

## NUEVA BASE DE DATOS RETICULADA DE TEMPERATURA PARA LA PROVINCIA DE SANTA CRUZ, ARGENTINA

Leandro Almonacid<sup>1</sup>, Natalia Pessacg<sup>2</sup>, Boris Diaz<sup>3</sup>, Oscar Bonfili<sup>4</sup>, Pablo L. Peri<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>Municipalidad de Río Gallegos– CONVENIO INTA

<sup>2</sup>Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC-CCT CONICET-CENPAT)

<sup>3</sup>Grupo Forestal, Agrícola y Manejo del Agua (FAMA) – EEA Santa Cruz -INTA

<sup>4</sup>Servicio Meteorológico Nacional – Oficina Río Gallegos

<sup>5</sup>Universidad Nacional de la Patagonia Austral - CONICET

(Manuscrito recibido el 25 de enero de 2021, en su versión final el 8 de julio de 2021)

### RESUMEN

La temperatura del aire es una variable biofísica que incide en la mayoría de los procesos bióticos y abióticos, así como también es una de las variables esenciales en estudios climatológicos, ecológicos e hidrológicos, y para la evaluación del impacto en aplicaciones agrícolas. Sin embargo, la medición y monitoreo de la temperatura del aire *insitu* presenta limitaciones en áreas remotas con limitada infraestructura, como lo es la región patagónica de Argentina y Chile. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue generar una base de datos reticulada de temperatura media mensual, estacional y anual para la provincia de Santa Cruz. Para ello se utilizaron 33 series disponibles de temperatura media mensual en el período 1995-2014, las que fueron interpoladas mediante la técnica geoestadística co-kriging obteniendo un producto reticulado de 20 km de resolución espacial. La Base de Datos de Temperatura Reticulada para Santa Cruz (BTRSC) mostró el mejor desempeño en general al compararla con otras bases de datos globales de temperatura disponibles, tanto en el producto anual como estacional. A pesar de ello BTRSC presentó dificultades para representar adecuadamente la temperatura en la región oeste de la provincia, en cercanías a la cordillera de Los Andes. De las bases globales analizadas CRU fue la que presentó el mejor desempeño. La BTRSC es una base de datos de aplicación regional con un buen desempeño para la representación espacio-temporal de la variación de la temperatura, con posibilidad de aplicación en modelos ecológicos, agronómicos e hidrológicos, además de representar un periodo de tiempo base para comparar en estudios de cambio climático.

*Palabras clave: Patagonia sur, isoterma medias anuales y estacionales, Co-Kriging, bases globales de temperatura.*

## A NEW GRIDDED TEMPERATURE DATABASE FOR SANTA CRUZ PROVINCE, ARGENTINA

### ABSTRACT

Air temperature is a biophysical variable that affects most biotic and abiotic processes, being essential in climatological, ecological and hydrological studies,

and for the evaluation on agricultural practices. However, air temperature measurements and monitoring in situ presents limitations in remote areas with limited infrastructure, such as the Patagonian region of Argentina and Chile. The objective of this work was to generate a reticulated database of monthly, seasonal and annual mean temperature for Santa Cruz province. For this, 33 available series of monthly mean temperature (period 1995-2014) were interpolated by using the geostatistical technique Co-Kriging to obtain a reticulated product of 20 km resolution. The Gridded Temperature Database for Santa Cruz (GTDSC) showed the best performance when compared with other available global temperature databases, both in the annual and seasonal products. Despite this, in the western region of the province located close to the Andes mountain range, GTDSC showed the greatest differences in comparison with the other global data bases. CRU had the best performance. GTDSC is a regional database with good performance that represented adequately the spatio-temporal temperature variation, with potential application in ecological, agronomical and hydrological models, in addition to represent a base time period for climate change studies.

*Keywords: Southern Patagonia, annual and seasonal mean isotherms, co-kriging, global temperature databases.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire es una variable biofísica fundamental que incide en la mayoría de los procesos bióticos y abióticos (Li et al., 2005; Hooker et al., 2018; Peri et al., 2018; Peri et al., 2019). Los registros de temperatura continuos y extensos en el tiempo son esenciales en estudios climáticos, ecológicos e hidrológicos y permiten determinar variaciones climáticas en diferentes escalas temporales y espaciales (Begert y Frei, 2018; Xu et al., 2018). Las bases de datos de temperatura son además un insumo fundamental para la evaluación del impacto del clima en actividades socioeconómicas clave como las agropecuarias (Benavides et al., 2007; Khesali y Mobasheri, 2020) y juegan un rol significativo en el planeamiento, asesoramiento de riesgo, y la toma de decisiones efectivas y confiables respecto al ambiente (Li y Heap, 2008).

En los últimos años se ha avanzado en distintas técnicas de interpolación que permiten la espacialización de los datos de temperatura a partir de registros puntuales terrenos, en particular en regiones con faltante de

datos (Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005; Berndt y Haberlandt, 2018). Para variables como la temperatura, fuertemente influenciada por la latitud, la elevación, la pendiente y/o la exposición al sol (Villalba et al., 2003; Benavides et al., 2007; Xu et al., 2018), existen además técnicas geoestadísticas como kriging con variable externa (Benavides et al., 2007; Aalto et al., 2012; Berndt y Haberlandt, 2018) o co-kriging (Li et al., 2005; Bianchi et al., 2016), que incorporan datos auxiliares para mejorar sus estimaciones, como la topografía.

Por otro lado, se encuentran disponibles actualmente bases de datos de temperatura reticulada en escala global o cuasi-global disponibles con diferentes resoluciones espaciales y temporales. Las mismas pueden corresponder a estimaciones remotas a partir de satélites o pueden estar basadas en modelos numéricos que incorporan datos mediante procesos de asimilación (reanálisis), o una combinación de ambos (Hooker et al., 2018).

Todas estas bases de datos de temperatura reticuladas son una fuente esencial de información especialmente donde las estaciones

meteorológicas son escasas. En particular, esta información es fundamental en Patagonia y específicamente en la provincia de Santa Cruz, donde está focalizado este estudio, donde la falta de estaciones se acentúa debido a que es una región caracterizada por una baja densidad poblacional con regiones remotas y de difícil acceso y con grandes extensiones territoriales (Bianchi et al., 2016). Sin embargo, la utilización de bases de datos generadas con cualquiera de estas técnicas requiere de un proceso de validación con estaciones terrenas y técnicas estadísticas que permita evaluar la certidumbre de las mismas. En general, todas las bases de datos de temperatura disponibles logran representar adecuadamente la distribución espacial de esta variable y las tendencias de largo plazo, pero presentan diferencias significativas en escalas regionales y locales (Schumacher et al., 2020). En particular, estas bases de datos son una fuente significativa de incertidumbre para estudios hidrológicos a escalas de cuenca (Bianchi et al., 2016; Pessacg et al. 2015; 2018).

En este contexto es importante resaltar que en Patagonia se cuenta con escasa información meteorológica oficial y que las bases de datos reticuladas no han sido exhaustivamente testeadas en la región. En Patagonia se distribuye sólo el 18% de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la red nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021) y sólo 7 de éstas se ubican en la provincia de Santa Cruz. En la provincia existen además otras estaciones meteorológicas, particulares, pertenecientes a instituciones agropecuarias regionales, agencias para el manejo del agua y energía, empresas e instituciones de investigación, entre otros. Esta información es muy valiosa y de gran utilidad para estudios climáticos e hidrológicos al significar una densificación de sensores terrenos en zonas de escasa cobertura de estaciones meteorológicas oficiales.

En la región patagónica los antecedentes sobre testeo de bases de datos globales climáticas

son escasos. Bianchi et al. (2016) midieron el desempeño de distintas bases de datos globales para la precipitación y la temperatura, comparándolos con una base reticulada propia generada a partir de la interpolación de un banco de datos meteorológicos para el norte de Patagonia incluyendo a las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut. En este trabajo sólo se midió el desempeño de los productos anuales para ambas variables, obteniendo para precipitación un desvío medio (DM) de hasta 300 mm menos de lo observado para aquel con peor desempeño (CRU) y 27 mm para la base propia; mientras que para la temperatura media anual UDEL presentó el peor desempeño con un DM de 1,1 °C por debajo de los valores observados, siendo la base propia la de mejor desempeño con un DM de 0,08 °C. Por otro lado, Almonacid et al. (2021) confeccionaron una base de precipitación reticulada para la provincia de Santa Cruz (BPRSC), la cual fue comparada con cinco bases globales de precipitación, entre ellas: CRU, UDEL, TERRACLIMATE, PERSIANN y ERA5. BPRSC demostró un mejor desempeño para el producto anual, obteniendo un desvío medio porcentual (PBIAS) de 6,7% mayor a los valores observados; mientras que PERSIANN fue la de peor desempeño con un PBIAS de 70% por sobre los valores observados.

