

EVALUACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS PARA EL ÁREA DE BOLIVIA:
COMPARACIÓN CON DATOS DE SUPERFICIE
EVALUATION OF THE PRECIS REGIONAL CLIMATE MODEL FOR THE REGION OF BOLIVIA:
COMPARISON WITH GROUND BASED DATA

MARCOS F. ANDRADE F. & LUIS A. BLACUTT B.

Laboratorio de Física de la Atmósfera
Instituto de Investigaciones Físicas
Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

Los posibles efectos del cambio climático sobre regiones como Bolivia son de mucho interés tanto a nivel científico como político. Los modelos numéricos del clima tanto a nivel global como regional son una importante herramienta para el estudio de tales efectos. A fin de establecer la confiabilidad de las proyecciones de la evolución futura del clima producidas por dichos modelos es necesario, sin embargo, validar las salidas de los mismos. En este trabajo se estudia el desempeño del modelo climático regional PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*) del *Hadley Centre* de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, sobre la región de Bolivia. La comparación de resultados del modelo con datos observados en superficie a nivel mensual de temperatura y precipitación en el periodo 1961–1990 muestra que ambos parámetros tienen un buen desempeño en zonas bajas (regiones con altura menor a 500 m.snm) pero que sobreestima la precipitación tanto en zonas de altura intermedia (entre 500 y 3500 m.snm) como en la zona andina (situada a una altura mayor a 3500 m.snm). A su vez, la comparación muestra que el modelo subestima la temperatura (media, máxima y mínima) en las regiones con altitudes mayores a 500 m.snm , mientras que realiza un trabajo aceptable en las zonas bajas. Aunque la parametrización de nubes y precipitación en las zonas de los valles y andina parece ser el elemento que más podría contribuir a las diferencias observadas, es necesario un estudio más profundo para entender los mecanismos involucrados.

Descriptor: cambio climático — Bolivia

Código(s) PACS: 92.70.-j, 93.30.Jg

ABSTRACT

The possible effects of climate change on regions like Bolivia are of great interest both at scientific and political level. Numerical climate models, both global and regional, are an important tool for studying such effects. However, in order to establish the reliability of future climate projections provided by such models is necessary to validate its results. In this work the performance of the regional climate model PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*), developed at the Hadley Centre at the UK Met Office, is evaluated for the region of Bolivia. The comparison of temperature and precipitation of model outputs with observations taken by ground-based stations at monthly level for the period 1961–1990 shows that the model has a good performance for both parameters at the Bolivian lowlands (locations with an altitude below 500 masl) while overestimates precipitation at regions situated at intermediate heights (between 500 and 3500 masl) as well as at the Andean region (above 3500 masl). At the same time, the comparison shows that the model underestimates temperature (mean, maximum and minimum) at regions with altitudes above 500 masl , while it makes an acceptable work at the lowlands. Even though parametrization of clouds and precipitation in regions like the Altiplano and valleys is likely to contribute to the observed biases, an in depth study of the involved mechanisms is needed.

Subject headings: climate change — Bolivia

1. INTRODUCCIÓN

A raíz del incremento observado de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero durante los últimos 50 años (i.e., Keeling 1960), el interés por los posibles efectos de este fenómeno sobre el clima futuro ha crecido enor-

memente. Debido a que el clima es un sistema altamente no-lineal¹ (Palmer & Willams 2008; Andrade 2008) las herramientas más usadas para estudiar la evolución futura del

¹ Para una explicación más detallada ver:
<http://www.ideo.columbia.edu/res/pi/arch/nonlinear.shtml>

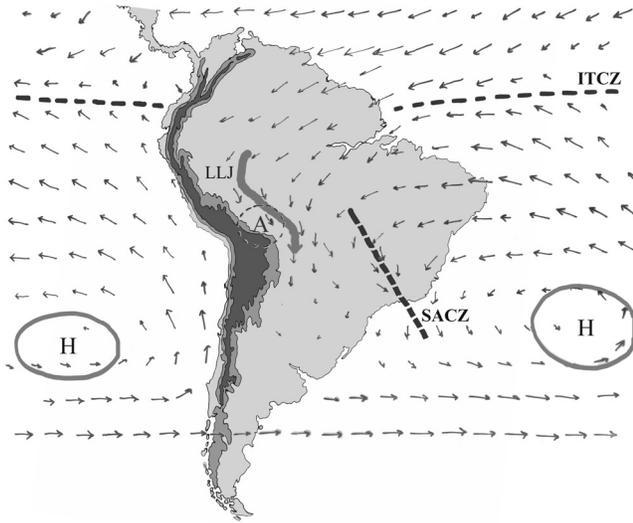


FIG. 1.— Esquema que muestra los principales controladores del clima de Bolivia.

mismo son los modelos climáticos numéricos pues estos tratan de representar al sistema climático de la manera más completa posible. Esto incluye no solamente a los elementos que componen este sistema como la atmósfera, los océanos o la biosfera, sino las relaciones entre éstos así como los complejos procesos de retroalimentación entre los diferentes componentes del sistema climático.

