WorldClim con los del SMN fueron de -0,43 °C (Tabla 3). Asimismo, se identificó una diferencia mayor a 2 °C entre la temperatura del SMN y la del Reanálisis. Los valores de Pearson y Concordancia confirman esta divergencia, el primer parámetro fue 0,86, mientras que el segundo fue menor (0,77). Esto indica que, si bien los datos del Reanálisis coinciden en más del 50 %, algunos presentan diferencias, las cuales pueden ser significativas en la distribución espacial.

La distribución espacial de la temperatura media del aire es similar a la clasificación climática de Köppen (cálidos, templados y fríos) (Figura 1). También se observó una similitud entre los datos del SMN y los del WorldClim, con valores mayores en el norte del país y una disminución de la temperatura en sentido este-oeste. En el sur, las temperaturas fueron más bajas y disminuyeron de noreste a sudoeste. En cambio, los resultados del Reanálisis mostraron temperaturas elevadas en todo el norte del país y disminuyendo hacia el sur pero sin diferencias regionales y con una clara sobreestimación del parámetro (Figura 3).

#### 3.2 Temperatura Máxima del Aire

La diferencia de los valores medios entre las mediciones y los resultados del WorldClim fue +1,74

| Método Estadístico | SMN                      | WorldClim | Reanálisis |
|--------------------|--------------------------|-----------|------------|
| Medias (°C)        | 16.36                    | 15.93     | 18.50      |
| DMS-Fisher         | Valores de media iguales |           |            |
| R <sup>2</sup>     | --                       | 0.97      | 0.97       |
| Pearson            | --                       | 0.95      | 0.86       |
| Concordancia       | --                       | 0.94      | 0.77       |

Tabla 3 Análisis estadísticos realizados con los datos de temperatura media del aire para el período 1950-2000 ( $\alpha = 0,05$ ).

°C. El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> fue alto (0,99) al igual que el de correlación de Pearson (0,95). Sin embargo, el índice de Concordancia fue más bajo (0,87), lo que podría indicar la existencia de sectores con menor representatividad espacial (Tabla 4).

| Método estadístico | SMN                      | WorldClim |
|--------------------|--------------------------|-----------|
| Medias (°C)        | 20.46                    | 22.20     |
| DMS-Fisher         | Valores de media iguales |           |
| R <sup>2</sup>     | --                       | 0.99      |
| Pearson            | --                       | 0.95      |
| Concordancia       | --                       | 0.87      |

Tabla 4 Análisis estadísticos de temperatura máxima del aire para el período 1950-2000 ( $\alpha = 0,05$ ).

La distribución espacial de la temperatura máxima fue similar entre ambas fuentes de información. Asimismo, como lo demostró el

índice de Concordancia, en la mayor parte del país y, especialmente, en el noreste y centro-oeste, el WorldClim sobreestimó los valores presentando temperaturas superiores a las medidas (Figura 4).

### 3.3 Temperatura Mínima del Aire

En el caso de este parámetro, los resultados del modelo WorldClim fueron muy diferentes a los datos observados (Tabla 5). La diferencia entre las temperaturas medias fue -3,66 °C. A pesar de ello, existe una buena correlación lineal entre ambas mediciones dado que el coeficiente de Pearson fue 0,94 y el R<sup>2</sup> 0,87. Sin embargo, la Concordancia fue baja (0,65) (Tabla 5). Todo indica una escasa representatividad de la temperatura mínima del WorldClim para la Argentina.

La temperatura mínima fue diferente en el norte, donde los datos del SMN abarcaron un área mayor con temperaturas que oscilaron entre los 12,7 °C y 14,2 °C. En esa zona el WorldClim mostró una disminución de temperaturas de este a oeste, variando de 14 a 9 °C. En el sur los datos del WorldClim siguieron la tendencia de distribución espacial de los del SMN. Asimismo, en el centro y sur del país, los datos del SMN oscilaron entre 2,2 °C y 3,7 °C y en el WorldClim los mínimos valores oscilaron entre -0,8 °C y 0,7 °C (Figura 5).

