



Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales

Future climate change scenarios from global models for locations in the central Andes

Delia Acuña Azarte¹; Weidi Flores Villanueva^{2*}; Alan Llacza Rodríguez¹; Mario Rorher³

¹ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

² Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Email: wflores@lamolina.edu.pe

³ Meteodat – Suiza.

Recepción: 27/11/2018; Aceptación: 05/06/2019

Resumen

Los posibles cambios en el comportamiento de la temperatura y precipitación para 2016-2045, relativos al período 1971-2000, en las localidades de Urubamba y granja Kcayra, ubicadas en Cusco, Andes centrales de Sudamérica, se han estimado mediante la técnica multivariada de Componentes Principales y sus Funciones Ortogonales Empíricas asociadas. Los datos corresponden a los medidos desde instrumental convencional de precipitación, temperatura máxima y mínima en el período 1965-2012. Los datos de vientos y temperatura en altura pertenecen al reanálisis ERA40 (1971-2000), la precipitación regional a CMAP (1979-2000). Asimismo, los datos numéricos de temperatura en altura y precipitación son provenientes de los modelos climáticos globales CCSM4, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5), en sus periodo histórico 1971-2000 y futuro 2016-2045, correspondientes al escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5, los cuales fueron registrados y validados a una resolución espacial de 2,5°. La validación de los modelos climáticos globales requirió de un análisis cuidadoso que consistió en la comparación de los patrones de temperatura del reanálisis ERA40, la circulación atmosférica regional (1971-2000) con los modelos del CMIP5, a fin de identificar la variable y el modelo más representativo a considerar como predictor confiable de la regionalización estadística (RE) para estimar el cambio climático futuro en las localidades de interés. La metodología se complementó con el análisis estadístico mediante el diagrama de Taylor y la consistencia de los patrones de circulación. De acuerdo con los resultados, en el período 1971-2000, el modelo HadGEM2_ES es el que representa mejor la circulación atmosférica a 200 hPa sobre Sudamérica; mientras que el modelo CCSM4, destaca la temperatura del aire a 500 hPa. En el período 2016-2045, todos los modelos evaluados indican el aumento

Forma de citar el artículo: Acuña et al. 2019. Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. *Anales Científicos* 80 (2):476-494 (2019).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i2.1482>

Autor de correspondencia (*): Weidi Flores Villanueva. Email: wflores@lamolina.edu.pe

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

de la temperatura a 500 hPa. Los resultados de la RE sugieren para el 2016-2045 un clima cálido-seco con el aumento de la temperatura local en promedio de 0,4 °C y la reducción de precipitación de 40% en SON, DEF y MAM, trimestres correspondientes al crecimiento y desarrollo de los cultivos de secano de papa y maíz en Urubamba y granja Kcayra.

Palabras clave: regionalización estadística; componentes principales; funciones ortogonales empíricas; modelos; cambio climático; Andes; Urubamba; granja Kcayra.

Abstract

The possible changes in the temperature and precipitation behavior for 2016-2045, relative to the 1971-2000 period, in the towns of Urubamba and granja Kcayra, located in Cusco, Central Andes of South America, have been estimated using the multivariate Principal Components technique and its associated Empirical Orthogonal Functions. The data correspond to those measured from conventional precipitation instruments, maximum and minimum temperature in the period 1965-2012. Wind and temperature data at height belong to the ERA40 reanalysis (1971-2000), the regional rainfall to CMAP (1979-2000). Likewise, the numerical data of temperature in height and precipitation come from the global climatic models CCSM4, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR of the Comparison Project of Coupled Models (CMIP5), in its historical period 1971-2000 and future 2016 -2045 corresponding to the scenario of high emission of RCP8.5 greenhouse gases, which were regillated and validated at a spatial resolution of 2.5°. The validation of the global climate models required a careful analysis that consisted in comparing the temperature patterns of the ERA40 reanalysis, the regional atmospheric circulation (1971-2000) with the CMIP5 models, in order to identify the variable and the model more representative to consider as a reliable predictor of statistical regionalization (SR) to estimate future climate change in the localities of interest. The methodology was complemented by statistical analysis using the Taylor diagram and the consistency of circulation patterns. According to the results, in the period 1971-2000, the HadGEM2_ES model is the one that best represents the atmospheric circulation at 200 hPa over South America; while the CCSM4 model highlights the air temperature at 500 hPa. In the 2016-2045 period, all the models evaluated indicate a temperature increase at 500 hPa. The results of the SR suggest that for 2016-2045 a warm-dry climate with an average increase in local temperature of 0.4 °C and a 40% reduction in rainfall in SON, DEF and MAM, quarters corresponding to growth and development of rain fed potato and corn crops in Urubamba and Kcayra farm.

Keywords: statistical regionalization; principal components; empirical orthogonal functions; models; climate change; Andes; Urubamba; Kcayra farm.

1. Introducción

Los Andes tropicales son considerados particularmente vulnerables al cambio climático y están expuestos a riesgos naturales de origen hidrometeorológico y geológico. Las sociedades necesitan respuestas para adaptarse al cambio climático gradual o al incremento de la variabilidad climática o a ambos (Huggel *et al.*, 2012).

En los Andes tropicales, un aumento significativo de la temperatura y cambios de los patrones de precipitación afectarían probablemente la extensión y la distribución de los glaciares y humedales, la integridad de los ecosistemas, la disponibilidad de agua para consumo humano, el riego y la producción de energía (Urrutia y Vuille, 2009).

Ante esta situación, “la evaluación de los impactos del cambio climático y el desarrollo de estrategias de adaptación adecuada, se han convertido en temas de particular importancia” (Salzmann *et al.*, 2009), principalmente en lo referente a la agricultura, la hidroenergía, el turismo y la disponibilidad, demanda y gestión futura de los recursos hídricos.

En este sentido, se desarrollan conocimientos sobre las manifestaciones locales y regionales del cambio climático actual, sus proyecciones a futuro y sus impactos en los medios de vida de las poblaciones rurales y urbanas de los Andes para dar soporte técnico-científico al establecimiento de políticas públicas, programas, proyectos y medidas específicas de adaptación por parte de los actores regionales, locales y tomadores de decisión.

Las investigaciones recientes realizadas por el Senamhi en el año 2012, a través de la regionalización de tres modelos globales del CMIP3, sugieren para las regiones de Cusco y Apurímac, ubicadas en los Andes centrales, una posible variación de la precipitación anual en $\pm 15\%$ y reducción en la época seca de 30% para el 2016-2045 bajo el escenario de emisión moderada de gases de efecto invernadero A1B relativo a 1971-2000. Asimismo, el estudio indica que las reducciones se acentuarían y generalizarían en el 2046-2065 hasta en 40%, lo que podría traducirse en menos agua para estas regiones, situación que se acentuaría con el incremento de la temperatura máxima y mínima, estimada en 1,5 °C.

En el presente artículo se estiman los posibles cambios de la precipitación y temperatura en Urubamba y granja Kcayra para el período 2016-2045, escenario de alta emisión RCP 8,5, relativo al período 1971-2000, a través de la RE con la nueva versión de modelos globales del CMIP5, entre ellos CCSM4, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, previamente validados. Se

vinculan los patrones de circulación y temperatura en altura sobre Sudamérica con su posible respuesta local deducible de la respectiva correlación histórica. Además, se complementa con el análisis de los futuros cambios en los patrones de circulación atmosférica.

Los datos utilizados para el análisis de la precipitación a gran escala, fueron los provenientes del CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation, Xie and Arkin, 1997). Los datos para la RE a escala local fueron los de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación mensual del período 1965-2012, provenientes de las estaciones meteorológicas convencionales de granja Kcayra y Urubamba. Estos datos pertenecen al Banco de Datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Tabla 1). Además, se utilizaron datos mensuales de variables atmosféricas del período 1971-2000 del reanálisis ERA-40 (Uppala *et al.*, 2005) obtenidos desde el servidor público del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) y datos mensuales de los períodos 1971-2000 y 2016-2045 que considera el escenario de alta emisión RCP 8,5 de tres modelos acoplados del proyecto CMIP5, el HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y CCSM4 (<https://pcmdi.llnl.gov/projects/cmip5/>). Las diferentes variables seleccionadas del reanálisis y modelos acoplados fueron armonizadas en sus diferentes unidades y registradas a 2,5° x 2,5° con la técnica de interpolación bilineal.