Dada la complejidad del sistema climático, los modelos numéricos todavía no pueden representar ciertos procesos de forma adecuada. Uno de los factores está relacionado a la resolución espacial del modelo y otro a la complejidad de ciertos procesos, como los relacionados con las nubes, por ejemplo. Debido a esto no queda más remedio que utilizar técnicas estadísticas que incorporen estos procesos a través de una representación paramétrica. A este proceso se le denomina “parametrización” y consiste básicamente en obtener valores (parámetros) que representen los procesos complejos o no resueltos a la escala en la que trabaja el modelo y permiten incorporar los efectos de los procesos físicos en las variables que el modelo resuelve (Peixoto & Ort 2002). En ese sentido la parametrización reemplaza procesos físicos por representaciones sencillas y, muchas veces empíricas, de los mismos. Por esa misma razón las parametrizaciones son típicamente las fuentes más importantes de error en los modelos (Palmer & Willams 2008).

La mayor parte de los modelos utilizados para el estudio del clima futuro son los denominados Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés). Estos modelos resuelven las ecuaciones que gobiernan a la atmósfera, el océano y otros componentes relevantes representados por el modelo, dividiendo el espacio en “cajas” o rejillas discretas (CCSP 2008). Por razones prácticas, el tamaño de estas cajas no puede ser muy pequeño pues el tiempo de cálculo crece rápidamente conforme el tamaño de la rejilla decrece (o, equivalentemente, la resolución del modelo se incrementa). Los GCMs típicamente tienen una resolución horizontal de

unos 150 a 300 km² (Vera et al. 2006) y entre 18 a 56 niveles verticales (que van desde la superficie hasta 0.1 hPa). Esta resolución es suficiente para resolver fenómenos a escala planetaria o sinóptica pero claramente no es adecuada para estudiar fenómenos a escala regional o local. Aún más, muchos fenómenos climáticos dependen decisivamente de la orografía por lo que regiones con gradientes altitudinales abruptos, como sucede en una parte importante del territorio boliviano, están inadecuadamente representadas por los GCMs. Estas debilidades llevaron de manera natural al desarrollo de los denominados Modelos Climáticos Regionales (RCM por sus siglas en inglés). Estos son modelos que operan en un dominio mucho menor que los GCMs y a una resolución mucho mayor a los mismos. A la fecha estos modelos pueden llegar a una resolución de kilómetros aunque típicamente trabajan entre 10 y 50 km de resolución horizontal. Los RCMs se relacionan con los GCMs a través de los bordes del dominio elegido pues las condiciones de borde son impuestas por los GCMs para asegurar consistencia general (global).

A pesar de los avances en la representación de los sistemas y procesos involucrados en el sistema climático, los modelos numéricos, sean estos GCMs o RCMs, deben ser evaluados a fin de establecer cuán bien representan la realidad. Este proceso, denominado comúnmente validación, se lo realiza a través de la comparación de observaciones y datos modelados en periodos largos que permitan definir la climatología de la región de estudio y estudiar características de la misma en la región de interés. La *World Meteorological Organization* (WMO) recomienda un periodo mínimo de 30 años para fines de estudiar el clima (WMO 1984). En particular, el periodo 1961–1990 fue adoptado por la WMO como el periodo de referencia estándar para la estimación de las normales climáticas. Adicionalmente, la validación busca verificar que el modelo sea capaz de reproducir eventos extremos, como periodos de sequías e inundaciones, así como otros indicadores estadísticos que describan el clima en el periodo de estudio.

El presente trabajo muestra resultados de la validación del modelo de escala regional PRECIS aplicado a la región de Bolivia. El documento se halla estructurado como sigue: una descripción del clima de Bolivia es dada en la sección 2, los datos así como el modelo usados en este trabajo son descritos en la sección 3, resultados de la comparación de los datos generados por el modelo y los datos observados son descritos en la sección 4 mientras que la discusión es descrita en la sección 5 y las conclusiones finales son expuestas en la sección 6.

2. CARACTERÍSTICAS Y ELEMENTOS DEL CLIMA EN BOLIVIA

El territorio boliviano se halla comprendido entre los 9°S y 23°S de latitud y 70°O y 57°O de longitud. El clima en Bolivia está fuertemente influenciado por su ubicación

² Aunque el modelo japonés JMA-GSM (Mizuta et al. 2006) ha sido perfeccionado para correr globalmente a 20 km de resolución espacial y 6 minutos de resolución temporal.

