

**PROYECCIONES FUTURAS ASOCIADAS A LOS EVENTOS EXTREMOS FRIOS
EN EL SUDESTE DE SUDAMERICA SOBRE LA PERSPECTIVA DEL MODELO
HADCM3**Gabriela V. Müller¹, Cintia R.R. Repinaldo¹, Kelen M. Andrade² e Iracema F.A Cavalcanti²¹Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción
(CICYTTP-CONICET) Diamante, Argentina²Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(CPTEC-INPE), Brasil

(Manuscrito recibido el 10 de enero de 2014, en su versión final el 25 de junio de 2014)

RESUMEN

Las simulaciones del modelo HadCM3 fueron de las primeras disponibles para el análisis de proyecciones futuras, reflejándose en la literatura que describe principalmente variables de temperatura y precipitación para Sudamérica. El objetivo de ese trabajo es investigar los cambios en la circulación atmosférica en el sudeste de Sudamérica asociada a eventos extremos fríos, en el escenario de emisiones futuras más crítico denominado A2, para el periodo 2081-2100 respecto a un periodo climatológico de referencia 1961-1990, considerando el modelo HadCM3 y los datos del reanálisis NCEP/NCAR. A partir de la temperatura media diaria en 850 hPa, se identifican los eventos de temperatura negativa para los meses de mayo a septiembre, componiéndose los cinco eventos más extremos para tres áreas que incluyen la Pampa Húmeda (área 1), Uruguay y sur de Brasil (área 2), la parte oriental de Paraguay, norte de Argentina y sur de Brasil (área 3). Los patrones de circulación son analizados tanto para el reanálisis como para las simulaciones en el clima presente y futuro. Los resultados muestran para el clima presente que el modelo simula la incursión de las isoterms de 0°C más al norte respecto del reanálisis, a excepción del área 3 que limita con los trópicos, con anomalías negativas de temperatura más intensas y más extensas en términos latitudinales. A pesar que las configuraciones de los campos de presión sean similares al reanálisis, se aprecia una mayor penetración del anticiclón continental, a excepción del área 3, con una intensificación de las anomalías en las respectivas áreas. El modelo también tiende a simular una componente de viento del sur más intensa en 850 hPa y captura la profunda vaguada sobre el continente en niveles altos con el jet subtropical bien configurado, típico de estos eventos extremos. En el escenario futuro, el modelo no proyecta eventos extremos de temperatura por debajo de 0°C para el área 3, restringiendo la incursión de la isoterma de 0° C a latitudes más al sur en las otras dos áreas respecto a la simulación en el clima presente, en concordancia con el aumento de temperatura media que el modelo proyecta para Sudamérica.

Palabras clave: proyecciones futuras, eventos extremos fríos, escenarios climáticos, cambio climático.

FUTURE PROJECTIONS OF EXTREME COLD EVENTS IN SOUTHEASTERN SOUTHAMERICA AS REPRODUCED BY HADCM3 MODEL

ABSTRACT

The simulations with the HadCM3 model were among the first available to analyze future projections. This is reflected in the literature, which mainly describes the variables temperature and precipitation for South America. The aim of this paper is to investigate the changes in the atmospheric circulation over southeastern South America associated to extreme cold events in the most critical future emission scenario A2 for the period 2081-2100, with respect to the climatological reference period 1961-1990. To do that the HadCM3 model is used as well as the NCEP/NCAR reanalysis. Were identified the five most extreme events of daily mean negative temperature in 850 hPa from May to September over three areas: Wet Pampa (area 1), Uruguay and southern Brazil (area 2), eastern Paraguay, northern Argentina and southern Brazil (area 3). The obtained circulation patterns are analyzed in both, the reanalysis and the HadCM3 simulations of the present and future climate. In the present climate, with the exception of the area 3 that borders the tropics, the model simulates a more extended northward incursion of the 0°C isotherm than the reanalysis. It also shows more intense negative temperature anomalies, which have more latitudinal extension. Despite the fact that the configurations of the pressure fields are similar to that of the reanalysis, except for the area 3, a further inland penetration of the continental anticyclone is appreciated, with an intensification of the anomalies over the respective areas. The model also tends to simulate a more intense 850 hPa southerly wind component, capturing the high level deep trough over the continent and displaying a properly configured subtropical jet, which is typical of these extreme events. In the future scenario, the model does not project extreme cold events of below 0°C temperatures for area 3. The model also restricts the incursion of the 0°C isotherm to more southerly latitudes in the other two areas with respect to the simulation of the present climate. These facts are consistent with the mean temperature increase projected by the model for South America.

Keywords: Future projections, extreme cold events, climate scenarios, climatic change.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha sido ampliamente discutido el papel de la acción humana en el cambio climático cada vez más evidente. Según las proyecciones futuras producto de los resultados de escenarios de emisiones del IPCC (2007), los cambios proyectados conllevan un gran riesgo para la vida en el planeta, causando daños en la agricultura, la ganadería y la vida humana, con una intensificación de los eventos extremos, olas de calor y frío más frecuentes, inundaciones y deslizamientos, entre otros desastres naturales.

Algunos autores como Vincent et al. (2005) y Alexander et al. (2006), observaron para las últimas décadas un aumento en la temperatura media de la superficie en gran parte de Sudamérica. Utilizando datos observados y homogeneizados para toda América del Sur, Skansi et al. (2013) encontraron evidencias de un aumento de temperatura a partir de la mitad del siglo XX. Por otra parte, el análisis de las tendencias de temperaturas diarias extremas obtenidas a partir de las temperaturas máxima y mínima indican una disminución en la cantidad de días fríos y la ocurrencia de

noches más cálidas en el este de Sudamérica (Rusticucci et al. 2010, Marengo et al. 2010). Estos resultados son coherentes con lo obtenido por Marengo y Camargo (2008) en el sur de Brasil, donde notaron una fuerte tendencia a un aumento en la temperatura mínima en comparación con la máxima para las últimas décadas del invierno, lo que resulta en una disminución en la amplitud de la temperatura diaria. Rusticucci y Renom (2008) encontraron resultados similares para Uruguay, mientras que para Argentina Rusticucci y Barrucand (2004) mostraron tendencias negativas en el número de noches frías, principalmente en el verano. En particular, para la región de la Pampa Húmeda Fernández Long y Müller (2006) obtuvieron tendencias positivas (negativas) en la temperatura mínima anual media en aquellos lugares donde las tendencias en la frecuencias de heladas fueron negativas (positivas) en las últimas décadas (Fernández Long et al., 2013).

