

EVALUACIÓN DEL REANALYSIS (NCEP/NCAR) PARA EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TERMO-PLUVIOMÉTRICA DEL NOROESTE ARGENTINO

Federico Ferrelli^{1,2}, Andrea Soledad Brendel^{1,3} y María Cintia Piccolo^{1,2}

Universidad Nacional del Sur

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar la precisión del reanálisis NCEP/NCAR para la caracterización de la variabilidad termo-pluviométrica del Noroeste Argentino. Series meteorológicas obtenidas de observatorios meteorológicos del área de estudio y modeladas del período 1960-2020 fueron estudiadas con técnicas estadísticas estándar (valores medios, desvíos, máximos, mínimos, etc). Posterior a la verificación del método Kriging como el método más adecuado para interpolar la información espacial, se analizó la temperatura y la precipitación. Un análisis de regresión cuantílica se aplicó a las series de tiempo. Para ello, las series fueron divididas en diez cuantiles y se evaluaron sus ajustes. Los resultados para ambas variables presentaron ajustes estadísticos significativos ($p < 0,05$), indicando que los datos del modelo Reanálisis permiten caracterizar la distribución espacial de estas variables. La temperatura del aire registró mejores resultados que la precipitación. Sin embargo, al estudiar los eventos extremos, se observaron diferencias importantes. La temperatura mostró buenos ajustes ($p < 0,05$) en los climas templados, seguidos por los climas áridos. La precipitación mostró ajustes significativos en los cuantiles medios, pero no así en los cuantiles extremos. Los resultados demostraron que el Reanalysis permite estudiar las características climáticas de la región NOA, pero no sus eventos extremos térmicos y pluviométricos. Además, esta base de datos es esencial para el estudio del clima a escala regional y para el diseño de planes de ordenamiento del territorio.

Palabras clave: Downscaling; estudios climáticos; estaciones meteorológicas; modelización; precisión.

ASSESSMENT OF REANALYSIS NCEP/NCAR TO STUDY THERMAL AND RAINFALL IN THE NORTHWEST OF ARGENTINA

Abstract

This study aims to assess Reanalysis NCEP/NCAR's skills to capture the temperature and rainfall variability in Northwestern Argentina. Observations and Reanalysis estimations were analyzed in the target region from 1960 to 2020. Standard statistical techniques were applied (means values, maximum, minimum, standard deviations, etc.), and the spatial variation of temperature and rainfall was subsequently studied using the Kriging method. We divided the time series into ten quantiles and studied the adjustments. Finally, we analyzed both series with quantile regression. Results evidenced that both temperature and rainfall had statistical adjustments ($p < 0.05$), indicating that data from Reanalysis allowed the characterization of the spatial distribution of these variables with high accuracy. Air temperature registered higher results than rainfall. Nevertheless, when we studied the extremes, we observed significant differences. The temperature was reasonably adjusted in temperate and arid climates, while rains presented significant results in the middle quantiles but not so in the extreme quantiles. The results obtained are an essential database for climate studies on a regional scale and for the design of land use plans to improve the population's quality of life and the environment.

Keywords: Downscaling techniques; climate studies; weather stations; modeled data; accuracy.

¹Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET.

²Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur (UNS)

³Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS)

fferrelli@criba.adu.ar – asbrendel@iado-conicet.gob.ar – ofpiccol@criba.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha convertido en uno de los problemas ambientales más graves del mundo (WANG *et al.*, 2013). Se ha establecido que, a partir de 1970, la tasa de incremento térmico fue 0,2 °C por década (WORKU *et al.*, 2018). Este calentamiento global ha generado cambios en los ambientes que repercuten sobre las actividades económicas, principalmente las agropecuarias y, como consecuencia, ha acentuado los impactos en la calidad de vida de la población (SUN *et al.*, 2016). Los efectos negativos del cambio climático se han intensificado en el último siglo debido a la mayor emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera por la actividad antrópica. Esta situación se hace más crítica al analizar el último informe del IPCC (2021), donde las nuevas estimaciones prevén las posibilidades de cruzar el nivel de calentamiento global de 1,5 °C en las próximas décadas, con temperaturas que aumentan en todo el mundo de forma homogénea. Con ello, los extremos térmicos alcanzarían, con mayor frecuencia, umbrales de tolerancia críticos para las coberturas terrestres y la salud humana (IPCC, 2021). En este contexto, la caracterización climática a escala regional con datos completos y actualizados reviste importancia para conocer la variabilidad térmica y pluviométrica. En ciertas ocasiones, la escasez o inconsistencia de datos meteorológicos genera dificultades para llevar a cabo investigaciones climáticas. Por tal motivo, se desarrollaron estudios orientados a validar herramientas indirectas como modelos numéricos, datos de aeronaves, imágenes satelitales, etc. (KALNAY *et al.*, 1996; KISTLER *et al.*, 2001; BUSTOS *et al.*, 2017; DEVERS *et al.*, 2020; FERRELLI *et al.*, 2021).

La caracterización térmica y pluviométrica de una región, requiere de una red de estaciones meteorológicas que presenten una distribución equidistante sobre el territorio y que registren información de por lo menos treinta años (BUSTOS *et al.*, 2017). En este aspecto, el modelo del Reanalysis NCEP/NCAR provee información a escala mensual de variables meteorológicas. La ventaja que presenta es que se encuentra validado a escala global y permite obtener información desde 1948 hasta la actualidad con una resolución espacial de 0,5° de latitud y longitud (KALNAY *et al.*, 1996; KISTLER *et al.*, 2001). Sin embargo, los datos de este modelo no siempre representan la realidad (SACHINDRA *et al.*, 2019; NACAR *et al.*, 2019). Por lo tanto, se deben aplicar técnicas de downscaling para ajustarlos en función de los registros *in situ* (SETH *et al.*, 2007; ZHAO *et al.*, 2008; VIGGIANO *et al.*, 2019).

