



## Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno).

## Climate change scenarios using regional models for the Peruvian Altiplano (Department of Puno)

JANEET SANABRIA<sup>1</sup>, JOSE MARENGO<sup>2</sup> & MARIA VALVERDE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Casilla 11 1308, Lima 11, Perú.

jsanabria@senamhi.gob.pe

<sup>2</sup> Centro de Ciencias do Sistema Terrestre-INPE. Rodovia Presidente Dutra, Km 40, 12630-000 Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil.

### Resumen

El Altiplano peruano (Departamento de Puno) es considerado una de las zonas más sensibles y perturbadas por la variabilidad climática con implicancias en las actividades del sector agropecuario, hidroeléctrico, minero, etc. En el futuro por el posible cambio climático la vulnerabilidad y las condiciones de vida en general serían afectadas, principalmente la actividad agropecuaria que es el principal sustento de la población. Tomando en cuenta estos aspectos este trabajo tiene como objetivo evaluar y tener una aproximación de los posibles cambios futuros en la precipitación y temperatura. Para esta evaluación del cambio climático futuro (período 2071 – 2100) en el Altiplano peruano se utilizaron tres modelos climáticos regionales (ETA CSS, HadRM3 y REgCM3) y se analizaron las variables de precipitación y temperatura. Inicialmente, se validó el clima presente (1961-1990) de estos tres modelos, en relación a la climatología observada y posteriormente se analizaron sus proyecciones futuras (2071-2100). Los resultados de la validación mostraron que el modelo HadRM3 fue el que presentó mejor desempeño en la simulación de la precipitación sobre el Altiplano Peruano, representando mejor la estacionalidad y el ciclo anual de la precipitación con menores errores en relación a los otros dos modelos (ETA CSS y REgCM3), y subestimando la media mensual en 2mm/día. En la temperatura los modelos ETA CSS y HadRM3, también simularon el ciclo anual y la estacionalidad, el primero relativamente mejor que el segundo, ambos subestimándola con errores de media mensual de 4°C y 5°C, respectivamente. Los modelos HadRM3 y ETA CSS por ser los que más se aproximaron a lo observado, los posibles cambios climáticos futuros se basaron en los resultados de estos dos modelos. Entonces, en el futuro 2071 – 2100, la precipitación proyectada por el modelo HadRM3 en el escenario A2 (altas concentraciones de CO<sub>2</sub>) mostró incrementos de precipitación de hasta 2mm/día principalmente en la época lluviosa (SON y DEF), y en el escenario moderado B2 (bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>) similares al patrón actual. Por otro lado, la temperatura proyectada, obtenida de la media aritmética de los modelos HadRM3 y el ETA CSS simularon para los escenarios A2 y B2 incrementos entre 2°C a 4°C, más aún al norte de lago con incrementos de hasta 6°C.

**Palabras Claves:** Escenarios Climáticos, Altiplano Peruano, Modelo HadRM3

### Abstract

The Peruvian Altiplano (Puno) is considered as one of the most sensitive and disturbed areas in relation to the climate variability, which affects activities in the agricultural, hydroelectric, mining etc. sectors. In the future, the possible climate change would affect the vulnerability and the general living conditions, particularly the agricultural activity, which constitutes the principal livelihood of the population in this region. Considering these aspects, the object of this study is to evaluate and to obtain the approximation of possible future changes in precipitation and temperature. In order to assess the future climate change (period from 2071 to 2100) in the Peruvian Altiplano region, three regional climate models were utilized (ETA CSS HadRM3 and RegCM3) and the variables precipitation and temperature were analyzed. At first, the present climate (1961-1990) of these three models was validated with respect to the observed climatology. Afterwards, their future projections (2071-2100) were analyzed. Validation results showed that the HadRM3 model presents the best efficiency in simulating precipitation over the Peruvian Altiplano, representing better the seasonality and the annual precipitation cycle with fewer errors compared to the other two models (ETA CSS and RegCM3), and underestimating the monthly mean by 2mm/day. For temperature, the ETA CSS and the HadRM3 models also simulated the annual cycle and seasonality; the first model did it relatively better than the second. Both models underestimated temperature by mean monthly error of 4°C and 5°C respectively. Since the HadRM3 and the ETA models reproduce better observed variables, the projection of the possible future climate changes is based on the outputs of these two models. Accordingly, in the future 2071 - 2100, precipitation projected by the HadRM3 model under the A2 scenario (high concentrations of CO<sub>2</sub>) shows increment of up to 2mm/day, mainly in the rainy season (SON and DJF). Under the moderate B2 scenario (low CO<sub>2</sub> concentrations) it is similar to the current pattern. Future temperature, obtained from the arithmetic mean of the ETA CSS and HadRM3 models, shows an increase of 2°C to 4°C under A2 and B2 scenarios, that is particularly strong to the north of the Lake, with values of up to 6 °C.

**Keywords:** Climate scenarios, Peruvian Altiplano, HadRM3 model.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es definitivamente uno de los temas más relevantes de la agenda ambiental internacional actual, que atraviesa la economía, el comercio y las decisiones políticas en este nuestro mundo globalizado. Todo eso sugiere que el cambio climático puede afectar el desarrollo de los países y que puede tener grandes impactos en los países tropicales de América Latina. La región Andina y, en consecuencia, los países localizados dentro de ella están entre los más afectados por las consecuencias del cambio climático.

Considerando tendencias climáticas observadas de largo plazo, en los Andes Peruanos, la precipitación total anual y estacional presenta características regionales, y los factores locales condicionan comportamientos diferenciados con o sin dependencia de las variaciones interanuales asociadas a El Niño o La Niña (SENAMHI 2009 a). Así las tendencias observadas muestran aumentos sistemáticos en la lluvia en la vertiente occidental de la sierra, así como reducciones en parte de la vertiente oriental de la sierra sur y central (SENAMHI 2009a,c, SENAMHI 2007). Evaluaciones de los extremos climáticos de precipitación establecen que la región de la sierra central como un área homogénea con una clara tendencia a una disminución de eventos extremos de lluvia, mientras que la sierra norte se detecta un incremento de días extremadamente lluviosos. Se observa una disminución de los días fríos principalmente en la sierra sur y aumento de los días cálidos en toda la sierra. Se detecta un patrón de calentamiento en las partes altas, más intenso en relación a las partes baja y media de la vertiente occidental central (cuenca del río Santa), con tendencias de hasta  $+0.07$  °C por año (SENAMHI 2009c, SENAMHI, 2005b).

A pesar de los escasos estudios realizados sobre variabilidad y el cambio de clima en la realidad andina peruana, existen incuestionables evidencias de los severos impactos de los extremos del clima que están ocurriendo o que pueden ocurrir en la región. Por eso, es de crucial importancia invertir en investigaciones para evaluar con mayor certeza los cambios del clima en los

ecosistemas andino amazónicos, y sus efectos en la biodiversidad, agricultura y pecuaria, infraestructura económica y social, generación de hidroelectricidad, turismo, entre otros sectores a ser afectados. Estudios de evaluación de escenarios de cambio climático para Sudamérica se hicieron con los modelos globales acoplados usados en el Cuarto Informe Científico del Panel Internacional de Cambio Climático-IPCC-AR4 (Vera et al., 2006, Cavalcanti et al. 2006, Boulanger et al 2006 a, b, Valverde & Marengo 2007, Marengo et al. 2008, Li et al. 2006, Salazar et. al 2007, entre otros). Vera et al. (2006) muestra que los modelos globales son capaces de reproducir las características básicas del ciclo estacional de la precipitación del presente, sin embargo hay algunas discrepancias en los modelos en reproducir cuantitativamente la exactitud estacional de la precipitación sobre las principales cuencas del continente. Sobre los Andes la baja resolución de la orografía parece afectar la intensidad y la ubicación de la precipitación. Las diferencias de los resultados de los modelos globales exigieron análisis más rigurosos de estos. Valverde & Marengo (2007), después de analizar y comparar 5 modelos globales del IPCC AR4 (CCCMA, GFDL, MIROC, GISS y HadCM3), encuentra que el modelo HadCM3 simula mejor el patrón de circulación de verano y primavera, próximo a lo observado, en relación a los otros modelos analizados.

Para el futuro (2071-2100), se proyecta una tendencia de aumento de lluvias en la región sur de Brasil y Norte de Argentina (Cuenca del Río de la Plata) y en la costa Norte de Perú y Ecuador, donde la mayor parte de los modelos muestra tendencias similares, en tanto que para la Amazonia, la mitad de los modelos de IPCC AR4 sugieren aumentos de lluvia y la otra mitad sugiere reducciones en la lluvia. Sin embargo, todos los modelos sugieren aumentos de la temperatura del aire.