Los modelos seleccionados del proyecto CMIP5 están dentro de los 11 evaluados por Barreto (2013) a través de las variables precipitación, presión a nivel del mar, vientos y temperatura, con métodos comparativo y estadístico para el período histórico 1970-2000. Los resultados indican la mejor representación y desempeño de los modelos HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y CCSM4

Tabla 1. Datos provenientes de modelos globales y medidos desde instrumental meteorológico

	Centro	Modelo/ Estación (Stn)	Resol. original	Variables seleccionadas	Periodo de control/ Línea de base	Período futuro ESCENARIO RCP8.5	Dominio - coordenadas geográficas
Datos de Modelos	Instituto Meteorológico de Alemania Max-Planck	MPI-ESM-LR	Espectral T63 1.875°x1.875°	Ta 500, 200 hPa U,V 500, 200 hPa RR	1971-2000	2016-2045	10N-30S, 40W-110W
	Centro Nacional de Investigación Atmosférica	CCSM4	1.25x0.942408	Ta 500, 200 hPa U,V 500, 200 hPa RR	1971-2000	2016-2045	10N-30S, 40W-110W
	Oficina Meteorológica	HadGEM2-ES	1.87x1.8496/48	Ta 500, 200 hPa U,V 500, 200 hPa RR	1971-2000	2016-2045	
Datos de Reanálisis	Centro Europeo de Pronóstico de Rango Medio	ECMWF ERA40	2.5°x2.5°	Ta 500, 200 hPa U,V 500, 200 hPa	1971-2000	-----	10N-30S, 40W-110W
Datos analizados	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica	CMAF	2.5°x2.5°	RR	1979-2000	-----	10N-30S, 40W-110W
Datos medidos desde instrumental	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología	Stn G. Kcayra Stn Urubamba	Escala local	Ta, RR	1965-2012	-----	-13.56 S, -71.88 W, 3219 -13.31 S, -72.12 W, 2863

Ta: temperatura media del aire, RR: precipitación, U: viento zonal, V: viento meridional, hPa: hecto pascal

para la región sudamericana, que confirman lo encontrado por [Acuña *et al.* \(2012\)](#) que, basados en una metodología similar, encuentran que los modelos evaluados en su versión previa (HadCM3, ECHAM5-OM y CCSM3) representan coherentemente la circulación atmosférica y la humedad sobre Sudamérica.

2. Materiales y métodos

En el proceso de validación (1971-2000) se compara simultáneamente para un mismo dominio las variables atmosféricas de líneas de corriente a 500 y 200 hPa, temperatura a 700 y 500 hPa del reanálisis ERA-40 con los GCMs seleccionados del CMIP5. Se realiza un análisis físico basado en la configuración, distribución espacial y magnitud de los patrones de las variables atmosféricas en sus distintos niveles y períodos estacionales setiembre-octubre-noviembre (SON), diciembre-enero-febrero (DEF), marzo-abril-mayo (MAM) —que coinciden con el crecimiento y desarrollo de cultivo bajo secano en los Andes del sur de Perú— y se determinan los predictores de gran escala. Además de la validación, se realiza el análisis de los cambios futuros en los patrones de circulación atmosférica.

Se establecen las relaciones empíricas entre el predictor de gran escala, vientos a 200 hPa (temperatura del aire a 500 hPa) y el predictando de escala local precipitación (temperatura) en superficie, a través de la función de transferencia lineal, Componentes Principales/Funciones empíricas ortogonales (EOF, por sus siglas en inglés) aplicando las funciones del paquete Climpack ([Benestad *et al.*, 2007](#)) ejecutado en plataforma R. En esta fase de calibración del modelo lineal (1971-2000) para precipitación y temperatura, el coeficiente de determinación ajustado se consideró mayor e igual a 0,4, debido a que se correlacionó área espacial versus punto; es decir, patrones de la circulación de 200

hPa (temperatura 500 hPa) de escala regional con la precipitación (temperatura) de granja Kcayra y Urubamba de escala local.

El patrón espacial identificado (10°N-30°S, 40°W-110°W) para el predictor fue constante e incorpora la señal de gran escala y el predictando local; además de los efectos locales de la escala pequeña incorpora su sensibilidad a la señal de cambio climático. Las áreas se ilustran en la [Figura 1](#).

El modelo lineal determinado fue extrapolado para obtener las proyecciones de cambio climático, asumiendo una serie de hipótesis, entre las más importantes la validez del modelo bajo condiciones futuras de cambio climático ([Brunet, 2009](#)).

En la [Figura 2](#), se esquematizan los procesos de RE propuestos para la generación de escenarios de precipitación y temperatura en las dos localidades de estudio.

3. Resultados y discusión

Variabilidad climática 1965-2012

La serie histórica de temperatura en granja Kcayra está modulada por los eventos extraordinarios de El Niño, Oscilación del Sur (ENOS) de 1982/1983 y 1997/1998, identificada en la [Figura 3](#). El salto en las series climáticas de temperatura (3 a y b) a mediados de los 70, dan lugar a un calentamiento abrupto en ambas estaciones estudiadas (granja Kcayra y Urubamba). Esta situación es coherente con el salto climático detectado a nivel mundial y en diferentes variables que, según [Jacques \(2009\)](#) es debido a la mayor incidencia del ENOS con la mayor frecuencia relativa de eventos cálidos después de mediados de los 70 y que correspondería a una respuesta acoplada del sistema climático. Entre tanto, en los últimos años de la década del 2000, la serie de granja Kcayra muestra una aparente tendencia a la disminución de la temperatura.

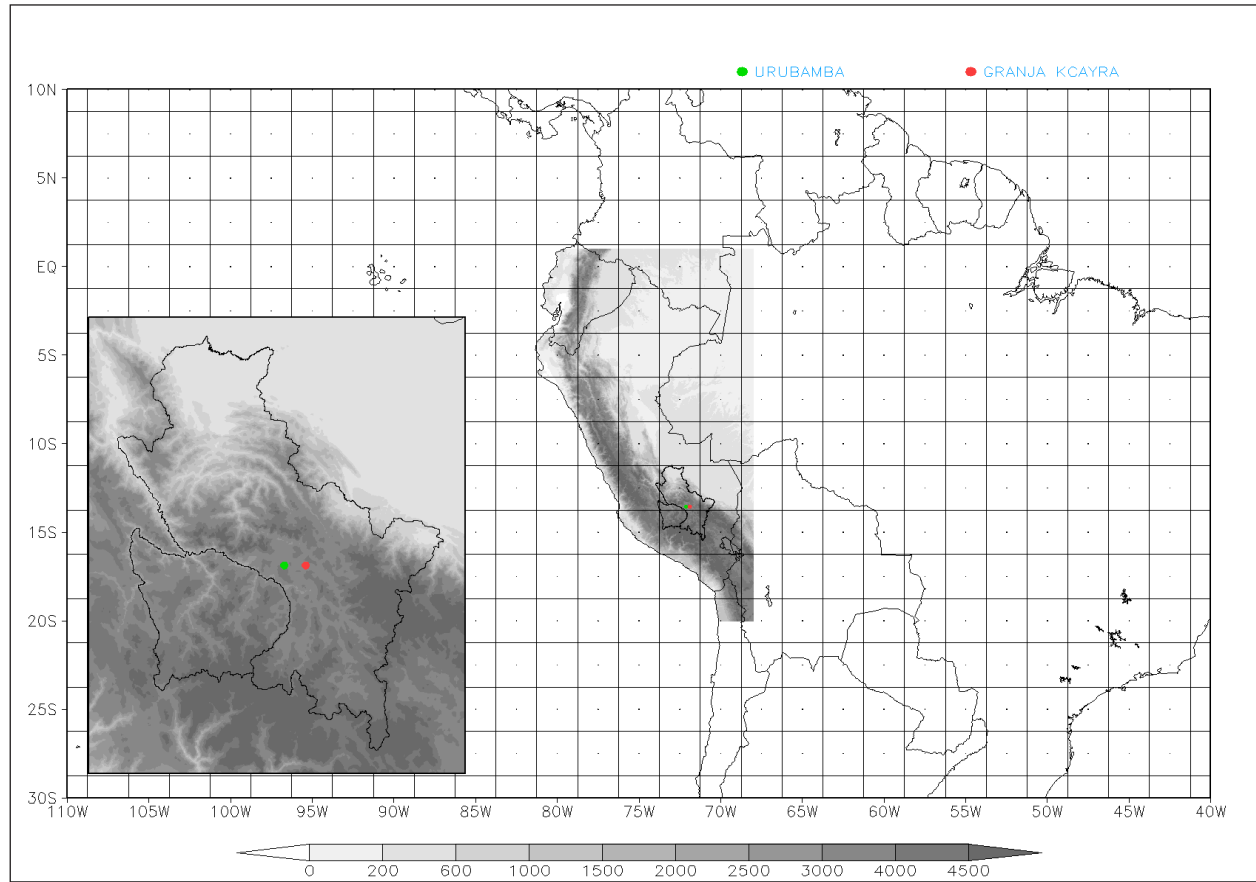


Figura 1. Localización de las estaciones de Urubamba (verde) y Granja Kcayra (rojo), departamento de Cusco, región sur andina de Perú - Andes centrales de Sudamérica. Dominio espacial 10°N-30°S, 40°W-110°W, resolución horizontal de 2,5°x2,5°