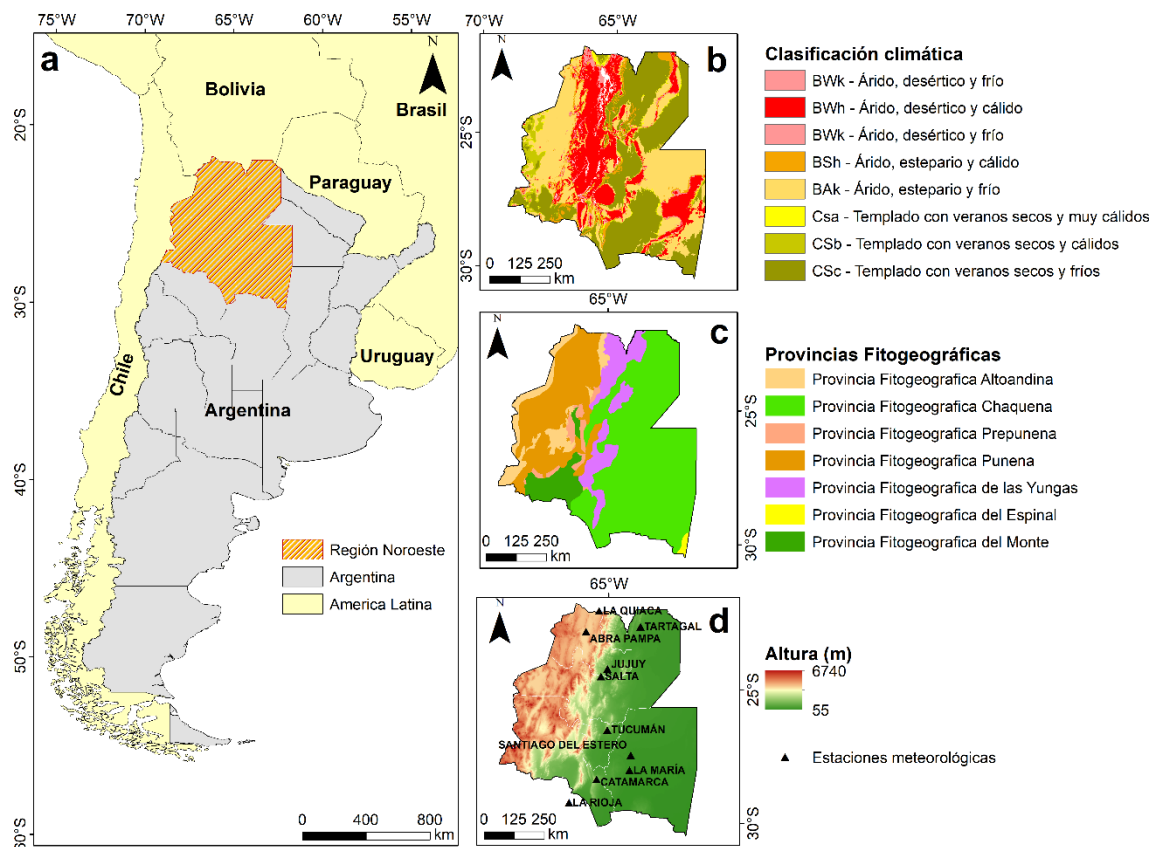
En Argentina se ha utilizado este modelo numérico para completar series climáticas, analizar la variabilidad de las precipitaciones, estudiar eventos térmicos y caracterizar el clima de ciudades costeras (RUSTICUCCI y KOUSKY, 2002; COLLAZO *et al.*, 2019; ROMERO *et al.*, 2020; FERRELLI *et al.*, 2021). Sin embargo, no existe un estudio a escala regional para el Noroeste Argentino que demuestre la precisión del modelo Reanalysis NCEP/NCAR para la caracterización térmica y pluviométrica considerando una sucesión de eventos extremos. Por ello, el objetivo de esta investigación fue evaluar la precisión del modelo numérico Reanalysis NCEP/NCAR para la caracterización de la variabilidad termo-pluviométrica en el Noroeste Argentino.

El área de estudio limita al Norte con Bolivia y al Oeste con Chile (Figura 1a). Está compuesta por las provincias de Santiago del Estero, Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, ocupando una extensión de 550.882 km² (16,7 % del territorio argentino) y albergando al 12,3 % de la población total de Argentina (Figura 1). Es un espacio con importantes contrastes paisajísticos, desde las selvas de las planicies localizadas al este, a los paisajes áridos y montañosos situados sobre la Cordillera del Oeste (Figura 1 b, c y d). La economía de esta región se basa en actividades primarias y en el procesamiento de productos agropecuarios. Si bien, el eje agroindustrial de esta región es la caña de azúcar, la cual representa el 90 % de la producción nacional, parte de su potencial se despliega hacia la producción de cítricos, frutas tropicales, frutas finas, hortalizas, olivos, producción de vinos en altura y en la llanura y valles, la producción de granos, algodón, tabaco y ganadería (MANZANAL *et al.*, 2009).

La diferencia de relieve origina distintos tipos de clima. Estos son: clima templado con veranos secos y cálidos, con veranos secos y muy cálidos, con veranos secos y fríos y clima árido de tipo desértico y frío, desértico y cálido, estepario cálido y estepario frío (Figura 1b).

FIGURA 1

Localización del área de estudio, tipos de clima, altura, provincias fitogeográficas y estaciones meteorológicas analizadas. Modificado de BECK *et al.* (2018).



2. METODOLOGÍA

2.1 DATOS

Para el estudio termo-pluviométrico, se analizaron datos mensuales de temperatura y precipitación pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina) para el período 1960-2020. En la Figura 1d se muestran las estaciones meteorológicas que se localizan dentro del área de estudio con un mínimo de treinta años de información climática. Los valores medios calculados con datos de observatorios meteorológicos y los obtenidos del Reanalysis NCEP/NCAR, junto con la localización absoluta de las estaciones se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1

Información de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio (Figura 1c). Los datos corresponden a los valores medios del período 1960-2020. Lat. Latitud, Long. Longitud, TR.

Temperatura del Reanalysis, TIS. Temperatura obtenida de observatorios meteorológicos, Tcorr. Temperatura corregida, PpR. Precipitación del Reanalysis. PpIS. Precipitación *in situ*, PpCorr. Precipitación Corregida.