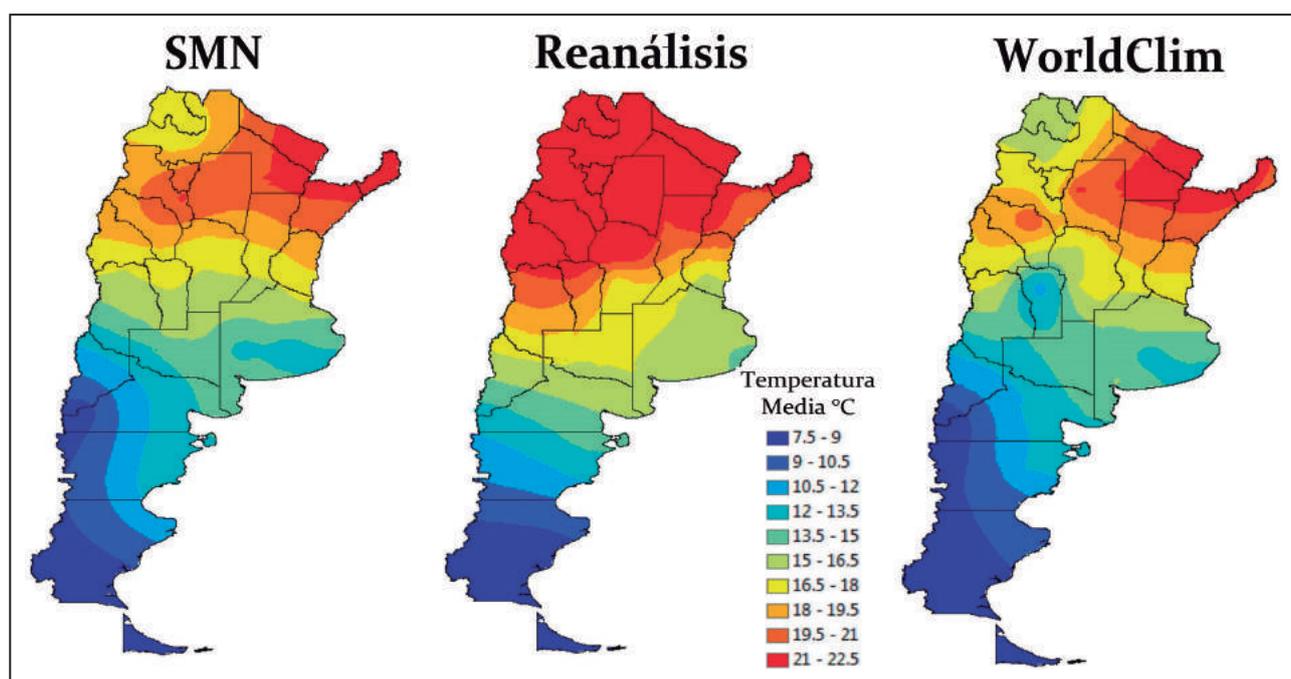


Figura 3 Distribución espacial de la temperatura media del aire para el período 1950-2000.