En América del Sur, relativamente pocas experiencias de desarrollo escenarios climáticos para el futuro usando modelos climáticos regionales han sido realizados (Marengo, 2007, Marengo et al. 2009, Rusticucci et al., 2009 a, Ambrizzi, et. al. 2007, Pisnichenko & Tarasova 2009,

Garreaud & Falvey 2009, Urrutia & Vuille 2009, Fuenzalida, H., 2007, Solman et al 2007, Nuñez et al. 2008, SENAMHI 2005, 2007, 2009 entre otros). Estas proyecciones han sido derivadas usando varios modelos regionales (RAMS, ETA CCS, RegCM3, HadRM3P, MM5) que fueron corridos usando los modelos globales NCAR-CSM y HadAM3P como condición de contorno, para el presente (1961-90) y futuro hasta 2100. Algunas de las proyecciones fueron generadas para toda América del Sur, y otras en regiones específicas, como América del Sur de 20 S, o a nivel de país. Todas las proyecciones fueron para los escenarios de altas (A2) y bajas emisiones (B2) de gases de efecto invernadero, definidos por el Special Report Emission Scenarios SRES del IPCC (Nakicenovic et al, 2000). Uno de los aspectos más importantes entre las proyecciones de los diferentes modelos regionales es la consistencia entre las proyecciones de los modelos regionales, y entre estos modelos y los modelos globales usados como condición de contorno (Marengo et al. 2009). Algunas experiencias usando modelos globales de alta resolución como el modelo japonés TL959L60 MRI JMA también han generado escenarios regionales de clima para finales del Siglo XXI (Avalos, 2007).

Con el fin de obtener una aproximación de los posibles cambios futuros en la precipitación y temperatura en las zonas más vulnerables del Altiplano peruano, se planteó este estudio. El Altiplano (Departamento de Puno) es considerado una de las zonas más sensibles y perturbadas por la variabilidad climática como por ejemplo, durante El Niño muchas veces las lluvias son deficitarias (Rome-Gaspaldy, 1999), además, de existir evidencias de cambios en la precipitación en el pasado (Garreaud, et al., 2003). También, es considerado como el tercer departamento más pobre del Perú que depende principalmente de la actividad agropecuaria aportando a la economía del departamento con un 68.3%, asimismo es uno de los tres principales productores del cultivo de papa y de alpacas a nivel nacional, (INEI, 2007), por lo que es alta la vulnerabilidad si eventos climáticos extremos sucedieran. Por eso surge la motivación y necesidad de

tener trabajos que puedan ser divulgados y utilizados por los órganos correspondientes, a fin de tomar medidas preventivas y de adaptación.

Este estudio fue desarrollado en tres partes. La primera parte consistió en la selección de uno de los modelos climáticos regionales estudiados el ETA CCS, el HadRM3 y el RegCM3, a través de un proceso de validación del clima actual basado en las observaciones. En esta parte también se incluyó la validación de los datos obtenidos del CRU respecto a los datos observados de las estaciones meteorológicas usadas para el presente 1961-1990. Después se analizaron las proyecciones de lluvia y temperatura para 2071-2100 para los escenarios A2 y B2. En la tercera parte se presentaron las conclusiones.

## MATERIALES Y METODOS

### Zona de estudio:

El Altiplano Peruano (departamento de Puno) está ubicado al sur del Perú entre la latitud 13°S y 17°S y longitud 68,5°W y 71°W y a una altitud entre 3700 a 4400 msnm (Ver Fig. 1). Del área total que comprende el departamento de Puno la mayor parte es de características Altiplánicas (-14°S a -17.5°S), solamente una pequeña área o franja angosta al noreste es de características de región Amazónica (-13°S a -14°S). Para determinar la climatología de esta zona de estudio se han elegido 28 estaciones con series de datos de paso diario de precipitación y temperatura del periodo 1961 a 1990 (25 estaciones representan características altiplánicas y 3 de la región Amazónica). La climatología en el Altiplano describe que la precipitación está restringida a los meses de noviembre a marzo acumulando valores entre 500 a 900 mm; y que las condiciones térmicas está caracterizada por temperaturas máximas absolutas que oscilan entre 14 °C a 18 °C y mínimas entre -7.0 °C a 3.0 °C, por tanto las temperaturas medias oscilan entre 4°C a 9°C (ver Tabla 1 y Figura 2). En esta zona los gradientes o variación espacial de la precipitación y temperatura no son acentuados (Coeficiente de variación CV bajos), mostrando apenas ligeramente variaciones en el invierno (CV: 0.4 a 0.5)

más que en el verano (CV: <0.3) (ver Fig. 2), excepto en la franja angosta de características de Amazonía donde son muy notorios (Figs. 3b y 3c).

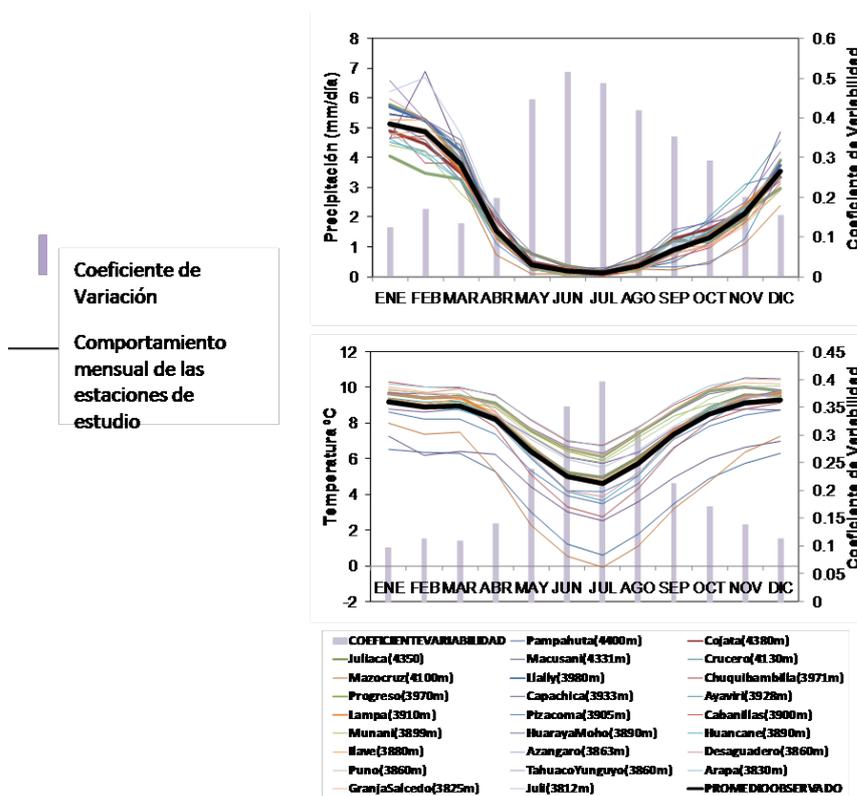
En el Altiplano también ocurren eventos como heladas, granizadas, inundaciones y sequías en ciclos anuales muy irregulares.

**Tabla 1.** Estaciones de estudio y características climáticas en el Altiplano peruano (departamento de Puno). Periodo del promedio 1961 a 1990

Estación	Latitud	Longitud	Altitud m	Temperatura media (°C)	Precipitación media anual (mm/año)
Pampahuta	-15.5	-70.7	4400	4.1	798
Cojata	-15.0	-69.4	4380	-	748
Juliaca	-15.5	-70.2	4350	8	800
Macusani	-14.1	-70.4	4331	5.3	743
Crucero	-14.4	-70.0	4130	6.4	811
Mazocruz	-16.7	-69.7	4100	4.5	526
Llally	-14.9	-70.9	3980	7.3	800
Chuquibambilla	-14.8	-70.7	3971	7.2	697
Progreso	-14.7	-70.4	3970	8.7	613
Capachica	-15.6	-9.8	3933	8	806
Ayaviri	-14.9	-70.6	3928	7.8	698
Lampa	-15.4	-70.4	3910	8	720
Pizacoma	-16.9	-69.4	3905	7.7	602
Cabanillas	-15.6	-70.3	3900	9.2	654
Munani	-14.8	-70.0	3899	8.5	651
Huancane	-15.2	-69.8	3890	7.8	680
Huaraya Moho	-15.4	-69.5	3890	8.7	892
Ilave	-16.1	-69.6	3880	8.2	709
Azangaro	-14.9	-70.2	3863	8.7	613
Desaguadero	-16.6	-69.0	3860	7.7	723
Puno	-15.8	-70.0	3860	8.8	727
Tahuaco Yunguyo	-16.3	-69.1	3860	8.1	800
Arapa	-15.1	-70.1	3830	9.1	700
Granja Salcedo	-15.9	-70.0	3825	8.7	647
Juli	-16.2	-69.5	3812	8.2	857
Ollachea	-13.8	-70.5	2850	12.6	1233
Tambopata	-14.2	-69.2	1320	20.4	1545
San Gaban	-13.4	-70.4	820	22.4	6093



**Fig. 1.** Mapa de ubicación del departamento de Puno en el Perú



**Fig. 2.** Ciclo anual y Homogeneidad de la zona de estudio expresado en Coeficiente de Variación (CV). a. Precipitación b. Temperatura media. Periodo 1961 – 1990.

### Modelos climáticos globales y regionales

Los modelos globales de clima son representaciones matemáticas de la naturaleza, sus componentes e interacciones, con un grado de complejidad tal que solo computadores poderosos (llamados de supercomputadoras) pueden ser usados. En los modelos, la superficie de la tierra es dividida en cajas o grillas, de dimensiones regulares, y cuanto mayor sea la grilla menor será la resolución espacial, y viceversa. Los modelos globales trabajan con resoluciones espaciales muy bajas, con una grilla de 300 a 500 km de extensión en latitud y longitud. Esta resolución baja no permite detectar cambios en áreas como costas, regiones de topografía pronunciada, ni los fenómenos de escala pequeña, como lluvias intensas en valles. Las montañas altas y empinadas de los Andes no son bien resueltas en los modelos climáticos de baja resolución. Errores e incertidumbres pueden aparecer debido a la necesidad de rellenar los detalles regionales que faltan usando interpolación lineal.