Estación Meteorológica	Lat	Long	TR	TIS	Tcorr	PpR	PpIS	PpCorr
La Quiaca	-22,06	-65,36	9,6	9,7	9,7	435,3	337,3	337,1
Tartagal	-22,65	-63,82	22,9	21,2	21,2	1165	1003,1	1003,1
Jujuy	-24,23	-65,05	17,4	18,9	18,8	548,2	724,9	725
Salta	-24,51	-65,29	21,6	16,6	16,6	617,8	739,7	739,7
Tucumán	-26,51	-65,06	19,7	19,6	19,6	680,8	1015,4	1015,4
Santiago del Estero	-27,46	-64,18	24,1	20,5	20,4	412,1	625,3	625,2
Catamarca	-28,36	-65,46	23,9	20,8	20,7	435	440,1	440,1

La información climática obtenida de observatorios meteorológicos fue sometida a pruebas de calidad y homogeneidad. Con ellas, se identificaron los datos faltantes y los erróneos, siguiendo la metodología de ZHOU *et al.* (2018). Para llevar a cabo estas pruebas, se utilizaron los paquetes estadísticos RCLimDex (ZHAN y YANG, 2013) y el RHTest V4 (WANG *et al.*, 2010) en el Software R. Las series de tiempo fueron completadas mediante la metodología descrita en FERRELLI *et al.* (2019). En todos los casos, se verificó que la información faltante y los errores no excedieran el 5 %.

Los datos de temperatura del aire y precipitación del modelo Reanalysis NCEP/NCAR fueron obtenidos a distintas alturas (milibares) y se seleccionaron aquellos sitios más cercanos a las estaciones meteorológicas que registraron los datos *in situ* (Figura 1c). La información de este modelo fue proporcionada por el Centro de Predicción del Ambiente Nacional (NCEP, Estados Unidos), el Centro Nacional de Investigación Atmosférica y la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera/Centro de Diagnóstico del Clima (NOAA/CDC, Estados Unidos). La información es de libre acceso a partir de su sitio web: <https://psl.noaa.gov>.

2.2 ANÁLISIS

Se procedió al análisis y evaluación de manera conjunta de ambas fuentes de información, considerando dos premisas. La primera de ellas, consistió en contrastar los valores de períodos climáticos (1960-2020) de ambas fuentes de información. Para ello, se evaluaron distintos tipos de regresiones (polinómica, exponencial, logarítmica y lineal) y se seleccionó la más precisa para corregir los datos a partir de los resultados de la función obtenida. Se estudiaron tres fuentes de datos (*in situ*, Reanalysis y series corregidas, es decir, aquellas que surgen del análisis de las dos primeras) de forma espacial a partir de la utilización de un Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.5 considerando lo descrito en FERRELLI *et al.* (2021). Los datos se interpolaron con el método Kriging dado que presenta mejores resultados al analizar las variables climáticas (ALIAGA *et al.*, 2017).

Posteriormente, se evaluaron las series de tiempo considerando nueve cuantiles (Q1 a Q9) con el objetivo de analizar los extremos térmicos y pluviométricos. Para ello, se organizó la información de cada una de las estaciones en tablas y se aplicó una regresión por cuantiles. Se estudió el comportamiento de las series del Reanalysis NCEP/NCAR respecto a eventos fríos, muy cálidos, secos y muy húmedos (representados por los Q extremos). Su aplicación se realizó siguiendo la metodología propuesta por CANNON *et al.* (2015) y EUM y CANNON (2017) quienes la aplicaron para mostrar el comportamiento de la precipitación.

Para llevar a cabo este estudio, se identificaron en una primera instancia los Q a estudiar con un valor de 0,1 para cada uno de ellos. De esta forma, se identificó como Q=1 al cuantil 0,1 y

como $Q=9$ al cuantil 0,9. Finalmente, la precisión de este análisis se estableció con el Error Medio Absoluto (MAE), el coeficiente de determinación R^2 y la intersección. Estos análisis se llevaron a cabo con el Software SPSS.

3. RESULTADOS

En este apartado, se presentan los resultados considerando las distintas etapas en las que fueron analizados. En una primera instancia, se presenta el análisis de regresión de las series climáticas y su estudio espacial. Posteriormente, se analizan los ajustes entre ambas series de tiempo subdividiendo las series en cuantiles.

