



PATRONES ATMOSFÉRICOS SIMULADOS EN EL CLIMA PRESENTE Y FUTURO ASOCIADOS AL DESCENSO DE TEMPERATURA EN EL SUDESTE DE SUDAMERICA

Cintia Rabelo da.Rocha Repinaldo¹
Gabriela Viviana Müller²
Kelen Martins Andrade³

(Manuscrito recibido el 25 de abril de 2017, en versión final 06 de 10 de 2017)

Para citar este documento

Rabelo da Rocha Repinaldo, C., Müller, G. V., Martins Andrade, K.. (2017). Patrones atmosféricos simulados en el clima presente y futuro asociados al descenso de temperatura en el sudeste de Sudamérica. *Boletín geográfico*, 39, 13-34.

Resumen

Las características atmosféricas asociadas a eventos extremos fríos, identificados a partir del descenso de la temperatura en el invierno en tres regiones en el sudeste de Sudamérica, son analizadas con datos de reanálisis NCEP/NCAR y simulaciones de los modelos HadCM3 y GFDL-CM2.0 en la versión acoplada océano-atmósfera, para el clima presente y el escenario futuro más crítico A2 del CMIP3. Para las simulaciones del clima presente, el modelo que mejor representó las características observadas en el conjunto del reanálisis fue el GFDL-CM2.0, presentándose más coherente con relación a las posiciones de las altas pos frontales y de las isotermas de 0°C y 10°C. Para el futuro, el modelo GFDL-CM2.0 proyecta un debilitamiento de las anomalías negativas de temperatura y los eventos extremos de caída de temperatura con menos avance en dirección al Ecuador, mientras que, según el modelo HadCM3, la simulación para el futuro

¹ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-CONICET), Buenos Aires, Argentina. E-mail: repinaldo@cima.fcen.uba.ar

² Centro de Investigaciones Científicas y de Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP-CONICET), Diamante, Argentina. E-mail: gabrielamuller@cicytpp.org.ar

³ Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Brasil. E-mail: kelen.martins.andrade@gmail.com

también apunta hacia una menor proyección con dirección al Ecuador pero, en general, a eventos más intensos.

Palabras clave: Eventos Extremos Fríos, Modelo GFDL-CM2.0, Modelo HadCM3, Escenarios Futuros.

ATMOSPHERIC CIRCULATION SIMULATIONS IN THE PRESENT AND FUTURE CLIMATE ASSOCIATED WITH TEMPERATURE DROP IN SOUTHEASTERN SOUTH AMERICA

Abstract

The atmospheric features associated with extreme cold events, identified by the temperature drop in the winter, in three regions of southeastern South America are analyzed with reanalysis data from NCEP / NCAR as well as simulations of the coupled ocean-atmosphere HadCM3 and GFDL-CM2.0 models for the present and CMIP3 A2 future scenario. In the present climate, GFDL-CM2.0 represents better the reanalysis fields, being more coherent with the post-frontal high pressure and the 0°C and better the reanalysis fields, being more coherent with the post-frontal high pressure and the 0°C and 10°C isotherms. For the future climate, GFDL-CM2.0 projects weakening of temperature anomalies and lower advance of the extreme events of temperature drop in direction to the Equator, while the HadCM3 projection also indicates lower latitudinal range, but in general, higher intensity of these events.

Keywords: Extreme cold events, GFDL-CM2.0 model, HadCM3 model, Future scenarios, climatic change

Introducción

El impacto del cambio climático en Sudamérica ha sido observado en los resultados de los modelos, tanto en el promedio mensual como en el estacional, lo que indica un aumento futuro de la temperatura media a lo largo de Sudamérica (Marengo et al., 2011; Barros et al., 2006), considerando la evolución mundial de la economía según las proyecciones del IPCC (2007). Si se mantienen las tendencias de crecimiento de las emisiones, los modelos climáticos indican que podría haber un aumento de más del 6° C de temperatura en algunas regiones del mundo a finales del siglo XXI (IPCC, 2013).

Varios autores encontraron tendencias en condiciones extremas de temperatura en el siglo pasado, entre ellos Vincent et al. (2005) que, utilizando datos de temperatura entre 1960 y 2000, observaron en varias estaciones de Sudamérica, una tendencia significativa al aumento (disminución) del porcentaje de noches cálidas (frías), resultados constatados también a nivel global por Alexander et al., (2006),

que utilizaron datos de temperatura entre 1901 y 2003. Rusticucci y Renom (2008) analizaron la variabilidad en las tendencias de los índices extremos de temperatura diaria en Uruguay, utilizaron datos de varias estaciones en el país con registros entre 1930 y 2005, encontrando una tendencia significativa en la disminución de noches frías, además de la tendencia al aumento en el número de noches cálidas durante el período entre 1960 y 2002.

Skansi et al. (2013) analizaron extremos climáticos en Sudamérica utilizando datos observados y encontraron, por todo el continente, evidencias al aumento en los índices extremos conectados con la temperatura a partir de mediados del siglo XX, principalmente en lo que corresponde a índices nocturnos de temperatura mínima. Utilizando datos de temperatura de 27 estaciones en el sur de Brasil, con registros entre 1960 y 2002, Marengo y Camargo (2008) mostraron en la mayoría de esas estaciones tendencias a grandes aumentos en las temperaturas nocturnas, y aumentos menores en las temperaturas diurnas, tendencias estas que son más fuertes en el invierno, comparadas con el verano.

En los últimos años, hubo un gran avance en el uso de modelos para simular las condiciones climáticas presentes y futuras. Analizando las performances de ocho modelos del WRCM CMIP3 además de medias del ensemble y comparando esos resultados a observaciones, Rusticucci, Marengo, Penalba y Renom (2009) obtuvieron buena representación de las noches cálidas, así como de su variabilidad interanual, lo que está de acuerdo con los datos observados entre 1961 y 2000 en Sudamérica. Por otro lado, no obtuvieron tan buena representación de los días con helada, que fue otro índice estudiado. Buscando evaluar el rendimiento del modelo GFDL, Knutson et al. (2006) compararon simulaciones del modelo en el período 1861-2000 con datos observados de temperatura en todo el globo. Las tendencias de aumento observadas fueron mejor simuladas con el forzante antropogénico y con todos los forzantes que sólo con el forzante natural o “no externo”. Además, las simulaciones con forzantes externos presentaron tendencia a mucho calentamiento tanto en latitudes tropicales como en latitudes extra tropicales en el Hemisferio Sur para el siglo XX.

Cavalcanti et al. (2013) investigaron la habilidad del modelo GFDL-CM2.0 en simular la frecuencia de las incursiones de aire frío invernales en el sur de Sudamérica para el clima presente (1961-1990) y las proyecciones futuras (2081-2100), concluyendo que el modelo sobrestima esas incursiones en el clima presente e indica una futura reducción en la cantidad de casos, que puede ser todavía más grande debido a la tendencia del modelo en sobrestimar el número de casos en el presente. Por otro lado, Andrade et al., (2012) compararon la frecuencia de sistemas frontales en el sur de Sudamérica identificados a partir del reanálisis de NCEP/NCAR, con las simulaciones de los modelos HadCM3 y GFDL, mostrando que ambos los modelos sobrestiman la frecuencia de sistemas frontales en el clima presente (1961-1990) y simulan un aumento en la frecuencia de sistemas frontales para fines del siglo.

A partir de la identificación de la ocurrencia de extremos de temperatura en el sudeste de Sudamérica, en este trabajo se propone analizar las características atmosféricas de los mismos en simulaciones climáticas en el período de referencia 1961-1990 y las proyecciones para el clima futuro 2081-2100. Para tal fin, se utilizan los campos atmosféricos asociados a los compuestos de dichos eventos para los modelos GFDL y HadCM3 en los períodos presente y futuro. Las simulaciones del presente son validadas en función del reanálisis NCEP/NCAR en el período de referencia, para una posterior comparación de los resultados con el escenario futuro más crítico, que es el A2 en cada uno de los modelos climáticos considerados.