En este contexto y teniendo en cuenta la necesidad de contar con información adecuada para estudios climáticos, hidrológicos y agropecuarios en la región sur de Patagonia los objetivos del presente trabajo fueron: 1) generar una base de datos reticulada de temperatura media mensual, estacional y anual para la provincia de Santa Cruz para el período 1995-2014 mediante la metodología de co-kriging utilizando toda la información meteorológica disponible y 2) evaluar las principales bases de datos globales reticuladas de temperatura en la región y evaluar el desempeño de la base de datos generada respecto de otras bases de datos globales.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región sur de la Patagonia continental, entre los paralelos 45° y 53° S y los 65° y 72° O, cubriendo la totalidad de la provincia de Santa Cruz (Figura 1).

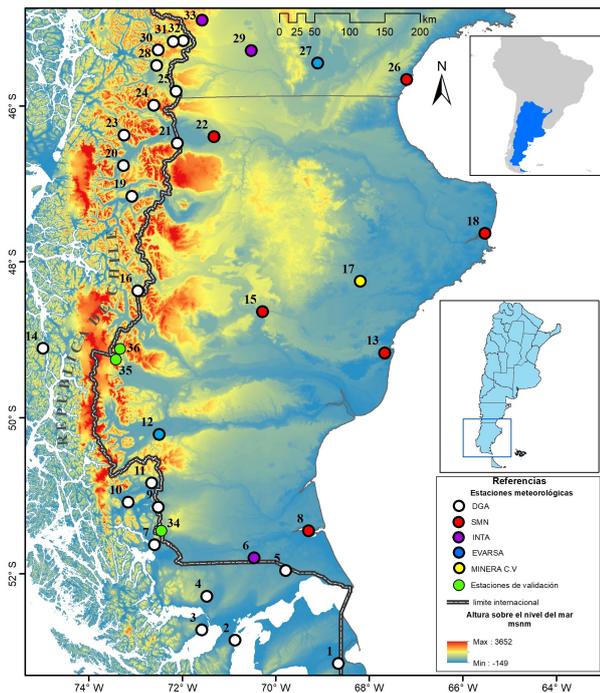


Figura 1: Región de estudio y ubicación de estaciones meteorológicas con 20 años de datos medios mensuales (1995-2014) utilizadas para la construcción de una base de datos reticulados de temperatura.

La región está bajo la influencia del cinturón de viento del oeste del Hemisferio Sur, siendo al sur de los 40 °S notablemente persistentes durante todo el año (Villalba et al., 2003). El clima en esta región puede ser definido como templado o frío templado con un patrón de distribución de las isotermas NO-SE. La temperatura media anual oscila entre los 12°C en la zona noroeste a 3°C hacia el sur (Paruelo et al., 1998). La temperatura media del mes más frío (julio) es mayor a 0°C en toda la Patagonia extra-andina. Entre los factores

locales que afectan la temperatura del aire, la topografía y el viento se encuentran entre los más relevantes (Paruelo et al., 1998). Con respecto a la precipitación, el oeste de la provincia de Santa Cruz presenta un gradiente muy marcado, que va desde valores máximos mayores a los 1200 mm año<sup>-1</sup> en el límite entre Argentina y Chile a menos de 200 mm año<sup>-1</sup> a 100 km de este límite del lado argentino (Almonacid et al. 2020). Este comportamiento es resultado del efecto de la Cordillera de los Andes en bloquear el flujo del oeste (Insel et al. 2009). El ascenso de aire al oeste de la Cordillera genera condiciones híper-húmedas, mientras que a medida que las masas de aire descienden se secan y generan condiciones áridas y altamente evaporativas (Garreaud et al. 2013).

La franja costera presenta una precipitación media anual entre 200 a 300 mm año<sup>-1</sup>, aumentando hacia el sur de la provincia; mientras que la zona del centro se caracteriza por ser la más seca, con valores de precipitación entre 130 a 150 mm año<sup>-1</sup>.

### 2.2. Base de datos de temperatura

Para la construcción de la base de datos reticulada de temperatura se utilizaron registros mensuales de temperatura media disponibles en el Banco de Datos Hidrometeorológicos (BDHM) de la provincia de Santa Cruz (Monserrat et al. 2016). El BDHM compila los registros climáticos históricos, principalmente de precipitación y temperatura para la provincia de Santa Cruz, sur de Chubut y regiones de Chile con recursos hídricos compartidos (Monserrat et al. 2016).

Del BDHM se seleccionaron 33 estaciones meteorológicas que cumplieron con un registro temporal de temperatura de 20 años entre 1995-2014, con no más del 30% de datos faltantes. Este período es el que aseguró la disponibilidad de series más extensas de registros históricos continuos de temperatura media mensual (Tmm), así como la mayor confiabilidad en los datos disponibles. También

representa un período común a estudios complementarios realizados con precipitación para esta región de interés (Almonacid et al. 2021).

Las estaciones meteorológicas seleccionadas se encuentran bajo propiedad y responsabilidad de distintos organismos, como la Dirección General de Aguas (DGA – Chile) a cargo de 21 estaciones, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN – Argentina) responsable de 6, mientras que las restantes 6 se encuentran bajo responsabilidad de otros organismos nacionales y agentes privados (Tabla I). Las estaciones seleccionadas se distribuyen en un rango altitudinal que varía entre los 3 y 900 msnm (Figura 1), localizadas principalmente en el sur de Santa Cruz y la Región de Magallanes y Antártica Chilena, mientras que otro gran grupo de estaciones se encuentran al sur de Chubut y en la Región de Aysén (Chile). Las mismas se distribuyen de manera no uniforme sobre el territorio, además de presentar una menor cobertura sobre el lado argentino de la Cordillera de Los Andes. Se seleccionaron estaciones termométricas fuera de los límites administrativos de la provincia de Santa Cruz con el fin de obtener una mejor representación de la temperatura en situaciones de borde. Todas las estaciones analizadas miden la temperatura del aire a 2 metros del suelo. Lo que varía en cada estación es la metodología de toma de datos; mientras que en el SMN un observador meteorológico realiza un registro cada 1 hora durante las 24 hs del día; la DGA cuenta con estaciones automáticas que registran el dato horario y son transmitidos en línea a través de un sistema satelital. Las demás estaciones registran sus datos cada una hora siendo almacenados en la memoria de la estación, que luego deben ser descargados regularmente para su interpretación. Sobre esta base primaria de datos se realizó un análisis de calidad para todas las series disponibles con el fin de identificar *outliers* (valores atípicos), definidos como aquellos que superan a un rango fijado por cuatro veces la desviación estándar; así como también otros tipos de errores como: repetición

NUM	Nombre	Lat.	Long.	Alt. (msnm)	Resp.
1	San Sebastián	-53,32	-68,66	20	DGA
2	Punta Arenas	-53	-70,85	37	DGA
3	Isla Riesco	-52,86	-71,55	10	DGA
4	Villa Tehuelche	-52,43	-71,42	190	DGA
5	Monte Aymond	-52,12	-69,76	160	DGA
6	Potrok Aike	-51,95	-70,41	132	INTA
7	Puerto Natales	-51,74	-72,46	45	DGA
8	Río Gallegos	-51,61	-69,28	12	SMN
9	Cerro Castillo	-51,26	-72,35	130	DGA
10	Torres Del Paine	-51,17	-72,95	25	DGA
11	Cerro Guido	-50,94	-72,46	230	DGA
12	Lago Argentino	-50,32	-72,26	186	EVARSA
13	Puerto San Julián	-49,31	-67,78	58	SMN
14	Puerto Edén	-49,13	-74,45	5	DGA
15	Gobernador Gregores	-48,78	-70,16	356	SMN
16	Villa O'Higgins	-48,46	-72,55	270	DGA
17	Cerro Vanguardia	-48,39	-68,27	230	MCV
18	Puerto Deseado	-47,73	-65,92	81	SMN
19	Lord Cochrane	-47,24	-72,58	204	DGA
20	Puerto Guadal	-46,84	-72,71	210	DGA
21	Chile Chico	-46,58	-71,69	306	DGA
22	Perito Moreno	-46,51	-71,01	429	SMN
23	Bahía Murta	-46,45	-72,67	240	DGA
24	Villa Mañihuales	-46,08	-72,1	150	DGA
25	Balmaceda	-45,91	-71,68	511	DGA
26	Comodoro Rivadavia	-45,78	-67,46	58	SMN
27	Sarmiento	-45,58	-69,08	275	EVARSA
28	Coyaique	-45,57	-72,02	310	DGA
29	Río Mayo	-45,41	-70,29	534	INTA
30	Villa Ortega	-45,37	-71,98	550	DGA
31	Ñirehual	-45,27	-71,7	535	DGA
32	Estancia Año Nuevo	-45,26	-71,52	700	DGA
33	Aserradero La Paulina	-45	-71,17	841	EVARSA
34	Río Turbio	-51,19	-72,87	302	EA
35	Los Huemules	-49,22	-72,95	455	Ea.LH
36	Cerro Torre	-49,32	-73,03	795	IANIGLA