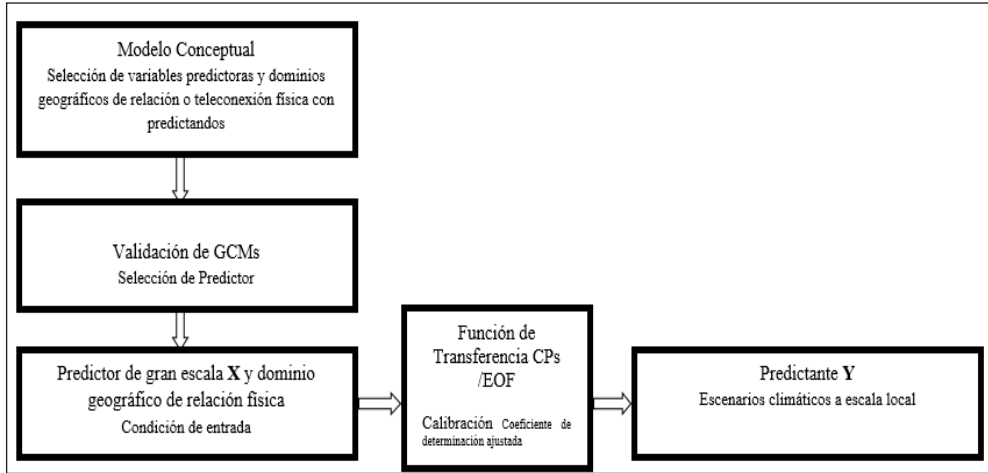


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico de reducción de escala estadística para la generación de escenarios del clima futuro en localidades de los Andes centrales

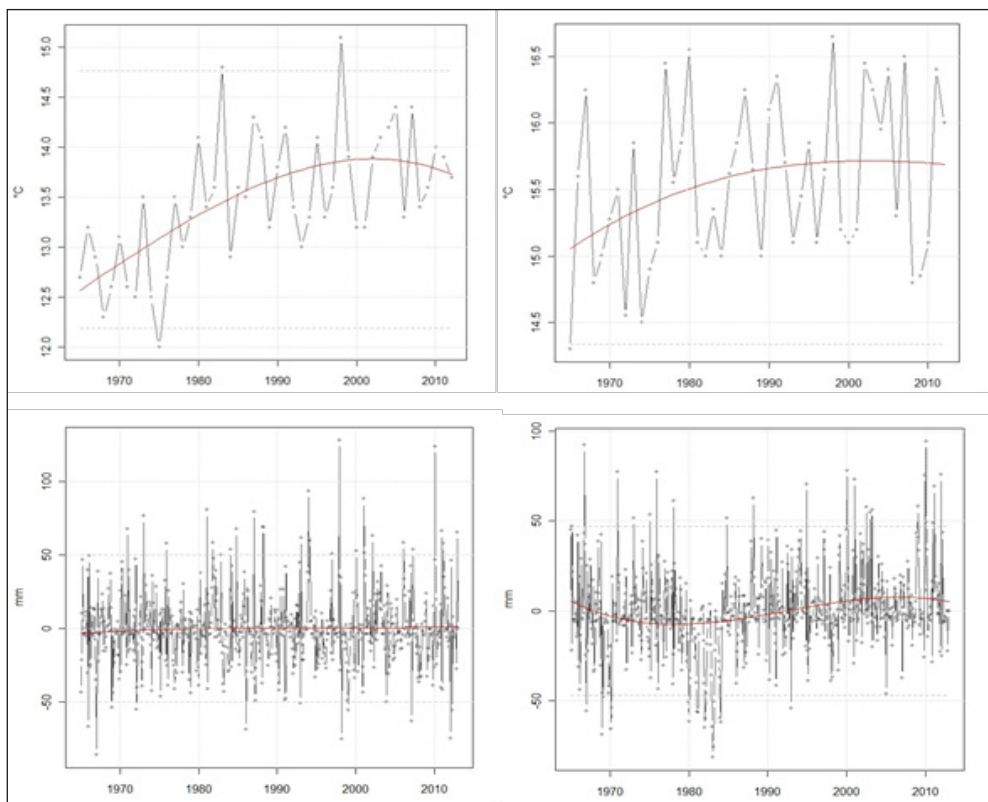


Figura 3. Temperatura del aire y anomalía de precipitación mensual, período 1965-2012. Estaciones granja Kcayra (izquierda) y Urubamba (derecha), departamento de Cusco, Perú

Las series de precipitación (3 c y d) tuvieron dos efectos diferentes debido a los ENOS extraordinarios, 1982/83 se caracterizó por ser seco y 1997/98 fue relativamente húmedo. A diferencia de la temperatura, las series de precipitación presentan una alta variabilidad temporal en granja Kcayra y Urubamba y se identifican, en general, períodos húmedos alternados con secos. Desde mediados de los 80 las series climáticas se caracterizan por presentar períodos húmedos fuertes y recurrentes con una tendencia de disminución de los períodos secos, principalmente en Urubamba.

Validación de los GCMs 1971-2000

La circulación de vientos a 200 hPa y la temperatura del aire a 500 hPa de los modelos CCSM4, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR es comparada con sus respectivos reanálisis ERA 40 y la precipitación regional con el CMAP, en los trimestres SON, DEF, MAM del período correspondiente a 1971-2000, [Tabla 2, 3 y 4](#) y [Figuras 4 y 5](#).

En SON, algunos modelos no capturan el reacomodo del patrón de circulación de la Alta de Bolivia (AB) sobre Sudamérica, a excepción del CCSM4 que sí configura la AB.

En DEF y MAM, el modelo HadGEM2_ES configura al sur de los 20 °S los flujos de viento zonal de dirección oeste y la posición del núcleo del AB alrededor de 15 °S - 65 °W, similar al patrón de viento zonal del ERA40.

El modelo HadGEM2_ES es el que mejor representa la circulación atmosférica a 200 hPa y 500 hPa, siendo similar al ERA40 en gran parte de los trimestres analizados.

En SON, DEF y MAM 1971-2000, el modelo global CCSM4 en relación al resto de modelos evaluados, es el que mejor representa el patrón de temperatura a 500 hPa sobre Sudamérica, [Figura 5](#). Asimismo, en SON y DEF representa mejor el patrón

de temperatura a 700 hPa sobre los océanos Pacífico sur y Atlántico sur. Excepto en MAM sobre el Pacífico norte, Centroamérica y parte de Norteamérica. Este comportamiento es cuantificado y expresado en términos de error o bias, [Figura 5](#).

Coherencia de los GCMs y relaciones a futuro 2016-2045

Los modelos evaluados en SON 2016-2045 no configuran coherentemente el sistema anticiclónico AB a 200 hPa comparado con su patrón ERA40 1971-2000. A diferencia del modelo CCSM4, que configura la AB sobre continente y océano, indicando menores cambios de la circulación atmosférica a futuro. Asimismo, en DEF el CCSM4 es el que mejor se aproxima a su comportamiento patrón. En MAM el modelo HadGEM2_ES configura la AB y los flujos de viento de componente oeste próximo a ERA40, [Figura 6](#).

Los modelos evaluados en todos los trimestres analizados muestran un consistente aumento de la temperatura a 500 hPa en el futuro, [Figura 7](#). El modelo MPI-ESM-LR guarda coherencia espacial respecto a su patrón ERA40 1971-2000, indicando menores incrementos a diferencia de los modelos CCSM4 y el HadGEM2_ES.