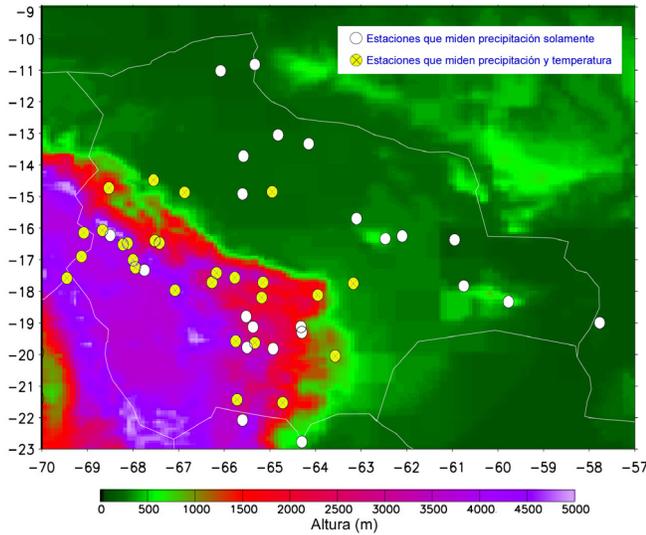


FIG. 2.— Distribución espacial de las estaciones usadas en el presente estudio (ver Tabla 1). Los colores de fondo representan la elevación de la superficie en el territorio boliviano con base a datos obtenidos en <http://www.ngdc.noaa.gov> a una resolución de 5' de grado. Los círculos indican la localización de las estaciones usadas para el periodo 1961–1990. Los círculos blancos muestran estaciones con datos de precipitación solamente mientras que los amarillos indican la existencia de datos de temperatura y precipitación (*color online*).

geográfica, su orografía y su geomorfología. Debido a su ubicación tropical los cambios en temperatura no presentan grandes variaciones temporales, asimismo las fluctuaciones en presión son pequeñas ($\sim 10hPa$) comparadas con las que ocurren en medias latitudes (Saucier 2003). La orografía también juega un papel importante en el clima de Bolivia pues temperatura y precipitación dependen fuertemente de la distribución altitudinal de su territorio. Casi dos tercios de Bolivia, 60% aproximadamente, se halla en regiones con alturas menores a $500msnm$, 24% del territorio se encuentra entre 500 y $3500msnm$ y el restante 16% por encima de esa altura en la zona Andina (ver Fig. 2). La parte baja se puede dividir en por lo menos dos regiones: una húmeda con mucha precipitación, ligada a la región amazónica y otra mucho más seca en la zona denominada Chaco alrededor de $20^\circ S$. La región de altura intermedia se caracteriza por tener un alto gradiente altitudinal que produce una alta precipitación por convección orográfica en la zona. En esta área se hallan regiones con la más alta biodiversidad del planeta (Ibish 2008). Las zonas altas, en contraste, son regiones con baja precipitación y bajas temperaturas.

La precipitación en Bolivia depende fuertemente del transporte de humedad desde el área amazónica y/o atlántica (Marengo et al. 2004). Este transporte es máximo durante la época de lluvias, típicamente entre Diciembre y Marzo, y se inhibe casi por completo en época seca. Durante la época de lluvias, el denominado monzón sudamericano (SAMS, *South American Monsoon System* por sus siglas en inglés) controla ese transporte de humedad. Esta última es generada hacia la atmósfera gracias a la intensa actividad convectiva en la zona central–oeste del Brasil y posteriormente transportada hacia Bolivia por los vientos alisios (Marengo et al. 2004). Debido a que la cordillera de los Andes actúa como una formidable

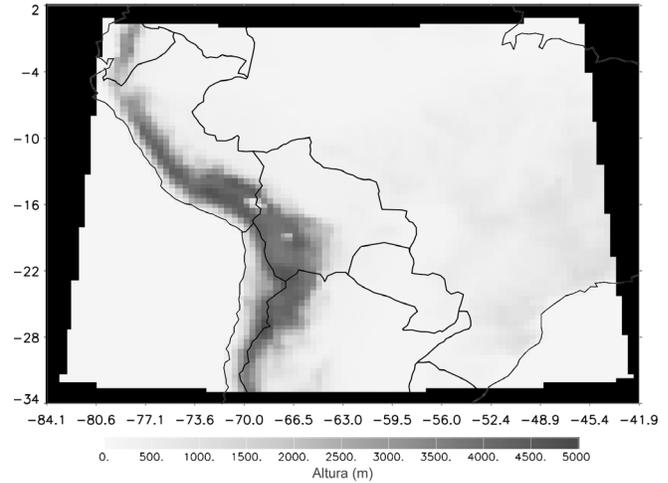


FIG. 3.— Dominio usado para la corrida descrita en el presente trabajo. La altura de la superficie, tal como es representada por el modelo, es también graficada.