Tabla I: Ubicación geográfica de estaciones de temperatura con registros medios mensuales entre 1995-2014. Latitud (Lat.) y Longitud (Lon.) expresados en decimal de grado, en el sistema internacional WGS84 (EPSG:4326). Altitud determinada sobre cartografía topográfica oficial E 1:100.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

de valores para dos meses consecutivos y saltos excesivos entre meses consecutivos. Para evaluar estos errores se confeccionaron grupos de estaciones meteorológicas utilizando un análisis por conglomerados, a partir de la metodología de Ward (Kalkstein et al. 1987). Se consideró cómo variables a la ubicación geográfica, temperatura media anual y estacional, así como la temperatura del mes más cálido (enero) y el mes más frío (julio). Una vez establecidos los grupos, dentro de los mismos se seleccionó cómo estación de referencia a la serie con menor cantidad de datos faltantes. Las demás estaciones de cada grupo fueron comparadas con cada estación de referencia siempre y cuando el valor de correlación entre sus series mensuales fuera mayor a 0,5 ( $r > 0,5$ ). De esta forma los valores sospechosos presentados por cada serie candidata fueron comparados con su serie de referencia. Por otro lado, cuando una estación presentó datos faltantes se utilizó la estación de referencia para el cálculo de los datos (explicado a continuación) y posterior rellenado de la serie, siempre y cuando la correlación con la serie de referencia fuera  $> 0,5$ . En los casos de series con datos faltantes, pero con valores de correlación  $< 0,5$  con la estación de referencia los datos no se rellenaron.

Los datos faltantes se calcularon mediante la metodología UK *traditional method* (UKtm), (Kashani y Dinpashoh, 2002). Los resultados de Kashani y Dinpashoh (2012) evidencian que, entre once metodologías estudiadas, UKtm fue una de las que presentó mejores resultados para la estimación de la temperatura media en zonas secas de Irán. Por otro lado, Shabala et al (2019), encontró que el UKtm tuvo la segunda mejor performance en la estimación de la temperatura diaria máxima y mínima en una región de Sudáfrica.

La metodología UKtm (1) permite el apareamiento de dos series correlacionadas entre sí, donde es posible a partir de una serie de referencia rellenar datos perdidos de una serie candidata. Esto permite que el dato a rellenar sea resultado de las variaciones que se

dan en el entorno próximo y no dependen de la variación interanual de la misma serie que presenta el vacío.

$$S_{aj} = S_{bj} \times \frac{S_{aj}}{S_{bj}} \quad (1)$$

Dónde:  $S_a$  = Estación meteorológica A candidata;  $S_b$  = Estación meteorológica B de referencia,  $j$  = mes del año,  $\underline{j}$ : promedio de la serie para el mes  $j$ .

Para cada mes del año, el registro histórico de cada estación de referencia fue comparado con los datos de la estación candidata con datos perdidos. Asumiendo una diferencia constante entre las estaciones, es posible luego obtener el valor perdido a partir de los datos de su estación de referencia para el mismo mes. (Shabalala et al. 2019).

### 2.3. Método de interpolación

Para la representación espacial continua de la temperatura del aire a partir de registros puntuales (discretos) se utilizó la interpolación espacial. Las técnicas más comúnmente utilizadas para estimar variables espaciales son diversas y pueden ser clasificadas en deterministas o geoestadísticas. La principal diferencia entre éstas reside en el criterio utilizado para asignar los pesos de interpolación. En los métodos determinísticos, los pesos dependen de la distancia geométrica entre puntos mientras que, en los métodos geoestadísticos (también denominados “kriging”), se utiliza una función de semivarianza para su estimación (Li y Heap, 2008; Bianchi et al. 2016).

Dentro de las técnicas geoestadísticas disponibles se utilizó el método “co-kriging Ordinario” (CKO). Esta metodología permite la incorporación de variables auxiliares para la interpolación de una variable primaria como la temperatura (Bianchi et al, 2016). En particular, dado que la temperatura disminuye con la altitud, se utilizó esta relación como variable auxiliar para la predicción del

comportamiento espacial de la temperatura (Goovaerts, 2000; Varentsov et al. 2020). Los valores de altitud para la provincia de Santa Cruz fueron extraídos del modelo digital de superficie (DSM) ALOS World 3D (AW3D30 v2.1), desarrollado por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA©). Consiste en una grilla planialtimétrica de 30 m de resolución espacial (1 segundo de arco en latitud y longitud), generado a partir de imágenes satelitales ópticas durante la misión ALOS PRISM (Tadono et al. 2016).

En el presente trabajo se obtuvieron los promedios mensuales de los 33 registros de temperatura media mensual (Tmm) para el período 1995-2014. A partir de la base de registros de Tmm se realizaron las interpolaciones para cada mes, estación y año dentro de la serie temporal propuesta. La resolución espacial del producto reticulado logrado fue de 20 km. Para definir esta resolución espacial se utilizó como referencia a los trabajos de Bianchi et al, 2016 y Almonacid et al, 2021; donde a partir de una base de datos no uniforme espacialmente se confeccionaron retículas de datos climáticos a una resolución de 20 km, obteniendo buenos resultados para la región patagónica. Este producto fue denominado “Base de Datos de Temperatura Reticulada para Santa Cruz” (BTRSC).

Para las interpolaciones se utilizó el semivariograma esférico, siendo seleccionado entre los modelos gaussiano, lineal y exponencial; al presentar mejor ajuste. Este ajuste fue cuantificado utilizando la raíz del error cuadrático medio (RMSE) generado a partir del método “leave-one-out” (Berndt y Haberlandt, 2018). En este procedimiento un valor observado para una ubicación en particular es removido en forma temporal del procedimiento de interpolación. El valor en dicha ubicación luego es estimado utilizando los valores observados restantes. Este proceso se repite para cada uno de los valores observados.

#### 2.4. Bases de datos globales de

#### temperatura

Se evaluaron diversas bases de datos globales de temperatura (BDGT), algunas de ellas ya testeadas en la región norte de Patagonia (Bianchi et al. 2016). Estas son CRU TS v. 4.04 (Harris et al. 2020), UDEL v. 5.01 (Willmott y Matsuura, 2001) y ERA5 (Hersbach et al. 2020). Las principales características de cada una se resumen en la Tabla II. Los resultados de las BDGT fueron comparados con la BTRSC. CRU y UDEL están basadas en redes de estaciones meteorológicas administradas por organismos públicos nacionales. CRU TS v4.04 utiliza un total de 11.800 estaciones en todo el mundo, compiladas a partir de dos fuentes principales: la WMO (World Meteorological Organization) y la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) a través de sus redes de estaciones meteorológicas asociadas, mientras que UDEL utiliza la base de datos GHCN2 (*Global Historical Climatology Network*, en su versión 2 con más de 34.000 estaciones). ERA5 es una base de datos de reanálisis generada con un esquema secuencial de asimilación de datos (Hersbach et al. 2020).

#### 2.5. Bases de datos globales de temperatura

La variabilidad de las 33 series de temperatura fue analizada mediante el coeficiente de variación (CV %).

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{x} \times 100 \quad (2)$$

Donde  $\sigma$  es el desvío estándar de la muestra y  $x$  representa la media aritmética.