En sus relaciones potenciales en el futuro 2016-2045, la circulación promedia de AB del modelo HadGEM2_ES se desplaza hacia el sector norte, y predominan los flujos de viento de dirección oeste sobre el sector centro y sur de Perú con el ingreso de aire frío seco y sus efectos posibles sobre el incremento de heladas en SON en respuesta a la dirección de flujo predominante. La divergencia de flujo de viento se configura sobre el sector centro y sur de la sierra en DEF, que propiciaría el incremento de la precipitación respecto al patrón CMAP. Los flujos de viento del modelo en MAM configura la circulación de AB propicia para

Tabla 2. Validación de modelos globales CMIP5, Circulación atmosférica regional a 200 hPa (~ 12 km) en Sudamérica, período 1971-2000

	REANÁLISIS - ERA40	CCSM 4	HadGEM2_ES	MPI-ESM-LR
SON	Se configura la circulación antihoraria Alta de Bolivia (AB) con núcleo alrededor de 7°S y 63°W y la presencia de la Vaguada del Noreste de Brasil (VNB) en su lado oriental favorecen el inicio del período de lluvias en la sierra y selva de Perú. Una dorsal con eje al noreste de Perú es identificada. Sobre la región sur andina los flujos son del noroeste, tornándose progresivamente del oeste y más intensos a latitudes mayores.	Se identifica un sistema de flujo antihorario difluente que genera una amplia dorsal con eje desde el noreste de Perú hasta Paraguay. La VNB presenta posición y configuración similar a ERA40. Los flujos del oeste a latitudes mayores son identificados.	Los flujos de HadGEM2_ES son cercanos al modelo CCSM4 con la diferencia de que el eje de la dorsal se encuentra desplazado más hacia el oeste; la VNB guarda la misma configuración. Sin embargo, muestra menor aglomeración en continente.	El núcleo del AB está posicionado sobre sector central de Perú y Brasil, aporta difluencia hacia sur y el este de Sudamérica apoyando la conformación de la VNB pero con mayor ondulación respecto al ERA40.
200hPa DEF	El núcleo del AB se ubica entre 12 °S - 13 °S y 65 °W - 68 °W con amplias zonas de divergencia al norte de Sudamérica mientras que la VNB domina todo el sector oriental, la interacción de estos sistemas favorecen el desarrollo de sistemas convectivos con ocurrencia de precipitaciones sobre el norte de Chile y Bolivia así como el centro, sur de Perú. Al norte de Perú se localizan flujos del oeste que generan subsidencia en su costa.	Las configuraciones de los sistemas y las intensidades de los flujos son muy cercanas a ERA40. La ubicación del AB y la vaguada toman posiciones muy parecidas.	Representa configuración muy parecidas al reanálisis ERA40.	La diferencia notable respecto a ERA40 es la amplitud de la AB que se configura más elongada.
MAM	El núcleo del AB se desplaza al norte a 6°S y 60°W, esta configuración favorece precipitaciones en Colombia, Venezuela, Centro América y norte de Perú. En tanto, en el sur de Perú predominan los flujos del noroeste-oeste que limitan la precipitación. Desde el sector sureste del AB se proyectan divergencias hacia el norte del continente.	Se identifica el sistema anticiclónico al este de Brasil y es notable el flujo del este que va dejando divergencia al norte y sur del Ecuador.	La ubicación del AB y las regiones de divergencia son cercanas a ERA40.	La AB no es configurada, una dorsal seguida de una vaguada predomina hacia el centro y este del continente.

Tabla 3. Validación de modelos globales CMIP5, Circulación atmosférica regional 500 hPa (~ 5 km) en Sudamérica, periodo 1971-2000

		REANÁLISIS - ERA40	CCSM 4	HadGEM2_ES	MPI-ESM-LR
SON		El núcleo anticiclónico se ubica a 10°S y 58°W hacia el noreste de Bolivia. Se configuran flujos del oeste hacia el sur del continente. Una tenue dorsal se proyecta sobre Ecuador y norte de Perú.	El núcleo anticiclónico se encuentra en 20°S y 65°W desplazado hacia el sur de Bolivia y con una orientación mucho más zonal.	El núcleo anticiclónico es ubicado al sureste a 15°S y 55°W. Los flujos zonales o oestees son muy similares al ERA40.	El núcleo anticiclónico esta posicionado hacia el este en relación al ERA40. La dorsal sobre Ecuador y norte de Perú desaparece en relación a ERA40.
500hPa	DEF	Sobre Sudamérica se proyecta una dorsal con eje sureste-noroeste hacia centro de Brasil. La vaguada invertida de onda corta se posiciona sobre centro – norte de Perú. Los núcleos anticiclónicos se ubican sobre los océanos Pacífico y Atlántico.	La vaguada sobre Bolivia se desplaza hacia el sureste entre Paraguay-Uruguay; los centros anticiclónicos sobre los océanos Pacífico y Atlántico son bien configurados.	La vaguada sobre Bolivia es similar a ERA40; en tanto la dorsal es muy inclinada con eje sobre el norte de Perú – sureste de Brasil. Sobre los océanos Pacífico y Atlántico se configuran bien los núcleos anticiclónicos.	Las posiciones de los centros anticiclónicos en los Océanos Pacífico y Atlántico son similares al ERA40; la dorsal sobre noroeste de Brasil tiene un eje similar a ERA40 así como la vaguada al sureste de Bolivia.
	MAM	Se configuran los núcleos anticiclónicos sobre el océano Pacífico y océano Atlántico con orientaciones muy zonales; una discreta vaguada se ubica sobre Bolivia.	Se tiene un amplio centro anticiclónico posicionado sobre Bolivia y sur de Perú que no se configura en ERA40. Los flujos del este predominan sobre el norte y centro de Perú.	La circulación y configuración de la atmósfera son cercanas al ERA40, caracterizados por un sistema anticiclónico hacia el océano Atlántico cuya dorsal se introduce desde el sector este de Brasil.	Los núcleos anticiclónicos frente a la costa sur de Perú, sobre el Atlántico frente a la costa de Brasil, y los flujos del este sobre el centro-sur de Perú son configurados.

Tabla 4. Validación de modelos globales CMIP5, Precipitación regional (Sudamérica)

		CMAP	CCSM 4	HadGEM2_ES	MPI-ESM-LR
SON		Sobre el continente al norte de Perú y en Colombia se concentran las precipitaciones. Sobre el océano Pacífico, en la región de la ZCIT, ocurre la mayor actividad convectiva.	Las precipitaciones en la ZCIT son cercanas a CMAP, aunque más acentuadas sobre Colombia, sur de Perú, noroeste de Brasil y centro-sur de Bolivia.	Sobre el continente las precipitaciones son mayores en relación a CMAP; principalmente en Ecuador y Colombia.	Los patrones de precipitación son cercanos a CMAP, excepto hacia el sur de Perú donde es sobrestimada.
En superficie	DEF	Las precipitaciones en la región de la ZCIT disminuyen con una posición desplazada hacia el sur en relación a SON. Sobre el continente las precipitaciones se concentran al norte y centro de Perú y en la Hoya Amazónica de Brasil.	Las mayores precipitaciones se concentran sobre el centro y sur de Perú, suroeste de Bolivia y norte de Argentina y sobrestiman a CMAP.	Las mayores precipitaciones se localizan en territorio de Perú y centro de Brasil superando a lo mostrados por CMAP.	Las precipitaciones en continente superan a CMAP, principalmente al sur de Perú y centro de Brasil.
	MAM	Las mayores precipitaciones se concentran al noreste de Brasil, sur de Colombia y norte de Perú. La ZCIT se ubica al norte del Ecuador.	Las mayores precipitaciones se localizan al norte de Brasil y hacia el sur de Perú.	Las precipitaciones son similares a CMAP en magnitud y extensión geográfica al noreste de Brasil, sobre gran parte de Perú y centro - norte de Bolivia; el litoral noreste de Brasil; océano Atlántico.	Las precipitaciones en general se muestran relativamente menores a CMAP sobre el continente. A excepción del noreste de Perú y suroeste de Colombia.