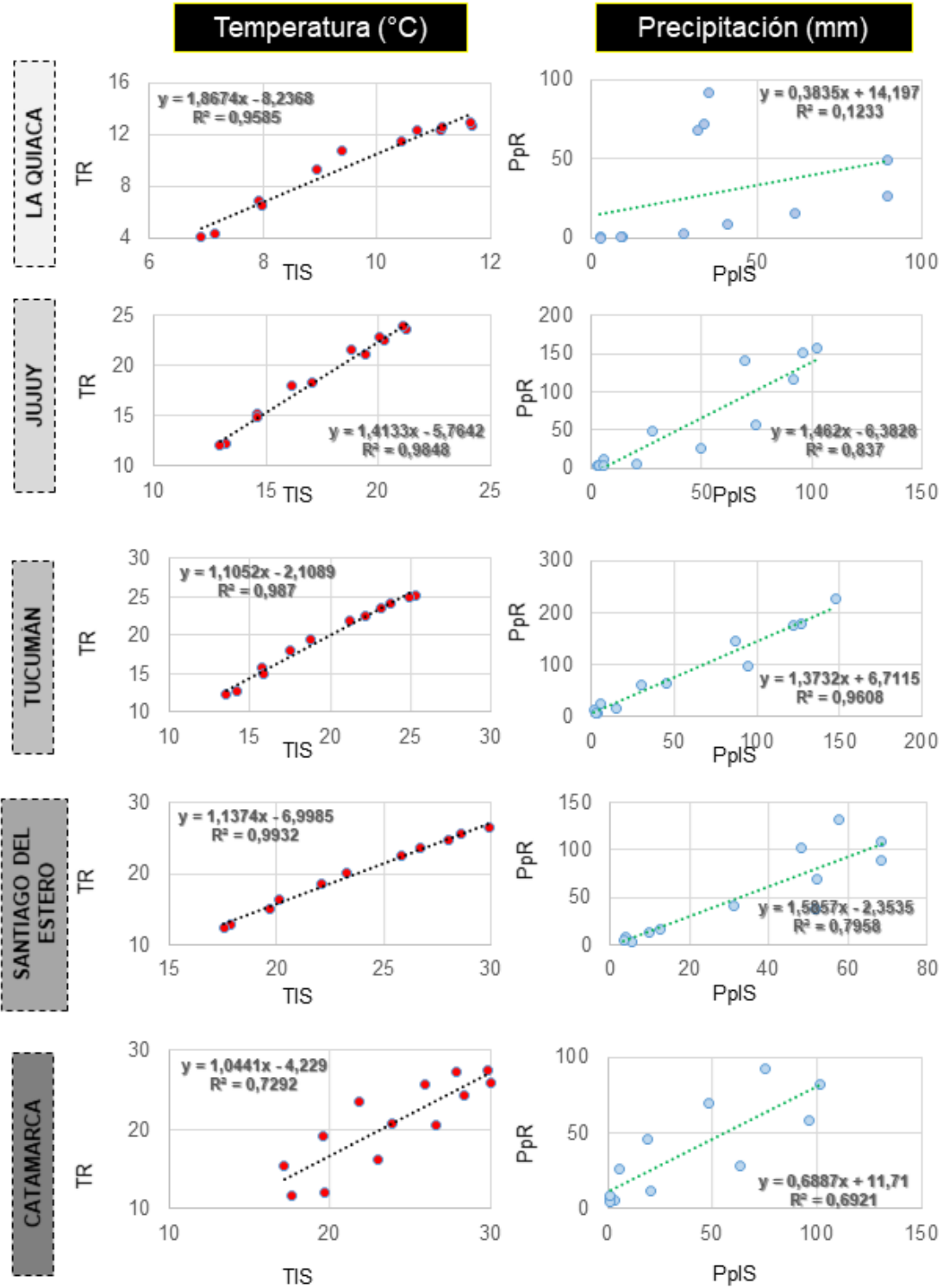
3.1 ANÁLISIS CLIMÁTICO

La relación entre ambas fuentes de información (*in situ* y modelada) estableció que la regresión de tipo lineal fue la que mejor se ajustó a los datos analizados ($p < 0,05$). En relación a la temperatura, se observó una excelente correlación de los resultados en la mayor parte del área estudiada ($R^2 > 0,72$). Los resultados más exactos se evidenciaron en las áreas de climas áridos (p.ej., La Quiaca) y en los de mayor altitud (p.ej., Jujuy y Salta), como así también sobre las áreas de menor altura de climas templados (p.ej., Santiago del Estero y Tucumán) (Figura 2).

La precipitación presentó menores ajustes que las temperaturas (Figura 2). En todos los casos analizados, existió evidencia estadística de que ambas fuentes de información registraron valores medios iguales, exceptuando en los ambientes áridos con gran altitud como La Quiaca (Figura 2).

FIGURA 2

Relación entre los datos del Reanalysis y los obtenidos de observatorios meteorológicos. TR: Temperatura media anual del Reanalysis, TIS: Temperatura media anual Observada, PpR: Precipitación media anual Reanalysis: PpIS: Precipitación media anual obtenida de observatorios meteorológicos.



A partir del análisis realizado se estudiaron tres escenarios espaciales. El primero de ellos correspondió a los datos obtenidos del Reanalysis NCEP/NCAR, el segundo a lo observado *in*

situ y el tercero representa el escenario modificado, donde las series del Reanalysis se ajustaron a las observadas a partir de la aplicación de las fórmulas lineales que se presentan en la Figura 2.

Las series de temperatura del aire en una escala climática de análisis (1960-2020) permitió ajustar las series del Reanalysis a las observaciones *in situ* con excelente precisión. Al analizar la serie del Reanalysis, se estableció que tiende a sobreestimar los valores máximos y mínimos de temperatura. Sin embargo, al corregirlos con las fórmulas obtenidas se mejoran los valores mínimos de temperatura, aunque los máximos siguen siendo sobreestimados (Figura 3).

Al analizar de igual manera la precipitación, se observaron diferencias espaciales significativas. El escenario representado por el Reanalysis no se correspondió con el obtenido de observatorios meteorológicos. Sin embargo, al corregir las series de tiempo con las fórmulas indicadas en la Figura 2, se obtuvieron buenos resultados y el escenario corregido permitió interpretar la variación espacial de las precipitaciones con un alto nivel de ajuste, es decir, que el comportamiento de las isohietas fue corregido, generando un documento cartográfico similar al observado en el terreno (Figura 4).

FIGURA 3

Distribución espacial de la temperatura del aire con los datos del Reanalysis, los obtenidos de observatorios meteorológicos y los corregidos mediante las fórmulas de la regresión.

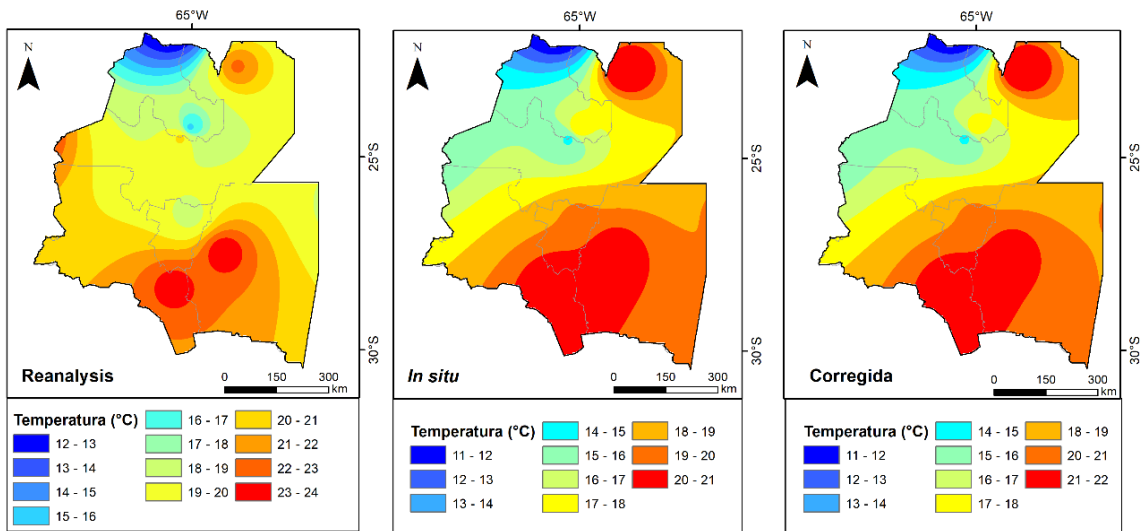
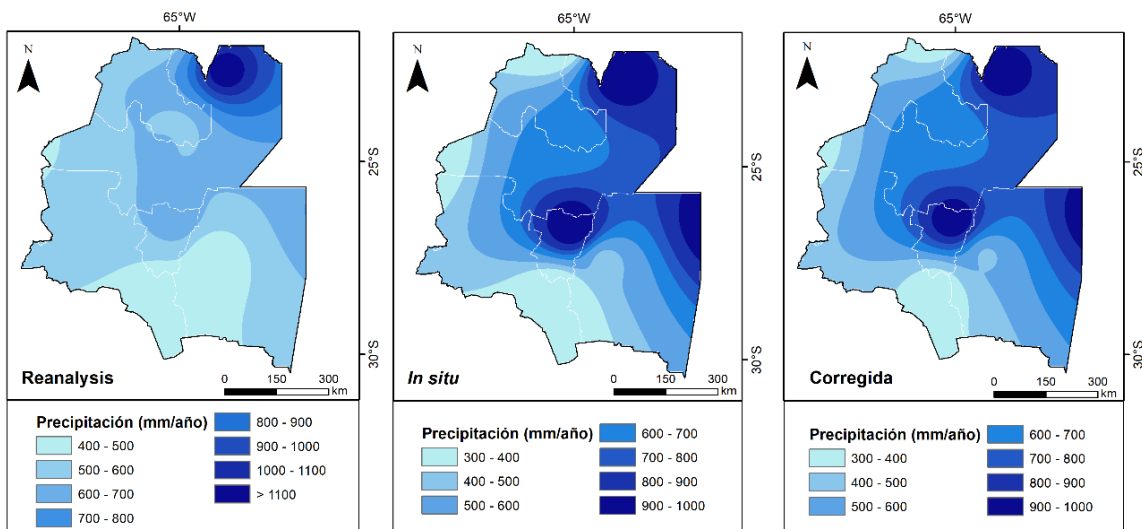