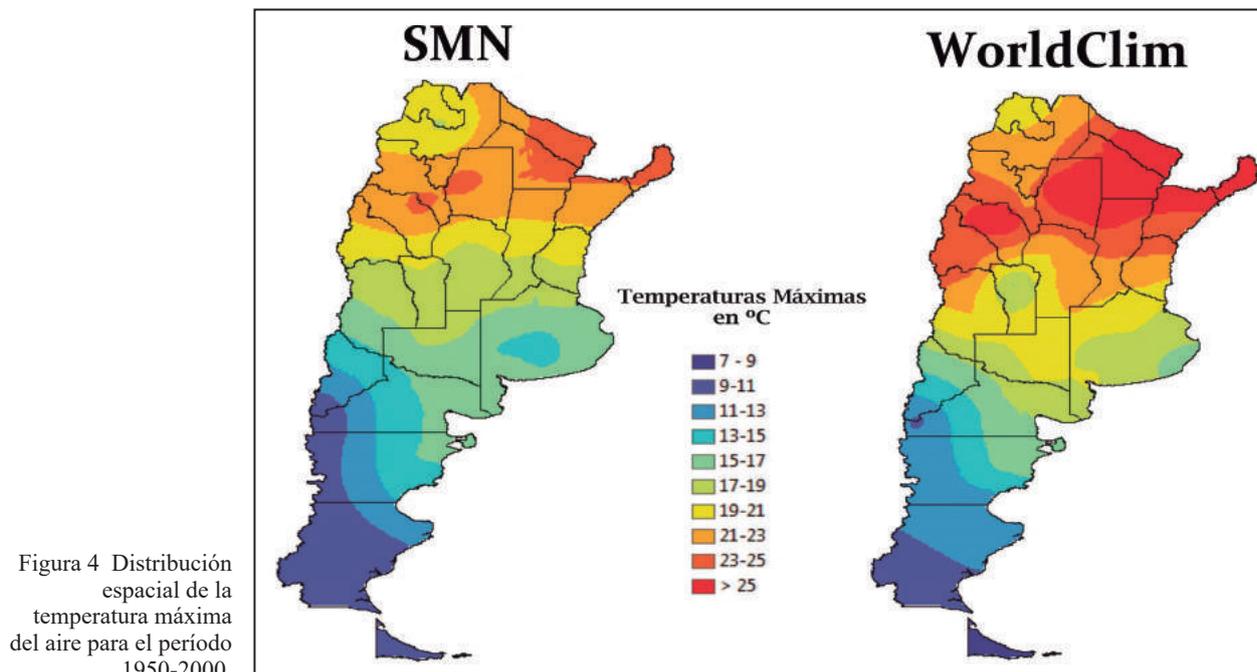


Figura 4 Distribución espacial de la temperatura máxima del aire para el período 1950-2000.

| Método Estadístico | SMN                         | WorldClim |
|--------------------|-----------------------------|-----------|
| Medias (°C)        | 13.43                       | 9.77      |
| DMS-Fisher         | Valores de media diferentes |           |
| R <sup>2</sup>     | --                          | 0.87      |
| Pearson            | --                          | 0.94      |
| Concordancia       | --                          | 0.65      |

Tabla 5 Análisis estadísticos realizados con los datos de la temperatura mínima del aire para el período 1950-2000.  $\alpha = 0,05$ .

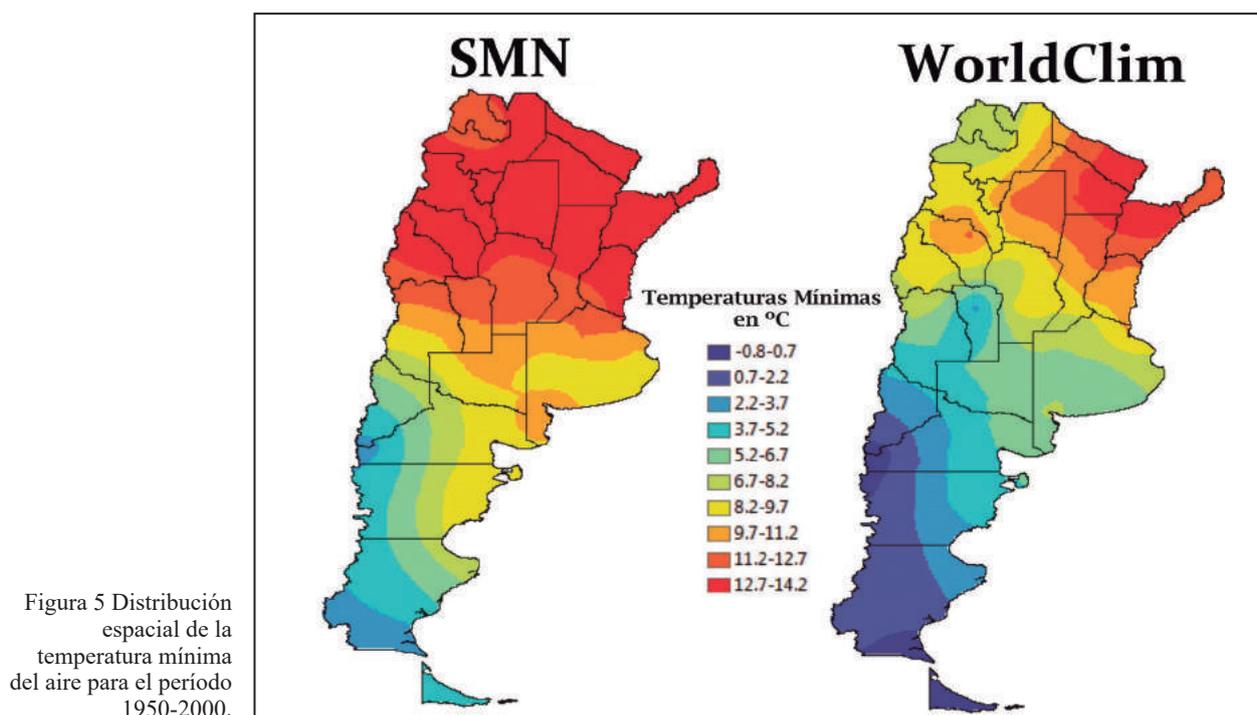


Figura 5 Distribución espacial de la temperatura mínima del aire para el período 1950-2000.