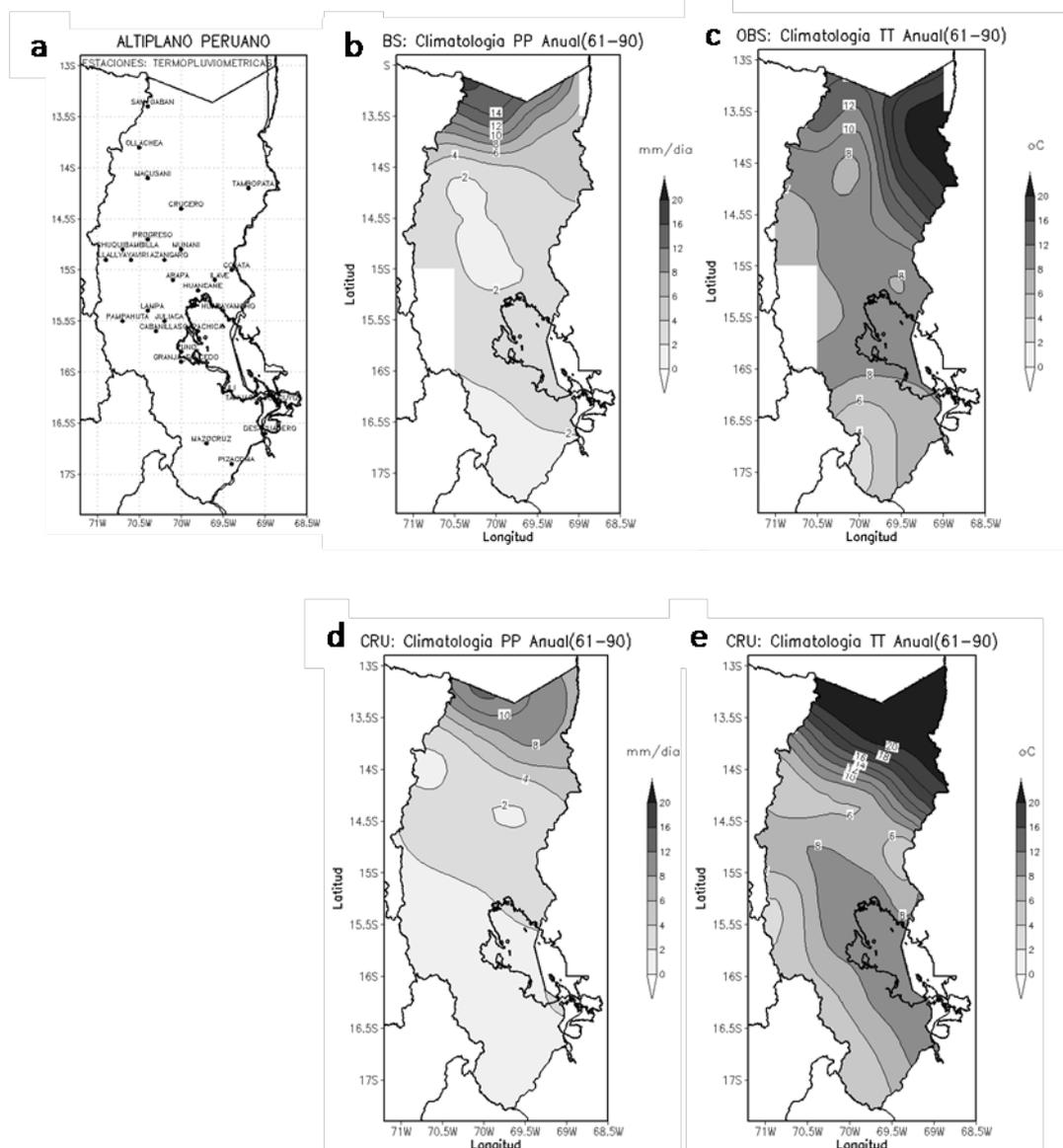
De ahí viene la necesidad de usar modelos climáticos con mayor resolución espacial (grillas más pequeñas, de ~50 km de largo y ancho), o modelos regionales de clima. El proceso de generar proyecciones climáticas usando modelos regionales es llamado de regionalización o “*downscaling* dinámico”. Esta técnica, muy usada en la generación de escenarios futuros de clima con alta resolución espacial, se basa en el uso de los modelos climáticos regionales antes mencionados, mismos que son corridos usando las condiciones de frontera de un modelo global (de grilla que varía entre 300-500 Km). Para las proyecciones de clima en este estudio hasta finales del Siglo XXI usamos los modelos regionales Eta CCS, RegCM3 y HadRM3P. Estos modelos regionales tienen una resolución de 50 km, presentando en el área de estudio 60 puntos de grilla, fueron corridos con las condiciones del modelo global inglés HadAM3P, hasta 2100 y para los escenarios A2 y B2. El dominio espacial para las simulaciones de 15N-50S y 25W-90W abarcando todo el continente Sudamericano.

El modelo global HadAM3P integra dos componentes el oceánico del HadCM3

(Gordon et al., 2000) y el atmosférico HadAM3 (Pope et al., 2000). Las simulaciones 1961-1990 del HadAM3P fueron forzadas con datos observados de temperatura superficial del mar (SSTs). Para el periodo futuro 2071-2100 fue forzado con SSTs cual es formado con datos observados de SSTs más la media de los cambios y tendencia calculados de las proyecciones de los modelos acoplados. (Marengo et al., 2009).

El modelo regional ETA fue desarrollado en el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) (Mesinger et al., 1988; Black, 1994). Este Describe una estructura de campo horizontal de punto de grado E y una estructura de coordenada *vertical eta* para reducir errores numéricos sobre las montañas calculando el gradiente de fuerza de presión. Integra el área de América del sur en 58.5°W a 89° W de longitud y 22°S a 16°N de latitud. En su versión para cambio climático, el modelo ETA CCS, desarrollado por Pisnichenko y Tarasova 2009 fueron incorporado continuas integraciones para periodos de cualquier duración, ampliando el límite de ETA no solo a estudios de pronósticos sino también para simulaciones de cambio climático.

El modelo regional HadRM3, es una versión actual del modelo regional HadCM3, del Centro Hadley del Reino Unido, que tiene una resolución espacial de 50 x 50 km y una resolución vertical de 19 niveles (de la superficie hasta 30 km en la estratosfera). Este modelo fue corrido para dos escenarios de emisiones de CO<sub>2</sub> SRES A2 (altas concentraciones de CO<sub>2</sub>) y SRES B2 (bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>) para los años del período del clima actual 1961-1990 y del período clima futuro 2070 - 2100. Estudios recientes de Alves y Marengo (2009) y Marengo et al., 2009, refieren que el modelo HadRM3P consigue representar relativamente bien el padrón espacial y temporal de la precipitación y temperatura como también las principales características de circulación atmosférica a gran escala. Todavía, regionalmente hay errores sistemáticos; sobre los Andes la precipitación es sobrestimada y la temperatura subestimada.



**Fig. 3.** Climatología del Altiplano Peruano (periodo 1961-1990). a. Distribución de las estaciones observadas .b. Climatología de la precipitación observada c. Climatología de la temperatura observada d. Climatología de la precipitación CRU e. Climatología de la temperatura CRU.

El modelo RegCM3, es la última versión del modelo climático RegCM, proviene del National Center for Atmospheric Research (NCAR) (Giorgi et al., 1993). El complemento dinámico es el mismo del modelo MM5, es un modelo comprensible, hidrostático con coordenada vertical sigma y de área limitada en diferencias finitas. Considera procesos de interacción suelo, planta y atmosfera (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme; Dickinson et al. 1993). Asimismo, presenta esquema de transferencia radiativa donde toma en

cuenta las contribuciones de gases CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> y de las nubes incluyéndola en la banda del infrarrojo. Para la aplicación de estudios climáticos, un número de parametrizaciones físicas fueron incorporados en el modelo. Los datos de la salida de este modelo se encuentran en formato binario. Da Rocha et al. (2006), señala que el modelo RegCM3 tiene la habilidad de simular correctamente la distribución de la precipitación en algunas áreas de Suramérica (noreste de Brasil y zona norte y central de Colombia), mientras

en las otras áreas faltan mejorar (Alves & Marengo, 2009; Marengo et al., 2009).

### Escenarios climáticos

Para obtener proyecciones del clima futuro, los modelos climáticos son corridos bajo condiciones de emisiones de gases de efecto invernadero, y un grado de desarrollo social y económico consistentes con estas emisiones. Estos escenarios socio-económicos-ambientales usados por el IPCC describen un marco para el pensamiento estructurado de cómo el futuro se puede revelar. Cualquier descripción (proyección) posible del clima futuro dependerá de la opción del panorama de las emisiones. Los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero provenientes de la actividad humana dependen de diversos factores socio-económicos como la población, el crecimiento económico, la tecnología, el uso de energías, entre otros (Nakicenovic et al., 2000). La concentración de dióxido de carbono atmosférico aumentará desde la concentración actual de 1999 (370 ppmv) a una concentración cercana a 550 ppmv en el escenario B2 (bajas emisiones) para el año 2100, y encima de 830 ppmv para el escenario A2 (altas emisiones).