barrera debido a su altura y gran gradiente altitudinal (ver Fig. 3), el viento proveniente del este o bien se desvía hacia el sur o es forzado a elevarse hacia los valles y la zona andina dejando en el camino la humedad transportada en forma de lluvia (Marengo et al. 2002). Este comportamiento está modulado por características de escala sinóptica como la llamada “Alta de Bolivia”, que es un anti–ciclón estacionario ubicado a una altura aproximada de $200hPa$ cuya posición varía dependiendo de la emisión de calor latente en el Amazonas (Lenters & Cook 1997); una región de baja presión de origen térmico en la región del Chaco; y, principalmente, por el comportamiento de la corriente en chorro de bajo nivel de Sudamérica (SALLJ, *South American Low Level Jet* por sus siglas en inglés) al este de los Andes. El SALLJ es una corriente de vientos en niveles que oscilan entre 925 y $850hPa$ y que transportan humedad hacia el sureste (Vera et al. 2006) y que tiene un marcado comportamiento estacional siendo más prominente durante el verano austral y más débil en el invierno correspondiente (Marengo et al. 2002). El SALLJ alimenta la cuenca de La Plata al proveer gran cantidad de humedad a esa región. Interesantemente muy poco de esa humedad se precipita en la zona del Chaco boliviano (Marengo et al. 2004). La Fig. 1 muestra esquemáticamente varios de los elementos que influyen el clima en Bolivia.

En el caso del Altiplano, las épocas seca y lluviosa son muy marcadas. En verano, debido al calentamiento de la superficie altiplánica, se inician procesos convectivos de gran intensidad que dan origen a tormentas eléctricas de moderada y elevada intensidad (Garreaud 1999). Se estima que más del 80% de la precipitación total del año que ocurre en el Altiplano se da entre diciembre y marzo (Vuille 1999). En invierno, por el contrario, existe intenso flujo de aire seco desde el occidente de manera casi permanente que inhibe la precipitación casi por completo (Garreaud 1999).

Aunque todas las características sinópticas mencionadas antes están presentes la mayor parte del año, la intensidad relativa de las mismas varía a lo largo de este periodo permitiendo producción y transporte de humedad de una región a

TABLA I
LISTA DE ESTACIONES USADAS PARA EL PERIODO DE ESTUDIO. LAS CRUCES INDICAN LA EXISTENCIA DE DATOS
DE PRECIPITACIÓN Y/O TEMPERATURA.

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Precip.	Temp.
AIQUILE	-18.20	-65.18	2250	x	x
APOLO (AASANA)	-14.73	-68.53	1406	x	x
ARANI	-17.57	-65.77	2740	x	x
ASCENCION DE GUARAYOS	-15.70	-63.10	246	x	
AYO-AYO	-17.01	-68.00	3956	x	x
BELEN	-16.07	-68.67	3820	x	x
BERMEJO	-22.77	-64.30	385	x	
CALAMARCA	-16.90	-16.13	3954	x	x
CAMIRI	-20.05	-63.57	810	x	x
CAPINOTA	-17.72	-66.27	2400	x	x
CHARAÑA	-17.58	-69.45	4057	x	x
CHINOLI	-19.63	-65.33	3450	x	x
CHULUMANI	-16.40	-67.52	1750	x	x
COCHABAMBA	-17.42	-66.17	2560	x	x
CONCEPCION	-16.25	-62.10	497	x	x
COPACABANA	-16.15	-69.08	3815	x	x
EL ALTO	-16.52	-68.22	4071	x	x
GUAYARAMERIN	-10.82	-65.33	130	x	
IRUPANA	-16.47	-67.42	1885	x	x
LA PAZ (Centro)	-16.48	-68.12	3635	x	x
LA PAZ (San Calixto)	-16.48	-68.12	3658	x	x
MAGDALENA	-13.33	-64.15	141	x	
MAIRANA	-18.12	-63.95	1300	x	x
ORURO	-17.97	-67.08	3701	x	x
PADILLA	-19.30	-64.30	2102	x	
PATACAMAYA	-17.25	-67.95	3789	x	x
PEÑAS	-16.23	-68.50	3986	x	
POTOSI	-19.58	-65.75	3950	x	x
PUERTO SUAREZ	-19.00	-57.77	133	x	
PUNA	-19.78	-65.50	3280	x	
QUILA-QUILA	-19.13	-65.37	3526	x	
RAVELO	-18.80	-65.52	3205	x	
RIBERALTA	-11.02	-66.08	135	x	
ROBORE	-18.33	-59.77	300	x	
RURRENABAQUE	-14.48	-67.55	202	x	x
SANTA ANA	-13.72	-65.58	144	x	
SANTA CRUZ	-17.75	-63.17	413	x	x
SAN BORJA	-14.87	-66.87	194	x	x
SAN IGNACIO DE MOXOS	-14.92	-65.60	160	x	
SAN IGNACIO DE VELASCO	-16.37	-60.95	413	x	
SAN JAVIER	-16.33	-62.47	534	x	
SAN JOAQUIN	-13.05	-64.82	139	x	
SAN JOSE	-17.83	-60.75	280	x	
SICA-SICA	-17.33	-67.75	3820	x	
TARIJA	-21.53	-64.72	1875	x	x
TOTORA	-17.72	-65.15	2906	x	x
TRINIDAD	-14.85	-64.95	157	x	x
TUPIZA	-21.43	-65.72	2952	x	x
TURUCHIPA	-19.82	-64.93	3360	x	
VILLAZON	-22.08	-65.60	3443	x	
VILLA SERRANO	-19.12	-64.32	2108	x	
YACUIBA	-22.02	-63.70	643	x	x