### 3.4 Humedad Relativa

No se observaron diferencias importantes entre los valores medios del Reanálisis y los datos del SMN (-1,4 %) y el índice de determinación fue 0,95 (Tabla 6). Sin embargo, los coeficientes de Pearson y de Concordancia mostraron una baja correlación entre los datos (0,41 y 0,39, respectivamente) lo que indica la poca representatividad del Reanálisis para la humedad relativa (Tabla 6).

La distribución espacial de la humedad relativa confirmó lo expuesto por los índices estadísticos. Considerando los datos del SMN se observa que la humedad decrece en sentido este-oeste. Esto se relaciona con la clasificación de Koppen (Figura 1), donde los climas húmedos poseen una tendencia a disminuir de este a oeste y con zonas húmedas en el límite suroeste y sur. Mientras que, con los resultados del Reanálisis, los valores mínimos se localizaron en el centro del país y los máximos en el norte y sur (Figura 6).

### 3.5 Precipitaciones

En el período 1961-1990 las precipitaciones medias anuales obtenidas de los datos observados

y del modelo NEW01 fueron similares (Tabla 7). La diferencia entre ellos fue mínima (-4,2 mm). El índice de determinación  $R^2$  fue 0,91, no tan elevado como se esperaba considerando los altos valores en el coeficiente de correlación de Pearson y la Concordancia (0,96 en ambos casos) (Tabla 7). La representación espacial de la precipitación también

| Método Estadístico | SMN                      | Reanálisis |
|--------------------|--------------------------|------------|
| Medias (%)         | 70.1                     | 68.7       |
| DMS-Fisher         | Valores de media iguales |            |
| $R^2$              | --                       | 0.95       |
| Pearson            | --                       | 0.41       |
| Concordancia       | --                       | 0.39       |

Tabla 6 Análisis estadísticos de humedad relativa. Período 1950-2010 ( $\alpha = 0,05$ ).

| Método Estadístico | SMN                      | NEW01 |
|--------------------|--------------------------|-------|
| Medias (mm)        | 843.7                    | 839.5 |
| DMS-Fisher         | Valores de media iguales |       |
| $R^2$              | --                       | 0.91  |
| Pearson            | --                       | 0.96  |
| Concordancia       | --                       | 0.96  |

Tabla 7 Análisis estadístico de precipitación. Período 1961-1990 ( $\alpha = 0,05$ ).