Los escenarios de cambio climático es una representación, internamente consistente, del clima futuro, construida a partir de métodos con basamento científico, y que puede ser usada para dar una comprensión de la respuesta de los sistemas sociales y medio ambientales, al futuro cambio climático (Nakicenovic et al., 2000).

### Climatología Observada y Climatología CRU (clima del presente)

Contábamos con dos climatologías referenciales, del período 1961 a 1990, tanto la de CRU como de los datos observados de las estaciones. La climatología de CRU proveniente de la Climatic Research Unit de la School of Environmental Sciences, University of East Anglia, UK, fue construida con datos observados de estaciones e interpolada en función de la latitud, longitud y elevación usando la metodología *thin-plate splines* en punto grilla 0,5°x0,5° (New et al., 1999). Esta información es de acceso libre para la

investigación climática; en la zona de estudio CRU utilizó datos observados de una sola estación la de Juliaca (latitud: -15.5°, longitud: -70.2° y altitud: 3825m) (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/landstations/crustnsused.txt>). Referente, a la climatología observada esta fue construida con los datos observados de las estaciones, distribuidos en 28 puntos en la zona de estudio, localizados en punto de estación (ver Fig. 3a), previamente a estos datos se les realizó el control de calidad y prueba de homogeneidad de las medias mensuales utilizando los estadísticos t Student-Fisher ( $P < 0.05$ ), además se realizó el análisis del coeficiente de variabilidad CV para ver espacialmente la homogeneidad (menor CV) o heterogeneidad (mayor CV) de la precipitación y temperatura en la zona de estudio o también indicarnos el comportamiento espacial de gradiente de la precipitación y temperatura (ver Fig. 2).

Entonces para ver si existía diferencias entre las climatologías de CRU y la observada se realizó la validación. Pero antes, los datos observados en puntos de estación en paso mensual para ser comparados tuvieron que ser interpolados a punto grilla de resolución 0.5°x0.5° con la metodología del esquema análisis CRESSMAN a través del software de visualización y análisis gráfica GrADS (Cressman, G., 1959 citado por Doty B., 1992). La metodología consistió primero en interpolar las localizaciones de las estaciones a punto grilla; segundo interpolar los datos para un punto grilla más fino, a través de pasos múltiples realizados por medio de grillas en subsecuentes radios de influencia. En cada paso fue determinado un nuevo valor para cada punto grilla hasta que se obtuvo el valor óptimo del radio de influencia. Entonces con los datos observados mensuales se generó la climatología anual y estacional para cada punto grilla. Ambas climatologías, CRU y observados, fueron comparadas en cada punto grilla de 0.5° x 0.5°. Para obtener los errores o desviaciones de estas comparaciones se empleo el indicador estadístico del BIAS ( $B = \sum_1^n (si - mi) / n$ ) cual midió el error o la media de las diferencias entre el

valor CRU ( $s_i$ ) y el observado ( $m_i$ ).  $n$  es el número de años.

### Validaciones de los modelos regionales para el clima del presente

El nivel de fiabilidad de los modelos regionales fue determinado mediante el proceso de validación de sus climatologías simuladas anuales y estacionales del periodo 1961-1990. La validación simplemente consistió en comparar cada una de las climatologías simuladas por los modelos respecto a la climatología observada. La validación fue realizada en punto grilla de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  que tiene un área de alcance de  $50\text{km} \times 50\text{km}$ , el valor de la climatología del modelo que se encuentra en la grilla fue comparada con el valor de la climatología observada que se encuentra también en la misma grilla, en caso que la climatología observada se encuentra en el punto medio de dos grillas esta fue comparada con el valor de la climatología del modelo obtenido mediante una interpolación bilineal que consistió en hallar el valor conociéndose los dos puntos más cercanos. Los errores de estas comparaciones fue calculada por el BIAS ( $B = \sum_1^n (s_i - m_i) / n$ ) cual midió la media de las diferencias entre el valor simulado ( $s_i$ ) y el observado ( $m_i$ ). El análisis de la validación fue espacial y temporal. El modelo que mejor representó el comportamiento del ciclo anual y estacional del observado, además el que mostró el menor bias y error será el de mayor confiabilidad para estimar los cambios en el futuro de la precipitación y temperatura.

### Cambios de la temperatura y precipitación en el futuro

Para determinar los cambios en el futuro pluviométrico y térmico, a nivel anual y estacional del Altiplano Peruano (departamento de Puno), se utilizaron solo los datos de los modelos climáticos regionales tanto de las proyecciones de los escenarios futuros A2 (altas emisiones) y B2 (bajas emisiones) del periodo 2071 – 2100 como de la climatología simulada del periodo 1961 a 1990. Este cambio en el futuro o anomalía ( $A = f_{mod} - C_{mod}$ ) fue determinada mediante la diferencia entre el valor futuro del modelo ( $f_{mod}$ ) y su

climatología simulada del mismo modelo ( $C_{mod}$ ), en punto grilla  $0,5 \times 0,5$ .

## RESULTADOS

### Validación de la climatología de CRU (Temperatura y Precipitación)

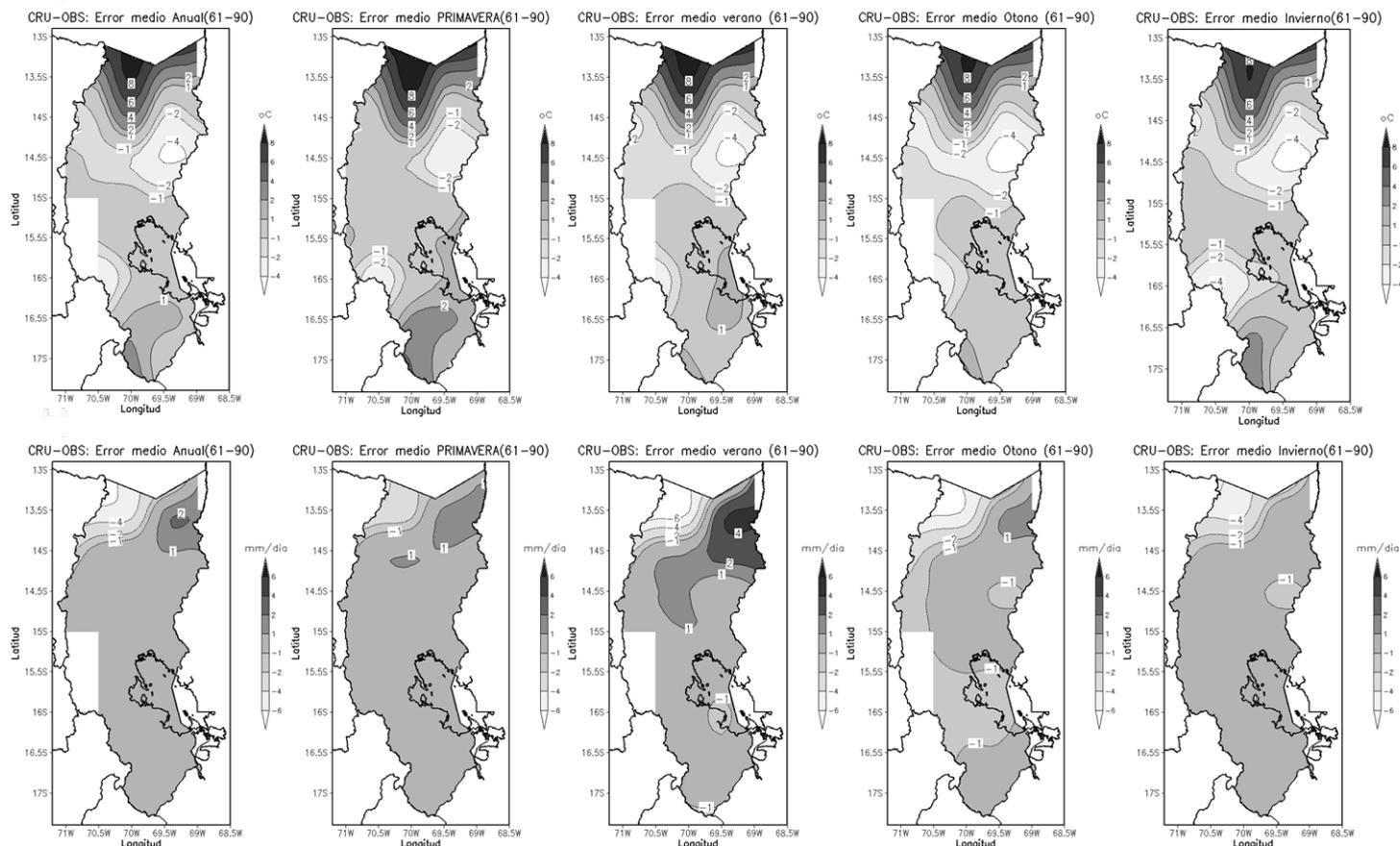
En relación a la temperatura el análisis de la figura 4a muestra que la climatología de la temperatura del CRU subestima a la climatología observada en  $-2^\circ\text{C}$  durante todas las estaciones (primavera, verano, otoño e invierno). Excepto la zona al noroeste ( $13^\circ\text{S}$  a  $14^\circ\text{S}$ ) donde al contrario sobrestima hasta  $8^\circ\text{C}$ , estos errores significativos podrían ser debido a que CRU incorporó una sola estación para generar la climatología de la zona de estudio cual no puede ser representativa a toda la zona por el contraste térmico que existe entre la mayor zona de estudio  $-14^\circ\text{S}$  a  $-17^\circ\text{S}$  de características altiplánicas y la zona muy al norte de  $13^\circ\text{S}$  a  $14^\circ\text{S}$  de características de Amazonía, también podría ser debido a pocas estaciones observadas en esta zona que no permitiría hacer una mejor comparación. Por otro lado, si se compara espacialmente en la zona de estudio el gradiente térmico de CRU respecto a lo observado este presenta un gradiente acentuado en la zona norte. (Ver Figs. 3c y 3e).