El impacto del cambio climático observado en el sudeste de Sudamérica también lo reflejan los modelos en el clima presente así como los escenarios futuros, tanto en los promedios mensuales como en las medias estacionales, proyectando un aumento en la temperatura media en América del Sur para fines de este siglo (Camilloni et al. 2006; Cavalcanti et al. 2006). Tebaldi et al. (2006) analizaron las simulaciones de 9 modelos de circulación general para tres escenarios de emisiones futuras, cuyos resultados apuntaron hacia un aumento en los extremos de temperatura consistentes con un clima más cálido, así como el decrecimiento en el número de días de helada en la media global y en particular en Sudamérica para todo el siglo XXI. Recientemente Cavalcanti et al. (2013) a partir de simulaciones con el modelo GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) para el escenario de emisiones más extremas A2 (IPCC, 2007), obtuvieron una reducción en la frecuencia de incursiones de aire frío para fines de este siglo, con la consecuente disminución de heladas en el sudeste del continente que es la principal región de ocurrencia de este fenómeno. Los resultados sugieren una intensificación en

el gradiente de temperatura lo que implicaría sistemas más vigorosos, con altas pos frontales más intensas y aire frío que se extendería a latitudes más bajas comparado al clima presente. Por otra parte, Andrade et al. (2012) encontraron un aumento en la frecuencia de los sistemas frontales sobre el sur de América del Sur en las proyecciones para fines de este siglo, según las simulaciones de dos modelos globales, GFDL y HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model 3rd version). Sin embargo, el modelo HadCM3 tiende a sobreestimar la media mensual de sistemas frontales en comparación con el reanálisis de NCEP/NCAR, principalmente en el área que abarca norte de Argentina, parte de Paraguay y sur de Brasil.

En este contexto y motivados por estos recientes resultados, en este trabajo se plantea realizar un estudio para los eventos extremos fríos a partir de simulaciones del clima presente y futuro con el modelo HadCM3, en la región más vulnerable a las heladas en el sudeste de Sudamérica. Cabe señalar que en la literatura no se encuentran estudios acerca de los potenciales cambios en la circulación atmosférica asociado a los eventos extremos fríos del sudeste de Sudamérica en el clima futuro a partir del modelo HadCM3. Por lo tanto el objetivo planteado es analizar los cambios en la circulación atmosférica asociada a los eventos extremos fríos en proyecciones para fines de este siglo según el escenario más crítico A2, en relación al clima presente. El análisis para el periodo de referencia (clima presente) nos permitirá evaluar la capacidad del modelo HadCM3 en simular la circulación asociada a esos eventos y así poder evaluar la confiabilidad de los resultados a futuro.

2. DATOS Y MÉTODOS

En este estudio se consideran las principales regiones del sudeste de Sudamérica anualmente afectadas por eventos extremos fríos y en particular por heladas, que cobran importancia por ser éstas de gran producción agrícola como lo señala Cavalcanti et al. (2013). Dichas regiones ocupan 5°lat x 5°lon (Figura 1), comprendiendo

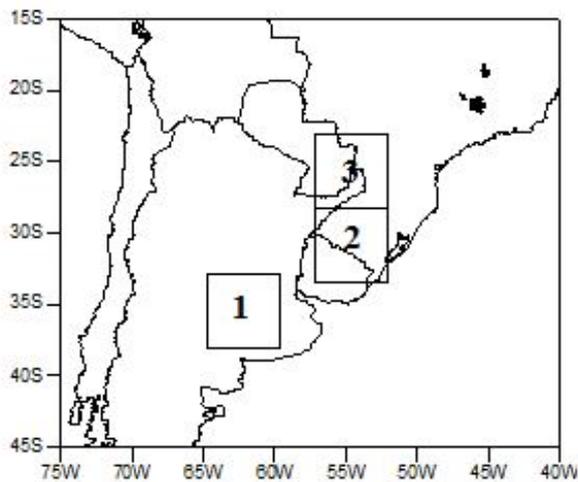


Figura 1: Áreas de referencia: área 1: Pampa Húmeda (33°-38°S, 65°-60°W); área 2: Uruguay y sur de Brasil (28°-33°S, 52°- 57°W); área 3: parte oriental de Paraguay, norte de Argentina y sur de Brasil (23°- 28°S, 52°-57°W).

la Pampa Húmeda (área 1, 33°-38°S, 65°-60°W), Uruguay y sur de Brasil (área 2, 28°-33°S, 52°-57°W), parte oriental de Paraguay, norte de Argentina y sur de Brasil (área 3, 23°- 28°S, 52°-57°W).

Se utilizan las simulaciones del modelo acoplado global HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model 3rd version, Gordon et. al, 2000) del CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project phase 3), elección que responde al hecho que no se encuentran estudios a partir de proyecciones con el modelo HadCM3 en particular para los eventos extremos fríos en las principales regiones afectadas por ellos, es decir las arriba mencionadas. Sin embargo, numerosos trabajos de la literatura usan dicho modelo para el análisis de la precipitación y la temperatura en Sudamérica (Ambrizzi, 2006; Camilioni et al., 2006; Cavalcanti et al., 2006; Bettolli et al., 2013; Gulizia y Camilloni, 2014; entre otros); así también este modelo es muy utilizado como condición de contorno de modelos regionales que analizan las proyecciones futuras en América del Sur (por ejemplo, Marengo et al., 2010; Chou et al., 2011). Por otra parte, el

reanálisis del NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, Kalnay et. al, 1996) es considerado representativo de las observaciones en cada una de las tres áreas de estudio de acuerdo con Cavalcanti et al. (2013). En dicho trabajo se muestra la similitud que existe entre la temperatura observada en superficie y la temperatura del reanálisis en niveles bajos para cada una de las tres áreas, coincidentes con las del actual trabajo para el mismo periodo de referencia. Dicho período se extiende de mayo a septiembre para 1961-1990 (clima presente) y para la proyección de fines de este siglo 2081-2100 (clima futuro) del escenario de emisiones más crítico A2 del IPCC (2007).

A partir de la temperatura media diaria en 850hPa promediadas arealmente en cada una de las regiones de estudio, se identifican los días en que la temperatura estuvo por debajo de 0°C, para los cuales se realiza una composición de cinco eventos, los más extremos, en cada una de las tres áreas. La elección de cinco eventos responde al hecho que es la cantidad total de eventos extremos que cumplen el criterio en el clima presente del área 3. Los campos analizados para las composiciones de los eventos incluyen temperatura en 850hPa, presión media a nivel del mar, viento en 850hPa y 250hPa y las anomalías de dichas variables, calculadas con respecto a la media zonal de cada área. Los patrones simulados son comparados en el clima presente y futuro, y a su vez las simulaciones en el clima presente son validadas a partir de los patrones obtenidos en cada área con el reanálisis; esto permite evaluar la capacidad del modelo HadCM3 en simular la circulación atmosférica de dichos eventos. El estadístico utilizado para cuantificar dicha validación es la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM) y RECMN normalizado respecto a la diferencia entre el valor máximo y mínimo de las temperaturas del reanálisis en el período de estudio para las respectivas áreas. Por otra parte, para cuantificar la variabilidad de las composiciones de los cinco eventos más extremos, en cada área se calcula el desvío standard (DS5) del reanálisis y del modelo en el clima presente y

DS5	NCEP/NCAR	HadCM3 presente	HadCM3 futuro
Área 1	0,43°C	0,76°C	0,68°C
Área 2	0,76°C	0,67°C	0,71°C
Área 3	0,66°C	2,14°C	Sin casos

Tabla I: Desviación standard de los cinco eventos más extremos de temperatura para las áreas 1, 2 y 3 de los reanálisis NCEP/NCAR, las simulaciones del HadCM3 para el período 1961-1990 y las proyecciones del HadCM3 para el período 2081-2100.

futuro (Tabla I).