otra o inhibiendo la misma. Adicionalmente, eventos como El Niño y La Niña, que son las fases positivas (calientes) y negativas (frías) de un fenómeno conocido como *El Niño Southern Oscillation* (ENSO, por sus siglas en inglés) modifican drásticamente el comportamiento climático en muchas regiones del territorio boliviano (Garreaud & Aceituno 2001, Ronchail et al. 2005).

3. DATOS Y MODELO

3.1. Observaciones de superficie

Para el presente estudio se utilizaron datos mensuales de 52 estaciones en el periodo 1961–1990. Las variables medidas en estas estaciones fueron temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación acumulada

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIDA USADA EN EL PRESENTE TRABAJO.

Condiciones de borde (Modelo Global)	Resolución espacial	Rango de latitudes	Rango de longitudes	Periodo
HadAM3P	50km	33.6°S – 2°N	41.88°W – 84.12°W	1961–1990

mensual. Los datos fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. La distribución espacial de las estaciones utilizadas se muestra en la Fig. 2, donde además se incluye la elevación de superficie. La Tabla 1 presenta información relacionada a las estaciones usadas en el presente trabajo. Las 52 estaciones utilizadas tenían datos de precipitación acumulada mensual en tanto que solamente 30 tenían registro de temperatura. En todos los casos se exigió que hubiera por lo menos el equivalente a 10 años de datos aunque los mismos no formaran series continuas de tiempo. Como se observa en la Fig. 2 es evidente que la falta de estaciones impide cubrir de manera adecuada la topografía de Bolivia. Existen pocas estaciones en las zonas bajas, aunque en este caso el hecho que el terreno sea relativamente plano alivia en algo la baja densidad de estaciones. La mayor densidad de estaciones se encuentra en los valles y en la zona altiplánica aunque con preferencia en la zona cercana a la Cordillera Oriental. Se tuvo acceso a muy pocos datos, para el periodo de estudio, en la zona de la Cordillera Occidental.

Aunque para el estudio también se tuvieron acceso a datos de otras fuentes se decidió usar solamente los datos provistos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) boliviano debido a que se encontraron diferencias, algunas de ellas significativas, entre las diferentes fuentes de datos. En todo caso, independientemente de cual sea la fuente de datos, el proveedor primario de los datos es SENAMHI por lo que el análisis de las diferencias encontradas es un tópico que merece ser investigado en otro trabajo.

Adicionalmente, se usaron datos interpolados a $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ lat-lon de temperatura media y precipitación obtenidos del *Center for Climatic Research, University of Delaware* (Legates and Willmont 1990a, 1990b). Aunque este tipo de datos permite tener una cobertura espacial y temporal muy buena del territorio objeto de estudio debe tenerse en cuenta que en aquellas regiones donde no existan datos obtenidos por estaciones de tierra los valores son típicamente interpolados y/o generados de forma sintética (Garreaud et al. 2008) por lo que se debe tener especial cuidado con la interpretación de estos datos en dichas regiones. Por esta razón en el presente trabajo se usan los datos interpolados para un análisis referencial y cualitativo solamente.

3.2. El modelo climático regional PRECIS

El modelo PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*) forma parte de la versión del modelo de circulación regional británico HadRM3P (Jones et al. 2004). HadRM3P tiene 19 niveles verticales y dos posibles resoluciones horizontales, 25 y 50km. Las condiciones de borde pueden ser elegidas de varias posibles opciones dependiendo el periodo en el cual se necesitan las simulaciones. Para el

caso del periodo 1961–1990 existen resultados no solamente obtenidos de GCMs sino también de fuentes observacionales como los reanálisis europeo y estadounidense. La versión del modelo con la que se trabajó fue la 1.7. Como todo modelo climático las características de la resolución de las ecuaciones de desenvolvimiento atmosférico suelen dividirse en dos partes, una denominada “dinámica” y otra denominada “física”. En cuanto a la dinámica del modelo, éste es hidrostático, es decir no considera de manera explícita los procesos convectivos que generan nubes y por lo tanto no determina de manera directa la precipitación. En cuanto a la física del modelo, se recurren a parametrizaciones. Este proceso se logra utilizando funciones determinísticas simples. Para los procesos como la formación de nubes y precipitación se utilizan parametrizaciones de acuerdo a Gregory y Morris (1996). La radiación sigue el esquema desarrollado por Edwards y Slingo (1996) y modificado por Cusack et al., (1999). Estos esquemas son fijos independientemente de las características geográficas sobre las que se corre el modelo. Para fines de la solución de las ecuaciones, los años son de 360 días y cada mes consta de 30 días.