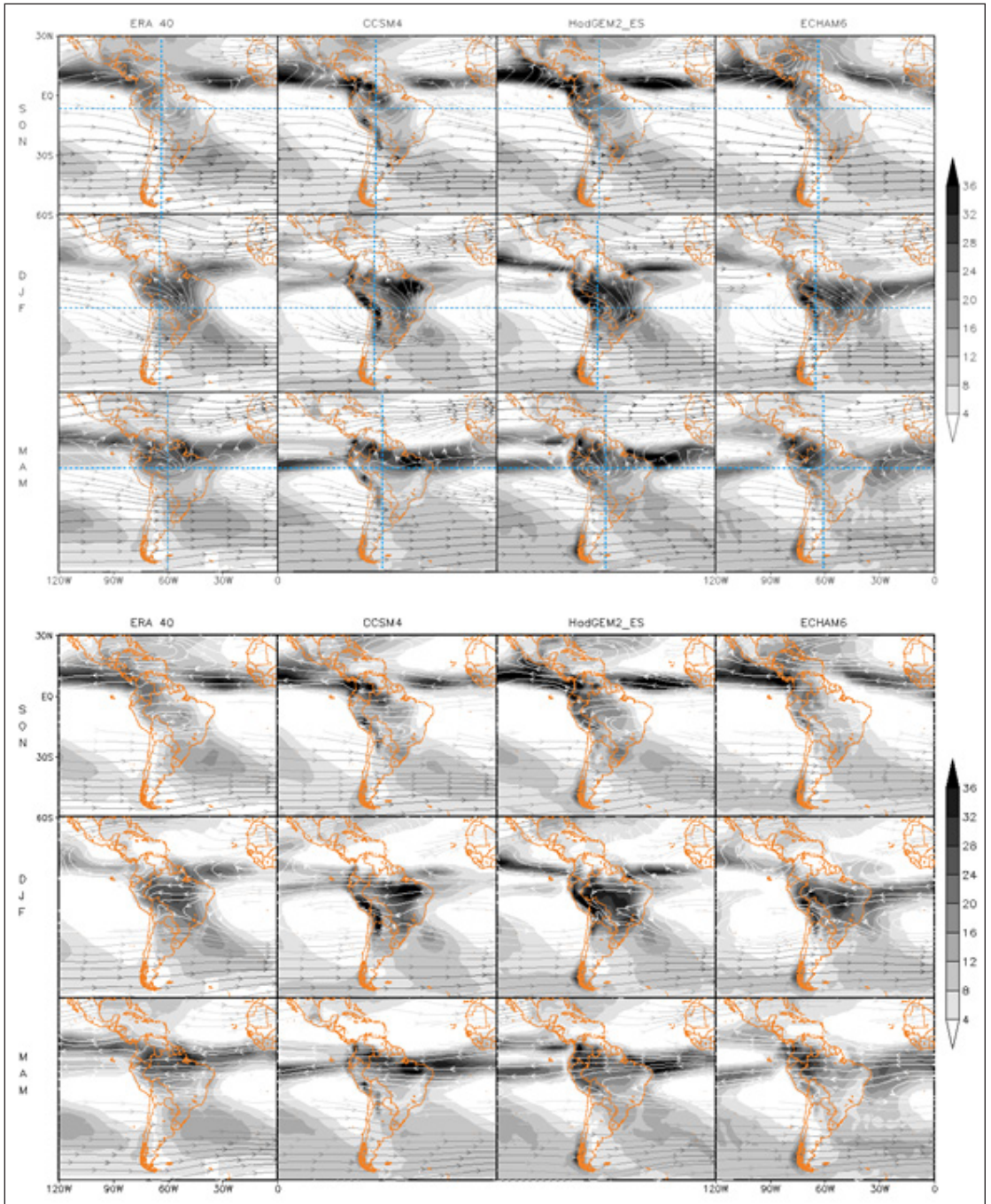


Figura 4. Mapa de líneas de corriente a 200 hPa (arriba) y a 500 hPa (abajo) para primavera (SON), verano (DEF) y otoño (MAM) 1971-2000, Reanálisis ERA40, modelos CCSM4, HadGEM2_ES, MPI-ESM-LR (ECHAM6). Precipitación en sombras fuente CMAP. La barra indica la velocidad de las líneas de corriente (m/s) y la magnitud de la precipitación (mm/día). La intersección de las líneas entrecortadas color celeste indica la ubicación del núcleo de la Alta de Bolivia a 200 hPa

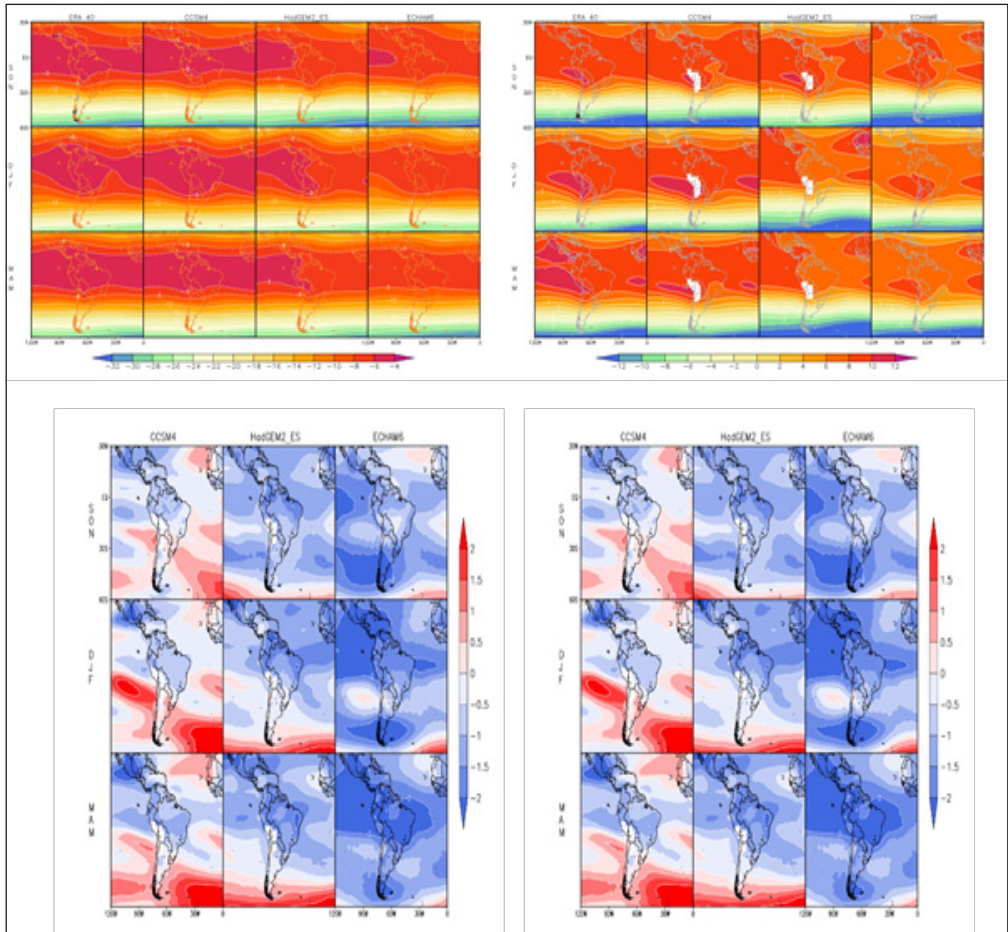


Figura 5. Temperatura del aire a 500 y 700 hPa del Reanálisis ERA40 y modelos CCSM4, HadGEM2_ES, MPI-ESM-LR (ECHAM6) para primavera (SON), verano (DEF) y otoño (MAM) 1971-2000 (arriba). Error de la temperatura a 500 y 700 hPa de los modelos (abajo). Las barras de colores indican la magnitud de temperatura y del error (°C)

la precipitación, que va a depender de la cantidad de humedad disponible a futuro en niveles medios de la atmósfera, [Figura 6](#).

El incremento de la temperatura a 500 hPa de CCSM4 en el futuro se configura sobre el sector norte y en el océano Pacífico en todos los trimestres analizados, sobre los sectores centro y sur de Perú en SON - MAM y sobre el sector sur de Perú en DEF que, entre otras causas aparentes, estaría asociado a la sensibilidad del modelo CCSM4 en respuesta al escenario de alta

emisión de GEI (RCP 8,5), a la expansión de la atmósfera debido al calentamiento en superficie y al ingreso de ondas del este en niveles medios que estarían advectando aire cálido y húmedo ([Figura 7](#)).

Todos los modelos configura el ciclo anual de precipitación en superficie y la temperatura en altura en el futuro, mas no la magnitud. Los modelos MPI-ESM-LR y HadGem2_ES subestiman a su periodo de control en casi todos los meses del ciclo anual. Mientras, CCSM4 subestima