El desempeño de las cuatro bases globales de temperatura fue obtenido mediante la comparación entre el valor observado y el valor estimado. Este último fue obtenido a partir de la interpolación bilineal a la ubicación de cada estación meteorológica. La metodología de interpolación bilineal utiliza el promedio ponderado de la distancia de los cuatro valores más cercanos para estimar el valor de un punto

BDGT	Resolución	Frecuencia	Periodo	Fuente de datos	Algoritmo o método de interpolación	Estaciones meteorológicas en la región	Referencia
CRU TS v 4.04	0,5°	Mensual	1901-2019	Estaciones meteorológicas	Distancia angular ponderada (ADW)	12	Harris et al. 2020
UDEL v. 5.01	0,5°	Mensual	1900-2014	Estaciones meteorológicas	Interpolación climatológicamente ayudada (CAI)	10	Willmott y Matsuura, 2001
ERA5	0,28°	Horaria	1950-presente	ECMWF	Reanálisis/ensamble 4D/VAR	-	Hersbach et al., 2020

Tabla II: Características de las Bases de Datos Globales de Temperatura (BDGT) testeadas para la provincia de Santa Cruz en el periodo 1995-2014.

de interés (Schumacher et al. 2020). Luego sobre estos valores se procedió a realizar una corrección por altura según lo describe Sheridan et al. (2010). Para ello se calculó a partir de un modelo digital de superficie (ALOS World 3d, Tadono et al. 2016) la altura sobre el nivel del mar de los cuatro píxeles más cercanos a la estación meteorológica (valor observado), siendo la diferencia de altitud entre ambas el valor utilizado en la fórmula de corrección (3) utilizando la tasa de descenso de temperatura de 6,5°C/km.

$$\delta T = [-\delta H x \Upsilon] + T \quad (3)$$

Donde  $\delta H = (h_o - h_e)$ ,  $h_o$ =altura de la estación meteorológica y  $h_e$ = altura media de los píxeles cercanos a la estación meteorológica correspondiente a la base global de datos.  $\Upsilon$ = es el gradiente adiabático (6,5°C/km).

El valor observado fue representado por cada una de las 33 estaciones meteorológicas citadas en la Tabla I.

El desempeño de cada base reticulada se analizó a partir del error relativo medio absoluto (RMAE, Li y Heap, 2008) y la raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE, Li y Heap,

2008). Para realizar este análisis se respetó la resolución espacial nativa de cada base reticulada.

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(p_i - o_i)/o_i| \quad (4)$$

$$RRMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|p_i - o_i|/o_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde  $O$  es el valor observado,  $P$  es el valor predicho o estimado.

Para evaluar la calidad de la BTRSC también se utilizó el procedimiento “leave-one-out” (Berndt y Haberlandt, 2018), en donde un valor observado para una ubicación en particular es removido en forma temporal del procedimiento de interpolación. El valor en esa ubicación fue estimado utilizando los valores observados restantes (32 estaciones). Este proceso se repitió para cada uno de los valores observados. Esta metodología permite la evaluación del ajuste entre el producto reticulado y el valor observado como si fueran independientes uno del otro (Bianchi et al. 2016; Berndt y Haberlandt, 2018). A partir de estas diferencias se evaluaron el RMAE (4) y RRMSE (5).

A fin de realizar un estudio complementario se seleccionaron del Banco de Datos Hidrometeorológicos (BDHM) de la provincia de Santa Cruz (Monserrat et al. 2016), tres estaciones meteorológicas con series incompletas, pero que por lo menos presentaron dos años consecutivos sin datos perdidos. Estas estaciones fueron Río Turbio (2002-2009), Los Huemules (2003-2004) y Cerro Torre (2007-2008), todas ubicadas sobre la región oeste de Santa Cruz (Figura 1, Tabla I). Sobre dichas estaciones se calculó el desvío entre el valor estimado por cada base reticulada y el valor observado, a fin de evaluar la dispersión de dichas bases en la región oeste de la provincia.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Características termométricas de las estaciones meteorológicas

La temperatura media anual (T<sub>ma</sub>) se encuentra influenciada por la latitud en las estaciones analizadas, presentándose los menores valores de T<sub>ma</sub> a mayor latitud. La altitud en cambio no presentó influencia sobre dichas estaciones, al ser estaciones ubicadas en rangos altitudinales no mayores a los 430 msnm en la provincia de Santa Cruz, sin tener representación sobre las altas cumbres de la cordillera. Hacia el oeste existe también una disminución de la T<sub>ma</sub> en concordancia con el característico patrón NO-SE de las isotermas en esta región (Paruelo et al. 1998). En la provincia de Santa Cruz la estación con mayor T<sub>ma</sub> fue Puerto Deseado, ubicada al noreste de la provincia, con una T<sub>ma</sub> de 10,5 °C; mientras que el menor valor de T<sub>ma</sub> se ubicó hacia el sur en el Campo Experimental Potrok Aike INTA con 6,0 °C.

Con respecto a los valores medios mensuales, enero se presentó como el mes más caluroso para todas las estaciones de la provincia, oscilando entre 16,7 °C y 13,5 °C para las estaciones de Puerto Deseado y Río Gallegos, respectivamente (Figura 2c). El mes de julio representó el mes más frío para las estaciones de la región, donde el valor mínimo medio fue de 0,1 °C para Potrok

Aike, y el máximo fue de 3,8 °C para Puerto Deseado.

De las nueve estaciones ubicadas en la provincia de Santa Cruz, Lago Argentino fue la que mostró la mayor variabilidad interanual (CV=12,5 %) dentro del periodo analizado, oscilando su media anual entre 6,4lor mínimo medio fue de 0,1 °C para Potrok Aike, y el máximo fue de 3,8 °C para el año más frío (1997) y 10,3 lor mínimo medio fue de 0,1 °C para Potrok Aike, y el máximo fue de 3,8 °C para el año más caluroso (2004). Las demás estaciones mostraron su coeficiente de variación entre 6 y 10 %, donde las menores variaciones se observaron en las estaciones ubicadas en cercanía a la costa atlántica (Puerto Deseado, Puerto San Julián y Río Gallegos), (Figura 2a).

A partir del análisis de conglomerados mediante la técnica de Ward se pudieron identificar diez grupos conformados entre 2 a 5 estaciones meteorológicas (Tabla III). Estos agrupamientos fueron utilizados para el análisis de calidad, además del rellenado de datos para las series con datos perdidos, a partir de una serie de referencia del mismo grupo. El grupo 1, conformado por las estaciones más australes de la región (Río Gallegos, Monte Aymond, Potrok Aike, San Sebastián) presentó una temperatura media anual (T<sub>ma</sub>) de 6,3 °C, siendo la menor en comparación a los demás grupos (Tabla III); mientras que el grupo con la T<sub>ma</sub> mayor fue el 6 ubicado al noreste de la región, conformado por las estaciones de Comodoro Rivadavia y Sarmiento, con una T<sub>ma</sub> de 12,6 °C.

#### 3.2. Evaluación de desempeño de bases reticuladas de temperatura

Para el cálculo de los estadísticos se utilizaron 30 de las 33 estaciones meteorológicas disponibles. Esto fue así dado que las estaciones de Comodoro Rivadavia, Puerto Deseado y San Sebastián son estaciones ubicadas al borde del producto generado, donde los valores estimados por BTRSC se apoyan en estaciones ubicadas a más de 200 km, límite del valor

Grupo	Estaciones meteorológicas	Tma (°C)	Tmv (°C)	Tmo (°C)	Tmi (°C)	Tmp (°C)
1	Rio Gallegos Monte Aymond Potrok Aike San Sebastián	6,3	10,6	3,4	2,4	8,7
2	Villa Tehuelche Punta Arenas Isla Riesco Puerto Natales	6,5	10	4,3	3,3	8,2
3	Lago Argentino Gobernador Gregores	8,7	14	5,4	3,7	11,7
4	Villa O'Higgins Puerto Edén Cerro Castillo Torres del Paine Cerro Guido	7,4	11,4	4,9	4	9,3
5	Puerto Deseado Cerro Vanguardía Puerto San Julián	10,3	15,3	7,4	5,5	12,9
6	Comodoro Rivadavia Sarmiento	12,6	18	9,3	7,5	15,5
7	Rio Mayo Perito Moreno Lord Cochrane	9,8	15,4	6,1	4,8	12,9
8	Puerto Guadal Villa Manihuales Bahia Murta Chile Chico	9,4	14	6,7	5,5	11,5
9	Aserradero La Paulina Balmaceda Estancia Año Nuevo	6,9	11,9	4,1	2,3	9,1
10	Coyaique Villa Ortega Ñirehuao	8,1	12,7	5,4	4,2	10,3