Referente a la precipitación (ver Fig. 4b) CRU muestra errores menores entre  $-1$  mm/día a  $+1$  mm/día, simulando mejor esta climatología, excepto la zona muy al norte (Amazonía), específicamente durante el verano, donde la variabilidad de los errores es alta, mostrando en la zona noroeste errores de hasta  $-4$  mm/día y en la zona noreste de hasta  $+4$  mm/día. Por otro lado, en la zona de estudio el gradiente pluviométrico de CRU y el observado son similares. (Ver Figs. 3b y 3d).

Según el análisis de CRU respecto a lo observado, en la zona del Altiplano simula mejor la climatología de la precipitación con errores de hasta  $-1$  mm/día a  $+1$  mm/día, en cambio la climatología de la temperatura los errores son más grandes de hasta  $-2^\circ\text{C}$ . En la zona norte, Amazonía, ( $13^\circ$  a  $14^\circ\text{S}$ ) los errores son más notorios principalmente en la temperatura.

Por tanto, para validar los modelos climáticos regionales se utilizaron los datos observados debido a su densidad en la zona

de estudio y por representar en sí misma una situación dada del clima y no estimada o calculada.



**Fig.4.** Error de la climatología de CRU respecto a lo OBSERVADO, anual y estacional, período 1961 a 1990. a. Temperatura. b. Precipitación

**Clima del Presente (1961-1990). Validación de los modelos regionales**

Comparando las climatologías de los tres modelos regionales respecto a la climatología observada anual y estacional, resultado de un análisis temporal y espacial (ver Figura 5, 6 y 7), se observó que el modelo HadRM3 simuló mejor los comportamientos del ciclo anual y estacional de la precipitación, en comparación a los otros dos modelos (ver Figura 5), mientras, el modelo ETA CSS simuló bien la estacionalidad de la temperatura y relativamente bien el HadRM3 (ver Figura 5).

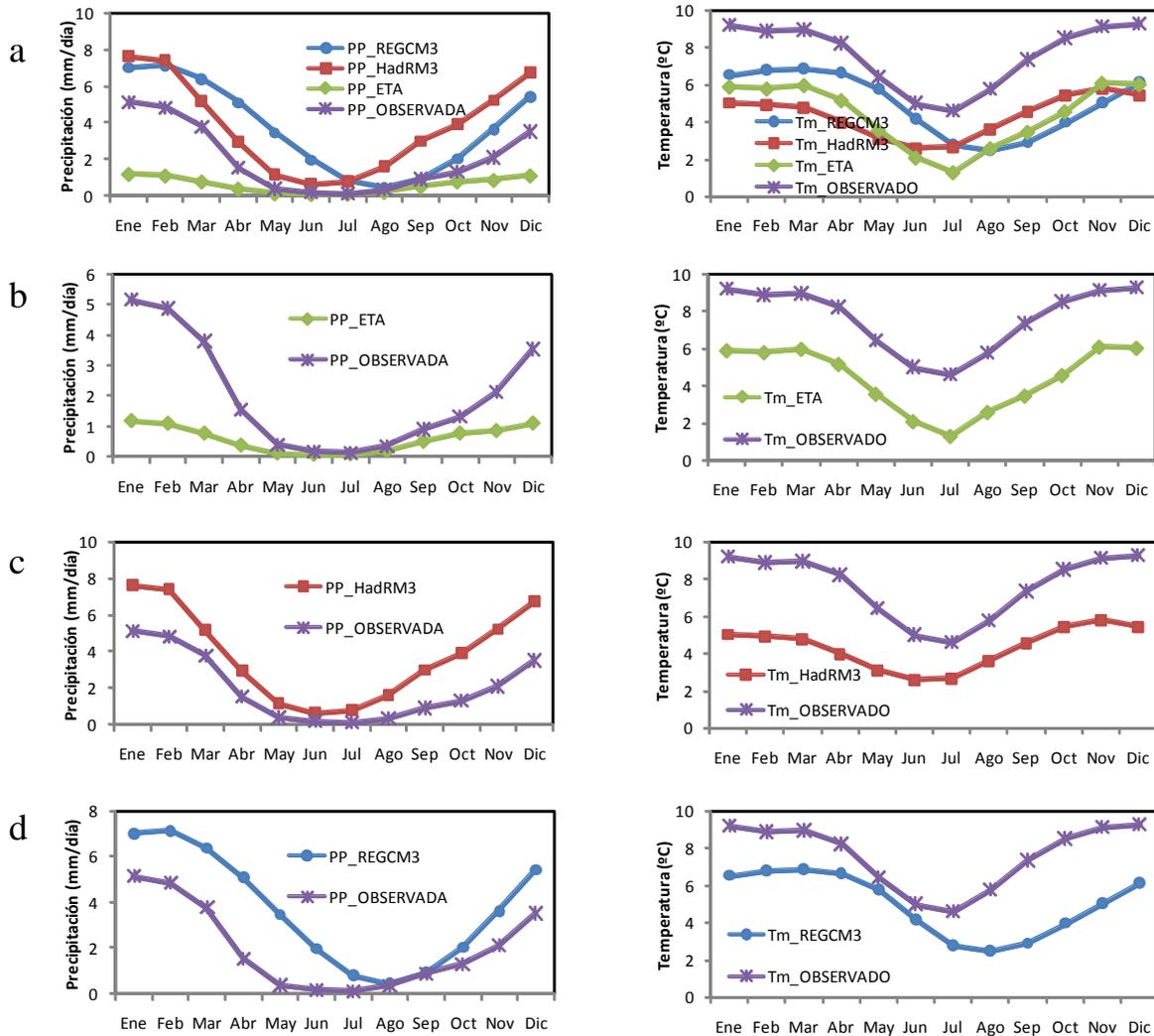
Específicamente, analizando el período lluvioso (húmedo: DEF y SON) está aún no es bien simulado por los modelos, el HadRM3 a pesar de simular bien la estacionalidad, cuantitativamente no es perfecta sobreestimándolo en promedio hasta

2 mm/día, asimismo, el modelo ETA CSS lo subestima significativamente en promedio hasta 4 mm/día y el RegCM3 lo sobrestima en promedio hasta 2mm/día, (ver Tabla 2). En cambio, el período seco (AMJ y JJA) fue perfectamente simulada por el HadCM3 y el ETA CSS, mientras el RegCM3 aún no simuló correctamente (ver Figura 5 y Figura 6).

El modelo HadRM3 en la zona de Amazonía (-13°S a -14,5°S) sobrestima la precipitación hasta 8 mm/día más que en la zona Altiplánica (-14.5°S a -17,5°S) hasta 4 mm/día, debido a que el modelo en la zona de Amazonía presenta un acentuado gradiente de precipitación respecto a lo observado. Este modelo aún sobreestimando los valores de precipitación, durante el periodo húmedo (verano) y seco (invierno), trata de simular el patrón espacial mostrando

por lo menos los cambios significativos en la zona de transición entre los Andes y la Amazonía (-13°S a -14°S) aunque más extendido hacia el sur (menos 13°S a -14,5°S) (ver Figura 4). Estos resultados son consistentes con los obtenidos de Alves & Marengo (2009) y Marengo et al., 2009 para otros lugares de Sudamérica. Los errores de estas sobrestimaciones podrían estar relacionada a la deficiencia de la

representación de algunas características locales como la topografía específicamente el área de transición entre Altiplano y Amazonía donde el gradiente de altitud es acentuado, también a la circulación atmosférica y procesos convectivos asociadas a la presencia del lago Titicaca que son importantes en la producción de lluvia, Galvez, J.M., 2005.



**Fig. 5.** Comportamiento de la climatología mensual (1961-1990) entre el modelo y el observado para la precipitación (izquierda) y la temperatura (derecha). b. Modelo Eta. c. Modelo HadRM3 d. Modelo RegCM3.

**Tabla 2.** BIAS estacional de la precipitación y temperatura dados por los modelos regionales en el Altiplano Peruano (departamento de Puno). Período 1961 a 1990.