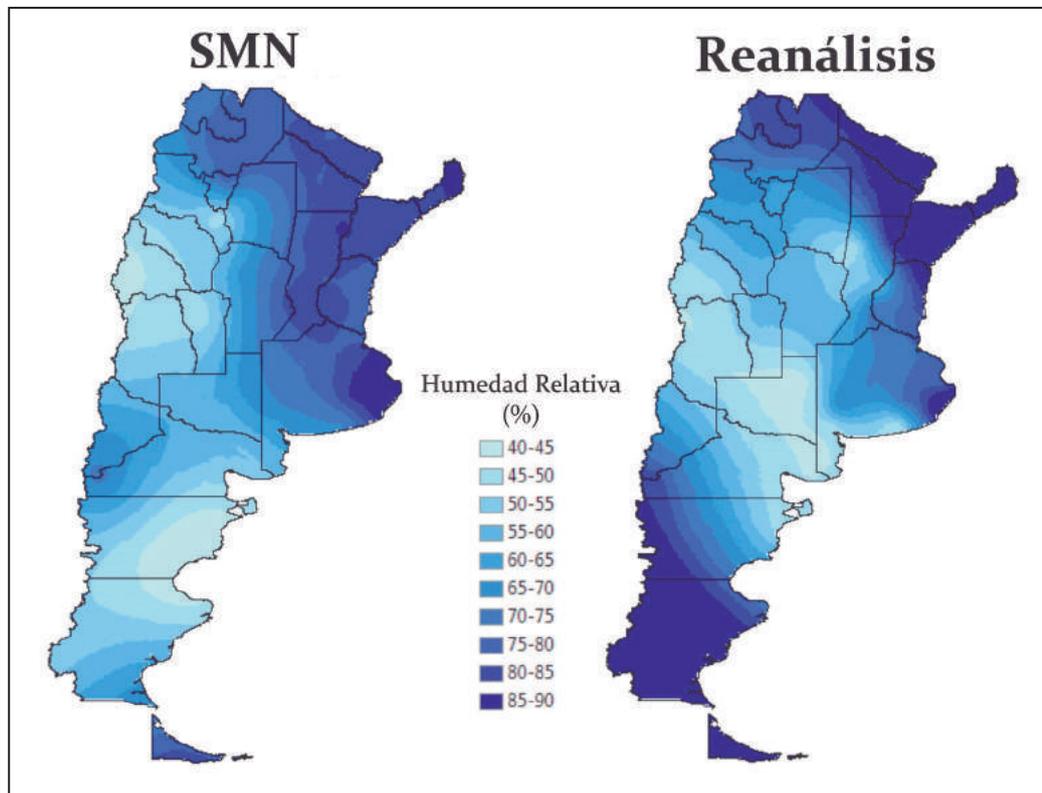


Figura 6  
 Distribución espacial de la humedad relativa. Período 1950-2010.

confirmó la alta correlación entre los datos. Los mayores valores se concentraron en el noreste del país y los menores en el oeste y sur. Sin embargo, como lo demostró el índice de determinación la representación tuvo algunas disparidades, tal es el caso al norte del clima templado pampeano y oeste del árido montañoso (Figura 1) donde el modelo NEW01 sobreestimó los valores (Figura 7).

Para el período 1950-2000 se comparó los valores medios de los datos medidos del SMN con los resultados del WorldClim y para el período 1950-2010 se comparó con los resultados del Reanálisis. Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre los valores medios (Tabla 8). La diferencia fue -28,5 mm para el WorldClim y +16,8 mm para el Reanálisis. El WorldClim presentó una buena relación con los datos medidos. El índice de determinación fue alto (0,92) al igual que Pearson y la Concordancia (ambos con 0,96). Por otro lado, el Reanálisis presentó valores estadísticamente bajos. Manifestó un  $R^2$  de 0,25, una baja correlación (Pearson=0,50) y la Concordancia fue de 0,49 (Tabla 8). Si bien los valores medios estadísticamente fueron similares, los datos del Reanálisis evidenciaron un mal ajuste.

| Método Estadístico | SMN                      | WorldClim | Reanálisis |
|--------------------|--------------------------|-----------|------------|
| Medias (mm)        | 848.1                    | 819.6     | 864.9      |
| DMS-Fisher         | Valores de media iguales |           |            |
| $R^2$              | --                       | 0.92      | 0.25       |
| Pearson            | --                       | 0.96      | 0.50       |
| Concordancia       | --                       | 0.96      | 0.49       |

Tabla 8 Análisis estadísticos de precipitación de las diferentes fuentes de información. Para el Reanálisis se utilizó el período 1950-2010 y para el WorldClim el período 1950-2000. Ambas en comparación con los datos del SMN ( $\alpha = 0, 05$ ).

Al comparar la distribución espacial de la precipitación del SMN con el WorldClim y el Reanálisis, se observó que entre los dos primeros el patrón fue similar. Mientras que los datos del Reanálisis no representaron de la misma manera la distribución espacial y se identificaron discrepancias en todo el país (Figura 8).

Si se compara los datos del SMN con la clasificación climática de Koppen (Figura 1) se puede observar una distribución similar. Asimismo, hay una reducción en el clima húmedo patagónico en el área suroeste. También, en la zona de clima templado pampeano se observa un aumento de las precipitaciones hacia el noroeste (Figura 8).