Tabla III: Grupos de estaciones meteorológicas siguiendo la metodología de Ward (Kalkstein et al. 1987) y sus características termométricas medias. Tma: temperatura media anual, Tmv: temperatura media de verano, Tmo: temperatura media de otoño, Tmi: temperatura media de invierno, Tmp: temperatura media de primavera

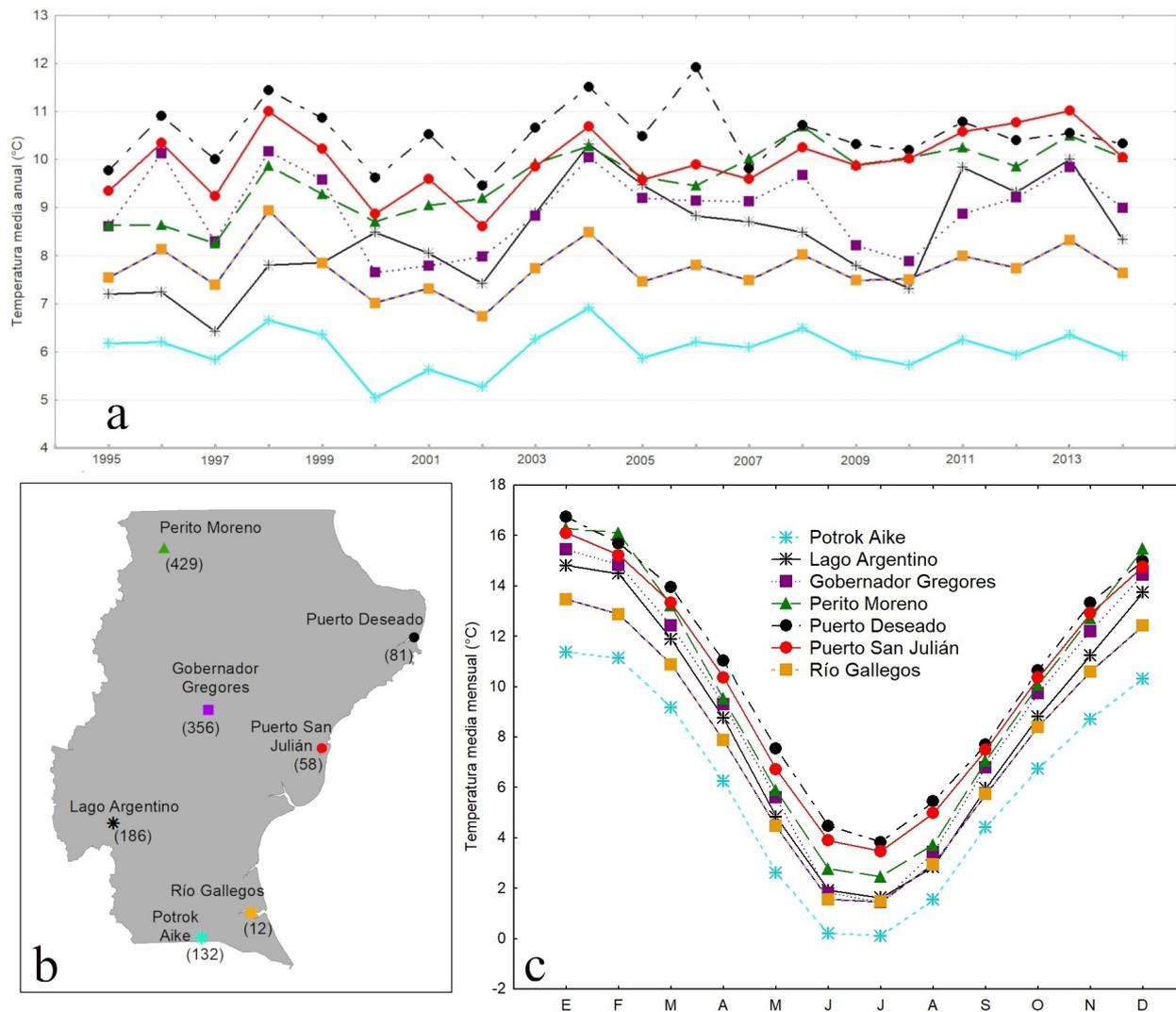


Figura 2: Temperatura media anual (a) y temperatura media mensual (c) para siete estaciones de la provincia de Santa Cruz (b) para el periodo 1995-2014. Entre paréntesis, la altura sobre el nivel del mar (msnm) de cada estación meteorológica.

umbral establecido para la generación de las interpolaciones.

Los estadísticos calculados indicaron que la BTRSC fue la base reticulada que mejor representó la variación de la temperatura en la escala temporal anual (Figura 3, Tabla IV). BTRSC subestima la temperatura media anual en la mayoría de las estaciones de validación, oscilando entre 0,2 y 2,7 °C menos que los valores observados, obteniéndose los mayores errores en situaciones de borde (Figura 3).

CRU se presentó como la base global con mejor desempeño en el producto anual, detrás de BTRSC; mientras que UDEL presentó el peor desempeño en comparación a las demás (Figura 3, Tabla IV). ERA5 presentó en todas las estaciones del año una subestimación de las temperaturas medias estacionales (Figura 4), con las mayores diferencias en el invierno y primavera (subestimaciones de más de 3°C en el invierno y más de 4°C en la primavera para las estaciones chilenas de Bahía Murta y Chile Chico). Salvo en el verano, UDEL presentó

	Anual		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	RMAE	RRMSE	RMAE	RRMSE	RMAE	RRMSE	RMAE	RRMSE	RMAE	RRMSE
BTRSC	<b>0,12</b>	<b>0,17</b>	0,14	<b>0,1</b>	<b>0,13</b>	<b>0,18</b>	<b>0,22</b>	<b>0,31</b>	<b>0,09</b>	<b>0,13</b>
CRU TS v 4.04	0,16	0,22	<b>0,09</b>	0,11	0,24	0,31	0,31	0,41	0,11	0,14
UDEL v. 5.01	0,2	0,3	0,32	0,35	0,29	0,4	0,35	0,48	0,13	0,18
ERA5	0,2	0,24	0,1	0,13	0,22	0,26	0,44	0,51	0,19	0,23

Tabla IV: Evaluación de desempeño de cuatro bases reticuladas de temperatura en sus productos estacionales y anual.

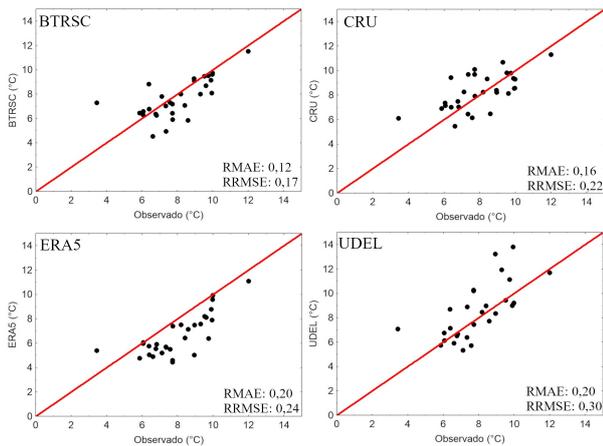


Figura 3: Evaluación del desempeño del producto anual de la base de datos BTRSC y de bases de datos globales de temperatura en comparación a los datos observados en estaciones meteorológicas para el período 1995-2014. RRMSE: Raíz del error medio cuadrático relativo; RMAE: Error relativo medio absoluto.

los menores desvíos con respecto a los valores observados en todas las estaciones del año (Figura 4), seguido por CRU y BTRSC. A pesar de ello, UDEL presentó la mayor variabilidad en las diferencias estimadas y observadas en comparación a las demás, mientras que BTRSC presentó para todas las estaciones del año una menor variabilidad en estas diferencias (Figura 4). Al analizar el RRMSE fue posible asegurar el comportamiento errático de estas bases globales, el cual aumenta en la época de menor temperatura media, como los son las estaciones de otoño e invierno (Figura 5). BTRSC mantuvo durante todas las estaciones del año un menor

valor de RRMSE en comparación a las demás bases globales.