	Precipitación (mm/día)				Temperatura (°C)			
	DEF	MAM	JJA	SON	DEF	MAM	JJA	SON
BIAS modelo ETA	-3.3	-1.5	-0.1	-0.8	-3.3	-3.0	-3.1	-3.6
BIAS modelo HadRM3	2.8	1.2	0.8	2.5	-4.1	-4.0	-2.2	-3.1
BIAS modelo ReGCM3	2.0	3.1	0.9	0.8	-2.6	-1.4	-2.0	-4.4

Referente a la temperatura el modelo ETA CSS es el que mejor simuló la tendencia de la estacionalidad, los ciclos de los períodos cálidos (diciembre, enero y febrero) y fríos (junio, julio y agosto), pero subestimándolo en promedio 3°C (ver Figura 5 y Figura 7), asimismo, captura el patrón espacial durante el verano y el invierno. La distribución espacial de la temperatura en el verano es relativamente homogénea con tenues gradientes térmicos (temperatura oscilando entre 8°C a 12°C), y en el invierno, menos homogéneo con acentuados gradientes térmicos (oscilando en el lado oeste de 0°C a 6°C y en lado este de 6°C a 8°C). El modelo HadRM3 también simuló relativamente bien la estacionalidad de la temperatura aunque subestimándolo en promedio de 5°C (ver figura 7). No obstante, no capturó el patrón espacial presentando acentuados gradientes térmicos principalmente alrededor del lago y la zona norte (-13°S a -14°S). Por otro lado, el modelo RegCM3 no consiguió capturar la estacionalidad ni el patrón espacial de la temperatura.

Estas subestimaciones dadas en la temperatura por los modelos regionales podrían ser concernidas a la utilización no real de los estándares de los esquemas de advección vertical de momentum y temperatura. El ETA CCS usa el esquema Arakawa-Lorenz que fue recientemente identificado como el esquema que no permite una advección vertical verdadera (Mesinger, 2008).

En la realidad los tres modelos presentaron deficiencias, pero el HadRM3 y ETA CCS fueron los que presentaron menores deficiencias. Esto se debería a que el modelo global HadRM3P que utilizaron como base también representó relativamente bien el padrón espacial y temporal de la precipitación y temperatura en Sudamérica.

### **Clima del Futuro**

Si los modelos simulan bien el clima del presente entonces simularían más realísticamente el clima del futuro. Esta asunción tiene sus limitaciones, pero por lo menos nos permite alguna comparación, aunque las incertidumbres puedan ser grandes. Asumiendo esto y tomando los

resultados del análisis de la validación, en la zona de estudio, el modelo HadRM3 podría ser el de mayor confiabilidad en el futuro para proyectar la precipitación, y el promedio de los modelos ETA CSS y HadRM3 para proyectar la temperatura.

### **Variación estacional de la precipitación y la temperatura en condiciones de escenario climático futuro A2 (extremo) y B2 (moderado)**

#### **Precipitación**

En la zona de estudio, principalmente en la zona del norte hacia el centro (-14°S a -15°S) los modelos regionales, en el futuro 2071-2100, en el escenario extremo A2 (pesimista), proyectaron alta variabilidad espacial y temporal en los cambios de precipitación, mientras en la zona del centro hacia el sur (-15°S a -17.5°S) consensuaron los modelos HadRM3 y el ETA CSS proyectando lluvias ligeramente más de lo que actualmente ocurre, con valores de hasta 2 mm/día, principalmente en el periodo lluvioso (setiembre, octubre, noviembre - SON- y diciembre, enero y febrero -DEF-). En el escenario moderado B2 los tres modelos proyectan lluvias similares al patrón actual, excepto ETA CSS durante las estaciones de primavera y verano para la zona de centro a sur (15°S a 17°S) proyecta ligeros incrementos en la lluvia de 1 a 2 mm/día. En la zona norte específicamente la Amazonía (-13°S a -14°S) no hay consenso en los modelos, el modelo ETA CSS proyecta disminuciones de hasta 4 mm/día, el HadRM3 aumentos de hasta 6 mm/día y RegCM3 similar a la climatología actual, comportamiento similares para ambos escenarios. (Ver figura 8).

Pero el modelo de mayor confiabilidad para las proyecciones futuras en la precipitación es el HadRM3, que simuló más detalles, específicamente en la zona andina del Altiplano (-14°S a -17.5°S) proyectó en el escenario A2 aumentos de precipitación con núcleos en el oeste de hasta 2mm/día más durante el período lluvioso (SON y DEF), excepto al noreste del lago en este mismo período (DEF) proyectó disminuciones con núcleos de 6 mm/día. (Ver Figura 8).

### Temperatura

En general en la zona estudio, los modelos regionales ETA CSS y RegCM3 proyectaron para el futuro incrementos de temperatura, en un escenario extremo A2 entre 2°C a 4°C, y en el escenario moderado B2 entre 1°C a 2°C. Más el HadRM3 proyectó incrementos más significativos alcanzando en el escenario A2 hasta 6°C y en el escenario B2 hasta 4°C (ver figura 9). Resultado de la validación, la fiabilidad de la media de los modelos ETA CSS y HadRM3 proyectaron para ambos escenarios A2 y B2 incrementos de temperatura entre 2°C a 4°C, excepto para algunas áreas localizadas al norte del lago, el escenario A2 proyectó incrementos de hasta 6°C. (Ver figura 9). Esta elevación de la temperatura estaría directamente relacionada con el aumento del CO<sub>2</sub> a lo largo del siglo 21.

### CONCLUSIONES

La climatología de la temperatura y precipitación del Altiplano Peruano (departamento de Puno) fue considerada la que se construyó a partir de los datos observados y no la climatología de CRU, debido a que la climatología observada fue construida a partir de 28 puntos de observación y la climatología de CRU utilizó un punto de observación. No obstante, la climatología de la precipitación tanto la de CRU como la observada cuantificablemente son similares con errores que varían entre -1 mm/día a + 1 mm/día; en cambio, en la climatología de la temperatura, CRU muestra errores de hasta -2°C respecto a lo observado, es decir lo subestima. Además comparando espacialmente las climatologías de CRU respecto a lo observado presentan ligeras diferencias más notorias en la temperatura con gradientes acentuados.

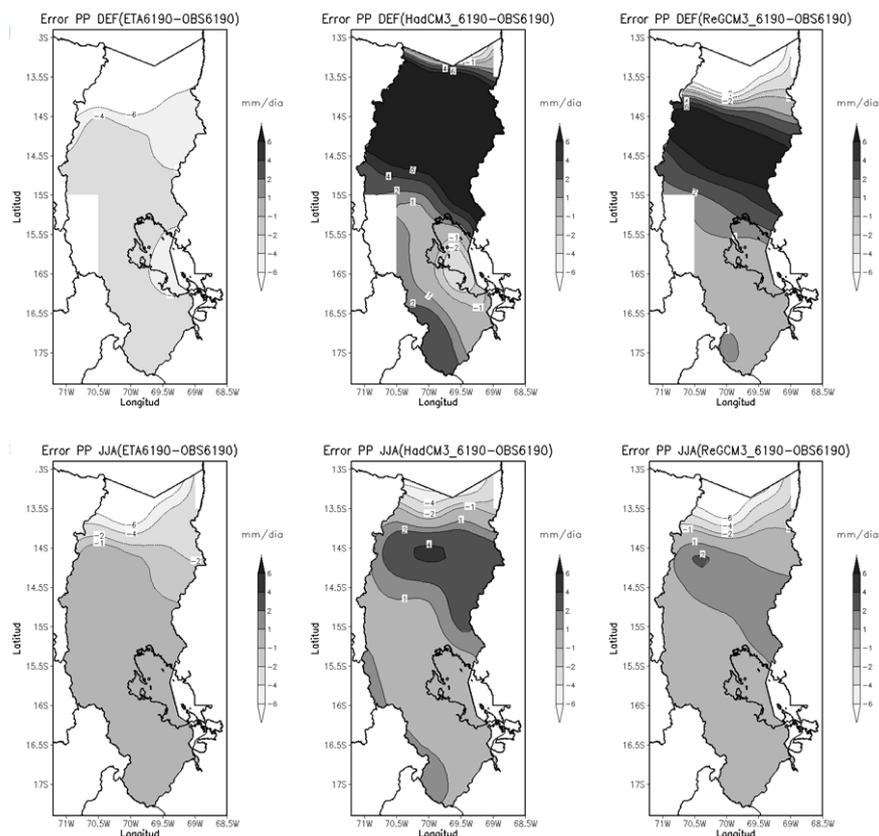
Resultado de la validación de los modelos regionales, espacial y temporal, el modelo HadRM3, en comparación a los otros

modelos, simuló mejor la estacionalidad y los valores de la climatología de la precipitación reproduciendo los períodos húmedos (SON y DEF) y secos (MMA y JJA) pero sobrestimándolos en 2 mm/día. Referente, a la temperatura, los modelos HadRM3 y el ETA CSS simularon la tendencia de la estacionalidad de la climatología de la temperatura, el segundo relativamente mejor que el primero, ambos subestimándolo en 5°C y 4°C, respectivamente. Es importante mencionar que los modelos numéricos presentan dificultad en simular la lluvia en los Andes, encontrándose generalmente un error muy grande de sobreestimación o subestimación, debido a la dificultad en parametrizar la topografía. A pesar de esa limitación, el modelo HadRM3 consiguió presentar errores menores que los otros modelos, sin embargo este modelo aún presenta inconvenientes en simular la precipitación en la zona de transición (-13.5°S a -14°S) entre los Andes y la Amazonía donde el gradiente topográfico es acentuado.