Datos y metodología

Se utilizaron las salidas del set de datos del CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project phase3) del modelo HadCM3-tercera versión del Hadley Centre Coupled Model (Gordon et al., 2000) y del modelo GFDL-CM2.0, desarrollado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, en la versión acoplada océano-atmósfera (Delworth et al., 2006). Las salidas diarias usadas cubren los meses de mayo a septiembre en el período de referencia 1961-1990 y para el escenario futuro A2 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) en el período 2081-2100. Se comparan los resultados del clima en el período de referencia simulado por cada uno de los dos modelos con los datos diarios del reanálisis del NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research, Kalnay et al., 1996) en el mismo período. El resultado de cada modelo en el clima de referencia es, a su vez, comparado a los resultados del escenario futuro respectivo. El reanálisis NCEP/NCAR es considerado representativo de las observaciones en cada una de las tres áreas de estudio (Figura 1), tomado como base los análisis de Cavalcanti et al. (2013).

Las tres áreas de estudio se definen como Área1: este de Paraguay, extremo noreste de Argentina, y los estados de Brasil que comprenden el extremo noreste del Rio Grande do Sul y centro este de Santa Catarina y Paraná (23°S-28°S, 52°W-57°W); Área2: norte de Uruguay y centro este y sur del Rio Grande do Sul en Brasil (28°S-33°S, 52°W-57°W); Área3: región de la Pampa Húmeda, Argentina (33°S-38°S, 65°W-60°W). El criterio de elección de los eventos considera el descenso de la temperatura media de un día con relación al siguiente para el nivel de 850 hPa, en los períodos presente y futuro antes definidos. A partir de aquí se seleccionan los cinco eventos de mayor descenso de temperatura, para así incluir solamente los eventos más extremos en los compuestos de los campos atmosféricos en superficie, niveles bajos y altos, con la finalidad de estudiar las características atmosféricas asociadas a las entradas de aire frío. Ese criterio tiene la ventaja de poder identificar el ingreso de aire frío en regiones con características térmicas muy distintas, pero que se ven afectadas por el pasaje de frentes fríos y que producen mayor caída de la temperatura en las latitudes subtropicales que en las tropicales. Además, el descenso

de temperatura va identificar el pasaje de un frente frío también en el clima futuro, donde se espera un clima más cálido en el sudeste de Sudamérica.

Las anomalías de temperatura y presión a nivel del mar (PNM) analizadas se calculan respecto a la media zonal para cada una de las tres áreas.

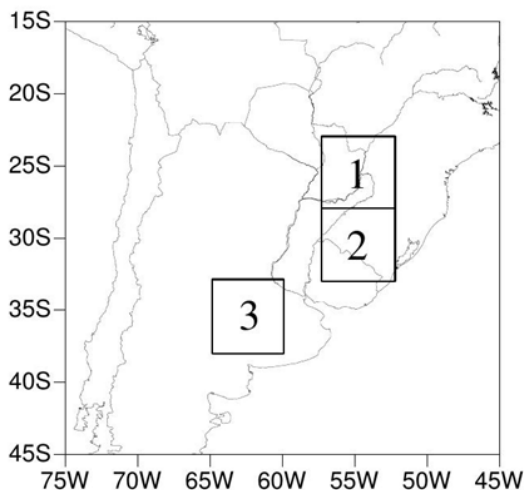


Figura 1. Áreas de referencia. Área 1: Paraguay, norte de Argentina y sur de Brasil (23°S-28°S, 52°W-57°W); Área 2: Uruguay y sur extremo de Brasil (28°S-33°S, 52°W-57°W); Área 3: Pampa Húmeda (33°S-38°S, 60°W-65°W).

Con la intención de evaluar estadísticamente el aumento/descenso de temperatura en el clima presente, fue calculado el bias de los cinco eventos más extremos de descenso de temperatura para los modelos con relación al reanálisis, así como también las diferencias entre el presente y el futuro de los modelos, denominado Cambio de Temperatura (Tabla 1). Para esos cálculos, fueron promediados los cinco eventos más extremos para cada área entre mayo y septiembre de los períodos de estudio. Se cuantifica la variabilidad de la composición de los cinco eventos más extremos para cada área a través de la Desviación Estándar de los cinco eventos (DE5) tanto para el reanálisis como para los modelos en el clima presente y futuro (Tabla 1). Por otra parte, la significancia estadística en los intervalos de confianza de 90%, 95% y 99% se calculan para las anomalías de temperatura y presión, conforme dispuesto en las Figuras 2-6.

Resultados

Evaluación de los modelos

Con la finalidad de analizar si los modelos son confiables en relación al reanálisis, que aquí se considera como lo más próximo de la realidad, fueron calculadas las medias mensuales de temperatura de mayo a septiembre del reanálisis

y de los modelos para el presente y futuro en cada una de las tres áreas estudiadas, conforme dispuesto en la Figura 2 (a, b, c). Se observa que para el Área 1 (Figura 2a) el modelo GFDL-CM2.0 es más frío que el reanálisis en los meses de mayo y junio, elevando sus temperaturas para los meses subsecuentes, llegando a ser casi 3°C más cálido que el reanálisis en el mes de agosto; mientras que el modelo HadCM3, presenta un comportamiento muy similar y con temperaturas un poco más bajas que el reanálisis durante todo el período invernal. Para el futuro, ambos modelos sugieren aumento de temperatura, pero el GFDL-CM2.0 proyecta temperaturas bastante más altas que el HadCM3 para fines del siglo XXI. Ese cambio en el comportamiento del ciclo invernal de temperatura puede indicar una posible mudanza en el régimen de las estaciones del año, como sugerido por López de la Franca, Sánchez y Domínguez (2013).

Para el Área 2 (Figura 2b) los modelos presentan temperaturas más bajas que el reanálisis en el presente. El HadCM3 considerando el ciclo invernal medio como un todo es más próximo al reanálisis mostrando una diferencia a partir del mes de julio cuando se torna más frío; en cambio el GFDL-CM2.0 se aproxima al reanálisis a partir de ese mismo mes. Para el futuro, ambos modelos muestran temperaturas más elevadas que en el presente, pero el GFDL-CM2.0 muestra descenso de mayo a junio, aumentando en restante el del ciclo invernal de temperatura y el HadCM3 descendiende de mayo a julio, aumentando a partir de este mes.

En el Área 3 (Figura 2c) el modelo GFDL-CM2.0 se muestra bastante más frío que el reanálisis en el mes de mayo (alrededor de 4°C), disminuyendo su diferencia durante el restante del año; en el HadCM3 se observa que a pesar de presentar temperaturas más frías que el reanálisis, se mantiene bastante próximo a él. En el escenario futuro ambos modelos presentan aumento de temperatura en relación al presente, sin embargo las proyecciones del modelo GFDL-CM2.0 son más frías que el reanálisis durante la mayor parte del ciclo invernal de temperatura.

Cuando se componen los cinco eventos más extremos de temperatura para cada área (Tabla I), el modelo GFDL-CM2.0 presenta un bias positivo y elevado (4,74°C) para el Área 1, mientras que el HadCM3 presenta un bias de apenas 0,66°C. Para el Área 2, GFDL-CM2.0 presenta bias de 4,88°C cuando el HadCM3 no muestra bias. El bias del Área 3 es bastante próximo en ambos modelos, siendo de 2,18 °C para el modelo GFDL-CM2.0 y de 1,94°C para el HadCM3. De una manera general, se observa que el modelo que más se aproxima del reanálisis en sus condiciones medias es el HadCM3, por tener menos bias en todas las regiones, llegando al mismo valor medio en el Área 2.

Como se puede observar en los valores del DS5 del reanálisis y de los modelos, presentan bastante variabilidad. El reanálisis y el modelo GFDL-CM2.0 tanto en el presente como en el futuro, además del HadCM3 futuro, muestran un patrón de disminución en la variabilidad conforme aumenta la latitud, patrón este que no se observa para el HadCM3 en el presente.