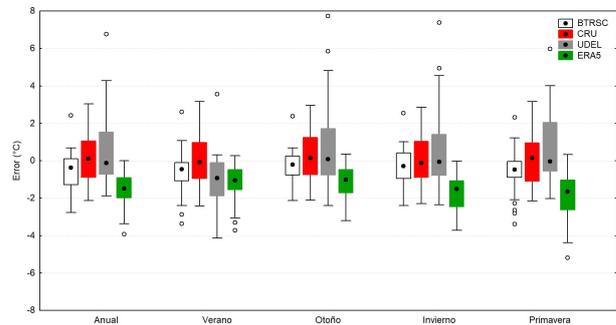


Figura 4: Distribución de los errores (°C) para cuatro bases de datos reticuladas de temperatura en el producto anual y estacionales en comparación a las estaciones de validación para el período 1995-2014.

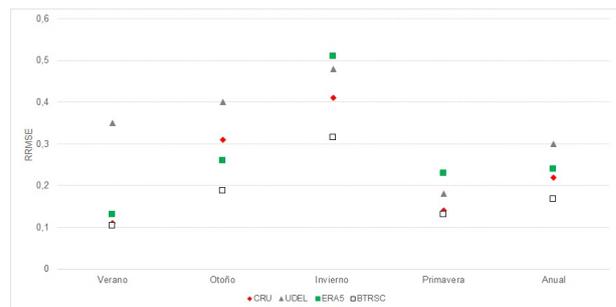


Figura 5: Raíz del error medio cuadrático relativo (RRMSE) para cuatro bases reticuladas de temperatura media estacional y anual, en el período 1995-2014.

Si bien se requieren estudios complementarios para determinar las causas, es posible que las bases de datos presenten mayor dispersión y

errores en el oeste de la región y en zonas de altura durante la época invernal dado que es la época del año de mayor actividad frontal, debido al ingreso de vaguada desde el Pacífico Sur, y abundantes precipitaciones (Blázquez y Solman 2018) que influyen a su vez los patrones de temperatura. Si las bases de datos utilizadas no cuentan con suficiente información espacial en la zona o no logran capturar adecuadamente esta circulación (como en el caso de los reanálisis) es posible que durante esta estación presenten mayores errores. Estos resultados están en concordancia con lo mostrado por Solman et al. (2013), donde se evidencia una mayor dispersión entre bases de datos de temperatura y un mayor cociente entre dispersión y variabilidad en el oeste de Santa Cruz durante el invierno.

### 3.3. Variación espacial de la temperatura en la provincia de Santa Cruz

Todas las bases de datos analizadas presentaron las temperaturas medias anuales más cálidas hacia el noreste de la provincia, oscilando entre los 10 y 13°C, mientras que las temperaturas más frías se ubicaron hacia el oeste y sur de la provincia, como era de esperar (Figura 6). El análisis de la temperatura en función de la altitud a lo largo de tres transectas longitudinales (46°, 49° y 51° S) permitió identificar que las temperaturas más cálidas se ubican en las zonas más bajas de la provincia localizadas en las zonas costeras; mientras que la temperatura media anual (Tma) disminuye conforme aumenta la altitud hacia las zonas cordilleranas (Figura 7). Esto marca la influencia de la latitud y la altitud en la temperatura media anual de la provincia, sumado a un tercer factor local de cercanía al mar.

A lo largo de las tres transectas longitudinales analizadas, BTRSC presentó valores de Tma por encima de las demás bases reticuladas, aumentando las diferencias en las zonas de mayor altitud (Figura 7), sobre todo en la transecta longitudinal de los 49°; donde hacia el oeste se alcanzan alturas hasta los 1500 msnm.

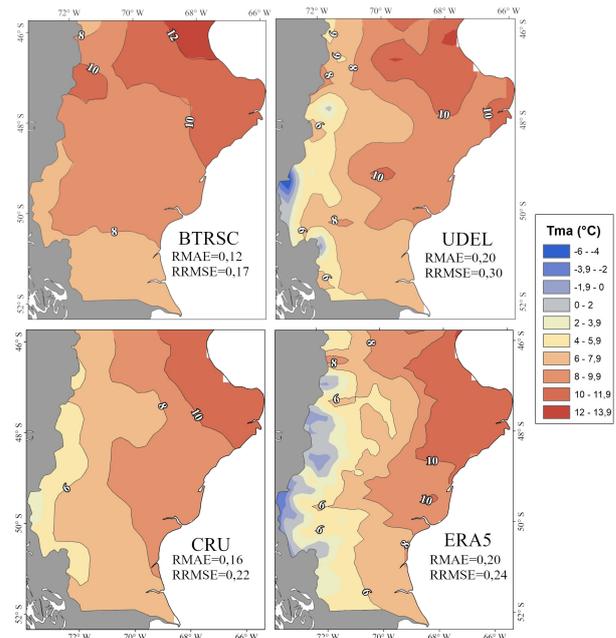
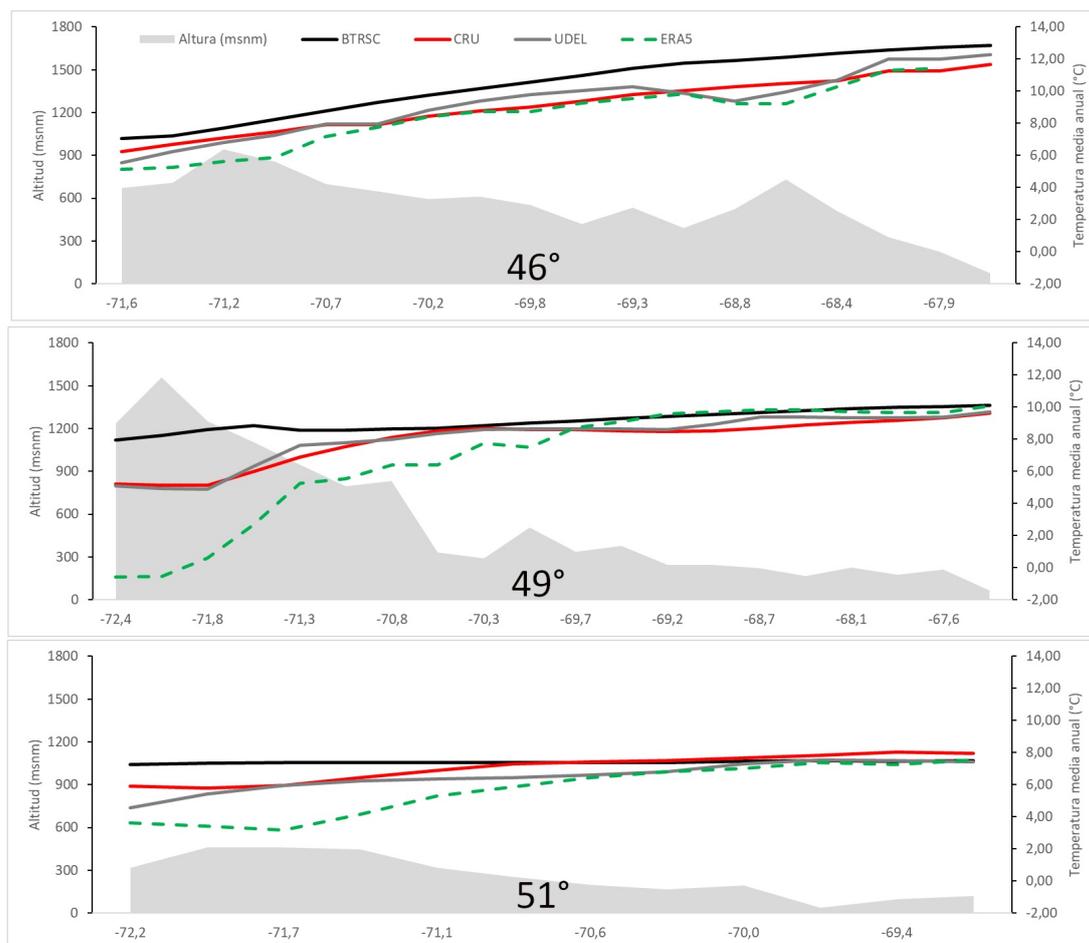


Figura 6: Variación espacial de la temperatura media anual (°C) para la provincia de Santa Cruz para el período 1995-2014, expresada por cuatro bases reticuladas de temperatura.