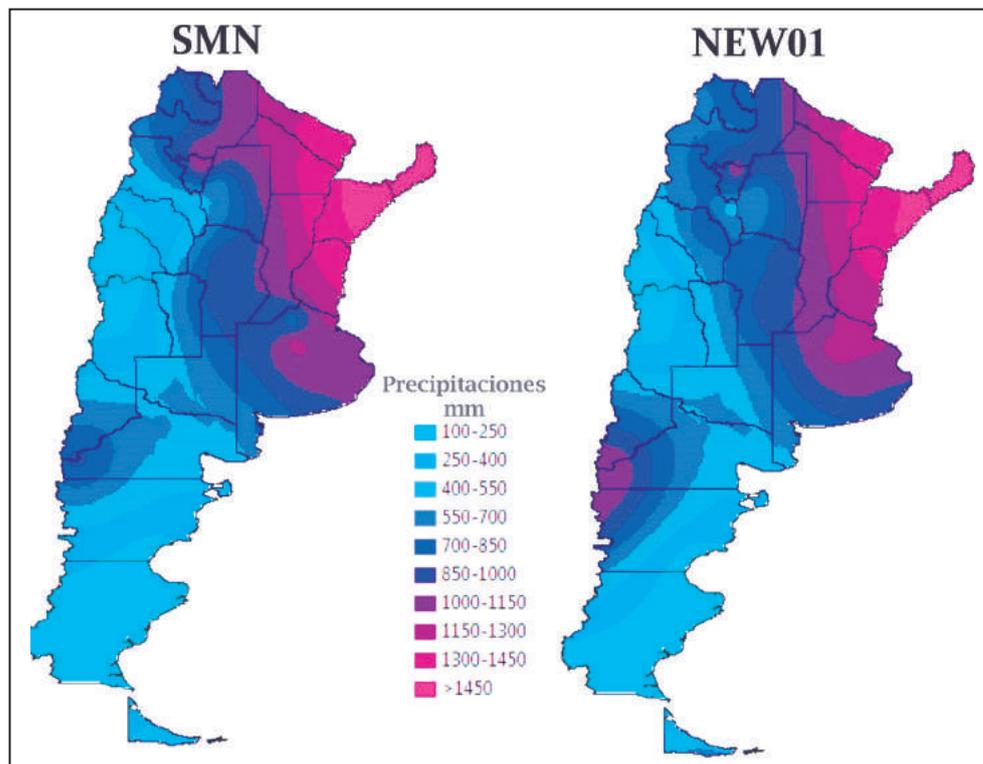


Figura 7 Distribución espacial de la precipitación. Período 1961-1990.