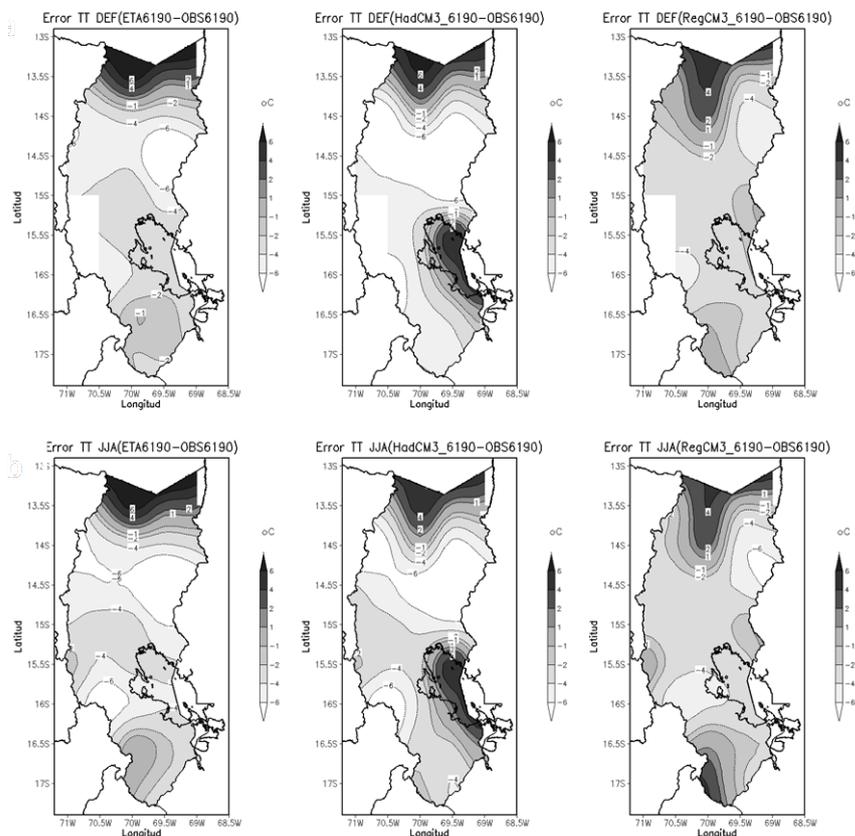
En el futuro 2071 – 2100, el modelo HadRM3 fue el que proyectó la precipitación, simulando en un escenario extremo A2 incrementos de hasta 2mm/día principalmente en la época lluviosa (SON y DEF), y en un escenario moderado B2 similares al patrón actual. Y la media de los modelos HadRM3 y el ETA CSS fueron los que proyectaron la temperatura, en los escenarios A2 y B2 simularon incrementos entre 2°C a 4°C, más aún localizadamente al norte de lago simularon incrementos de hasta 6°C.

Por otro lado, esta información obtenida es una primera aproximación del cambio climático futuro en el Altiplano Peruano que puede ser utilizada para estudios de impacto de cambio climático en la agricultura, hidrología, etc.. También está la perspectiva de entender mejor la variabilidad climática actual del Altiplano y proyectarlo hacia el futuro.

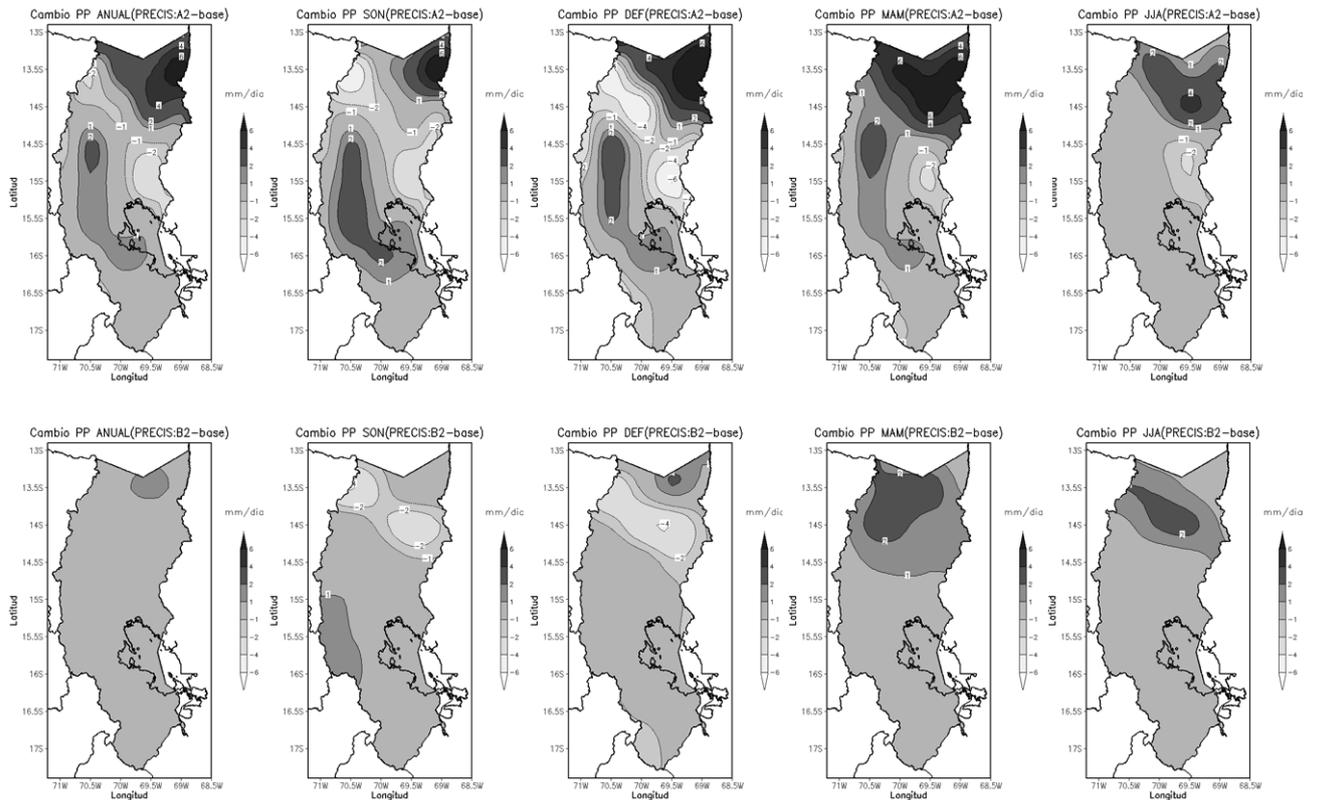
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO



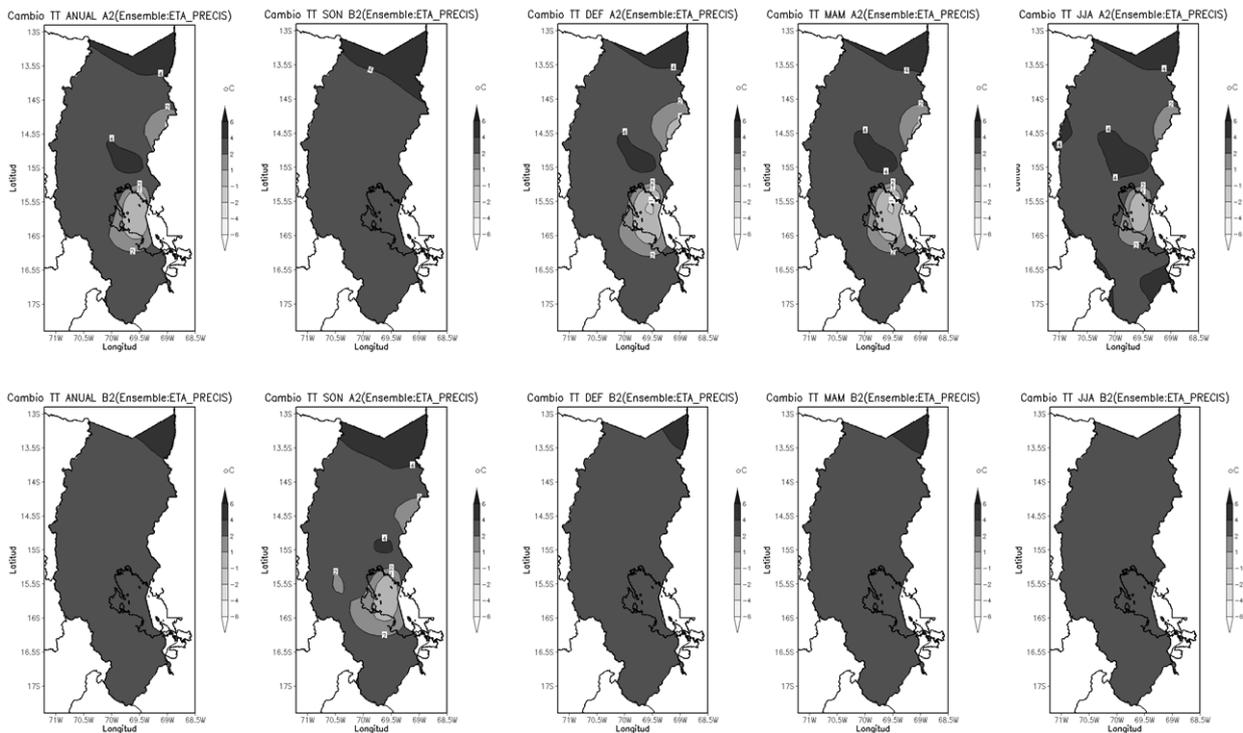
**Fig.6.** Error de la climatología de la precipitación (1961-1990) dado por los modelos climáticos regionales. a. Verano (DEF) b. Invierno (JJA).