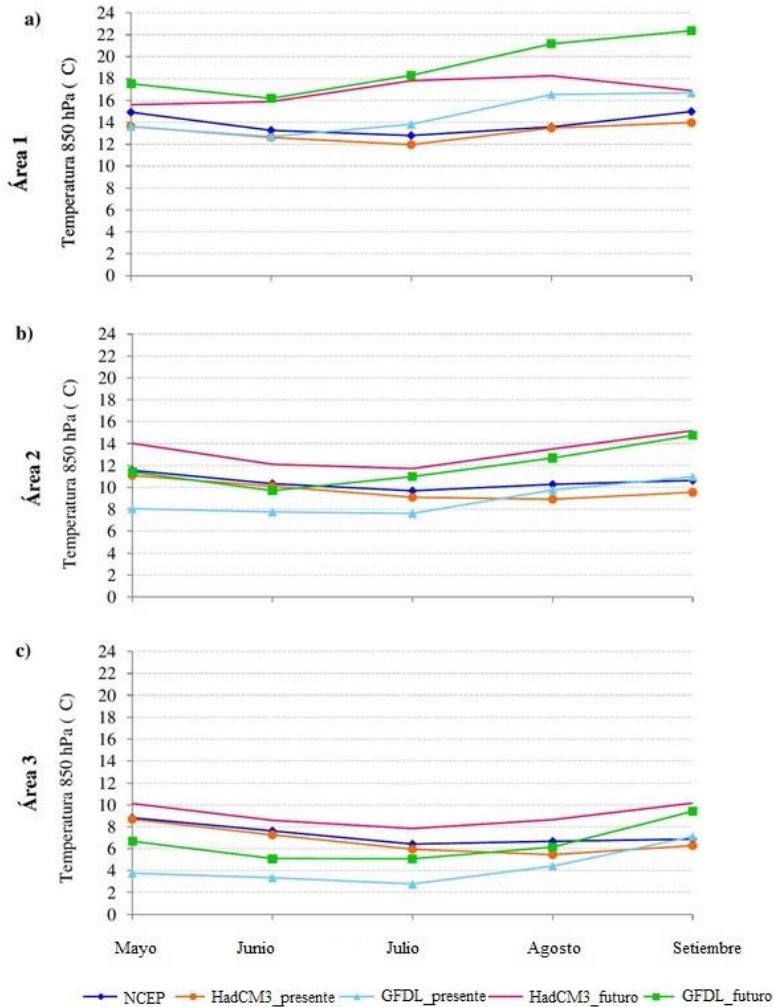


Figura 2: Evolución mensual de la temperatura media del reanálisis y los modelos en el presente y en el futuro.

También en la Tabla 1 está presentado el cambio en los descensos de temperatura en el futuro (cambio de temperatura). Con excepción del Área 2 del GFDL-CM2.0, se proyecta aumento en el descenso de temperatura para los dos modelos en todas las áreas, lo que es esperable en una atmósfera futura más cálida.

Las diferencias de comportamiento de un determinado modelo de acuerdo al área pueden ser explicadas por la dificultad que algunos modelos tienen en representar los procesos físicos específicos locales, lo que causa diferencias en su performance de acuerdo al área en que es aplicado (Ambrizzi & Araujo, 2014).

Modelo	Área	Bias	DP5	DP5	DP5	Cambio de Temperatura
			Reanálisis	Presente	Futuro	(futuro-presente)
GFDL	1	4.74	1.14	1.38	2.58	0.22
	2	4.88	0.93	1.12	2.01	-0.68
	3	2.18	0.50	0.30	1.52	1.34
HadCM3	1	0.66		0.79	1.67	1.52
	2	0		1.68	1.41	0.72
	3	1.94		1.00	0.55	0.6

Tabla 1: Evaluación de los modelos HadCM3 y GFDL-CM2.0 con relación al reanálisis NCEP/NCAR para las tres áreas de estudio: Bias del decrecimiento de temperatura de los cinco eventos más extremos para ambos los modelos, Desviación Estándar de los cinco eventos más extremos para Reanálisis, clima presente y futuro (DP5), Cambio de temperatura con respecto al presente.

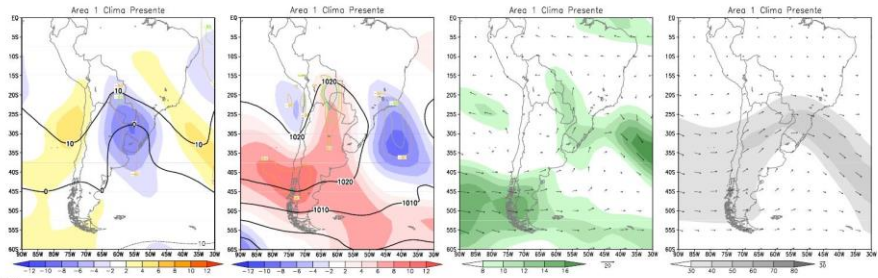
Para cada una de las tres áreas de estudio, se componen las variables atmosféricas para los cinco eventos extremos seleccionados a partir de los modelos en el clima presente comparando dichos campos con los respectivos obtenidos a partir de los eventos extremos del reanálisis, descritos en la Figura 3. La Figura 3a en particular muestra los compuestos de las variables de circulación atmosférica en el Área 1. En el campo de temperatura la isoterma de 0°C alcanza latitudes al norte de 30°S, cruzando el estado de Rio Grande do Sul en el sur de Brasil, con la isoterma de 10°C llegando a 20°S, en el norte de Paraguay. En la región de interés, las anomalías negativas de temperatura pueden ser de hasta 10°C. Por otra parte, los compuestos de presión muestran el dominio del alta pos frontal sobre la región y la anomalía anticiclónica, asociada a una ciclónica en el Atlántico Sur. En 850 hPa se observa un flujo meridional de sur alcanzando el este de Bolivia y región centro oeste de Brasil, con vientos fuertes (de 12m/s), lo que podría significar la ocurrencia de heladas advectivas sobre la región (Pereira, Angelocci & Sentelhas, 2002). En niveles altos hay ocurrencia de la corriente en chorro acompañando a una vaguada sobre el continente, con su eje sobre el área de estudio. Asociado a la corriente en chorro se puede observar un máximo de viento corriente abajo en la vaguada, característico del pasaje de frentes fríos. Esa situación atmosférica es coherente con lo encontrado por Andrade, Müller, Calvacanti, Fernández Long & Bidegain, (2012), que en un estudio sobre la frecuencia de sistemas frontales sobre el sudeste

de Sudamérica, muestra cómo situación característica un frente frío en el estado de São Paulo con una alta pos frontal adentrándose al continente y actuando en parte de Argentina, Paraguay y sur de Brasil. Esa configuración de alta presión también fue registrada en otros trabajos sobre incursiones de aire frío (Marengo, Cornejo, Satyamurty, Nobre & Sea, 1997; Garreaud, 2000).

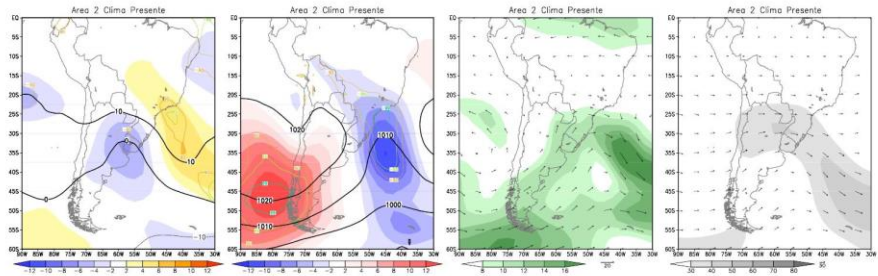
Para el Área 2 (Figura 3b), se observa que la isoterma de 0°C llega a latitudes próximas de sur de Brasil. Al sur de esa última, los mayores valores de anomalías negativas de temperatura 30°S, frontera de Uruguay con Brasil, mientras que la isoterma de 10°C atraviesa Paraguay y la región alcanzan los 8°C. En ese caso se observa la presencia de la alta pos frontal entrando en el continente con anomalías positivas intensas sobre el Océano Pacífico sudeste y la vaguada corriente abajo con anomalías negativas intensas sobre el Océano Atlántico, que se extiende sobre el litoral del Rio Grande do Sul. Esa configuración produce una advección del sudoeste afectando el sudeste del continente, en particular el Área 2, como se observa en la figura de viento en 850 hPa. En niveles altos acompaña la vaguada sobre el sur de Sudamérica con su eje desplazado para el oeste en relación al nivel de 850 hPa.