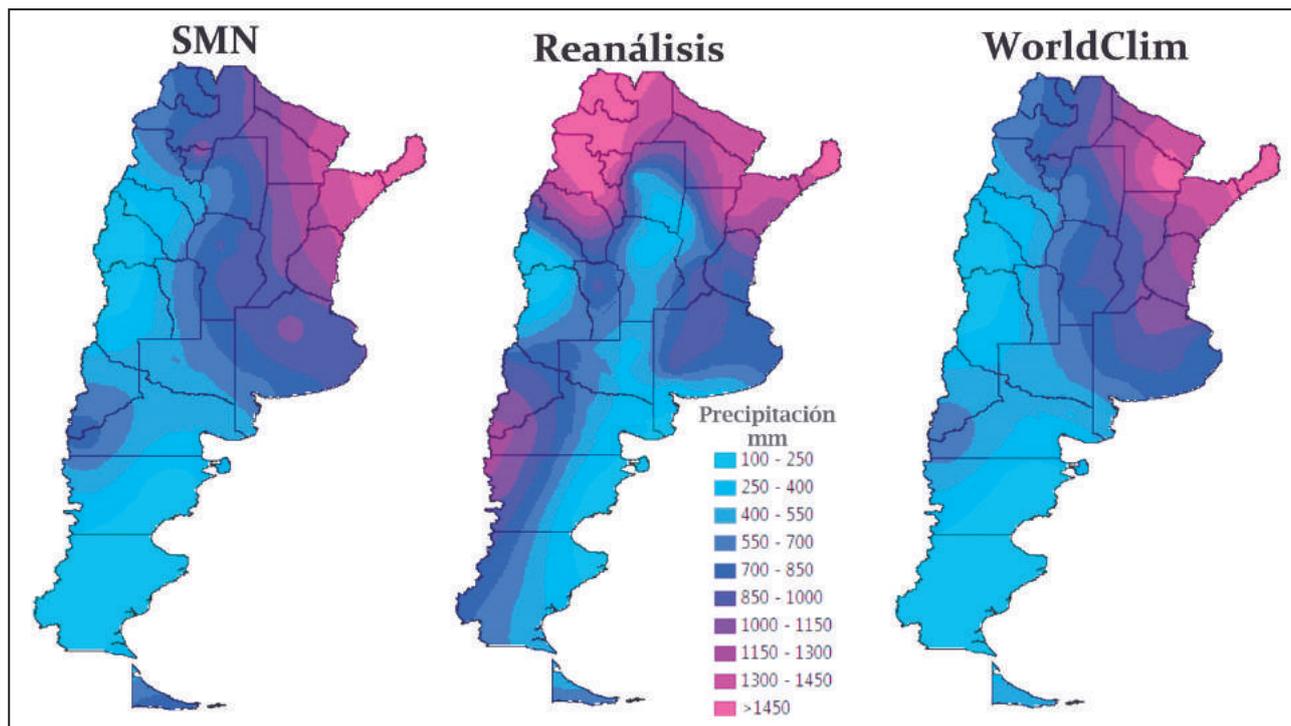


Figura 8 Distribución espacial de la precipitación del SMN y de Reanálisis (1950-2010) y del WorldClim (1950-2000).

#### 4 Discusión y Conclusiones

En esta investigación se comprobó que es posible caracterizar variables climáticas de zonas carentes de información. Esto se puede lograr a partir de la adquisición de datos provenientes de modelos de predicción climática y la aplicación de métodos de interpolación de los SIG. A partir del análisis estadístico realizado, se obtuvo que la temperatura media del aire de Argentina puede caracterizarse mejor mediante el WorldClim que con el Reanálisis dado que éste último sobreestimó los datos en el norte del país. A pesar de ello y coincidiendo con los aportes de Mesinger *et al.* (2006), se destaca la importancia de los datos del Reanálisis dado que tienen una disponibilidad mensual y muestra buenos ajustes entre los datos estimados y las observaciones en el terreno. Si bien los valores de temperatura pueden presentar errores por la influencia de la topografía, una de las ventajas de este modelo es que puede corregirse a partir de métodos estadísticos (Zhao *et al.*, 2008; Durand *et al.*, 2009; Ferrelli, *et al.*, 2016).

Por otra parte, la temperatura máxima del aire presentó un comportamiento espacial similar entre el WorldClim y los datos del SMN. Los resultados demostraron que el WorldClim es un buen estimador de este parámetro pero no lo es para la temperatura

mínima. Esto último, probablemente se deba a la topografía irregular del país. En este último caso, el parámetro fue subestimado en el noreste del país y presentó valores menores a los medidos en el sudoeste. Los datos estadísticos calculados muestran una tendencia lineal de alta correlación entre las variables, lo que podría favorecer la estimación de factores de corrección para aproximarlos a los datos medidos en el terreno.

La distribución espacial de la humedad relativa presentó diferencias importantes entre las diferentes fuentes de información. Los datos del Reanálisis presentaron valores mayores a los del SMN en el norte y el sur del país y mostraron los menores en la zona central. Por ello, es aconsejable evitar el uso de los datos de este modelo para estimar este parámetro climático, aunque, de ser necesario su uso, es aconsejable contrastarlos con datos observados y generar modelos de adaptación a un territorio en particular.

Por último, la precipitación fue mejor estimada por el NEW01, ya que su distribución espacial fue similar a la observada en superficie y la diferencia entre las medias fue inferior a 5 mm. Sin embargo, este modelo solo brinda información promediada para el período 1961-1990. Por otro lado, el WorldClim

tampoco presentó variaciones con los registros del SMN pero las diferencias entre las medias fueron superiores a los 25 mm. Finalmente, el Reanálisis no fue apropiado para estimar este parámetro. Esto puede deberse a la diferencia resultante de utilizar datos medidos por estaciones meteorológicas, que toman datos *in situ*, y datos estimados por modelos para áreas mayores. Los valores estadísticos calculados evidenciaron la inexistencia de correlación y de relación lineal entre estos datos y los del SMN. Se coincide con el estudio de Khan *et al.* (2002) en que se debe tener precaución al utilizar los datos del Reanálisis para estudiar la variabilidad climática e incorporarlos a modelos sin estar previamente validados. Asimismo, hay evidencias de que los ajustes entre los datos observados en superficies con la precipitación estimada por el Reanálisis se puede ajustar con una regresión de tipo polinómica (Ferrelli *et al.*, 2016).

Por lo mencionado, se concluye que los tres modelos analizados presentan similitudes con los datos observados. Sus ajustes son variados y su aplicación deberá tener en cuenta los coeficientes de correlación, la escala del análisis y el tipo de dato del que se desee disponer dado que cada uno de los modelos brinda la información en diferentes formatos. Una vez definidos, de acuerdo al área de estudio, estos modelos serán de gran utilidad para estudios climáticos de aquellos espacios carentes de datos meteorológicos en cualquier parte del mundo.