FIGURA 4

Distribución espacial de la precipitación con los datos del Reanalysis, los medidos obtenidos de observatorios meteorológicos y los corregidos mediante las fórmulas de la regresión.



3.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR CUANTILES: EVALUACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos entre los datos de temperatura *in situ* y los derivados del Reanalysis a partir de una regresión por cuantiles. Importantes diferencias se observan al estudiar esta variable. Por ejemplo, en Catamarca, se identificaron resultados estadísticamente significativos ($p < 0,05$) en el Q3 (Tabla 2). Otra particularidad se presentó en La Quiaca, en donde los registros térmicos presentaron evidencia estadística ($p < 0,05$) en los cuantiles extremos (Q1, Q2, Q3, Q9), pero no así en los valores medios (Tabla 2).

En Salta, Santiago del Estero y Tartagal, se obtuvieron buenos ajustes ($p < 0,05$) en los eventos térmicos cálidos (Q7, Q8 y/o Q9). Finalmente, se destacan los casos de Tucumán y Catamarca, donde la precisión de estas variables fue significativa ($p < 0,05$) en la mayor parte de los Q estudiados, exceptuando el Q1 y el Q2 (Tabla 2).

TABLA 2

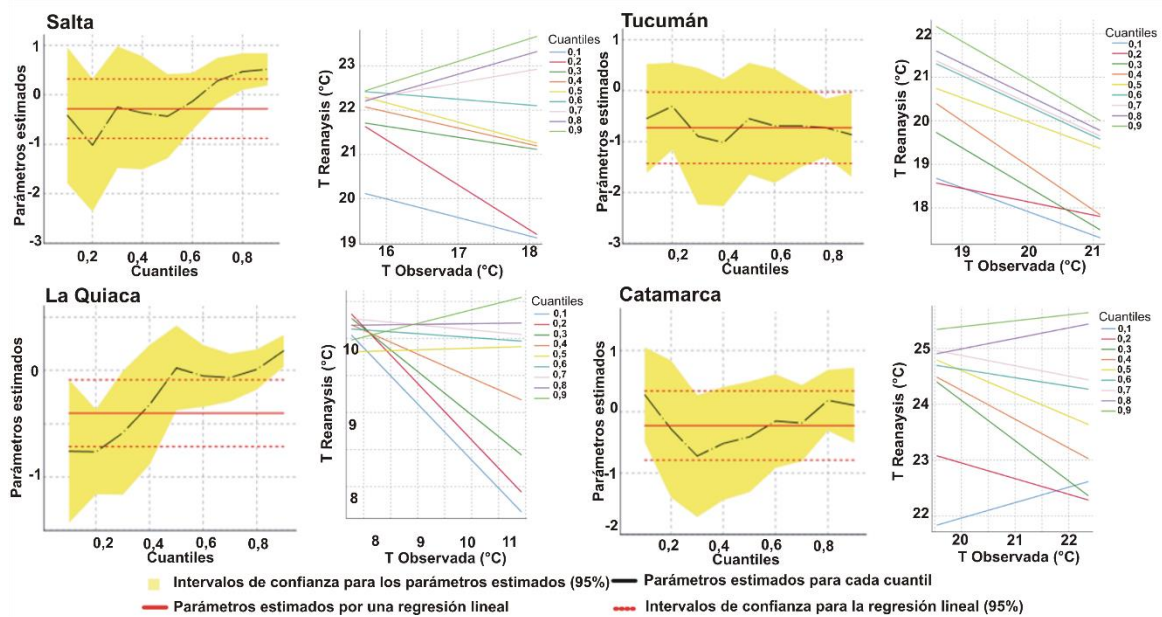
Resultados de la regresión cuantílica obtenidos para los valores de temperatura de las estaciones meteorológicas analizadas para el Noroeste Argentino. MAE. Error Medio Absoluto, Int. Intersección, R². Coeficiente de Determinación. Aquellos datos resaltados con negrita indican valores significativos.