3. RESULTADOS

La temperatura media de mayo a septiembre del período de estudio en el sur de Sudamérica está representada en la Figura 2, pudiéndose apreciar que el modelo simula dicha variable con una buena aproximación principalmente en el sudeste, con isotermas ligeramente más al norte (Figura 2b) respecto a las del NCEP/NCAR (Figura 2a). Tal como es de esperarse, el modelo HadCM3 proyecta condiciones medias más cálidas para el futuro (Figura 2c) respecto del presente (Figura 2b).

A modo de cuantificar el resultado de la validación del modelo respecto del reanálisis en cada una de las tres regiones de estudio, se comparan las temperaturas medias del modelo respecto del reanálisis (Figura 3a-c). En la figura 3 se observa que existe una buena aproximación de la temperatura media del modelo a la del NCEP/NCAR, siendo menor el RECM para el caso del área 3 (Figura 3c). Por otra parte se calcula el RECMN, obteniéndose 0,40°C (área 1), 0,36°C (área 2) y 0,32°C (área 3), es decir que los errores son similares en las tres regiones, disminuyendo hacia las latitudes menores.

El análisis de los campos de anomalías de cada una de las áreas de estudio se describe a continuación a partir de las figuras 4, 5 y 6 respectivamente, que muestran la composición de los eventos que cumplen el criterio definido

previamente para las variables temperatura (a, b, c), presión (d, e, f), viento en 850 hPa (g, h, i) y viento en 250 hPa (j, k, l), en una intercomparación entre reanálisis y simulaciones en el clima presente y futuro. En los campos de temperatura aparecen las isotermas de 0°C y 10°C que representan la temperatura media de los eventos que intervienen en la composición.

3.1. Área 1

La composición de la temperatura de los eventos identificados por el modelo en el clima presente muestra una mayor incursión de la isoterma de 0°C (Figura 4b) la cual alcanza los 25°S respecto del reanálisis (Figuras 4a), donde se ubica alrededor de los 30°S. Acompañando esta isoterma se observan anomalías negativas de temperatura más intensas para el modelo. En la simulación del clima futuro (Figura 4c), la incursión de la isoterma de 0°C alcanza latitudes al sur de lo mostrado por el clima presente, siendo similar al reanálisis, pero mantiene las regiones de anomalías negativas de temperatura cercanas a las simuladas en el clima presente, aunque las más extremas ocupan extensiones menores. La Tabla I presenta una medida de la variabilidad de temperatura para los cinco eventos más extremos. En el caso del reanálisis el desvío standard es de 0,43°C, lo que equivale al 7% de la media de esos eventos. Los cinco eventos más extremos de temperatura simulados por el modelo para el presente muestran un desvío standard de 0,76°C, 11% de la media de los eventos, y para el futuro el desvio standard es de 0,68°C, 18% de la media de los eventos. Es decir que la variabilidad del modelo en el clima presente es mayor que la del reanálisis y disminuye ligeramente para el clima futuro respecto a la del presente.

En líneas generales el modelo representa adecuadamente tanto el campo de presión asociados al anticiclón pos frontal, como las anomalías anticiclónicas relacionadas (Figura 4d y e). Sin embargo, el campo simulado parece estrecharse sobre el continente, haciendo que la incursión de aire frío alcance latitudes más bajas, como se refleja en la temperatura del clima

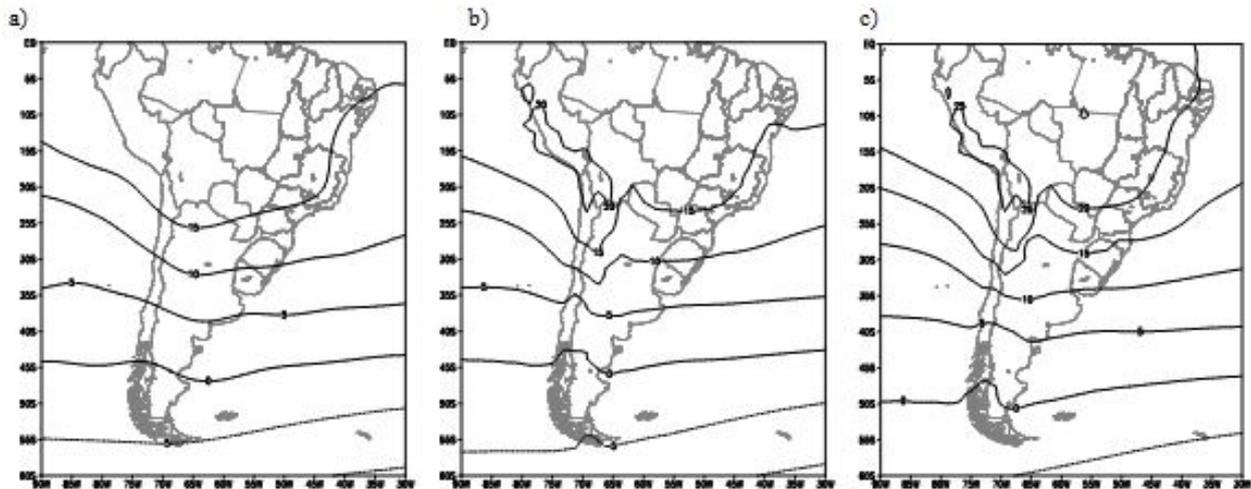


Figura 2: Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) (a) NCEP/NCAR (1961-1990); (b) clima presente (1961-1990); (c) clima futuro (2081-2100).

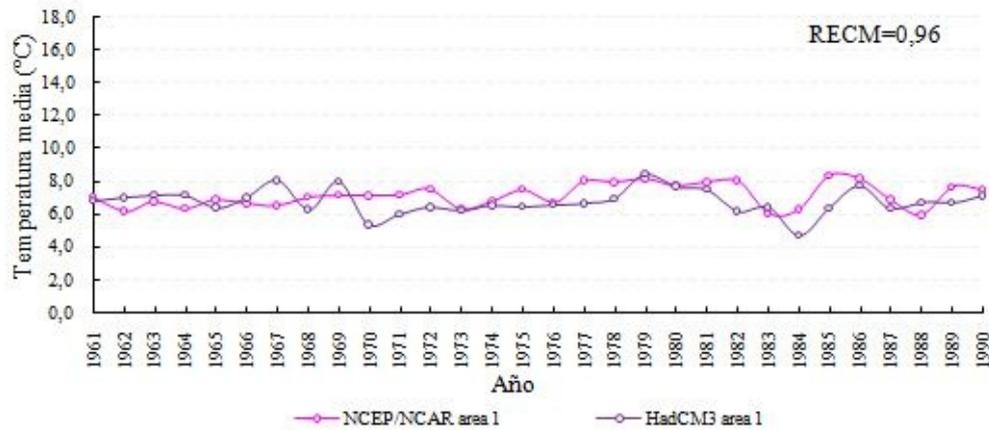
presente (Figura 4b). La anomalía ciclónica en el Atlántico frente a la costa de Sudamérica, aparece mucho menos intensa en las simulaciones del presente y localizada más al norte que en el reanálisis. En el clima futuro (Figura 4f) tanto las anomalías anticiclónica sobre el Pacífico próximo al continente como la ciclónica en el Atlántico, se intensifican en relación a las simulaciones del presente. El anticiclón pos frontal queda retenido más al sur del continente, coherente con el campo de temperatura observado para el clima futuro (Figura 4c). Este patrón -anomalía anticiclónica sobre el continente y ciclónica a sotavento-, es el típico asociado a eventos de heladas en la Pampa Húmeda (área 1). Müller et al. (2003) en una clasificación sinóptica asociada a la ocurrencia de heladas en la Pampa Húmeda a partir de componentes principales, obtuvieron que uno de los patrones de superficie que mayor varianza explica, está representado por el dipolo alta-baja antes mencionado.