El Área 3 (Figura 3c) está acotada por las isotermas de 10°C al norte y 0°C al sur, siendo que las anomalías negativas más intensas quedan al sur de esa última, por lo que no afecta el área. La configuración del campo de presión es similar a la del Área 2, pero en ese caso el sistema de alta presión se ubica más al sudoeste del continente, con anomalías anticiclónicas más intensas sobre el Océano Pacífico y sur de Chile, y anomalías ciclónicas acompañando la vaguada del Atlántico corriente abajo, con un nivel de confianza del 99% para ambos los sistemas. Esa disposición favorece la penetración del aire frío de sur/suroeste que alcanza la región de la Pampa Húmeda, acorde a lo observado en el campo de viento en 850 hPa. En la figura de viento en altura se observa el jet subtropical acompañando la vaguada, más desplazado para suroeste en relación a los casos de las Áreas 1 y 2. La ubicación e intensidad del jet en niveles altos también tiene un rol importante en la ocurrencia de heladas en la Pampa Húmeda (Müller, Compagnucci, Nuñez & Salles, 2000; Müller, Ambrizzi & Nuñez, 2005; Müller & Ambrizzi 2007), siendo también capaz de determinar la persistencia de ese fenómeno en la región (Müller & Berri 2007, 2011).

a)



b)



c)

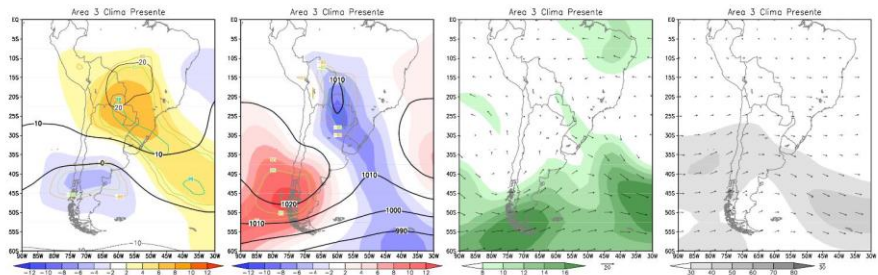


Figura 3: Composiciones de los eventos del reanálisis NCEP/NCAR para los campos de Temperatura y anomalía (sombreado) ($^{\circ}\text{C}$), Presión a nivel del mar y anomalía (sombreado) (hPa), dirección e intensidad del Viento en 850 hPa (m/s) y en 250 hPa (m/s), para las áreas 1 (a), 2 (b) y 3 (c) en el clima presente. Las líneas de color muestran la significancia estadística (anaranjado al 90%, verde al 95% y azul al 99%).

Simulaciones con el Modelo GFDL-CM2.0

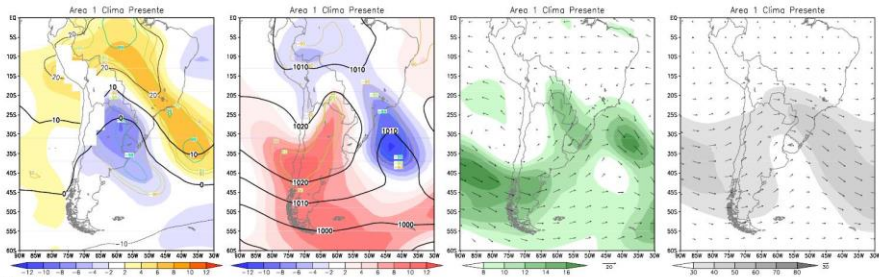
Clima presente

La composición de los cinco eventos más extremos en Área 1 (Figura 4a), presenta en particular para el campo de temperatura en 850 hPa, configuración bastante similar al reanálisis (Figura 3a), con anomalías negativas de temperatura hasta 10°C y la isoterma de 0°C llegando a Paraguay en latitudes próximas a 25°S, algunos grados avanzada hacia el norte en comparación con el reanálisis. La isoterma de 10°C alcanza los 15°S, sugiriendo el descenso de temperatura también en latitudes más bajas en relación al reanálisis. Se observan anomalías anticiclónicas más intensas que en el reanálisis sobre el sudoeste de Argentina, las cuales se extienden hasta Paraguay, y anomalías ciclónicas también más intensas sobre el sudeste de Brasil, configurando vaguada que afecta parte del litoral de la región sur de Brasil. En el nivel de 850 hPa, se observan vientos meridionales del sur, advectando aire más frío en toda la región y sobrestimando el reanálisis en hasta 4 m/s. En altura la configuración del jet y la vaguada sobre Paraguay y sur de Brasil son semejantes a lo mostrado por el reanálisis.

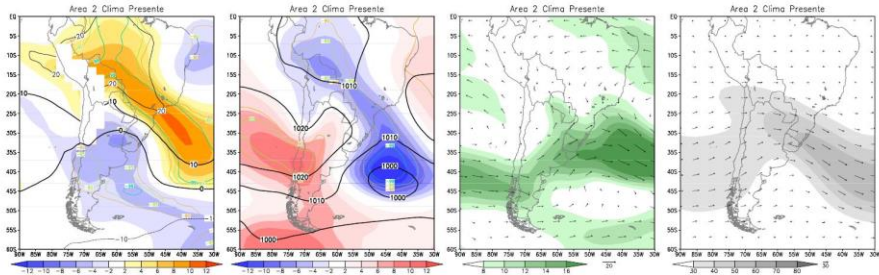
En el Área 2 (Figura 4b), la isoterma de 0°C cruza la frontera de Uruguay con el estado del Rio Grande do Sul, se aproximando de los 30°S, mientras que para el reanálisis (Figura 3b) la isoterma de 0°C no llega hasta el Rio grande do Sul. Así como en el reanálisis, se observan anomalías negativas de temperatura entre 2 y 4°C en gran parte de Rio Grande do Sul y entre 4 y 6°C en Uruguay. El sur y sudeste de Brasil está bajo la influencia de anomalías ciclónicas más intensas que en el reanálisis y que se extienden hacia el océano alcanzando la costa de Uruguay. La simulación del modelo en 850 hPa muestra vientos del sudoeste de hasta 14 m/s en dicha región, siguiendo la vaguada que aparece menos intensa que la mostrada por el reanálisis. En 250 hPa, el modelo simula vientos con intensidad de hasta 50 m/s en niveles altos sobre Uruguay y la región sur de Brasil.