	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
atamarca	MAE	1,81	1,5	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,6
	Int	16,45	28,5	38,5	34,6	32,8	27,6	28,6	21,2	23,3
	R ²	0,3	0,3	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,2	0,1
	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
Jujuy	MAE	2,1	1,8	1,3	1,1	1,0	1,1	1,1	1,2	1,4
	Int	18,0	32,9	29,6	23,0	16,0	10,9	10,4	11,8	12,8
	R ²	0,1	0,2	0,7	0,3	0,1	0,4	0,7	0,7	0,3
	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
La Quiaca	MAE	1,1	0,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8
	Int	15,9	16,3	14,8	12,7	9,6	10,5	10,8	10,1	8,6
	R ²	0,8	0,8	0,6	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	0,7
	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
Salta	MAE	2,1	1,5	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,1	1,3
	Int	26,7	37,6	25,6	27,8	29,1	24,5	17,8	14,9	14,4
	R ²	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,1	0,3	0,7	0,6
	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
Santiago del Estero	MAE	1,9	1,8	1,1	1,0	0,9	0,9	1,0	1,1	1,3
	Int	10,1	14,7	26,0	20,7	19,8	17,7	17,0	19,9	19,2
	R ²	0,6	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3
	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
Tartagal	MAE	1,6	1,1	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0
	Int	27,6	26,1	24,8	24,5	24,1	24,4	23,3	24,0	25,3
	R ²	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
Tucumán	MAE	1,7	1,6	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,5
	Int	28,8	24,3	36,4	39,4	31,0	34,2	34,2	35,1	38,2
	R ²	0,6	0,3	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,9

En las estaciones donde se registró una menor significancia estadística, las pendientes lineales predictivas fueron variantes en relación con el número de Q. Esta situación se presentó con claridad en Salta. Sin embargo, en Tucumán se observaron pendientes negativas y similares en todos los casos (Figura 5). Catamarca presentó situaciones heterogéneas y La Quiaca tuvo ajustes lineales con tendencias negativas en los Q1, Q2 y Q6 (Figura 5). Esto demuestra que la diferencia de altura, de ambientes y de climas propia de la región del NOA, genera que el ajuste entre estas fuentes de información sea heterogéneo para el estudio de los eventos extremos térmicos.

FIGURA 5

Parámetros estimados para los distintos cuantiles, aquellos obtenidos por una regresión lineal y las líneas predictivas (Q=1 hasta Q=9) resultante del análisis de los datos de temperatura *in situ* y obtenida del Reanalysis para Salta, Tucumán, La Quiaca y Catamarca.



3.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PLUVIOMÉTRICO POR CUANTILES: EVALUACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS

En este apartado, los ajustes pluviométricos a partir del estudio de las series de tiempo por cuantiles fueron analizados para las series de precipitación *in situ* y obtenidas del Reanalysis. Esta variable presentó ajustes espaciales heterogéneos. Por un lado, en Catamarca se registraron valores estadísticamente precisos ($p < 0,05$) para estudiar los cuantiles medios y los más secos (Q1 a Q7), mientras que, en Jujuy y Santiago del Estero (Figura 5), se evidenciaron buenos resultados ($p < 0,05$) en los Q intermedios (Q3 a Q8). Las series con mejores ajustes se presentaron, al igual que en la temperatura, en Tucumán (Figura 5), registrando valores significativos en todos los cuantiles, exceptuando el Q1 (Tabla 4). El resto de las estaciones no presentó buenos ajustes entre las series analizadas en ninguno de los cuantiles (Tabla 3).

TABLA 3

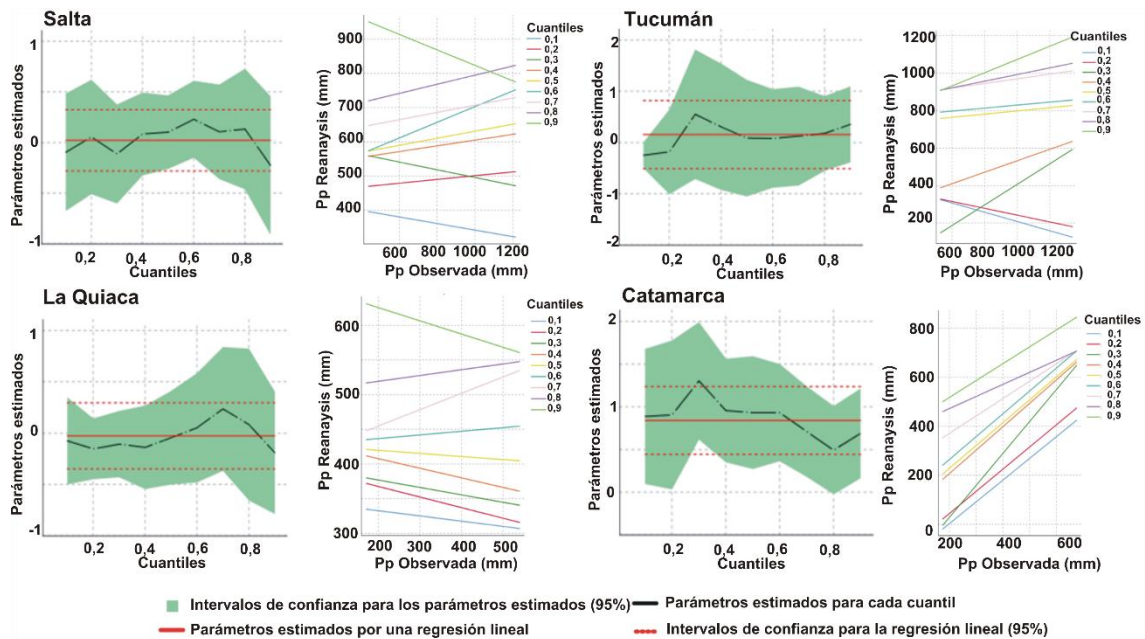
Resultados de la regresión cuantílica obtenidos para los valores de precipitación de las estaciones meteorológicas analizadas para el Noroeste Argentino. MAE. Error Medio Absoluto, Int. Intersección, R^2 . Coeficiente de Determinación. Aquellos datos resaltados con negrita indican valores significativos.

Catamarca	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	235,3	203,3	164,9	139,1	137,5	141,4	156,7	181,4	248,7
	Int	4,6	7,1	12,5	15,7	42,0	78,0	228,9	373,7	379,9
	R^2	0,9	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	0,7	0,4	0,7
Jujuy	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	268,1	166,8	136,9	130,3	124,1	128,9	140,8	155,0	201,9
	Int	291,3	291,5	364,9	412,6	330,4	492,2	461,5	544,2	662,6
	R^2	0,4	0,2	0,3	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,1
La Quiaca	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	119,0	101,4	94,1	86,5	83,6	86,3	99,1	121,4	171,6
	Int	347,6	398,1	398,2	435,3	428,6	426,0	407,6	502,5	663,6
	R^2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Salta	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	256,6	169,8	150,4	132,2	130,0	131,3	141,7	183,3	274,1
	Int	438,1	446,1	608,6	521,1	528,2	473,7	601,3	661,5	1049,4
	R^2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
Santiago del Estero	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	181,7	135,5	125,5	114,5	112,7	118,6	131,5	152,6	203,7
	Int	92,7	208,1	251,4	229,8	302,7	327,1	298,8	341,0	355,2
	R^2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,4	0,5
Tartagal	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	290,6	243,0	206,7	198,2	192,3	202,2	230,3	265,9	392,8
	Int	1135,9	977,8	1126,7	1141,0	1161,2	1107,7	1044,9	995,0	870,9
	R^2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,7
Tucumán	Q	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9
	MAE	482,1	459,4	370,0	329,3	305,3	307,2	346,9	358,6	416,8
	Int	455,9	424,4	-143,7	226,0	712,9	749,5	845,2	814,8	719,4
	R^2	0,5	0,7	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	0,6	0,8