En estas zonas más elevadas ERA5 fue la que presentó los menores valores de Tma, con valores por debajo de 0°C en la zona sudoeste de la provincia (Figura 6).

Como se muestra en la figura 6, la distribución de las isotermas varía según la base analizada, donde las isotermas de menor valor se ubican en forma más cercana y paralelas a la distribución principal de la cordillera de Los Andes.

La falta de datos a partir de estaciones meteorológicas ubicadas en la región oeste de la provincia no permite realizar un análisis exhaustivo del ajuste de cada base reticulada en su representación de la variación térmica, que en esta región es altamente influenciada por la altitud. Son pocos los registros que se encuentran sobre esta región, siendo la mayoría discontinuos o bien de corta duración. En particular, en este estudio se consideraron tres estaciones adicionales con registros de temperatura en periodos más cortos (Río



*Figura 7:* Transectas longitudinales de temperatura media anual (°C) a los 46°, 49° y 51° de latitud sur expresada para la Base de Temperatura Reticulada para Santa Cruz (BTRSC) y cuatro bases globales reticuladas de temperatura. En gris se representa la topografía (msnm) a lo largo de la transecta a partir del modelo digital de elevaciones ALOS PRISM (30 m).

Turbio, 2002-2009; Los Huemules, 2003-2004 y Cerro Torre, 2007-2008), ubicadas sobre zonas de altura, con el fin de analizar el comportamiento de las bases de datos en esta región. De las tres estaciones analizadas, se obtuvieron resultados muy disímiles entre la estimación de cada base reticulada y el valor observado. En el caso de Río Turbio, CRU y UDEL representaron muy bien la temperatura media anual y estacional, con una leve subestimación de la misma (Figura 8); mientras que BTRSC sobreestimó dichos valores. ERA5 fue la base de datos que presentó las mayores diferencias para esta estación meteorológica, con valores entre los 4° y 5° menos para el

producto anual y de primavera respectivamente. Para las dos estaciones meteorológicas restantes BTRSC sobreestimó la temperatura anual y estacional, mientras que UDEL y ERA5 subestimaron principalmente la temperatura media del invierno y primavera (Figura 8). De acuerdo a estos resultados es de esperar que el producto BTRSC, tanto en el anual como en los estacionales se encuentre sobreestimando a la temperatura en la zona oeste, donde se presentan las mayores altitudes de la provincia, a pesar de haber utilizado una técnica geoestadística de interpolación de datos que incluye en su modelo de estimación a la altitud.



Figura 8: Diferencias absolutas entre cuatro bases reticuladas de temperatura y tres estaciones meteorológicas para los productos estacionales y el anual.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las bases de datos de temperatura del aire son un insumo esencial para el estudio del clima, su variabilidad y tendencias cómo también para estudios hidrológicos, agropecuarios, de planificación y conservación ambiental y de manejo de riesgos y emergencias (Larson y Peck 1974; Ebert et al. 2007; Yilmaz et al. 2010; Jiang et al. 2012).

En la provincia de Santa Cruz, ubicada en el sector sur de Patagonia, donde está focalizado este estudio, son escasos los antecedentes de generación y/o validación de bases de datos reticuladas globales o de bases regionales de temperatura. De Fina (1968) y Soto (2000) son dos de los estudios que abordan esta problemática. Los autores caracterizan la temperatura media anual proponiendo una distribución genérica de isotermas en cartografía de muy baja resolución para la región, sin una descripción metodológica clara y estandarizada para describir apropiadamente la variación espacio-temporal de la temperatura.

En este contexto, en el presente trabajo se creó una nueva base reticulada de datos

de temperatura, BTRSC, generada a partir del análisis y procesamiento de los datos termométricos disponibles en el Banco de Datos Hidrometeorológicos de la Provincia de Santa Cruz. De esta forma se obtuvo el primer antecedente regional para la caracterización cartografiada de la distribución espacio-temporal de la temperatura a partir de procedimientos estandarizados para su tratamiento y modelización geoestadística.

Uno de los objetivos principales que debe cumplir una base de datos reticulada de temperatura es lograr capturar adecuadamente la interacción entre la topografía, la latitud, la circulación atmosférica, el viento y la proximidad a los océanos. Estos factores introducen grandes complejidades en los patrones espaciales de la temperatura en Patagonia (Paruelo et al. 1998; Villalba et al. 2003; Bianchi et al. 2016). En particular, el rol de la Cordillera de los Andes es esencial en el comportamiento de esta variable en esta región, dado el doble rol que ejerce en la disminución de la temperatura con la elevación (Oke, 2002) y en la fuerte influencia que esta barrera topográfica ejerce sobre los patrones de temperatura, asociado al bloqueo de la

circulación atmosférica y la reducción del paso de las masas de aire a través de la Cordillera (Insel et al. 2009). La BTRSC representó en forma satisfactoria la interacción de factores como la latitud y la proximidad a los océanos en los patrones espaciales de la temperatura. Los mayores valores de temperatura media anual se obtuvieron en la región noreste de la provincia de Santa Cruz en zonas de baja altitud y latitud en cercanías al mar. En esta zona más cálida las T<sub>ma</sub> registradas estuvieron entre los 9 y 12 °C (Caleta Olivia y Puerto Deseado, respectivamente), en concordancia con los resultados obtenidos por Soto (2000). Por otro lado, hacia el sudoeste BTRSC presenta un descenso en el valor de la T<sub>ma</sub>, llegando a valores de 5°C en la zona de Río Turbio y 28 de Noviembre. La zona oeste, al límite con la cordillera de Los Andes muestra una barrera térmica, con una T<sub>ma</sub> entre 5 y 6 °C ubicada en forma paralela a la cordillera. Esta zona, de elevada altitud, es la región más compleja de representar y donde la BTRSC presentó los mayores déficits.

La comparación de BTRSC con tres bases de datos globales de temperatura evidenció un mejor desempeño general con los menores valores de RRMSE en comparación a las demás bases globales de temperatura, tanto para los productos estacionales como para el producto anual. Bianchi et al. (2016) encontraron que para la representación de la temperatura, bases globales con mayor resolución espacial, como CRU y UDEL tuvieron mejor desempeño que ERA-Interim con menor resolución espacial. La mayor diferencia entre BTRSC y las demás bases globales fue la representación de la temperatura en la franja oeste de la provincia de Santa Cruz, zona cercana a la cordillera de Los Andes. Este aspecto es relevante dado que el patrón de temperatura en la distribución noroeste-sudeste de las isotermas está determinado principalmente por la presencia de Los Andes (Paruelo et al. 1998). Esta es una zona con elevados gradientes altitudinales y con la menor densidad de estaciones meteorológicas que dificulta que se

pueda representar adecuadamente la variación térmica. Las pocas estaciones que existen sobre la cordillera de Los Andes, se encuentran sobre el sector chileno, donde la Dirección General de Aguas de Chile (DGA) mantiene una red activa de estaciones meteorológicas en las zonas de los Campos de Hielo Norte y Sur (Bravo et al. 2019). A pesar de ello esta red cuenta con datos muy recientes desde el año 2015. Del lado argentino, existe solo una nueva estación meteorológica activa en cercanías al campo de hielo ubicada al pie del glaciar Torre, cuya administración está bajo el Instituto Argentino De Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Esta falta de registros determina una representación incompleta de la variación espacial de la temperatura, sobre todo en situaciones de extrema complejidad como la zona cordillerana. A pesar de estas limitaciones, la red de estaciones utilizada en el presente trabajo para la confección de BTRSC resulta de mayor densidad que aquella utilizada por la mayoría de las bases globales para la elaboración de sus modelos continuos en esta región de Patagonia. Los registros climáticos utilizados por dichas bases suelen realizar sus estimaciones a partir de datos incluidos en la base de registros históricos del Sistema Global de Observación del Clima (GCOS, por sus siglas en inglés; Bianchi et al. 2016).