Lo descrito en los campos de presión en superficie se ve reflejado en los campos de viento en 850hPa (Figura 4g-i). En la simulación del clima presente se observa un flujo más intenso con predominio de componente del sur (Figura 4h) que el del sudoeste mostrado por el reanálisis (Figura 4g). Esto es coherente con una incursión más profunda

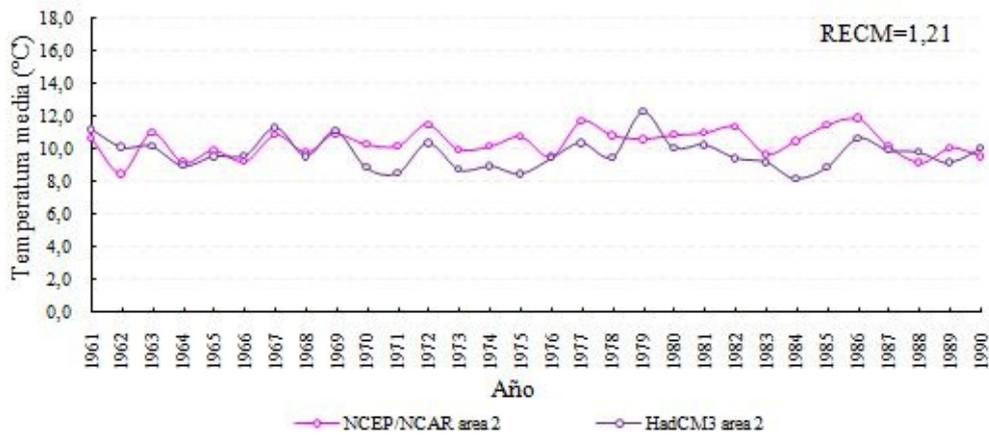
de la isoterma de 0°C observada en la Figura 4b y el alcance del anticiclón pos frontal (Figura 4e). En el clima futuro, el modelo proyecta un campo de viento más intenso que puede superar al del clima presente en más de 6 m.s^{-1} , pero con la misma dirección del sudoeste en la Pampa Húmeda (Figura 4i). Esto se debe principalmente a la intensificación de la anomalía ciclónica del Atlántico que el modelo proyecta y que provoca flujo del sur (Figura 4f), lo cual juega un rol importante en la ocurrencia de heladas en la región de la Pampa Húmeda (Müller and Berri, 2007, 2012). A pesar de una mayor intensidad del flujo del sur en el futuro respecto del presente (Figura 4i, 3h respectivamente), se nota una menor penetración de aire frío en la región de estudio (Figura 4c), lo cual se debe a la condición más cálida proyectada por el modelo para toda América del Sur (Figura 2c).

En niveles altos, el reanálisis muestra una cuña en el océano Pacífico, al oeste del continente seguida de una vaguada sobre el continente (Figura 4j), favoreciendo la entrada de aire frío hasta el centro de Argentina; situación coherente con el patrón principal de circulación observado por Escobar et al. (2004) en un análisis de las incursiones de aire frío que afectan Buenos Aires. El modelo en el clima presente profundiza

a)



b)



c)

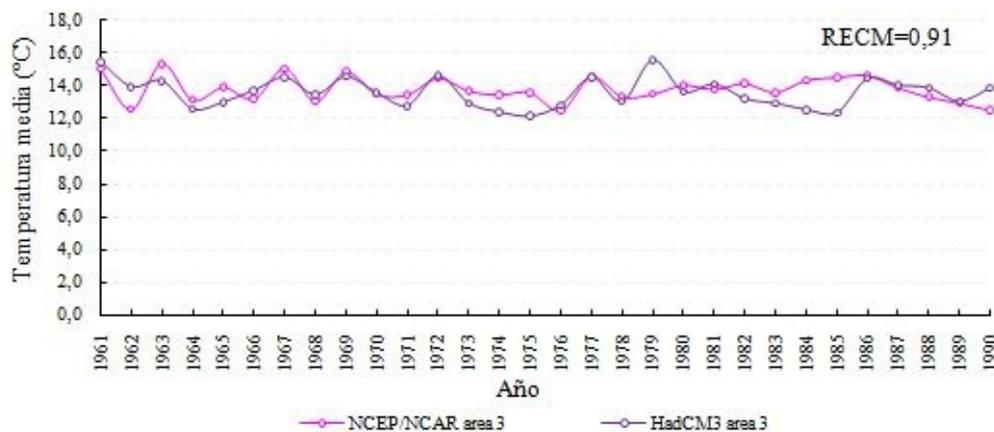


Figura 3: Comparación entre los promedios estacionales de la temperatura del reanálisis NCEP/NCAR y del modelo HadCM3 en el período 1961-1990 para área 1 (a), área 2 (b) y área 3(c)