Ejemplos de los parámetros estimados por una regresión cuantílica, una lineal y sus correspondientes líneas predictivas para las estaciones de Salta, Tucumán, La Quiaca y Catamarca se muestran en la Figura 6. Se identificaron situaciones similares entre los cuantiles intermedios de Tucumán y Catamarca. Las estaciones Salta y La Quiaca no presentan un comportamiento lineal en ninguno de los Q analizados (Figura 6).

FIGURA 6

Parámetros estimados para los distintos cuantiles, aquellos obtenidos por una regresión lineal y las líneas predictivas (Q=1 hasta Q=9) resultante del análisis de los datos de precipitación (PP) *in situ* y obtenidos del Reanalysis para Salta, Tucumán, La Quiaca y Catamarca.



4. DISCUSIÓN

En este estudio se comprobó que el modelo del Reanalysis es una fuente de datos indirecta que luego de la aplicación de técnicas de downscaling permite caracterizar el clima de una región, considerando largos períodos de tiempo (superiores a 50 años) utilizando regresiones lineales. Este modelo es muy valioso para complementar los estudios climáticos a escala regional (FERRELLI *et al.*, 2021) debido a la gran cantidad de información disponible, su libre acceso y la frecuencia de los datos que brinda (VAGGIANO *et al.*, 2019). Además, se destaca su utilidad para completar series de datos y analizar la variabilidad climática interanual (LIBANDA *et al.*, 2020).

La utilización de los datos del Reanalysis han sido útiles para la caracterización de los climas templados, fríos, cálidos y con influencia oceánica del Sur de América, dado que permiten identificar anomalías térmicas en una escala de análisis climática (MARTINS *et al.*, 2012; BUSTOS *et al.*, 2017; DA ROCHA REPINALDO *et al.*, 2017; ARAYA-OSSES CASANUEVA *et al.*, 2020). Dado que hay evidencia de diferencias estacionales en los ajustes, sobre todo en las estaciones intermedias de los climas templados (FERRELLI *et al.*, 2016), el modelo requiere de cierto estudio al aplicarlo para realizar una caracterización climática.

En la región Noroeste de Argentina se establecieron relaciones con buenos ajustes entre ambas variables, obteniendo como resultado un mejoramiento significativo al analizar las series de tiempo en una escala climática. Sin embargo, estas requieren de varios estudios estadísticos para analizar detalladamente el clima de una región (HEO *et al.*, 2019), particularmente para la caracterización de las precipitaciones (JEON *et al.*, 2016). Es por esta razón que en este estudio se presentaron distintos métodos de downscaling que evidenciaron que el modelo numérico es un buen estimador de las condiciones climáticas y que favorece el estudio de la distribución espacio-temporal de la temperatura y la precipitación, pero no permite analizar con significancia estadística sus extremos. Por ello es que se considera esencial la aplicación de varias técnicas estadísticas para estudiar los climas con modelos numéricos (HWANG y GRAHAM, 2013).

Por todo lo mencionado, se demostró que la variabilidad propia de las precipitaciones es un elemento que no está bien representado con los datos del Reanalysis. Sin embargo, su ajuste para el estudio de la temperatura del aire es altamente significativo ($p < 0,05$) en la mayor parte del

Noroeste Argentino. Este método no es recomendable para la caracterización termopluiométrica sin ser corregido previamente, debido a los errores producto de la diferencia de la escala espacial a la que son generadas las series de datos, a la topografía y a los distintos tipos de climas y ambientes de las áreas de estudio (KIM, 2019).

5. CONCLUSIONES

El estudio de las series de tiempo obtenidas del modelo Reanalysis NCEP/NCAR y las observadas *in situ* presentó algunas diferencias en la región del Noroeste Argentino. La temperatura del aire registró los mejores ajustes entre las series del Reanalysis y las observadas, mientras que la precipitación presentó ajustes menores. El modelo es preciso para analizar las variables a escala climática, pero no así para estudiar los extremos termo-pluiométricos. Estos responden a la gran variación de ambientes y tipos de climas propios del NOA.

En este estudio se muestra la importancia de utilizar métodos indirectos para la caracterización climática como así también se presentan resultados que permiten afirmar que las técnicas de downscaling requieren de múltiples análisis estadísticos para su aplicación. Los resultados obtenidos conforman una base de datos esencial para el estudio de la variabilidad climática del NOA, dada su escasa red de estaciones meteorológicas con extensos períodos de datos y su desigual equidistancia, como así también son fundamentales para orientar políticas destinadas al manejo sustentable del espacio geográfico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS, Argentina) por la financiación del presente estudio. Además, al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina) por el suministro de datos meteorológicos. Finalmente, al NOAA/OAR/ESRI PSD, Boulder, Colorado (Estados Unidos) por brindar los datos del Reanalysis desde su sitio web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