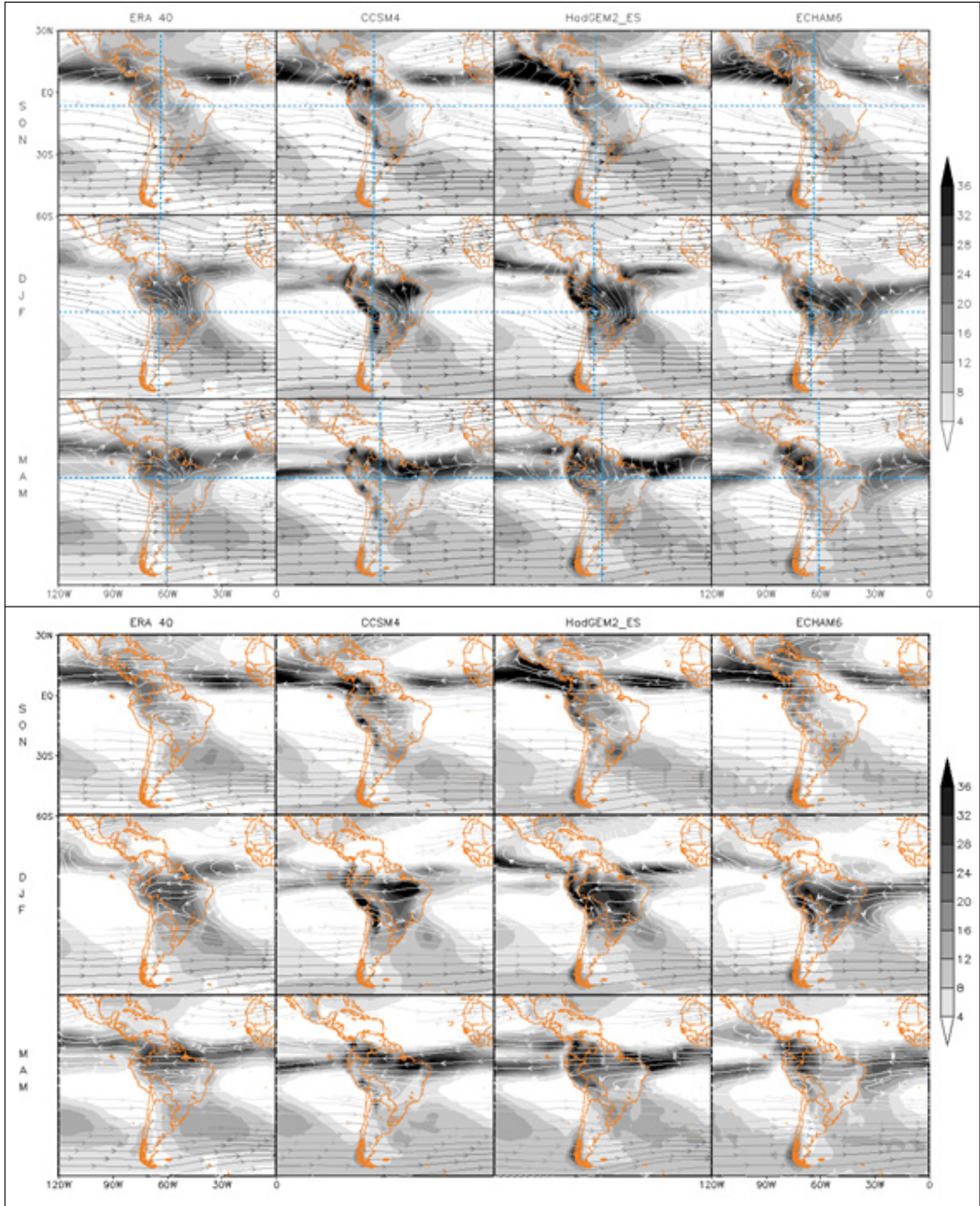


Figura 6. Líneas de corriente a 200 hPa (arriba), 500 hPa (abajo) y precipitación asociada para primavera (SON), verano (DEF) y otoño (MAM) 2016-2045, escenario de alta emisión RCP 8,5, modelos CCSM4, HadGEM2_ES y MPI-ESM-LR (ECHAM6) y reanálisis ERA40 1971-2000. Precipitación en sombras fuente CMAP 1979-2000. La barra indica la velocidad de las líneas de corriente (m/s) y la magnitud de la precipitación (mm/día). La intersección de las líneas entrecortadas de color celeste indica la ubicación del núcleo de la Alta de Bolivia (AB) por los diferentes modelos

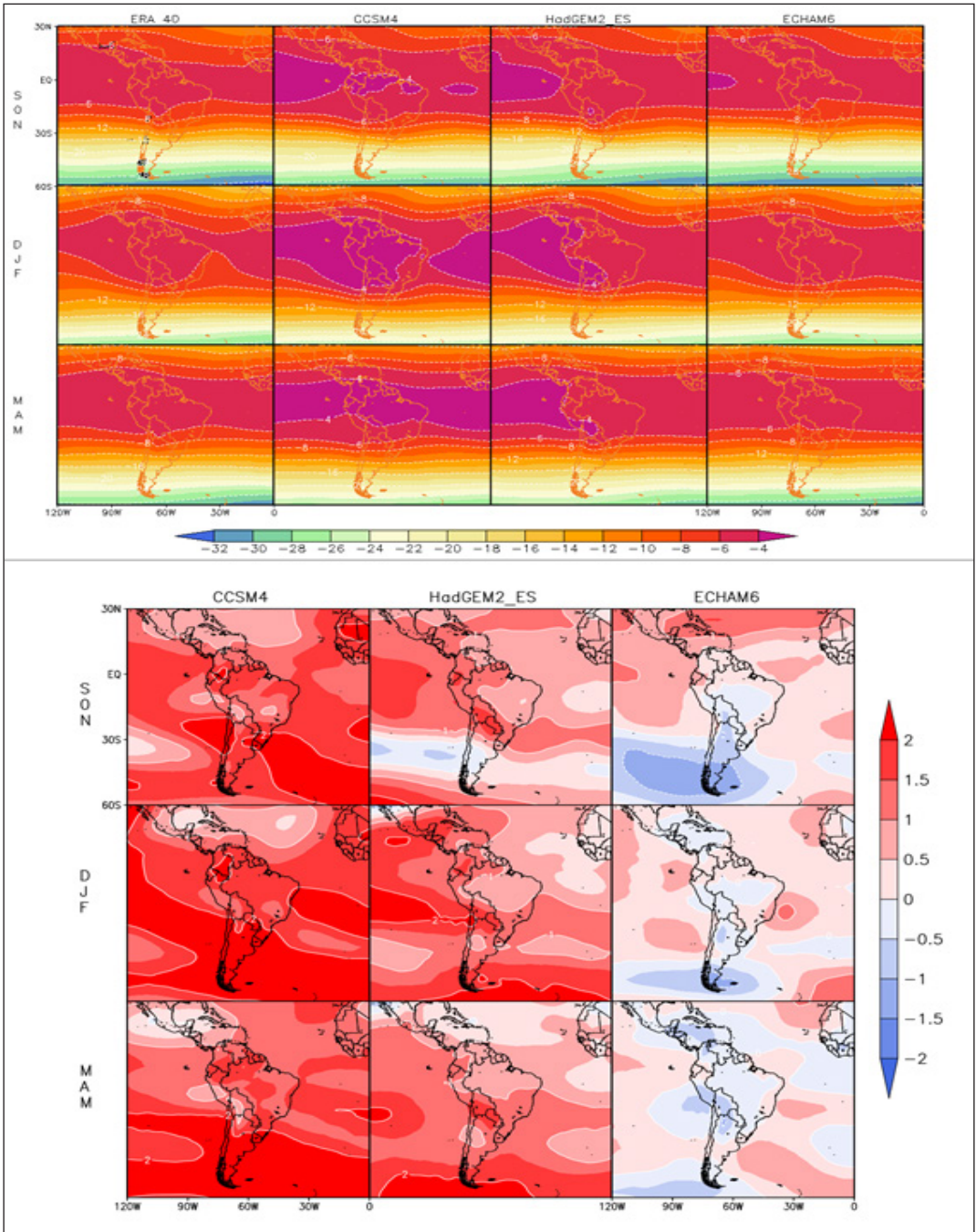


Figura 7. Temperatura a 500 hPa modelos CCSM4, HadGEM2 ESM, MPI-ESM-LR (ECHAM6) para primavera (SON), verano (DEF) y otoño (MAM), período 2016-2045, escenario de alta emisión RCP 8,5 y reanálisis ERA40 del período 1971-2000 (arriba). Error de la temperatura a 500 hPa 2016-2045 relativo a ERA40 1971-2000 (abajo). Las barras de colores indican la magnitud de temperatura y del error en °C

la precipitación en ocho meses del ciclo anual. Con respecto al rango de variabilidad mensual de temperatura, los modelos MPI-ESM-LR, seguidos del CCSM4 y HadGem2_ES, muestran una señal clara y consistente de aumento de la temperatura respecto a su período de control (Figura 8).

Todos los modelos indican acuerdo del cambio de la temperatura (500 hPa) hacia un incremento en todos los trimestres analizados 2016-2045 respecto al reanálisis (REF). El modelo MPI-ESM-LR es el que presenta menores cambios de la temperatura a futuro en SON (1) y DEF (2) reflejados en las estadísticas más próximas al reanálisis (REF) en el Diagrama de Taylor de la Figura 9.

En el periodo 1971-2000, los modelos MPI-ESM-LR y HadGem2_ES sugieren una disminución de la confianza de la temperatura respecto a REF en MAM (3), SON (1) y DEF (2). Sin embargo, el modelo CCSM4 y el promedio de los modelos, presentan temperaturas próximas a REF indicando, en las estadísticas de Taylor, una mayor confianza.