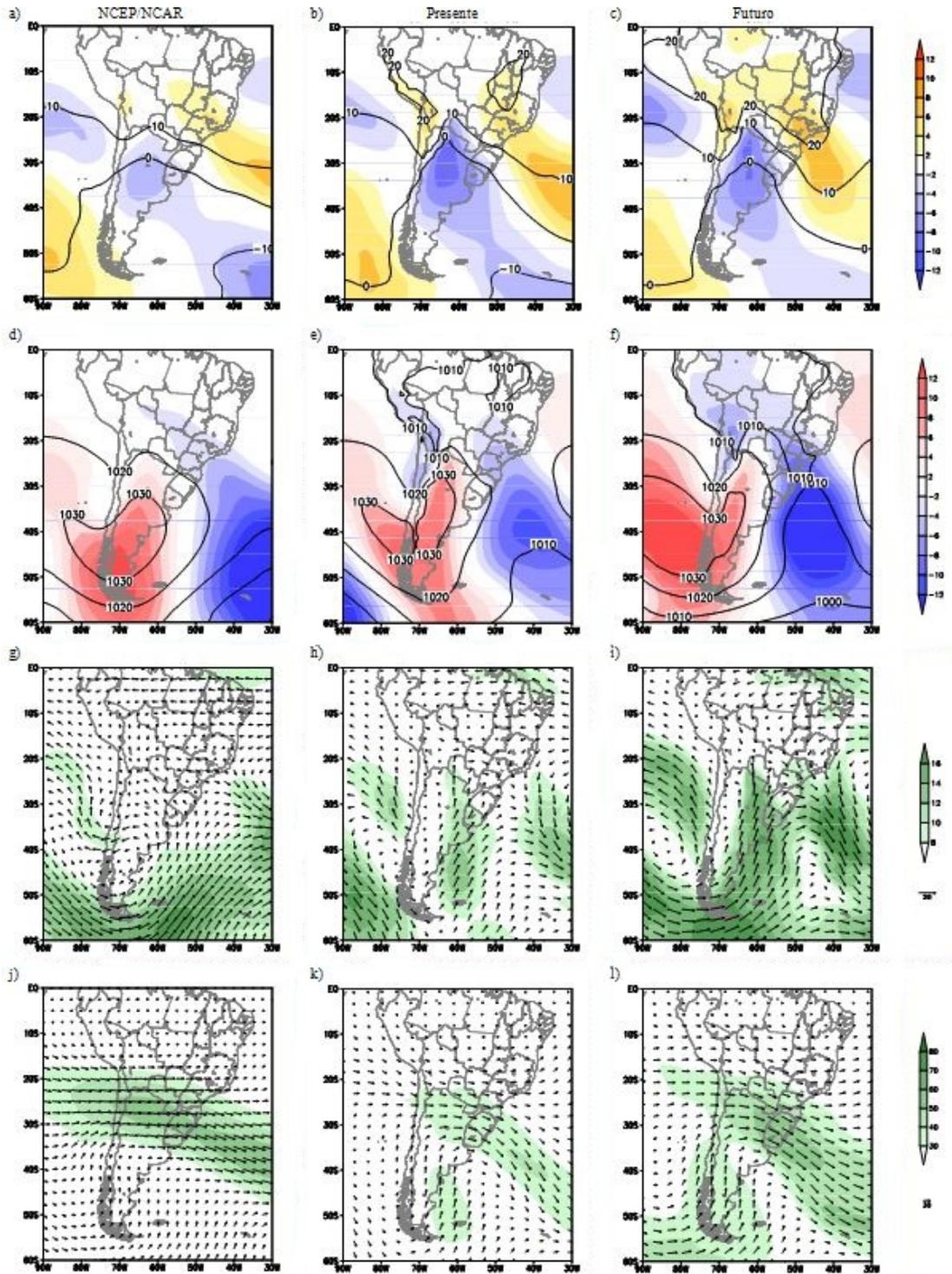


Figura 4: Compuestos de los eventos más extremos en el área 1 para (a, b c) Temperatura y anomalía (°C) (sombreado); (d, e, f) Presión al nivel del mar y anomalía (hPa) (sombreado); (g, h, i) Viento e intensidad en 850 hPa (sombreado) (m/s); (j, k, l) Viento e intensidad en 250 hPa (sombreado)(m/s); para el reanálisis del NCEP/NCAR (primer columna), el clima presente (segunda columna) y el clima futuro (tercer columna).

tanto la cuña como la vaguada en niveles altos (Figura 4k), mostrando el flujo meridional más intenso que en el reanálisis. Para el futuro (Figura 4l) se mantiene la configuración simulada en el clima presente, pero se observa los jets polar y subtropical acoplados con intensidades superiores a las simuladas en el clima presente. La localización de los jets, así como su intensidad, también juegan un rol importante en las heladas de la Pampa Húmeda según se discute en Müller et al. (2005) y Müller and Ambrizzi (2007).

3.2. Área 2

En la simulación del clima presente la isoterma de 0°C alcanza latitudes menores (Figura 5b) a la presentada por el reanálisis (Figura 5a), que abarca un área mayor extendiéndose al centro noroeste de Argentina. Siguiendo esa isoterma, el modelo también simula anomalías negativas de temperatura más intensas que el reanálisis. Para el futuro la incursión de la isoterma de 0°C se encuentra restringida al centro este del país en latitudes inferiores a 28°S (Figura 5c), es decir al sur de la simulación en el clima presente, producto del calentamiento proyectado por el modelo para esta región continental (Figura 2c). Como consecuencia las anomalías negativas de temperatura más intensas se extienden al norte en relación a la simulación del clima presente, dado que como la condición media es más cálida, al producirse la irrupción de aire frío la anomalía resultante es mayor. Respecto a la variabilidad de la temperatura de los cinco eventos más extremos (Tabla I), se ve que el reanálisis presenta un desvío standard de $0,76^{\circ}\text{C}$, lo que equivale al 23 % del valor medio de temperatura de los eventos más extremos. El modelo muestra un desvío standard de $0,67^{\circ}\text{C}$, 15 % de la media de los eventos seleccionados para el clima presente, y para el futuro el desvío standard es de $0,71^{\circ}\text{C}$, 44 % de la media. Es decir que la variabilidad del modelo en el clima presente es menor que la del reanálisis y aumenta ligeramente para el clima futuro respecto a la del presente.

El anticiclón pos frontal simulado en el presente (Figura 5e) se extiende latitudinalmente respecto

al observado en el reanálisis localizado en el centro de Argentina (Figura 5d). Las anomalías anticiclónicas son más intensas con un máximo que ocupa todo el centro del anticiclón, el cual se extiende hacia la parte oeste del área de estudio abarcando una extensa región continental. También la anomalía ciclónica del Atlántico se presenta más intensa que lo observado para el reanálisis.

En el clima futuro, el modelo simula la alta pos frontal ocupando parte del Pacífico sudoeste, estrechándose longitudinal sobre el continente (Figura 5f) y acompaña dicha configuración una intensa anomalía anticiclónica, más extendida que lo mostrado en el clima presente. Por su parte, la anomalía ciclónica del Atlántico aparece más intensa y expandida hacia el continente respecto a la simulada en el presente (Figura 5e). Esa condición, favorece el ingreso de aire frío proveniente del sur en toda la parte oriental del continente y principalmente en la región de estudio.

El campo de viento simulado por el modelo (Figura 5h) presenta una magnitud superior al del reanálisis (Figura 5g), superándolo en por lo menos 2m.s^{-1} sobre la región de estudio, con una dirección del sudoeste respecto a la del sur predominante en el reanálisis. La simulación futura mantiene la configuración del presente, pero proyecta una intensificación de viento del sur en particular en el área 2 (Figura 5i), en conformidad con las anomalías más intensas observadas en el campo de presión (Figura 5f). En lo que se refiere a intensidad del flujo del sur y penetración del aire frío existe una similitud con el área 1, sin embargo se aprecia una mayor extensión de las anomalías negativas de temperatura en el área 2, debido que al hallarse más al norte las temperaturas medias son superiores respecto al clima presente.