Para el Área 3 (Figura 4c), la incursión de la isoterma de 0°C sobrestima el reanálisis (Figura 3c), alcanzando latitudes próximas a 35°S, atravesando las provincias de Buenos Aires y Mendoza. Se observan anomalías negativas de temperatura de hasta 6°C, posicionada sobre la región de la Pampa Húmeda argentina. Con relación a los campos de PNM, el modelo presenta configuración similar al reanálisis, con un centro de alta presión actuando sobre una pequeña parte de la región de la Pampa Húmeda. Son observadas anomalías ciclónicas más intensas desde el sur de Brasil hasta el Paraguay, y anomalías anticiclónicas cubren toda la mitad sur de Argentina. En el campo de viento en 850 hPa para el presente, así como en el reanálisis se puede observar un flujo de suroeste en gran parte de Argentina, pero con vientos más intensos, de la magnitud de los 14 m/s sobre la región costera, pudiendo llevar aire frío por sobre la región de la Pampa Húmeda. En los compuestos de viento en 250 hPa, se observa que la simulación del modelo para el presente muestra una vaguada en niveles altos en la región de la Pampa Húmeda, la cual aparece menos intensa en el reanálisis.

a)



b)



c)

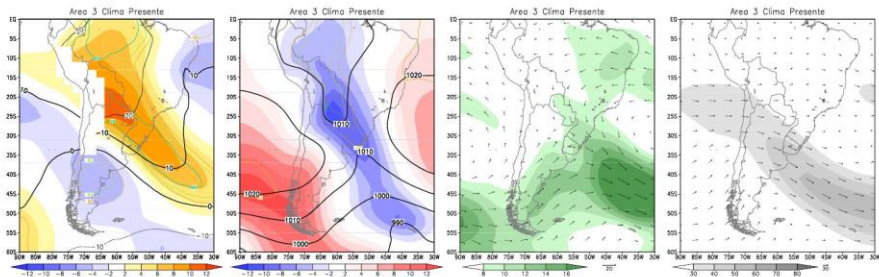


Figura 4: Composiciones de los eventos del modelo GFDL para los campos de Temperatura y anomalía (sombreado) ($^{\circ}\text{C}$), Presión a nivel del mar y anomalía (sombreado) (hPa), dirección e intensidad del Viento en 850 hPa (m/s) y en 250 hPa (m/s), para las áreas 1 (a), 2 (b) y 3 (c) en el clima presente. Las líneas de color muestran la significancia estadística (anaranjado al 90%, verde al 95% y azul al 99%).

Proyecciones futuras

La Figura 5a muestra los compuestos para el Área 1. De acuerdo a los campos de temperatura obtenidos, el modelo proyecta un debilitamiento de la anomalía negativa de temperatura, restringiendo el alcance de la isoterma de 0°C a latitudes próximas a 35°S , mientras que en el clima presente (Figura4a) alcanzó latitudes

próximas a 25°S. Sin embargo, en esta área todavía son proyectadas temperaturas por debajo de 10°C en el futuro, dado que la isoterma de 10°C pasa por el norte de Paraguay y por el estado del Paraná, en el sur de Brasil. El modelo proyecta las anomalías ciclónicas sobre el océano, desplazadas hacia el este con relación al clima presente, además de presentar anomalías positivas más débiles sobre Argentina. A pesar de mostrar un flujo en niveles bajos similar al del presente, el modelo proyecta el debilitamiento de la vaguada y una disminución en la magnitud del viento sobre el área de estudio. En niveles altos, la configuración en el clima futuro es la misma que la mostrada en el clima presente, pero desplazada hacia el este.

En la proyección futura para el Área 2 (Figura 5b), a pesar de que hay una gran área de anomalías negativas de temperatura, son bastante menos intensas que las simuladas para el presente (Figura 4b), quedando la isoterma de 0°C restringida a latitudes más altas, próximas a 45°S sobre el continente, con la incursión del aire frío desplazada hacia el océano Atlántico. La configuración de las anomalías de presión mostradas en las simulaciones del clima presente, no aparecen en las del futuro donde Uruguay y sur de Brasil están bajo la influencia de anomalías anticiclónicas. Los vientos en 850 hPa son de la dirección sur, pero con menor magnitud que en el presente. En niveles altos el flujo se vuelve menos intenso, con la vaguada desplazada hacia el este en la proyección futura.

Para el Área 3 (Figura 5c), la isoterma de 0°C está ubicada más al sur comparada al clima presente (Figura 4c), así como las anomalías negativas de temperatura más intensas se restringen al centro/este de Argentina, contrastando con las del clima presente, más concentradas en el centro/sur. Con relación a los campos de PNM, la configuración en el clima futuro es similar al presente, pero las anomalías son menos intensas. En la proyección del flujo en niveles bajos (850 hPa) y altos (250 hPa), la magnitud del viento es mayor y más zonal que en el clima presente.

Simulaciones con el Modelo HadCM3 Clima Presente

El Área 1 (Figura 6a) muestra los campos de temperatura en 850 hPa con la incursión de la isoterma de 0°C desplazada para el este en comparación al reanálisis (Figura 3a), aproximándose a la latitud de 25°, además de un aumento en intensidad de las anomalías negativas de temperatura pudiendo alcanzar los 10°C con una extensión que abarca Argentina, Uruguay y Paraguay. Temperaturas de 10°C en 850 hPa también alcanzan latitudes inferiores a las del reanálisis, siendo simuladas próximas a 15°S. El modelo simula adecuadamente el campo de PNM, pero intensifica la anomalía anticiclónica sobre el área de estudio, además de mostrar un desplazamiento del dipolo de circulación ciclónica/anticiclónica para el este. Esa situación se refleja en los campos de viento en 850 hPa con un flujo netamente del sur que afecta la región de análisis. En 250 hPa, el modelo simula un debilitamiento del jet y desplaza la vaguada hacia el este.

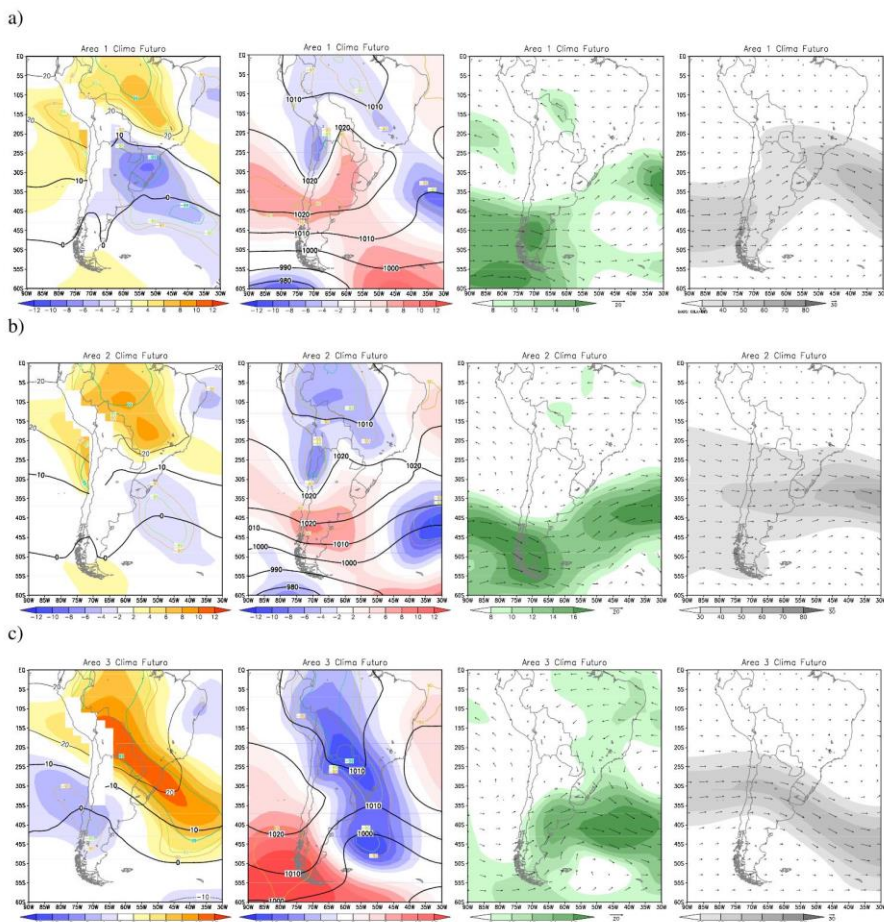


Figura 5: Composiciones de los eventos del modelo GFDL para los campos de Temperatura y anomalía (sombreado) ($^{\circ}\text{C}$), Presión a nivel del mar y anomalía (sombreado) (hPa), dirección e intensidad del Viento en 850 hPa (m/s) y en 250 hPa (m/s), para las áreas 1 (a), 2 (b) y 3 (c) en el clima futuro. Las líneas de color muestran la significancia estadística (anaranjado al 90%, verde al 95% y azul al 99%).