**Fig.7.** Error de la climatología de la temperatura (1961-1990) dado por los modelos climáticos regionales. a. Verano (DEF) b. Invierno (JJA).



**Fig.8.** Anomalías del periodo 2071 -2100 en la precipitación anual y estacional en escenario climáticos futuros A2 (altas concentraciones de CO<sub>2</sub>) y B2 (bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>) periodo 2071 - 2100. Modelo HadRM3



**Fig. 9.** Anomalías en la temperatura anual y estacional en escenario climáticos futuros A2 (altas concentraciones de CO<sub>2</sub>) y B2 (bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>) periodo 2071 – 2100, proyectado por la media de los modelos ETA CSS y HadRM3.

**Agradecimientos:** Estamos muy agradecidos al IAI (Instituto Interamericano para la investigación del Cambio Global) por el aporte financiero que en colaboración con el CPTEC (Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos) quien prestó la asesoría técnica, hicieron posible el desarrollo del presente trabajo, durante la estadía en el INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales). Asimismo, agradecer a Josyane Ronchail por los aportes dados al presente trabajo. También, al SENAMHI por la apertura al desarrollo de este trabajo. Además, al CPTEC y CCST por el compañerismo brindado.

## BIBLIOGRAFÍA

**Alves, L. & Marengo, J. (2009)** Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theor Appl Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-009-0165-2.

**Ambrizzi, T., Rocha, R., Marengo, J., Pissinchenko, I. & Alves, L. (2007)** Scenarios regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI Projeções de clima usando três modelos regionais. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade Sub-projeto Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília Fevereiro 2007.

**Avalos, G. (2007)** Projected Climate Over the Central Andes Countries caused by Global Warming. Visualizing Future Climate in Latin America Results from the Application of the Earth Simulator. Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 30, The World Bank, Washington DC. 90 p.

**Black, L. (1994)** NMC notes the new NMC mesoscale Eta model description and forecast examples. *Wea Forecasting* 9256–278.

**Boulangier, P., Martínez, F. & Segura, C. (2006)** Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 1 Temperature mean state and seasonal cycle in South America. *Climate Dynamics*, 27, 233-259. Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 2 Precipitation mean state and seasonal cycle in South America, *Climate Dynamics*, 28, 255-271, DOI 10.1007/s00382-006-0182-0.

**Cavalcanti, IFA & Cunningham, C. (2006)** The wave four intraseasonal variability in extratropical S.H. and influences over South America- The behaviour of CPTEC/COLA

AGCM. *8th Southern Hemisphere International Conference on Meteorology and Oceanography*, abril 2006, Fóz do Iguaçú, Brasil.

**Da Rocha, R., Ambrizzi, T., Cuadra, S., Ferraz, S. & Fernandez, J. (2006)** ReGCM3 simulations nested in the Hadley Center Model over South America the present day climate. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçú, Brazil, April 24-28. p. 373-378.

**Dickinson, R., Henderson-Sellers, A. and Kennedy, P. (1993)** Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR. Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/ TN-3871STR, 72 pp.

**Doty, B. (1992)** Using the Grid Analysis and Display System Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions (COLA). Maryland, university of Maryland.

**Fuenzalida, H. (2007)** Clima de Chile para fines del siglo XXI Simulaciones con Modelo HADRM3 bajo escenarios A2 y B2 del IPCC. *Revista Ambiente y Desarrollo* 23 (2) 9 -14, Santiago de Chile.

**Galvez, J. (2005)** “The Modulation of Rainfall by the South American Altiplano Lakes.” *Masters Thesis*. School of Meteorology, University of Oklahoma. Norman, OK. 101 pp.

**Garreaud, R. & Falvey, M. (2009)** The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *Int. J. of Climatology*, 29, 543-554. doi 10.1002/joc.1716

**Garreaud, R., Vuille, M., & Clements, A. (2003)** The climate of the Altiplano Observed current conditions and past change mechanisms. *Paleo3*, 3054, 1-18

**Giorgi, F., Marinucci, M. & Bates G. (1993a)** Development of a second generation regional climate model (RegCM32). Part I Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2749-2813.

**Giorgi, F., M. R. Marinucci G. & Bates, T. (1993b)** Development of a second generation regional climate model (RegCM32). Part II Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2814-2832.

**Gordon 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* 16147-168.

**INEI (2007)** Avance económico y social regional. Departamento de Puno. Junio 2007. <http://www1.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0739/index.htm>

**Li, W., Fu, R., & Dickinson, E. (2006)** Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled

- models for the IPCC AR4, *J. Geophys. Res.*, 111, D02111, doi10.1029/2005JD006355.
- Marengo, J. (2007)** Integrating across Spatial and Temporal Scales in Climate Projections Challenges for using RCM projections to develop plausible scenarios for future extreme events in South America for vulnerability and impact studies. In Annals of IPCC TGICA Expert Meeting Integrating Analysis of Regional Climate Change and Response, Nadi, Fiji, 20-22 June 2007.
- Marengo, J., Jones, R., Alves, L. & Valverde, M. (2008)** Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate model system, Accepted, *Int. J. Climatology*.
- Marengo, J., Rusticucci, M., Penalba, O. & Renom, M. (2009)** 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*, doi10.1007/s10584-009-9743-7.
- Mesinger, F., Janjic, Z., Nickovic, S., Gavrilov, D. & Deaven, D. (1988)** The step-mountain coordinate model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Mon Wea Rev* 116:1493–1518.
- Mesinger (2008)** The Eta brief history, summary, results, discussion. <ftp://ftp1.cptec.inpe.br/etamd/Download/model/EtaGuide.2008.8.pdf>
- Nakicenovic, N., et al. (2000)** Special Reports on Emission Scenarios – SRES, edited by N. Nakicenovic and R. Swart. Cambridge Univ. Press, New York.
- New, M., Hulme, M., & Jones, P. (1999)** Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part I Development of a 1961–90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. , 12, 829–856.
- Núñez, M., Ciapessoni, H., Rolla, A., Kalnay, E., & Cai, M. (2008)** Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. *J. Geophys. Res.*, 113, D06111, doi10.1029/2007JD008638.
- Pisnichenko, I. & Tarasova, T. (2009)** The climate version of the Eta regional forecast model. II. Evaluation of the Eta CCS model performance against reanalysis data and surface observations. arXiv0901.1461v1 [physics.aop] <http://arxiv.org/abs/0901.1461v1>.
- Pope, V. D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree & Stratton, R. A. (2000)** The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model -- HadAM3. *Climate Dynamics*, 16: 123-146.
- Rome-Gaspaldy, S. & Ronchail, J. (1999)** La Pluviométrie au Pérou Pendant les Phases ENOS et LNSO. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, Vol. 27, No. 1, p. 675-685.
- 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*, DOI 10.1007/s10584-009-9742-8.
- Salazar, L., Nobre, C & Oyama, M. (2007)** Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09708, doi10.1029/2007GL029695.
- SENAMHI (2005b)** Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa., Editor Consejo Nacional del Ambiente – CONAM, ISBN 9972-824-19.
- SENAMHI (2007)** Escenarios de cambio climático en la cuenca de los ríos Mantaro y Urubamba para el año 2100; Proyecto Regional Andino de Adaptación – PRAA. Autores Rosas G., Avalos G., Díaz A., Oria C., Acuña D., Metzger L. y Miguel R. Eds. SENAMHI – MINAM, Perú, 124 pp.
- SENAMHI (2009c)** Escenarios Climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030 Autores Diaz A., Rosas G., Avalos G., Oria C., Acuña D., Llacza, A., Miguel R. Proyecto SCNCC, Segunda Comunicación Nacional del Cambio Climático. Editor Ministerio del Ambiente.
- SENAMHI (2009a)** Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030 Autores Diaz A., Rosas G., Avalos G., Oria C., Acuña D., Llacza, A., Miguel R. Proyecto SCNCC, Segunda Comunicación Nacional del Cambio Climático. Editor Ministerio del Ambiente.
- Solman, S., Nuñez M., & Cabré M.F. (2007)** Regional Climate change experiments over southern South America. I Present Climate. *Climate Dynamics*, 30:533-552.
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009)** Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, *J. Geophys. Res.*, 114, D02108, doi10.1029/2008JD011021.
- Valverde, M. & Marengo, J. A. (2007)** Change in the atmospheric circulation pattern over south America by climate future scenarios from models of IPCC AR4 climate simulations. *Revista Brasileira de Meteorologia*. Submitted.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebman, B. and Gonzalez, P. (2006)** Climate Change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC AR4 models. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L13707, doi10.1029/2006GL02575.