En el campo de altura del reanálisis se aprecia una vaguada con su eje sobre Uruguay (Figura 5j), también capturada por el modelo en el clima presente (Figura 5k), aunque de menor amplitud. El jet subtropical simulado por el

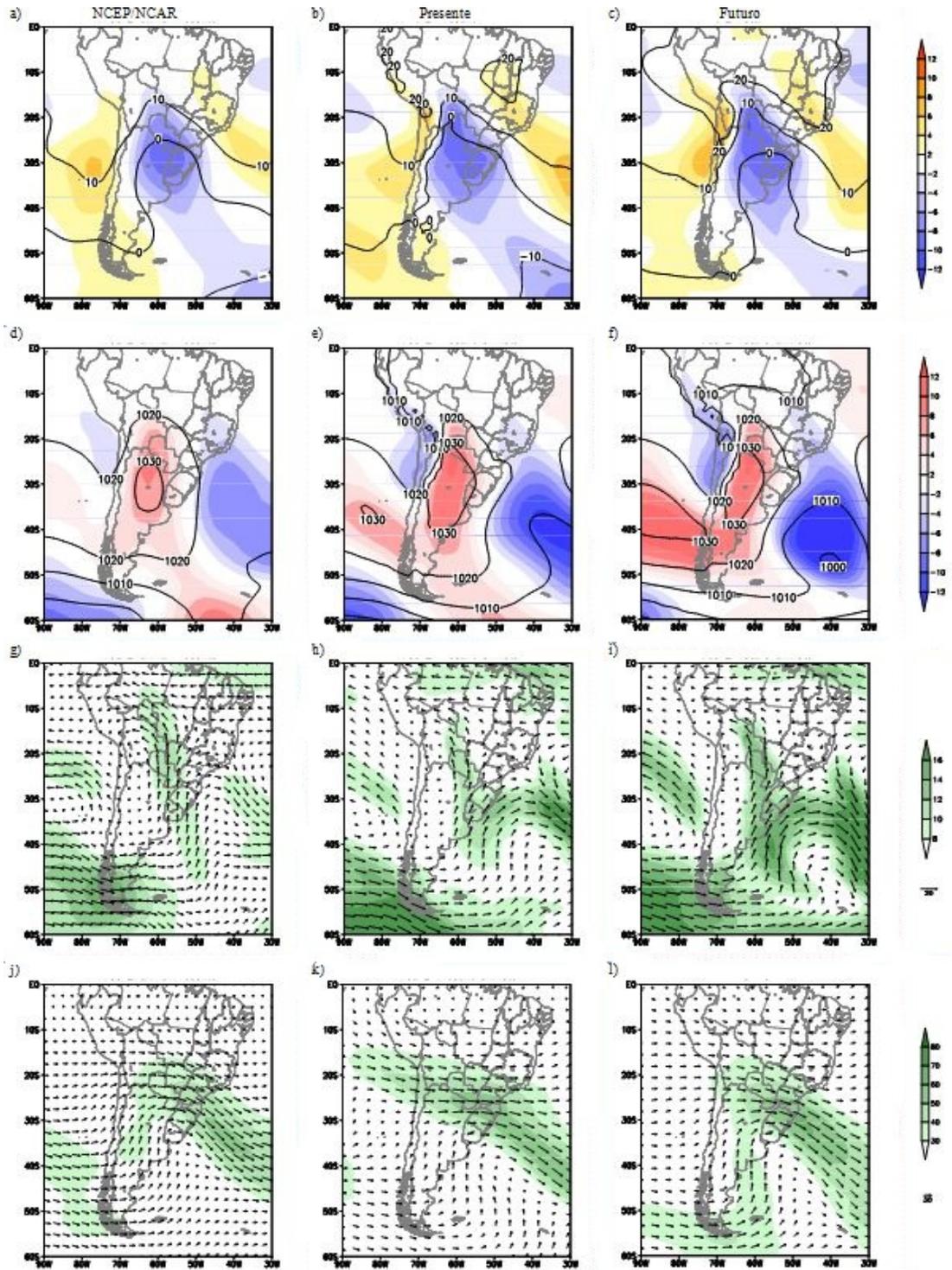


Figura 5: Compuestos de los eventos más extremos en el área 2 para (a, b c) Temperatura y anomalía ($^{\circ}\text{C}$) (sombreado); (d, e, f) Presión al nivel del mar y anomalía (hPa) (sombreado); (g, h, i) Viento e intensidad en 850 hPa (sombreado) (m/s); (j, k, l) Viento e intensidad en 250 hPa (sombreado)(m/s); para el reanálisis del NCEP/NCAR (primer columna), el clima presente (segunda columna) y el clima futuro (tercer columna).

modelo presenta un área de máximos un poco más extenso sobre el continente que el reanálisis, donde se ve una zona de máxima intensidad de viento al este del continente, característico de las irrupciones de aire frío, junto a otra región de máximos asociada al jet polar al sudoeste del continente (Figura 5j). El modelo proyecta el eje de la vaguada en niveles altos sobre Uruguay (Figura 5l), similar al presente, pero con mayor extensión latitudinal, además del acople entre el jet polar y subtropical, como lo muestra el reanálisis.

3.3. Área 3

En el clima presente el modelo simula la incursión de la isoterma de 0°C (Figura 6b) que alcanza latitudes inferiores a los 23°S aproximadamente, coincidente con el reanálisis (Figura 6a) pero con anomalías negativas de temperatura del orden de 2°C más intensas en la región de estudio. Por otra parte la Tabla I muestra un desvío estándar de $0,66^{\circ}\text{C}$, equivalente a 63 % de la media de los eventos extremos del reanálisis. El modelo por su parte en el clima presente muestra un desvío de $2,14^{\circ}\text{C}$, lo que significa 91 % de la media de los casos. Es decir que la variabilidad del modelo en el clima presente es muy superior a la del reanálisis, no teniendo clara la razón física de dicha diferencia, dado que aún no lo hemos investigado en detalle.

El modelo es capaz de simular la disposición del campo de presión (Figura 6d), aunque en este caso la anomalía asociada al anticiclón pos frontal se extiende e intensifica en la región de análisis, así como también la anomalía ciclónica del Atlántico aparece más intensa. Esto provoca el flujo netamente meridional observado en 850 hPa, tanto en el reanálisis (Figura 6e) como en el modelo (Figura 6f), afectando Uruguay, sur de Brasil y Paraguay. Una configuración semejante fue el patrón principal descrito por Escobar et al. (2007) en un estudio hecho acerca de las irrupciones de aire frío que alcanzan la región sudeste de Brasil. En 250 hPa se puede ver la vaguada cuyo eje se posiciona al este del continente, con una inclinación menor para el

caso del modelo (Figura 6h), simulando un acople entre el jet subtropical y polar, característica no tan bien definida en el reanálisis (Figura 6g).