6. REFERENCIAS

- ALIAGA, V.S., FERRELLI, F., y PICCOLO, M.C. (2017): "Regionalization of climate over the Argentine Pampas". *International journal of climatology*, vol. 37, p.1237-1247.
- ARAYA-OSES, D., CASANUEVA, A., ROMAN-FIGUEROA, C., URIBE, J.M., y PANEQUE, M. (2020): "Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling". *Climate Dynamics*, vol. 54, n° 9, p.4309-4330.
- BECK, H.E., ZIMMERMANN, N.E., MCVICAR, T.R., VERGOPOLAN, N., BERG, A., y WOOD, E.F. (2018): "Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution". *Scientific data*, vol.5, p.180214.
- BUSTOS, M.L., FERRELLI, F., y PICCOLO, M.C. (2017): "Estudio Comparativo de Tres Modelos Climáticos en Argentina". *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 40, n°1, p.34-43.
- CANNON, A.J., SOBIE, S.R., y MURDOCK, T.Q. (2015): "Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?" *Journal of Climate*, vol. 28, n°17, p.6938-6959.
- COLLAZO, S., BARRUCAND, M., y RUSTICUCCI, M. (2019): "Summer seasonal predictability of warm days in Argentina: statistical model approach". *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 138 n°3-4, p.1853-1876.
- DA ROCHA REPINALDO, C.R., MÜLLER, G.V., y MARTINS ANDRADE, K. (2017): "Patrones Atmosféricos Simulados en el clima presente y futuro asociados al Descenso de temperatura en el invierno en el sudeste de Sudamérica". *Boletín geográfico*, vol.39, p.13-34.
- DEVERS, A., VIDAL, J. P., LAUVERNET, C., GRAFF, B., y VANNIER, O. (2020): "A framework for high-resolution meteorological surface reanalysis through offline data assimilation in an ensemble of downscaled reconstructions". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol.146, n°726, p.153-173.

EUM, H.I., y CANNON, A.J. (2017): "Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble". *International Journal of Climatology*, vol.37, n°8, p. 3381-3397.

FERRELLI, F., BUSTOS, M.L., PICCOLO, M.C., HUAMANTINCO CISNEROS, M.A. y 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*, vol.62, p.21-33.

FERRELLI, F., BRENDEL, A., 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*, vol. 45, n°1, p. 393-416.

FERRELLI, F. BUSTOS, M.L., PERILLO, G.M.E. y PICCOLLO, M.C. (2021): "Evaluación de variables meteorológicas obtenidas del Reanalysis (NCEP/NCAR) para el estudio del clima de ciudades costeras de Argentina". *Investigaciones Geográficas*, vol.76, p.263-284.

HEO, J.H., AHN, H., SHIN, J.Y., KJELDSSEN, T.R., y JEONG, C. (2019): "Probability distributions for a quantile mapping technique for a bias correction of precipitation data: A case study to precipitation data under climate change". *Water*, vol.11, n°7, p.1475.

HWANG, S., y GRAHAM, W.D. (2013): "Development and comparative evaluation of a stochastic analog method to downscale daily GCM precipitation". *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, n°11, p.4481-4502.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2021): "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press. En prensa.

JEON, S., PACIOREK, C.J., & WEHNER, M.F. (2016): "Quantile-based bias correction and uncertainty quantification of extreme event attribution statements". *Weather and Climate Extremes*, vol. 12, p.24-32.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K. C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R. y JOSEPH, D. (1996): "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project". *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, n°3, p.437-472.

KIM, K. Y., KIM, J., BOO, K. O., SHIM, S., y KIM, Y. (2019): "Intercomparison of precipitation datasets for summer precipitation characteristics over East Asia". *Climate Dynamics*, vol.52, n°5-6, p.3005-3022.

KISTLER, R., KALNAY, E., COLLINS, W., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., KANAMITSU, M., KOUSKY, V., VAN DEN 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*, vol. 82, n°2, p.247-268.

LIBANDA, B., BWALYA, K., NKOLOLA, N. B., y CHILEKANA, N. (2020): "Quantifying long-term variability of precipitation and temperature over Zambia". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol.198, p.105201.

MANZANAL, M., ARQUEROS, M. X., ARZENO, M., y NARDI, M. A. (2009): "Desarrollo territorial en el norte argentino: una perspectiva crítica". *EURE (Santiago)*, vol. 35, n°106, p.131-153.

MARTINS ANDRADE, K.M., MÜLLER, G.V., CAVALCANTI, I.F.A. FERNÁNDEZ-LONG, M.E. y BIDEGAIN, M. (2012): "Avaliação de mudanças na frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul em projeções do clima futuro". *Meteorologica*, vol. 37, p.15-26.

ROMERO, P. E., GONZÁLEZ, M. H., ROLLA, A. L., y LOSANO, F. (2020): "Forecasting annual precipitation to improve the operation of dams in the Comahue region, Argentina". *Hydrological Sciences Journal*, p. 1-10.

RUSTICUCCI, M.M., y KOUSKY, V.E. (2002): "A comparative study of maximum and minimum temperatures over Argentina: NCEP–NCAR reanalysis versus station data". *Journal of Climate*, vol.15, n°15, p.2089-2101.

SETH, A., RAUSCHER, S. A., CAMARGO, S.J., QIAN, J.H., y PAL, J.S. (2007): "RegCM3 regional climatologies for South America using reanalysis and ECHAM global model driving fields". *Climate Dynamics*, vol.28, n°5, p.461-480.

SUN, W., MU, X., SONG, X., WU, D., CHENG, A. y QIU B., (2016): "Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960–2013 under global warming". *Atmospheric Research*, vol.168, p.33-48.

VIGGIANO, M., Busetto, L., CIMINI, D., DI PAOLA, F., GERALDI, E., RANGHETTI, L., RICCIARDELLI, E. y ROMANO, F. (2019): "A new spatial modeling and interpolation approach for high-resolution temperature maps combining reanalysis data and ground measurements". *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.276, p.107590.

WANG B., ZHANG M., WEI J., WANG S.J., LI S.S., MA Q., L. X.F. y PAN S.K. (2013): "Changes in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, Northwest China, during 1960–2009". *Quatern Int*, vol. 298, p.141–151.

WANG X.L., CHEN H., WU Y., FENG Y. y PU Q. (2010): "New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series". *J Appl Meteor Climatol*, vol. 49, n°12, p.2416–2436.

WORKU, G.; TEFERI, E.; BANTIDER, A. y DILE, Y.T. (2018): "Observed changes in extremes of daily rainfall and temperature in Jemma Sub-Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia". *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 135, n°3-4, p.1-16.

ZHANG X. y YANG F. (2013): "RClimDex (1.1) user manual". Disponible en: <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/software.shtml>.

ZHAO, T., GUO, W., y FU, C. (2008): "Calibrating and evaluating reanalysis surface temperature error by topographic correction". *Journal of Climate*, vol. 21, n°6, p.1440-1446.

ZHOU B.T., XU Y., WU J., DONG S.Y. y SHI Y. (2016): "Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a highresolution grid dataset". *Int J Climatol* vol. 26, p.1051–1066.