Las ecuaciones del modelo son “dirigidas” por un modelo de escala global, las condiciones de borde lateral son incorporadas al modelo mediante el método de relajación newtoniana (Davis & Turner 1977) en la que se estima que los primeros 400km cercanos al borde del dominio consisten en la zona de amortiguamiento que no debe ser considerada en el análisis debido a que ésa es la zona en la que el modelo global se acopla con el modelo regional. De acuerdo a las recomendaciones de los desarrolladores del modelo, el contorno sobre el cual se definen los bordes laterales no debería cortar cadenas montañosas y debería tener un área del orden de $5000 \times 5000 \text{ km}^2$ (Jones et al. 2004). La primera recomendación, sin embargo, es prácticamente imposible de cumplir en nuestro caso debido a las características geomorfológicas de la región de estudio. La segunda recomendación está relacionada al hecho que un dominio muy pequeño podría restringir en exceso la circulación generada por el RCM mientras que un dominio muy grande podría generar patrones de circulación tan diferentes a los generados por el GCM que perturbaría la circulación general modelada por este último (Jones et al. 1995; Rojas & Seth 2003). Por esta razón, se realizaron experimentos preliminares variando el tamaño del dominio para tratar de determinar el tamaño óptimo. Estas corridas experimentales fueron efectuadas para tres años (1960–1962) y con dominios que variaban en 800km tanto en latitud como en longitud partiendo de un área que englobaba a Bolivia (unos $1300 \times 1200 \text{ km}^2$) hasta un área del orden de $5000 \times 5000 \text{ km}^2$. Los resultados de estos experimentos mostraron diferencias entre los distintos dominios. Aunque las diferencias entre un dominio y el siguiente más grande

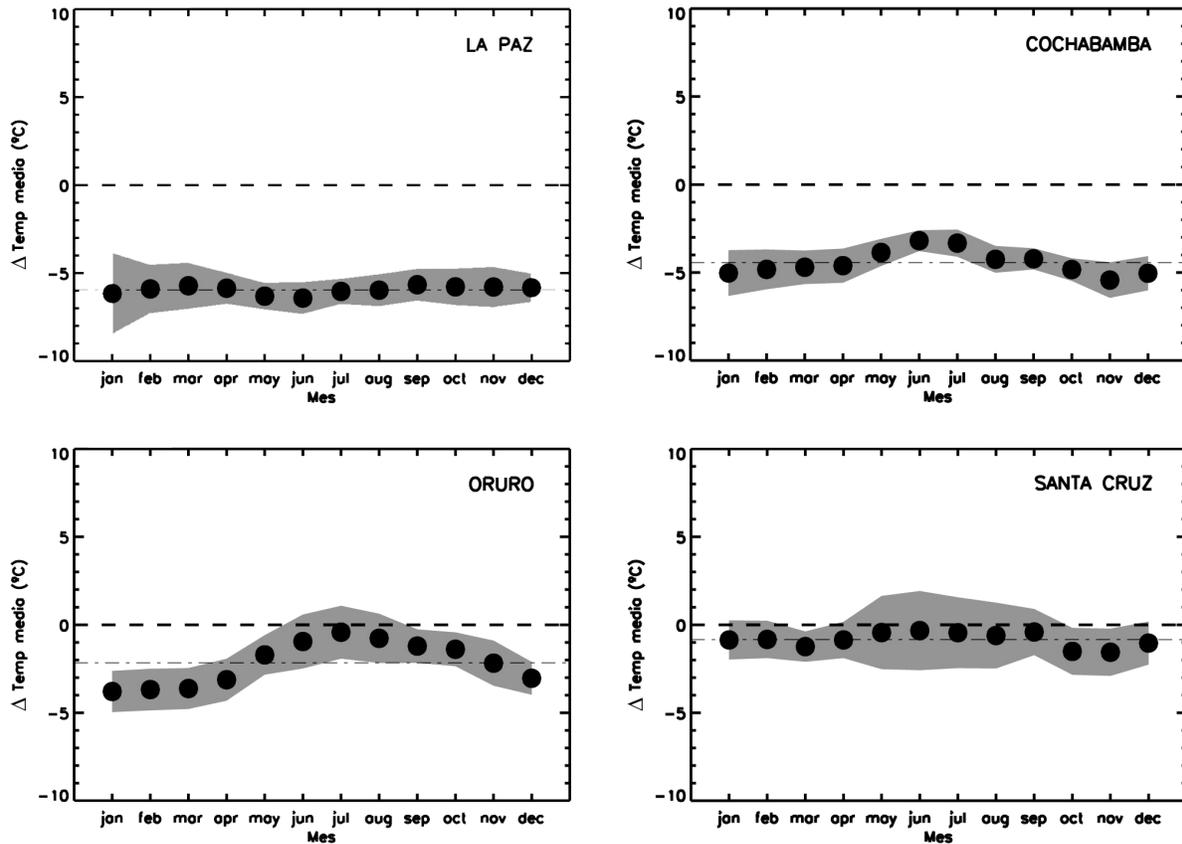


FIG. 4.— Temperatura media mensual promedio para el periodo 1961–1990 para estaciones seleccionadas. Los puntos llenos indican el promedio de la diferencia entre datos modelados y observados en tanto que la región sombreada indica la variabilidad ($\pm\sigma$) de esa diferencia en el periodo de estudio. La línea punteada delgada indica el valor promedio anual para el periodo de estudio mientras que la línea discontinua gruesa indica el valor referencial para cuando la diferencia modelo menos observaciones sea cero.