Una de las principales características de esta área es que para el futuro no existen eventos que cumplen con el criterio de selección de los eventos extremos fríos. Este resultado es coincidente con los obtenidos por Cavalcanti et al. (2013) en el análisis con el modelo GFDL para idéntica área y período. Si bien es de esperar que eventos fríos ocurran en el futuro en éstas latitudes, tal como lo mostrara Andrade et al. (2012), quienes encontraron un aumento en la frecuencia de los sistemas frontales sobre el sudeste de América del Sur en las proyecciones de fines de siglo del escenario A2, según las simulaciones de los modelos globales GFDL y HadCM3.

4. CONCLUSIONES

Con la finalidad de evaluar la circulación atmosférica en América del Sur asociada a los eventos extremos fríos en el periodo 1961-1990 y en el escenario futuro más crítico A2, se analizaron las composiciones de los cinco eventos más extremos de temperaturas por debajo de 0°C , a partir del reanálisis del NCEP/NCAR y del modelo HadCM3. Para el clima presente, el modelo logró capturar las características generales de los campos de circulación asociados a estos eventos extremos mostrados por el reanálisis en las respectivas áreas. La incursión de aire frío en las áreas 2 y 3 alcanzó latitudes más bajas en el continente respecto del reanálisis. Esto se ha reflejado en la isoterma de 0°C y las anomalías negativas de temperatura sobre la región continental, producto de la mayor penetración continental del anticiclón pos frontal. El aire frío del sur que es predominante en dichas áreas, apareció más intenso en las simulaciones que en los respectivos reanálisis. Esta configuración del campo de viento se extendió en altura, acompañando la vaguada en niveles altos característica de los sistemas frontales asociado a los eventos extremos fríos en estas latitudes, cuyo eje se localizó aproximadamente en la región de estudio,

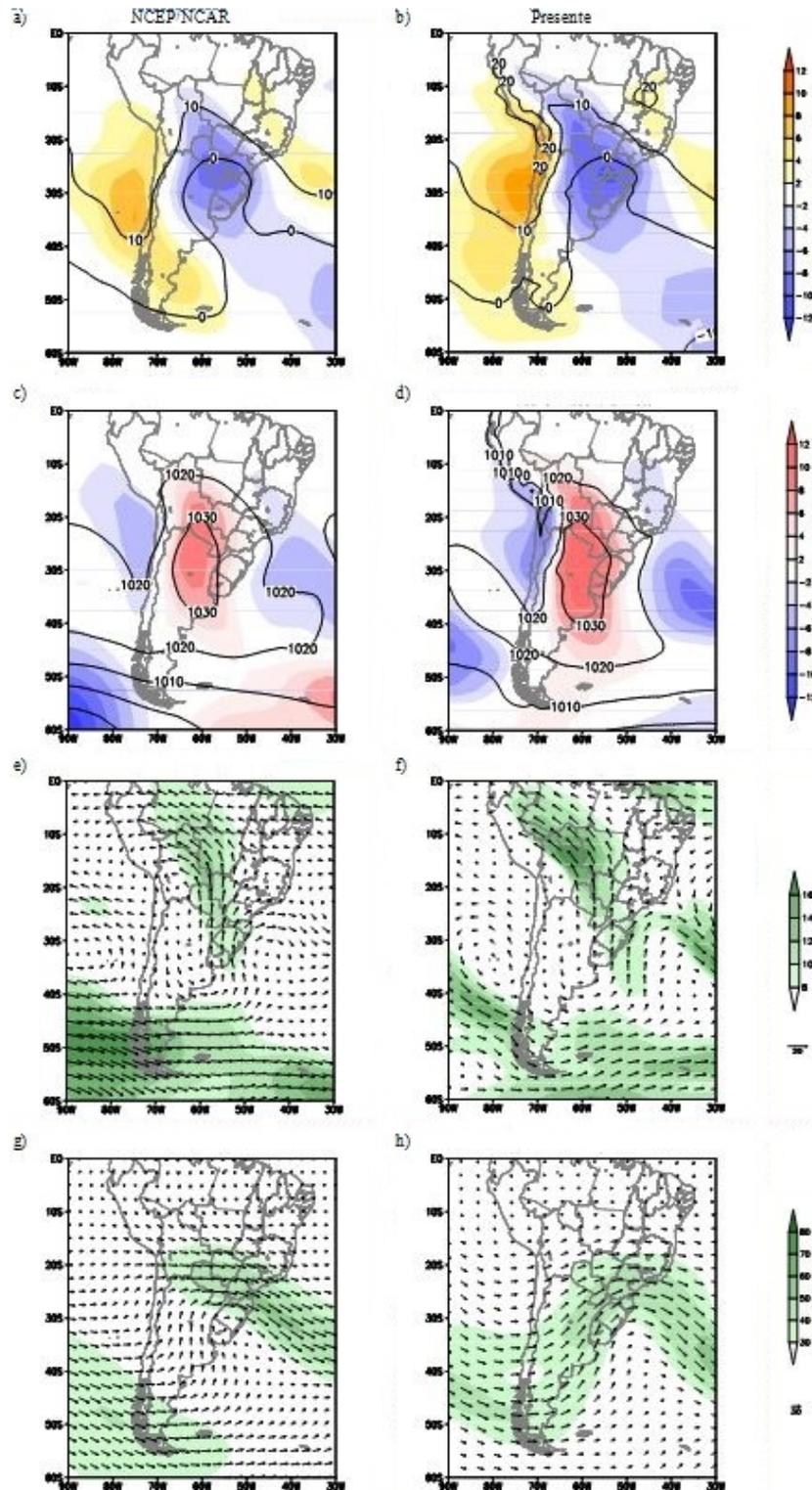


Figura 6: Compuestos de los eventos más extremos en el área 3 para (a, b c) Temperatura y anomalía ($^{\circ}\text{C}$) (sombreado); (d, e, f) Presión al nivel del mar y anomalía (hPa) (sombreado); (g, h, i) Viento e intensidad en 850 hPa (sombreado) (m/s); (j, k, l) Viento e intensidad en 250 hPa (sombreado)(m/s); para el reanálisis del NCEP/NCAR (primer columna) y el clima presente (segunda columna).

conjuntamente con el jet subtropical que también fue capturado por la simulación.

El área 3 mostró una gran similitud en los campos estudiados de las composiciones del reanálisis y del modelo en el clima presente, con anomalías ligeramente más intensas en éste último. Esta región al estar localizada más al norte y bajo las condiciones de calentamiento proyectadas para el clima futuro, no presentó eventos extremos fríos. En las otras dos áreas analizadas, el escenario futuro restringió la incursión de la isoterma de 0°C hacia latitudes más al sur, incluso que la observada en el reanálisis de dichas áreas, debido al calentamiento proyectado por el modelo para el futuro en todo el cono sur de Sudamérica, y con valores de anomalías del mismo orden que las simuladas en el clima presente. Un mayor gradiente de presión se hizo evidente entre la anomalía anticiclónica del Pacífico y la ciclónica del Atlántico intensificando el flujo del sur respecto al observado en el clima presente. Esta configuración se proyectó en altura, en donde se observó una profundización de la vaguada y el acople del jet polar y subtropical. Se concluyó que a pesar de la intensificación de los campos de viento en el futuro, la penetración del aire frío podría ser menor en latitud debido a la condición más cálida proyectada para fines del siglo actual por el modelo en el escenario crítico A2.