La base de datos BTRSC presenta dos limitaciones relevantes que deben ser consideradas al momento de utilizar este producto. Por un lado, la longitud de la serie de tiempo de 20 años (1995 – 2014) utilizada en el presente trabajo no cumple con los estándares internacionales sugeridos, donde se consideran periodos de referencia de 30 años de información que permitan realizar climatologías que capturen adecuadamente la variabilidad interanual de la variable estudiada (WMO, 2018). La segunda limitación está asociada a la distribución espacial no equilibrada de estaciones de registro termométrico, con escasas estaciones en las zonas gradientes altitudinales relevantes, como la cordillera occidental de Los Andes y la zona de sierras y mesetas del centro

de la provincia de Santa Cruz.

Aun así, la base de datos lograda representa un importante avance en materia de conocimiento de la distribución de las temperaturas regionales. Es una base de datos de aplicación regional con un buen desempeño para la representación espacio-temporal de la variación de la temperatura, con posibilidad de aplicación en modelos ecológicos e hidrológicos, además de representar un periodo de tiempo base para comparar en estudios de cambio climático.

Agradecimientos: Agradecemos a la empresa Enap Sipetrol Argentina S.A por el aporte de recursos al proyecto de investigación, a la Municipalidad de Río Gallegos (Santa Cruz) y, en especial, a Mariano Bertinat, Secretario de Estado de Ambiente de la provincia de Santa Cruz.

#### REFERENCIAS

- Aalto, J., Pirinen, P., Heikkinen, H., Venäläinen, A., 2013. Spatial interpolation of monthly climate data for Finland: comparing the performance of kriging and generalized additive models. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 112: 99-111.
- Almonacid, L., Pessacg, N., Diaz, B., Bonfili, O., Peri, P. L., 2021. Nueva base de datos reticulada de precipitación para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Revista Meteorológica*, Vol. 46 N°2 (2021) 26-53.
- Barry, R. G., 2013. *Mountain Weather and Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, 532 pp.
- Begert, M., Frei, C., 2018. Long-term area-mean temperature series for Switzerland-Combining homogenized station data and high resolution grid data. *International Journal of Climatology*, 2018, 38: 2792-2807.
- Benavides, R., Montes, F., Rubio, A., Osoro, K., 2007. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 146 (2007) 173-188.
- Berndt, C., Haberlandt, U., 2018. Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany – Influence of temporal resolution and network density. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15: 184 – 202.
- Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M., et al., 2016. New precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global climate grids. *Journal of Meteorological Research*, 30: 38 – 52.
- Blázquez, J., Solman, S. A., 2018. Fronts and precipitation in CMIP5 models for the austral winter of the Southern Hemisphere. *Climate Dynamics*, Vol. 50, 2705–2717 pp.
- Bravo, C., Quincey, D. J., Ross, A. N., Rivera, A., Brock, B., Miles, E., Silva, A., 2019. Air temperature characteristics, distribution, and impact on modeled ablation for the south Patagonia icefield. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 907-925.
- De Fina, A. L., Garbosky, A. J., Giannetto, F., Sabella, L. J., 1968. Difusión geográfica de cultivos índices en la provincia de Santa Cruz y sus causas. *INTA-Suelos*. Publicación 111:29, 1968.
- Ebert, E., Janowiak, J., Kidd, C., 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of American Meteorological Society*. 88, 47–64.
- Garreaud R., Lopez, P., Minvielle, M., Rojas, M., 2013. Large-scale control on the Patagonian Climate. *Journal of Climate*, Vol. 26, 215-230 pp.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228 (2000) 113 – 129.
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. D., Lister, D. H., 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7: 109, 1 – 18 pp.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G.,

- Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J. -N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049.
- Hooker, J., Duveiller, G., Cescatti, A., 2018. A global dataset of air temperature derived from satellite remote sensing and weather stations. *Scientific Data*, 5: 180246 doi: 10.1038/sdata.2018.246 (2018).
- Insel, N., Poulsen, C., Ehlers, T., 2009. Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Climate Dynamics*, Vol. 35, 1477-1492 pp.
- Jiang, S., Ren, L., Hong, Y., Yong, B., Yang, X., Yuan, F., Ma, M., 2012. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *Journal of Hydrology*, 452–453, 213–225.
- Kalkstein, L.S., Tan, G.R., Skindlov, J.A., 1987. An evaluation of 3 clustering procedures for use in synoptic climatological classification. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 26: 717–730.
- Kashani, M. H., Dinpashoh, Y., 2012. Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26: 59-71.
- Khesali, E., Mobasheri, M., 2020. A method in near-surface estimation of air temperature (NEAT) in times following the satellite passing time using MODIS images. *Advances in Space Research*, article in press.
- Larson, L. W., Peck, E. L., 1974. Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 10(4), 857–863.
- Li, J., Heap, A. D., 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia, Record 2008/23*, 137 pp.
- Li, X., Cheng, G., Lu, L., 2005. Spatial analysis of air temperature in the Qinghai-Tibet Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 37, No 2, 2005, pp. 246-252.
- Lloyd, C. D., 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology* 308 (2005) 128 – 150.
- Monserrat, M. C., Diaz, B. G., Bonfili, O., Almonacid, L., 2016. Banco de datos hidrometeorológicos de Santa Cruz. Presentado en: 3er encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos (IFRH, 2016), 6 y 7 de octubre de 2016, Ezeiza, Buenos Aires, 8 pp.
- Oke, T. R., 2002. *Boundary Layer Climates*. Routledge, London, 435 pp.
- Paruelo, J. M., Beltrán, A., Jobbágy, E., Sala, O., Golluscio, R. A., 1998. The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral*, 8, 85-101.
- Peri, P.L., Rosas, Y. M., Ladd, B., Toledo S., Lasagno, R. G., Martínez Pastur, G., 2018. Modelling soil carbon content in South Patagonia and evaluating changes according to climate, vegetation, desertification and grazing. *Sustainability* 10(2), 438.
- Peri, P. L., Rosas, Y. M., Ladd, B., Toledo, S., Lasagno, R. G., Martínez Pastur, G., 2019. Modeling soil nitrogen content in South Patagonia across a climate gradient, vegetation type, and grazing. *Sustainability* 11, 2707.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, S., Solman, S., Pascual, M., 2015. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of Total Environment* 537 (2015) 225 – 234.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, S., Rehencq, M., GarciaAsorey, M., Castiñeira, L., Solman, S., Pascual, M., 2018. Producción de agua en la Cuenca del río Limay: Modelado y calibración. *Revista Meteorológica*,

- 43(2):3-23.
- Schumacher, V., Justino, F., Fernández, Al., Meseguer-Ruiz, O., Sarricolea, P., Comin, A., Venancio, L. P., Althoff, D., 2020. Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature. *International Journal of Climatology*, 2020; 1-23.
- Sheridan, P., Vosper, S., Smith, S., 2018. A physically based algorithm for downscaling temperature in complex terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 57, 1907 – 1929.
- SMN, 2021. <https://datos.gob.ar/dataset/smn-listado-estaciones-meteorologicas-smn>. Último acceso enero de 2021.
- Solman, S. A., Sanchez, E., Samulesson, P., da Rocha, R. P., Li, L., Marengo, J., Pessacg, N. L., Remedio, A. R. C., Chou, S. C., Berbery, H., Le Treut, H., de Castro, M., Jacob, D., 2013. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. *Climate Dynamics*, 41, 1139 – 1157 (2013).
- Soto, J., 2000. Mapa de clima: Atlas de la República Argentina. Isohietas medias anuales. Las condiciones climáticas de la provincia de Santa Cruz. En *El Gran Libro de la Provincia de Santa Cruz 2000*, pag.1321.
- Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H., 2016. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by Alos Prism. *International Archives of the Photogrammetry, remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, Vol. 41, p157-162.
- Varentsov, M., Esau, I., Wolf, T., 2020. High resolution temperature mapping by geostatistical kriging with external drift from large-Eddy Simulations. *American Meteorological Society*, V:148, pp 1026-1048.
- Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, J. A., et al., 2003. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change*, 59, 177–232.
- Willmott, C. J. y Matsuura, K., 2001. *Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950 - 1999)*.
- WMO, 2018. *Guide to climatological practices*. WMO-No. 100, World Meteorological Organization, Geneva, 2018. ISBN 978-92-63-10100-6, pp 140.
- Xu, C., Wang, J., Li, Q., 2018. A new method for temperature spatial interpolation based on sparse historical stations. *Journal of Climate*, vol. 31, 1757-1770.
- Yilmaz, K. K., Adler, R. F., Tian, Y., Hong, Y., Pierce, H. F., 2010. Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system. *International Journal of Remote Sensing*, 31(14), 3763–3782