## 5 Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la financiación total del presente trabajo. Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por el otorgamiento de los datos meteorológicos y a la Dra. M. Andrea Huamantínco Cisneros por la evaluación y tabulación de los mismos. También agradecemos los datos del Reanálisis proporcionados por NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, Estados Unidos a través de su web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

## 6 Referencias

Aliaga, V.; Ferrelli, F.; Alberdi Algarrañaz, E.D.; Bohn, V.Y.; Piccolo, M.C. 2016. Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1): 261-280.

Basist, A.N. & Chelliah, M. 1997. Comparison of tropospheric temperatures derived from the NCEP/NCAR Reanalysis,

NCEP operational analysis, and microwave sounding unit. *American Meteorological Society*, 79: 1431-1447.

Bustos, M.L.; Ferrelli, F.; Huamantínco Cisneros, M.A.; Piccolo, M.C. & Gil, V. 2016. Estudio preliminar del ajuste entre datos meteorológicos *in situ* y del Reanálisis (NCEP/NCAR) en distintos ambientes de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Estudios Geográficos*, LXXVII, 280: 335-343.

Celemín, A.H. 1984. *Meteorología práctica*. Mar del Plata, Edición del autor, Argentina. 313 p.

Díaz, R.A. 2001. Calidad de las series mensuales de temperaturas y lluvias en Argentina. In: REUNIÓN LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOLOGÍA, 3, 2001, Fortaleza, *Actas*, Brasil, p. 641-642.

Durand, Y.; Giraud, G.; Etchevers, P.; Lesaffre, B. & Mérinard, L. 2009. Reanalysis of 44 Yr of climate in the french Alps (1958-2002). Methodology, model validation, and trends for air temperature and precipitations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48: 429-449.

Ferrelli, F.; Bustos, M.L.; Piccolo, M.C.; Huamantínco Cisneros, M.A. & Perillo, G.M.E. 2016. Downscaling de variables climáticas a partir del reanálisis NCEP/NCAR en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Papeles de Geografía*, 62.

Hijman, R J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G. & Jarvis, A. 2005. A very high resolution interpolated climate surfaces for global lands areas. *International Journal of Climatology*, 65: 1965-1978.

Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woolten, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R. & Joseph, D. 1996. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 77: 437-471.

Khan, V.; Rubinshtein, K.G.; Sterin, A.M. & Abdoulaev, S. 2002. Comparison between monthly data of NCAR/NCEP Reanalysis and aerological observations in southern hemisphere. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002. Foz de Iguazú, *Anales*, Argentina, p. 1053-1062.

Klister, R.; Kalnay, E.; Collins, W.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Kanamitsu, M.; Kousky, V.; Van del Dool, H.; Jenne, R. & Fiorino, M. 2001. The NCEP NCAR 50 year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 247-267.

New, M.; Lister, D.; Hulme, M. & Makin, I. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global lands areas. *Climate Research*, 21(1): 1-25.

Mesinger, F.; DiMego, G.; Kalnay, E.; Mitchell, K.; Shafran, P. C.; Ebisuzaki, W. & Ek, M. B. 2006. North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3), 343-360.

Ritter, B. & Geleyn, J.F. 1992. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulation. *American Meteorological Society*, 120: 303-325.

Rusticucci, M.M. & Kousky V.E. 2002. A comparative study of maximum and minimum temperatures over Argentina: NCEP-NCAR Reanalysis versus station data. *American Meteorological Society*, 15: 2089-2101.

Rusticucci, M.M. & Barrucand, M.G. 2001. Climatología de Temperaturas Extremas en la Argentina, Consistencia de Datos. Relación entre la Temperatura Media Estacional y la Ocurrencia de Dias Extremos. *Meteorológica*, 26: 69-83.

Simmonds, I. & Keay, K. 2000. Mean Southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-years NCEP-NCAR Reanalysis. *Journal of Climate*, 13: 873-885.

Strahler, A. & Strahler, A. 1989. *Geografía Física*. Barcelona, Omega, España. 336 p.

Xue, Y.; Sellers, P.J.; Kinter, J.L. & Shukla, J. 1991. A simplified Biosphere model for global climate studies. *American Meteorological Society*, 4: 345-364.

Zhao, T.; Guo, W. & Fu, C. 2008. Calibrating and evaluating reanalysis surface temperature error by topographic correction. *Journal of Climate*, 21: 1440-1446.