El Área 2 (Figura 6b), el modelo muestra desintensificación del gradiente de temperatura respecto al reanálisis (Figura 3b) con un debilitamiento de la anomalía de temperatura en gran parte del área de estudio. La isoterma de 10°C penetra en latitudes más bajas y la de 0°C se limita a latitudes más altas, en comparación con el reanálisis. El modelo simula un desplazamiento longitudinal del anticiclón pos frontal con su anomalía relacionada, debilitándola, así como a su interacción

anómala. El campo de viento en 850 hPa refleja esa situación con una intensidad menor a la mostrada por el reanálisis. El mismo campo en altura también muestra un debilitamiento y desplazamiento longitudinal de la vaguada y una disminución de la intensidad del jet subtropical.

En el Área 3 (Figura 6c), el modelo muestra la incursión de aire frío en latitudes más bajas respecto al reanálisis (Figura 3c), con anomalías negativas de temperatura latitudes cercanas a 30°S. El campo de PNM muestra el dipolo de anomalías anticiclónica/ciclónica más desplazado para el este comparado con el reanálisis, presentando una vaguada mejor configurada en razón de un gradiente de anomalías ciclónicas más intenso en el Atlántico sur. El alta pos frontal, de configuración muy similar a la del reanálisis, se retrae al oeste sobre el continente, lo que influencia en la composición de viento en 850 hPa, que muestra vientos más intensos del sudoeste sobre la región de la Pampa Húmeda. Coherentemente la vaguada simulada por el modelo en niveles altos, además de aparecer profundizada, también presenta un desplazamiento para el este con relación al reanálisis. Otro punto es que el núcleo del jet se traslada a latitudes inferiores a las presentadas por el reanálisis.

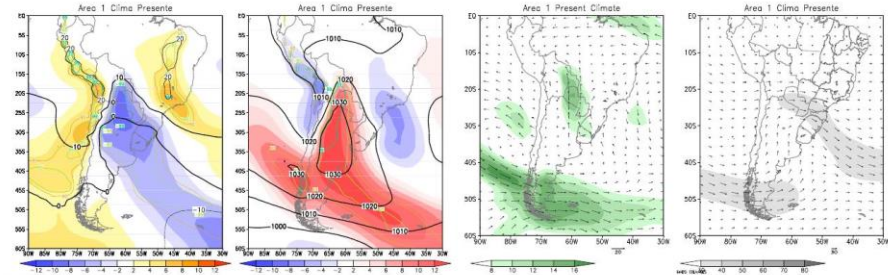
Proyecciones futuras

En el escenario futuro del Área 1 (Figura 7a), las anomalías negativas de temperatura se muestran menos intensas respecto al clima presente (Figura 6a), sin embargo pueden alcanzar hasta 10°C en el norte de Paraguay, con la isoterma de 10°C desplazada hacia el sur y la de 0°C confinada a latitudes más altas, comparadas con el clima presente. El modelo proyecta para el futuro una configuración del campo de presión similar al del presente, pero el modelo debilita el alta pos frontal y anomalías positivas de presión y presenta anomalías negativas más intensas sobre el continente y Océano Atlántico. En la proyección futura, el flujo en niveles bajos es más intenso que en el presente desde el sudeste de Sudamérica hasta Bolivia, presentando componente de sudoeste sobre el área de estudio mientras que en el presente se observa componente de sudeste. Para el futuro se proyecta debilitamiento del jet subtropical, así como desplazamiento del núcleo del jet más para el sur con relación al presente.

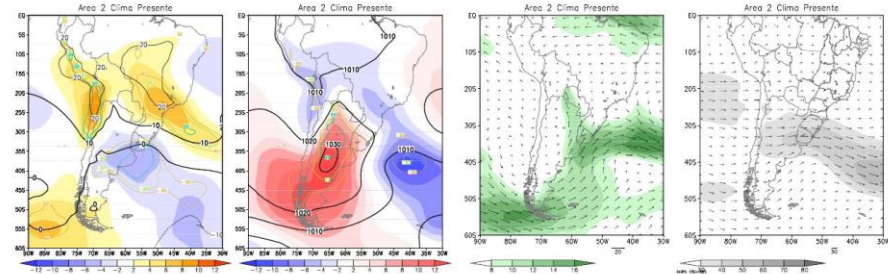
En el Área 2 (Figura 7b), el campo de temperatura y su anomalía en el escenario futuro muestran una configuración próxima a la del clima presente (Figura 6b), pero con anomalías de temperatura más intensas sobre la región. La isoterma de 10°C se encuentra un poco más al sur, no ultrapasando la latitud de 20°S, así como la isoterma de 0°C, que también es proyectada más al sur, cruzando el continente solamente en el extremo sur de Sudamérica y alcanzando latitudes próximas a 40°S sobre el Atlántico. Se observa, sobre el Área 2, una configuración del campo de presión semejante a la del clima presente pero con anomalías anticiclónicas más intensas. Se proyecta una profunda vaguada en niveles bajos sobre el Atlántico que se muestra más intensificada que en la simulación del clima presente. Tal situación proporciona un flujo del sur, similar al mostrado en las simulaciones para el

presente, pero más intenso. En niveles altos se proyecta una intensificación del jet sobre la región sur de Brasil respecto del el clima presente.

a)



b)



c)

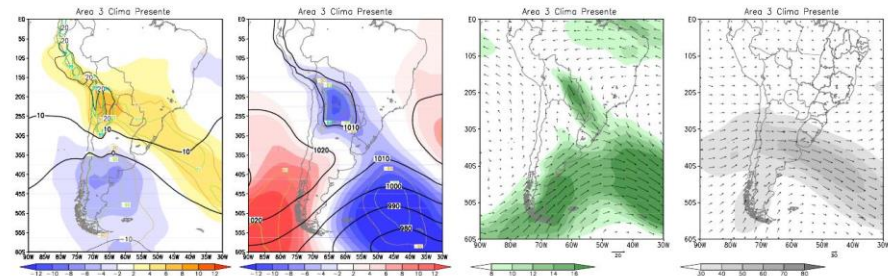
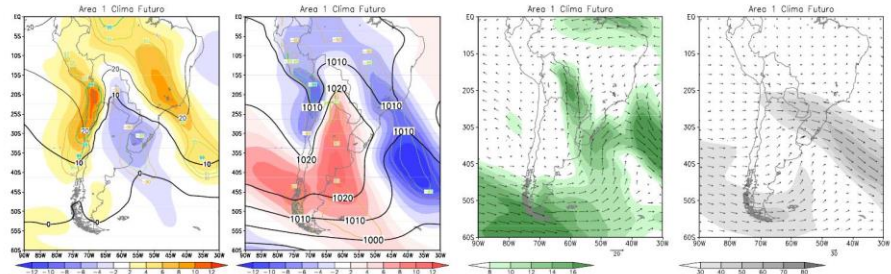


Figura 6: Composiciones de los eventos del modelo HadCM3 para los campos de Temperatura y anomalía (sombreado) ($^{\circ}\text{C}$), Presión a nivel del mar y anomalía (sombreado) (hPa), dirección e intensidad del Viento en 850 hPa (m/s) y en 250 hPa (m/s), para las áreas 1 (a), 2 (b) y 3 (c) en el clima presente. Las líneas de color muestran la significancia estadística (anaranjado al 90%, verde 95% y azul 99%).