se hacían, en promedio, más pequeñas, al agrandar el dominio no se observó una clara convergencia de los resultados ni para la precipitación ni para la temperatura.

Los resultados de los experimentos preliminares sugieren la necesidad de un estudio más detallado respecto al tamaño óptimo del dominio pero el mismo está fuera del alcance del presente trabajo. Por esta razón se optó por seguir las recomendaciones usuales para este modelo (Jones et al. 2004) y se definió trabajar con un dominio de $5000 \times 4400 \text{ km}^2$. Dado el tamaño del dominio se decidió utilizar una resolución de 50 km principalmente por limitaciones de recursos computacionales. La Fig. 3 muestra el dominio usado además de la topografía manejada por el modelo. Además, se eligió usar el modelo global HadAM3P desarrollado por el *Hadley Centre* (Pope et al. 2000) como condición de contorno principalmente por razones de consistencia con otros trabajos realizados en Sudamérica (por ejemplo, Marengo et al. 2009; Soares & Marengo 2008). La Tabla 2 resume las principales características de la corrida usada en este artículo.

4. VALIDACIÓN DE LAS SALIDAS DEL MODELO

A fin de realizar la validación del modelo se corrigieron las salidas de temperatura del mismo tomando en cuenta la diferencia entre la altura de las retículas del modelo y la altura de cada estación. Para esta corrección se usó un gradiente térmico de $5^\circ\text{C}/\text{km}$ basado en los datos observados. Estos va-

lores corregidos, junto a los de precipitación, fueron interpolados espacialmente para una comparación “uno a uno” con los datos obtenidos en superficie para cada mes del periodo 1961–1990. Las diferencias entre datos del modelo, interpolados espacialmente a través de una interpolación bilineal simple³, y las observaciones fueron entonces calculadas para cada variable y estación. Las series temporales resultantes muestran que en tierras bajas la diferencia promedio entre valores modelados y observados de temperatura media es relativamente pequeña, del orden de 1°C , aunque con variaciones individuales de hasta 5°C . No se observa una dependencia estacional evidente. En tierras altas, sin embargo, se observan diferencias marcadas entre valores modelados y observados, mostrando, en algunos casos, una evidente dependencia estacional. En las regiones intermedias, típicamente valles, las diferencias promedio entre modelo y observaciones son notoriamente más grandes alcanzando valores de hasta 8°C con una fuerte variabilidad alrededor del valor medio pero sin mostrar, la mayor parte de las veces, una fuerte dependencia estacional. Un comportamiento similar se observa para las temperaturas mínimas y máximas medias mensuales.

Las Figs. 4, 5 y 6 muestran los valores promedio mensuales de las diferencias entre valores modelados y observados para el periodo 1961–1990 para la temperatura media, tem-

³ NUMERICAL RECIPES IN C: THE ART OF SCIENTIFIC COMPUTING, Copyright (C) 1988–1992 by Cambridge University Press.