Con respecto a la precipitación regional escenario RCP 8,5, todos los modelos evaluados en la región surandina de Perú, indican cambios de precipitación de $\pm 10\%$ comparable con el rango de variabilidad normal actual de $\pm 15\%$ en los trimestres SON, DEF y principalmente en MAM (Figura 10).

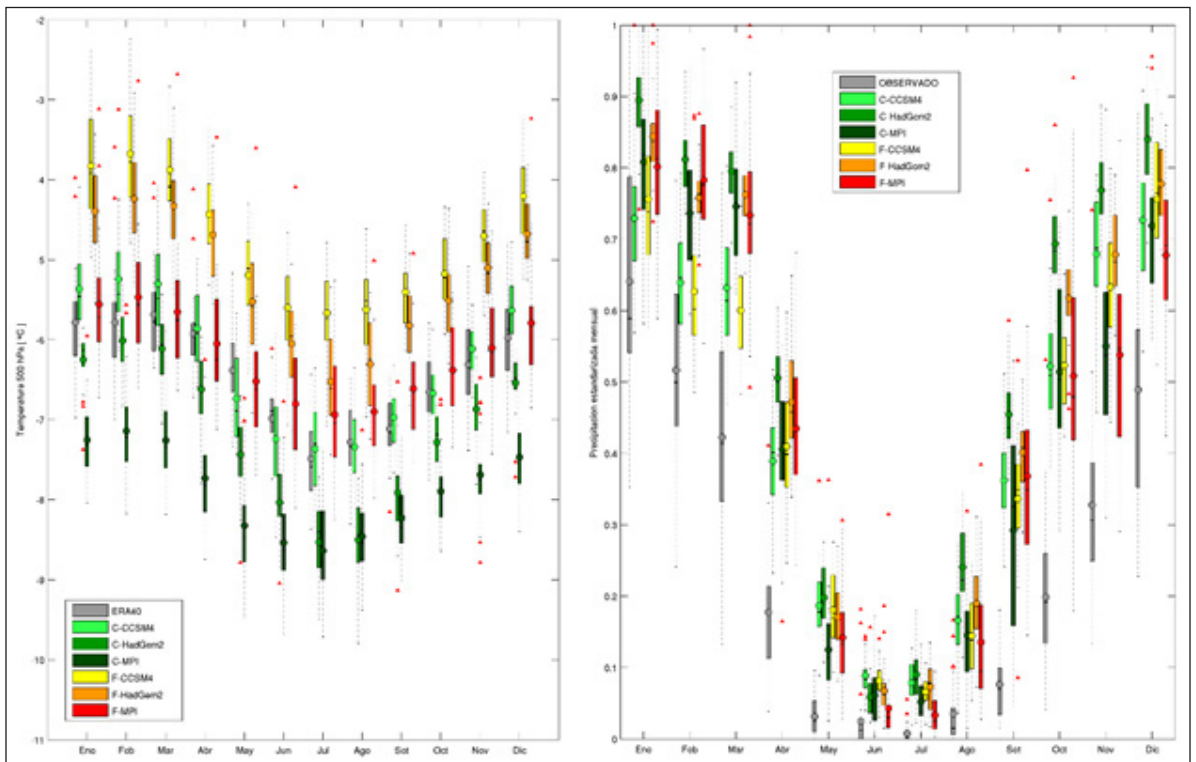


Figura 8. Ciclo anual de la temperatura a 500 hPa período 1971-2000 y 2016-2045 en el área de la región predictora (10°N-30°S, 40°W-110°W) comparado con el reanálisis ERA 40 (Diagrama de cajas) y precipitación normalizada en las grillas próximas a las localidades de estudio (derecha) comparada con el promedio de la data observada en la estación convencional. Las letras C y F antepuestas en los acrónimos de los modelos significan el periodo de control y futuro, respectivamente

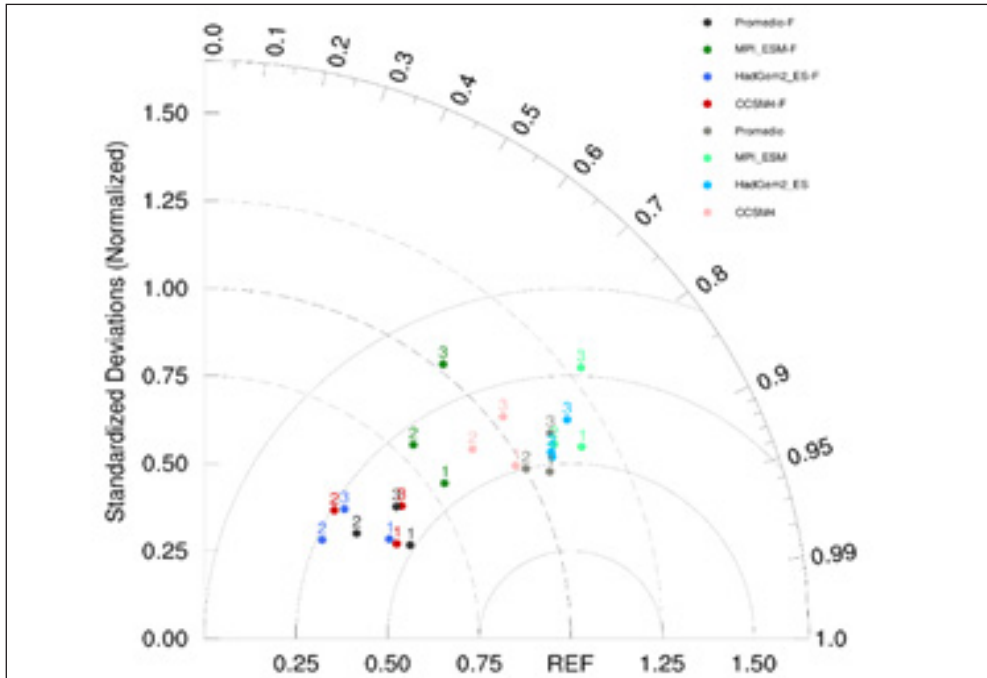


Figura 9. Estadísticos de temperatura (500 hPa) de los modelos CCSM4 (NCAR), HadGem2-ES (Hadley Center), MPI-ESM-LR (Instituto Max Planck) en el Diagrama de Taylor. La coordenada radial indica la magnitud de la desviación estándar respecto a su patrón; los semicírculos concéntricos indican el valor de la Raíz Cuadrada del Error Cuadrado Medio, la coordenada angular muestra la correlación del modelo con sus observaciones. La numeración 1,2,3 indica las estaciones SON, DEF, MAM, los colores suaves el período 1971-2000 y los colores fuertes el período 2016-2045. REF es la data de referencia del reanálisis ERA40

Escenario locales de temperatura y precipitación en los Andes centrales

Los cambios de temperatura y precipitación 2016-2045 en superficie, comparados con el período 1971-2000, para las localidades de granja Kcayra y Urubamba, ubicadas en el sector sur del territorio, desde los diferentes modelos regionalizados (CCSM4, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR), son mostradas en la [Tabla 5](#) y en la [Figura 11](#).

En SON, los modelos regionalizados presentan acuerdo en el incremento moderado de la temperatura y la reducción importante de la precipitación 2016-2045, en ambas localidades de estudio. En DEF y MAM, los modelos indican acuerdo en el

incremento moderado de la temperatura y una amplia variabilidad de la precipitación en DEF en granja Kcayra y en MAM en Urubamba.

Los resultados, en general, sugieren un incremento de la temperatura de 0,2 a 0,5 °C en SON, DEF, MAM, una drástica disminución de la precipitación de 65% a 69% en SON (período de inicio de las lluvias), el incremento de la precipitación con amplio rango de 7% a 60% en DEF (período de mayores lluvias) y una disminución de 6% a 30% en MAM (período de finalización de lluvias). Indicando, en general, en las localidades de estudio, un clima cálido-seco en el 2016-2045 relativo al período 1971-2000.