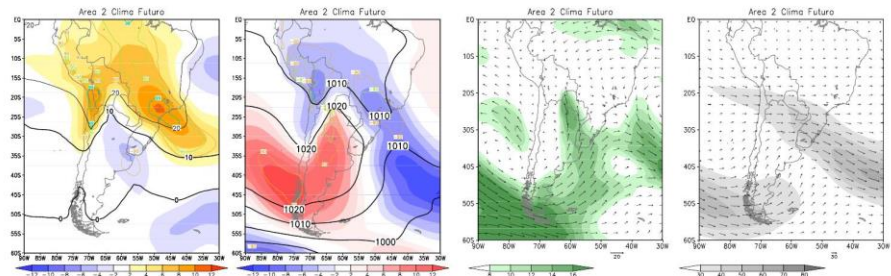
Para el Área 3 (Figura 7c), el modelo proyecta las isotermas de 10°C y 0°C posicionadas más al sur que en el clima presente (Figura 6c), así como menores anomalías negativas de temperatura restringidas a un área menor en relación al clima presente, sin embargo afectan la Pampa Húmeda. En los campos de PNM se proyecta una menor incursión del alta pos frontal, pero con anomalías similares a la

simulación del clima presente. Se observa también una profundización de la vaguada en superficie en el Atlántico, con una intensificación de las anomalías ciclónicas asociadas, además de un desplazamiento de la configuración de los campos hacia el oeste, favoreciendo la entrada del aire frío para el centro de Argentina. En los compuestos de viento y magnitud para la proyección futura, el flujo en niveles bajos es muy semejante al del clima presente, a pesar de este mostrarse más intenso sobre la Pampa Húmeda. Además de eso, se observa intensificación del jet en niveles altos sobre el área de estudio.

a)



b)



c)

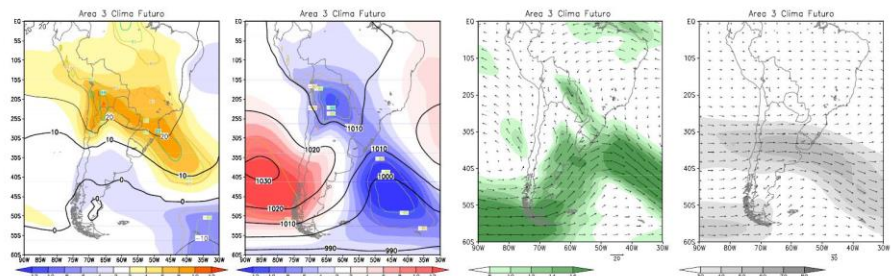


Figura 7: Composiciones de los eventos del modelo HadCM3 para la Temperatura y anomalía (sombreado) (°C), Presión a nivel del mar y anomalía (sombreado) (hPa), dirección e intensidad del Viento en 850 hPa (m/s) y en 250 hPa (m/s), para las áreas 1 (a), 2 (b) y 3 (c) en el clima futuro. Las líneas de color muestran la significancia estadística (anaranjado al 90%, verde al 95% y azul al 99%).

En todos los casos, tanto para el reanálisis como para los modelos, las anomalías obtenidas de temperatura y de PNM son significativas, con un intervalo de confianza de por lo menos 90%, pudiendo llegar al 99% en algunos casos como se puede ver en las figuras arriba descritas.

En un clima futuro, con el aumento de temperatura previsto, se podrán ver afectados diversos frutales de clima templado, que necesitan de una determinada cantidad de horas de frío en el invierno (latencia) (Mandelli 2004; Fioravanço, Czermainski, Alves, & Nachtigall, 2010, Fioravanço, Magrin, Soldatelli, & Andolfato, 2013) y que sufren con las heladas tardías en el momento de su floración (primavera) (Chaar, 2013; Almorox, Suñer, Laurent, & Aguirre, 2015). En un futuro aquellas regiones adaptadas a cultivos de otras más cálidas, debido al incremento de temperatura, también podrán ser afectadas por eventos extremos fríos.

Conclusiones

En este artículo se analizaron las características atmosféricas asociadas a los eventos extremos fríos, identificados por el descenso de la temperatura en el invierno en tres regiones del sudeste de Sudamérica, utilizando los modelos HadCM3 y GFDL-CM2.0 en la versión acoplada océano- atmósfera, para el clima presente y el escenario futuro más crítico A2 del CMIP3. Se compusieron los campos de masa y movimiento en altos y bajos niveles de la atmósfera de los cinco eventos con mayor caída de temperatura en cada una de las tres áreas de estudio.

En la comparación con los compuestos del reanálisis en el período de referencia, el modelo GFDL-CM2.0 simula bastante bien los patrones observados de anomalías de temperatura y presión en los análisis de las 3 áreas, mostrando también el desplazamiento para noreste del patrón del Área 3 para el Área 1. La posición de la isoterma de 0°C es bien simulada en las Áreas 1 e 2, mientras que en el Área 3 es un poco desplazada para el sur, con relación al reanálisis. La posición de la isoterma de 10°C es simulada satisfactoriamente en las tres áreas, presentándose un poco más para el sur en el Área 2 y más para el norte en el Área 3. Los vientos de sur/ sudoeste en el flujo en niveles bajos son simulados por el modelo, así como la vaguada y el jet en niveles altos. Para las proyecciones futuras, con relación al clima presente, el modelo muestra tanto temperaturas inferiores a 10°C como temperaturas inferiores 0°C en 850 hPa, restrictas a latitudes más altas para las tres regiones, además de anomalías negativas de temperatura menos intensas. A pesar de que los campos presentan una configuración bastante semejante en el futuro con relación al presente, las anomalías tanto positivas como negativas de presión al nivel del mar se muestran menos intensas sobre el continente en el caso del Área 1, y desplazadas longitudinalmente en los casos de las Áreas 2 y 3 en el futuro. El modelo reproduce los vientos de sur en 850 hPa observados en el reanálisis y en las proyecciones y debilita el flujo en las Áreas 1 e 2, intensificándolo sobre el Área 3. En niveles altos, el modelo reproduce la vaguada y el jet, pero aumenta sus magnitudes, proyectándolas todavía más intensas para el futuro.

Utilizando un criterio de intervalos de temperatura en las mismas áreas para selección de casos de incursiones de aire frío, (Cavalcanti et al., 2013) obtuvieron anomalías de temperatura más intensas para el clima futuro que para el clima de referencia en los resultados del GFDL-CM2.0. Las anomalías más intensas están relacionadas a la media climatológica de temperatura, que en el escenario futuro es mayor que en el clima de referencia. En el presente estudio, son analizados los casos más extremos de descenso de temperatura, que en el clima futuro, en virtud del calentamiento, tendrían valores más bajos de descenso cuando comparados al clima de referencia. Por esa razón, en los resultados del GFDL-CM2.0, las anomalías son menos intensas en las proyecciones que en el clima de referencia y el aire frío queda restringido a las latitudes más altas.

El modelo HadCM3 presenta un comportamiento muy próximo al reanálisis cuando se comparan las medias estacionales de temperatura. En el clima presente, cuando comparado al reanálisis, el modelo simula anomalías negativas en una mayor extensión latitudinal sobre Sudamérica en las tres áreas. El modelo también simula más distancia latitudinal entre las isotermas de 0°C y de 10°C, y las isotermas de 10°C aparecen todas desplazadas para norte. En el escenario futuro, el modelo proyecta intensificación de las anomalías de temperatura en el Área 2 y debilitamiento en el Área 3, mientras que en el Área 1 permanece con configuración similar al presente. El modelo simula bien el patrón de anomalías de alta y baja presión asociadas a las incursiones de aire frío para el clima presente. Por otro lado, en las proyecciones futuras, muestra configuraciones de alta pos frontal más intensas en las áreas de estudio. En niveles altos, el modelo reproduce la vaguada y el jet observados en el reanálisis, pero con diferencias en su posición e intensidad. La magnitud del jet en niveles altos es menos intensa en clima presente. En el clima futuro el modelo proyecta intensificación del jet en relación al clima presente.