Si bien este trabajo abordó aspectos no contemplados en la literatura a partir del modelo HadCM3, futuras investigaciones considerando las simulaciones del proyecto CMIP5, y en particular las nuevas versiones del modelo Hadley, permitirán contrastar estos resultados.

Agradecimientos: Los autores agradecen las sugerencias y revisiones del revisor anónimo y del Dr. Alexandre Pezza, que contribuyeron a la mejora del artículo. Este trabajo contó con el apoyo financiero del proyecto PICT-PRH 0023.

REFERENCIAS

Alexander L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J.

- Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, P. Ambenje, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, and J.L. Vazquez-Aguirre. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109. doi:10.1029/2005JD006290
- Ambrizzi, T.. 2006. Modelos climáticos globales. In: V.Barros; R. Clarke; P.Silva Dias. (Org.). *El Cambio climático en la cuenca del Plata*. Buenos Aires: CIMA/CONICET, v. , p. 149-158.
- Andrade, K.M., G.V. Müller, I. Cavalcanti, M.E. Fernandez-Long, M. Bidegain, e G.J. Berri. 2012. Avaliação de mudanças na frequência de sistemas frontais sobre o Sul da America do sul em projeções do clima futuro. *Meteorológica*, 37, 1, 15-26. <http://www.cenamet.org.ar/archivos/Vol137-Nro1-2012.pdf>
- Bettolli M.L., O.C. Penalba and P.A. Krieger. 2013. How do GCMs represent daily maximum and minimum temperatures in La Plata Basin? AGU Meeting of the Americas, 14-17 May 2013, Cancún, México. Resumen.
- Camilloni, I.; I.F.A. Cavalcanti; T. Ambrizzi. 2006. Escenarios Climaticos:151-167. In: *Cambio climático en la cuenca del Plata*. Ed. V.Barros; R.Clark; P.L. Silva Dias.
- Cavalcanti I.F.A., I. Camilloni, y T. Ambrizzi. 2006. Escenarios climáticos regionais: 168-184. In: *Cambio climático en la cuenca del Plata*. Ed. V. Barros; R. Clark; P.L. Silva Dias.
- Cavalcanti I.F.A., G.V. Müller, K. Andrade, and M.E.F. Long. 2013. Cold air intrusions over southeastern South America - GFDL model behavior regarding climate simulations in the 20th century and future projections. *Global and Planetary Change*, 111, 31-42. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.08.006
- Chou, S.C.; J.A. Marengo; A.A. Lyra; G. Sueiro; J.F. Pesquero; L.M. Alves; G. Kay; R. Betts; D. Chagas; J. Gomes; J.F. Bustamante; P. Tavares. 2011. Downscaling of South America present climate driven by 4-member

- HadCM3 runs. *Climate Dynamics*. DOI: 10.1007/s00382-011-1002-8
- Escobar, G.C.J., R.H. Compagnucci, and S.A. Bischoff. 2004. Sequence Patterns of 1000 hPa and 500 hPa geopotential height fields associated with cold surges in Buenos Aires. *Atmósfera*, 12, 2, 69-89.
- Escobar, G.C.J.. 2007. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22, 241-254.
- Fernández-Long, M.E. and G.V. Müller. 2006. Annual and Monthly Trends In Frost Days In The Wet Pampa. 8th International Conference On Southern Hemisphere Meteorology And Oceanography. 249-253.
- Fernández-Long M.E., G.V. Müller, A. Beltrán-Przekurat, and O. Scarpati. 2013. Long- and short- term changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology*, 33, 7, 1673–1686.
- Gordon C., C. Cooper, C.A. Senior, H. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell, and R.A. Wood. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, 147-168.
- Gulizia, C. and I. Camilloni. 2014. Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America *International Journal of Climatology*; Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.4005
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC 2007.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Sasha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowlak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jeene, and D. Joseph.. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 77, 437-471.
- Marengo, J. A. and C. Camargo. 2008. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002 *International Journal of Climatology* 28, 893–904.
- Marengo, J. A., C. A. Nobre, and L. F Salazar. 2010. Regional Climate Change Scenarios in South America in the Late XXI Century: Projections and Expected Impacts. *Nova Acta Leopoldina NF 112, Nr. 384*
- Marengo, J.A., M. Rusticucci, O. Penalba, and M. Renom. 2010. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98, 509-529.
- Müller, G.V., R. Compagnucci, M.N. Nuñez, and A. Salles. 2003. Spatial analysis of surface circulation 302 associated to frosts in the wet Pampas. *International Journal of Climatology, United Kingdom*, 23, 943-961.
- Müller, G.V., T. Ambrizzi, and M.N. Nuñez. 2005. Mean Atmospheric Circulation leading to Generalized Frosts in Central Southern South America. *Theoretical and Applied Climatology, Austria*, 82, 95-112.
- Müller, G.V. and G.J. Berri. 2007. Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central- Southern South America. *Monthly Weather Review*, 135, 4, 1268–1289.
- Müller, G.V. and T. Ambrizzi. 2007. Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to Generalized Frosts over Southern South America. *Climate Dynamics*, 29, 633-645. DOI 10.1007/s00382-007-0253-x.
- Müller, G.V. and G.J. Berri. 2012. Atmospheric Circulation Associated with Extreme Generalized Frosts Persistence in Central-Southern South America. *Climate Dynamics*, 38 (5-6), 837-857. DOI: 10.1007/s00382-011-1113-2.
- Rusticucci M. and M. Barrucand. 2004. Observed trends and changes in temperature extremes in Argentina. *Journal of Climate* 17, 4099–4107.
- Rusticucci, M. and M. Renom. 2008. Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal of Climatology*, 28,

1083-1095.

- Rusticucci, M., J.A. Marengo, O. Penalba, M. Renom. 2010. An intercomparison of model-simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. *Climatic Change*, 98, 493–508. DOI 10.1007/s10584-009-9742-8.
- Skansi, M.L.; M. Brunet, J. Sigró, E. Aguilar, J.A.A. Groening, O.J. Bentancur, C.Y.R. Geier, R.L.C. Amaya, H. Jácome, A.M. Ramos, C.O. Rojas, A.M. Pastén, S.S. Mitro, C.V. Jiménez, R. Martínez, L.V. Alexander, and P.D. Jones. 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307.
- Tebaldi, C., K. Hayhoe, J.M. Arblaster, and G.A. Meehl. 2006. Going to the extremes: An intercomparison of model simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change*, 79, 185–211. DOI: 10.1007/s10584-006-9051-4.
- Vincent L.A., T.C. Peterson, V.R. Barros, M.B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L.M. Alves, T. Ambrizzi, M.A. Berlatto, A.M. Grimm, J.A. Marengo, L.C.B. Molion, D.F. Moncunill, I.E. Rebello, Y.M.T. Anunciação, J. Quintana, J.L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M.R. Haylock, and D. Karoly. 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *Journal of Climate*, 18, 5011–5023.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.