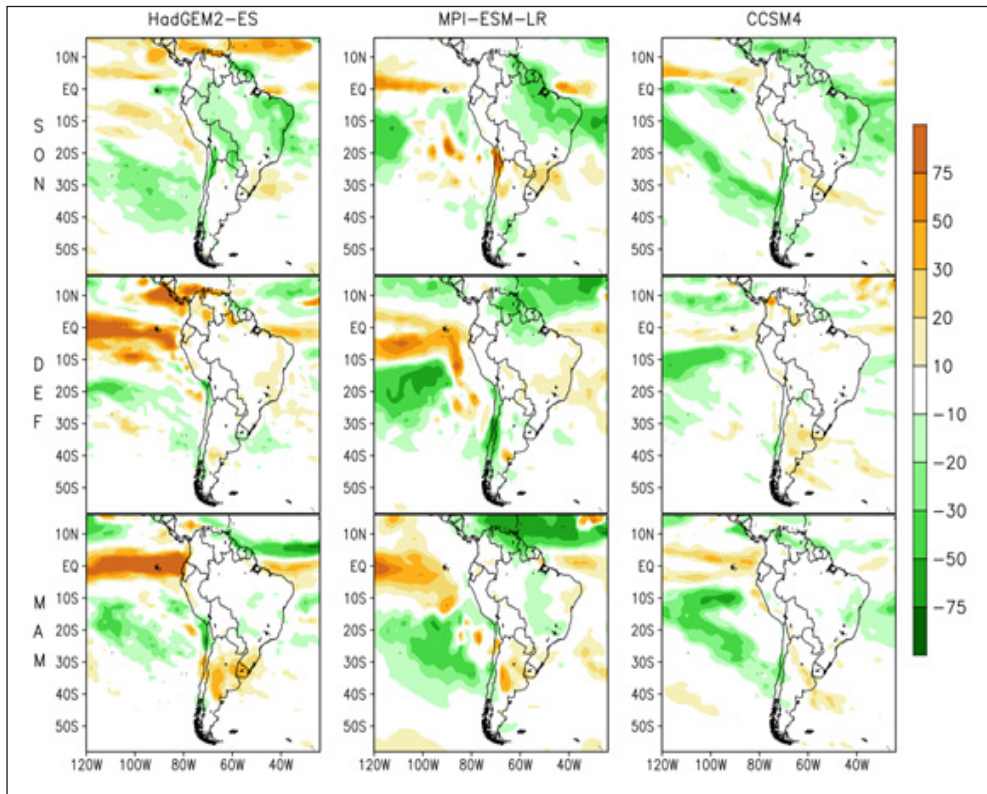


Figura 10. Cambios de la precipitación regional (%) 2016-2045 de los Modelos de CCSM4, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR, escenario RCP 8,5 relativo a 1971-2000

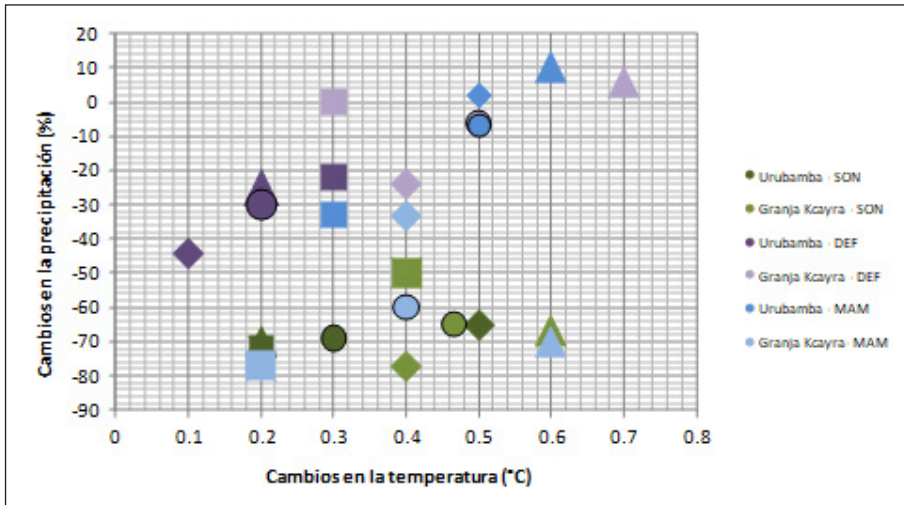


Figura 11. Cambio en la precipitación (%) y temperatura del aire (°C) promedio estacional 2016-2045 relativos a 1971-2000 para las localidades de Urubamba (círculo de tonalidad oscura y contorno negro) y granja Kcayra (círculo de tonalidad suave y contorno negro). Los cambios para los modelos CCSM4 (rombo), HadGEM2-ES (triángulo) y MPI-ESM-LR (cuadrado) son representados para las estaciones SON (verde), DEF (lila) y MAM (celeste)

Tabla 5. Cambios en la precipitación (Δ RR %) y temperatura del aire (Δ Ta °C) a escala local para SON, DEF, MAM y promedio del período 2016-2045

	LOCALIDAD	CAMBIOS	CCSM4	HadGEM2-ES	MPI-ESM-LR	Promedio	
SON	Urubamba	Δ RR	-65	-70	-72	-69	
		Δ Ta	0,5	0,2	0,2	0,3	
	Granja Kcayra	Δ RR	-77	-67	-50	-65	
		Δ Ta	0,4	0,6	0,4	0,5	
DEF	Urubamba	Δ RR	-22	-25	-44	-30	
		Δ Ta	0,3	0,2	0,1	0,2	
	Granja Kcayra	Δ RR	-24	6	0	-6	
		Δ Ta	0,4	0,7	0,3	0,5	
MAM	Urubamba	Δ RR	2	10	-33	-7	
		Δ Ta	0,5	0,6	0,3	0,5	
	Granja Kcayra	Δ RR	-33	-70	-77	-60	
		Δ Ta	0,4	0,6	0,2	0,4	
	Urubamba	Δ RR	-45	-44	-42	-44	
		Δ Ta	0,4	0,3	0,2	0,3	
	Granja Kcayra	Δ RR	-28	-28	-50	-35	
		Δ Ta	0,4	0,6	0,3	0,5	
Promedio					Prom	-44	
		Δ RR	-37	-36	-46	Máx	-69
						Mín	-6
					Prom	0,4	
	Δ Ta	0,4	0,5	0,3	Máx	0,5	
					Mín	0,2	

4. Conclusiones

Todos los modelos evaluados a escala regional y en grillas próximas a las localidades de estudio reproducen el ciclo anual de la temperatura 500 hPa y la precipitación en el periodo 1971-2000. A futuro, no muestran cambios en el ciclo anual, pero un consistente aumento de la temperatura sobre el área predictora es identificado en todos los meses del ciclo anual y la reducción de precipitación en las grillas próximas a las localidades de interés.

5. Agradecimiento

Este artículo fue realizado en el marco del Programa de Adaptación al Cambio Climático - PACC, iniciativa de la Cooperación Bilateral Peruano Suiza

(Ministerio del Ambiente y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - Cosude) y la colaboración del Ing. Met. Wilmer Pulache Vélchez.

5. Literatura citada

- Acuña, D.; Llacza, A.; Cubas, F.; Jácome, G.; Díaz, A.; Avalos, G. 2012. Escenarios de cambio climático en las regiones Cusco y Apurímac: precipitación y temperatura 2030 y 2050. *Senamhi-PACC*, 131: 25-39.
- Barreto, C. 2013. Informe de Códigos de programas para el análisis del ciclo anual y estacional, de los modelos globales y regionales. Proyecto de apoyo al fortalecimiento de capacidades regionales en la gestión

- de cambio climático. BID, Senamhi-Minam. Lima, Perú.
- Benestad, R.; Chen, D.; Hanssen-Bauer, I. 2007. Empirical –Statistical Downscaling. Norwegian Meteorological Institute. 272 p.
- Brunet, M. 2009. The WMO Mediterranean Data Rescue (MEDARE) initiative. In: ACRE data and data visualisation meeting. Exeter Meeting, 15 September 2009. Available at www.met-acre.org/meetings-and-workshops-1/acre-dataand-visualisation-meeting.
- ECMWF [European Centre for Medium-Range Weather Forecasts]. 2009. Meteorological parameters table 128: stan - dard. ECMWF, Reading. Available at www.ecmwf.int/services/archive/d/parameters
- Huggel, C.; Rohrer, M.; Calanca P.; Salzmann, N.; Vergara, W.; Quispe, N.; Ceballos, L. 2012. The “Last Mile” of Adaptation, *Eos* 93 (22).
- Jacques, M. 2009. Caracterización del salto climático de mediados de los 1970 en Sudamérica. Tesis de Magister en Ciencias, mención Geofísica. 149 p.
- Minvielle, M.; Garreaud, R. 2011. Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano 4577- 4583. *Journal of Climate*, 24.
- Salzmann, N. 2009. Integrated assessment and adaptation to climate change impacts in the Peruvian Andes. *Adv. Geosci* 22: 35-39.
- Uppala, S.M.; Kållberg, P.W.; Simmons, A.J.; Andrae, U. 2005. The ERA-40 re-analysis. *QJR Meteorol Soc* 131: 2961-3012.
- Urrutia, R.; Vuille, M. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of geophysical research*, 114, D02108. doi:10.1029/2008JD011021, 2009.
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.* 106: 7183-7192.
- Xie, P.; Arkin, P.A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78: 2539-2558.