Comparando los dos modelos, se nota que para todas las áreas, el HadCM3 presenta menor gradiente de temperatura tanto cuando se compara al reanálisis como comparado al GFDL, lo que se observa por el alargamiento de la distancia entre las isotermas de 0°C y 10°C por parte del HadCM3 tanto para el clima presente como para las proyecciones futuras. Como el HadCM3 tiende a simular anomalías positivas de PNM más intensas que el reanálisis y que las simulaciones del GFDL, tanto en el clima presente como en las proyecciones, se puede concluir que las simulaciones del modelo GFDL se muestran más próximas a las del reanálisis que las del HadCM3, simulando tanto las altas pos frontales como las posiciones de las isotermas más próximas del reanálisis. Para el clima de finales del siglo 21, de acuerdo con el GFDL, se proyecta tanto un debilitamiento como menor alcance latitudinal de los eventos de descenso de temperatura superiores a 10°C, mientras que, segundo el modelo HadCM3, esos eventos también son proyectados con menor cobertura latitudinal, pero en general con mayor intensidad.

A pesar de que cada modelo tiene sus particularidades, cada uno de ellos presenta patrones de circulación similares, principalmente con respecto a los campos de presión, con configuraciones semejantes, pero con visibles diferencias en las intensidades de las anomalías, tanto en el presente como en el clima futuro.

Considerando los campos de temperatura, el modelo GFDL presenta menos descenso de temperatura que el HadCM3 en el presente, situación que parecería se amenizar para el clima futuro.

Se debe tener en cuenta que aunque sean una herramienta muy útil para la estimación del comportamiento climático futuro, los modelos son una representación imperfecta del sistema climático, en donde cada cual responderá de manera distinta a un mismo forzante. Sus proyecciones son todavía imprecisas, dado a que no se pueden pronosticar, por ejemplo, las erupciones volcánicas o las emisiones de gases de efecto invernadero en que se basan los escenarios. Otra fuente de incertidumbre son las distintas formas con que el clima puede comportarse de acuerdo con las condiciones iniciales de los componentes más lentos, como por ejemplo, el océano.

Bibliografía

Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T., Caesar, J., Gleason, B., & Klein Tank, A. et al. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal Of Geophysical Research*, 111(D5).

<http://dx.doi.org/10.1029/2005jd006290>

Almorox, J., Suñer L., Laurent G., & Aguirre M.E., (2015): Análisis de las temperaturas en dos áreas de interés olivícola del sudoeste bonaerense, Argentina. *CIC, Revista de Climatología* ; 15, 65–75.

Ambrozzi, T., & Araujo, M. (2014). *Base científica das mudanças climáticas: primeiro relatório de avaliação nacional*. Rio de Janeiro: Universidade de Rio de Janeiro. 102 pp.

Andrade, K. M., Müller, G. V., Cavalcanti, I. F. A., Fernández-Long, M. E., & Bidegain, M. (2012): Avaliação de mudanças na frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul em projeções do clima futuro. *Meteorologica*, 37, 15–26.

Barros, V., Clarke, R. & Dias, P. S. (2006): *El Cambio Climático en la Cuenca del Plata*. V. CIMA - CONICET, Buenos Aires, 232 pp.

Cavalcanti, I., Müller, G., Andrade, K., & Fernández Long, M. (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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.006>

Chaar, J. E., (2013): *Resistencia a heladas en plantas frutales*. 109-121. Recuperado de <http://inta.gob.ar/documentos/resistencia-a-heladas-en-plantas-frutales>.

Delworth, T., Broccoli, A., Rosati, A., Stouffer, R., Balaji, V., & Beesley, J. et al. (2006). GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics. *Journal Of Climate*, 19(5), 643-674. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli3629.1>.

Fioravanço, J. C., Czereminski, A. B. C., Alves, S. A. M. & Nachtigall, G. R., (2010): *Condições meteorológicas e sua influência na safra de maçã 2009/10 na região de Vacaria, RS*. - Portal Embrapa. Bento Gonçalves, 1-9 pp.

- <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/859774/condicoes-meteorologicas-e-sua-influencia-na-safra-de-maca-200910-na-regiao-de-vacaria-rs>. Fioravango, J. C., Magrin, F. P., Soldatelli, P. & Andolfato, W., (2013): Comportamento fenológico e produtivo do pessegueiro Eragil em Vacaria, RS..Portal Embrapa. Bento Gonçalves, 1-7 pp.
- <https://www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes//publicacao/991751/comportamento-fenologico-e-produtivo-do-pessegueiro-eragil-em-vacaria-rs>.
- Garreaud, R., 2000: Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. *Monthly Weather Review*, 128, 2544–2559.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C., Banks, H., Gregory, J., & Johns, T. et al. (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(2-3), 147-168. <http://dx.doi.org/10.1007/s003820050010>
- IPCC, (2007): *IPCC Fourth Assessment Report (AR4)*. IPCC, 1, 976pp, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm%5Cnhttp://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-spm.pdf.
- IPCC, (2013): Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change2013: *The Physical Science Basis*. IPCC, AR5, 2014, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., & Gandin, L. et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 77(3), 437-471. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:tnyrp>2.0.co:2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co:2)
- Knutson, T., Delworth, T., Dixon, K., Held, I., Lu, J., & Ramaswamy, V. et al. (2006). Assessment of Twentieth-Century Regional Surface Temperature Trends Using the GFDL CM2 Coupled Models. *Journal Of Climate*, 19(9), 1624-1651. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli3709.1>
- López de la Franca, N., Sánchez, E., & Domínguez, M. (2013). Changes in the onset and length of seasons from an ensemble of regional climate models over Spain for future climate conditions. *Theoretical And Applied Climatology*, 114(3-4), 635-642. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-013-0868-2>
- Mandelli, F., (2004): *Comportamento meteorológico e sua influência na vindima de 2004 na Serra Gaúcha*. - Portal Embrapa. Bento Gonçalves, 4 pp. <https://www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes/publicacao/539635/comportamento-meteorologico-e-sua-influencia-na-vindima-de-2004-na-serra-gaucha>.
- Marengo, J., Cornejo, A., Satyamurty, P., Nobre, C., & Sea, W. (1997). Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125(11), 2759-2786. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2759:csitae>2.0.co:2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2759:csitae>2.0.co:2)
- Marengo, J., & Camargo, C. (2008). Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal Of Climatology*, 28(7), 893-904. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1584>

- Marengo, J., Chou, S., Kay, G., Alves, L., Pesquero, J., & Soares, W. et al. (2011). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38(9-10), 1829-1848. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- Müller, G., & Berri, G. (2007). Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. *Monthly Weather Review*, 135(4), 1268-1289. <http://dx.doi.org/10.1175/mwr3344.1>
- Müller, G., & Ambrizzi, T. (2007). Teleconnection patterns and Rossby wave propagation associated to generalized frosts over southern South America. *Climate Dynamics*, 29(6), 633-645. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-007-0253-x>
- Müller, G., & Berri, G. (2011). Atmospheric circulation associated with extreme generalized frosts persistence in central-southern South America. *Climate Dynamics*, 38(5-6), 837-857. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1113-2>
- Müller, G., Compagnucci, R., Nuñez, M., & Salles, A. (2003). Surface circulation associated with frost in the wet Pampas. *International Journal Of Climatology*, 23(8), 943-961. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.907>
- Müller, G., Ambrizzi, T., & Núñez, M. (2005). Mean atmospheric circulation leading to generalized frosts in central southern South America. *Theoretical And Applied Climatology*, 82(1-2), 95-112. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-004-0107-y>
- Pereira, A. R., Angelocci, L. R., & Sentelhas, P. C., (2002): *Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba, RS: Livraria e Editora Agropecuária.
- Rusticucci, M., & Renom, M. (2008). Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal Of Climatology*, 28(8), 1083-1095. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1607>.
- Rusticucci, M., Marengo, J., Penalba, O., & Renom, M. (2009). An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. *Climatic Change*, 98(3-4), 493-508. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-009-9742-8>
- Skansi, M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J., & Bentancur, O. et al. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global And Planetary Change*, 100, 295-307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>
- Vincent, L., Peterson, T., Barros, V., Marino, M., Rusticucci, M., & Carrasco, G. et al. (2005). Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960–2000. *Journal Of Climate*, 18(23), 5011-5023. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli3589.1>