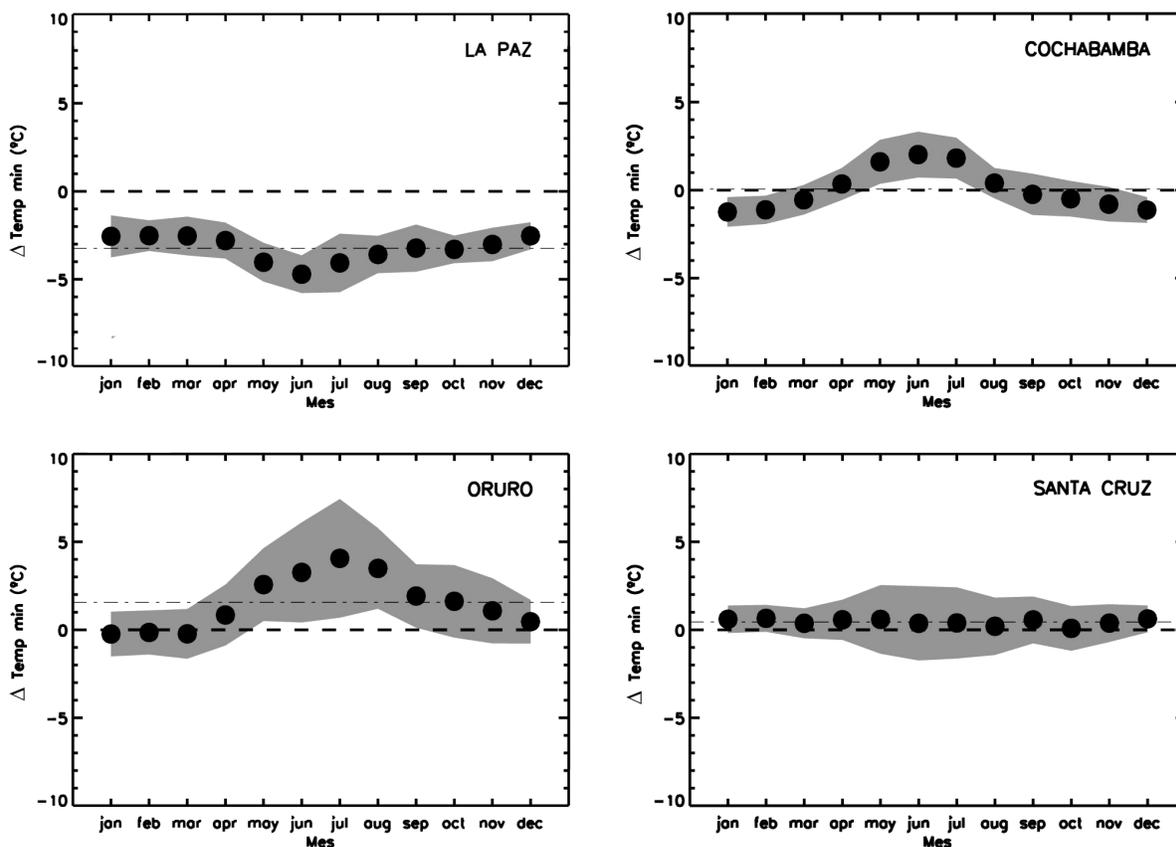


FIG. 5.— Lo mismo que para la Fig. 4 pero para la temperatura mínima media mensual.

peratura media mínima y la temperatura media máxima, respectivamente. Los gráficos muestran estas diferencias para cada mes del año. La línea punteada delgada indica el valor medio anual mientras que la línea punteada gruesa indica el valor referencial cuando la diferencia es cero. Si el modelo reprodujera las observaciones perfectamente, todos los puntos en estos gráficos estarían sobre la línea punteada gruesa y tendrían variabilidad nula alrededor de la misma (todas las diferencias serían igual a cero). A fin de ilustrar el comportamiento de la diferencia “modelo menos observaciones” se seleccionaron estaciones representativas en las regiones Altiplano, valles y tierras bajas para ilustrar el comportamiento típico observado en estaciones localizadas en estas regiones. En el caso de las temperaturas medias mensuales se observa (Fig. 4) que el modelo reproduce razonablemente bien el ciclo estacional en la mayor parte de las estaciones (pues la pendiente de la diferencia es cercana a cero) pero existen diferencias sistemáticas importantes especialmente en la zona andina y la de los valles, donde las diferencias medias llegan hasta 7°C , mostrando que el modelo subestima la temperatura media en prácticamente todas las estaciones. Sin embargo, existen algunas estaciones, Oruro por ejemplo, donde la diferencia modelo menos observaciones exhibe una clara dependencia estacional a lo largo del año. En tierras bajas, por otro lado, la diferencia observada en las distintas estaciones es muy cercana a cero, como se muestra para el caso de Santa Cruz.

Para la temperatura mensual promedio mínima (Fig. 5) se observa un comportamiento similar a la temperatura media con una ligera tendencia a mostrar mayor dependencia estacional como se puede ver en el caso de Cochabamba y Oruro. Una vez más esta diferencia es cercana a cero para las estaciones localizadas en tierras bajas mientras que se observa que el modelo subestima la temperatura mínima en zonas por encima de 500msnm .

En el caso de la temperatura mensual promedio máxima la dependencia de la diferencia estacional de los valores modelados con los observados es relativamente pequeña (Fig. 6), pero la diferencia promedio anual es más grande que en el caso de la temperatura mínima y media. Una vez más la diferencia mensual promedio más grande ocurre en la región de los valles mientras que el modelo muestra un acuerdo bueno con las observaciones en tierras bajas.

En el caso de la precipitación (Fig. 7), los datos muestran un sesgo mucho más marcado entre valores modelados y valores observados para lugares de altura y/o con pendiente elevada (como la región de los valles, por ejemplo). En este caso, el modelo no sólo sobreestima la precipitación en prácticamente todas las estaciones de la zona sino que la diferencia entre valores modelados y observados muestra una marcada dependencia estacional. La variabilidad en el periodo de estudio es también bastante grande tal como lo evidencia la Fig. 7. Como era de esperarse, dicha variabilidad es mayor durante la época de lluvias. Interesantemente, las

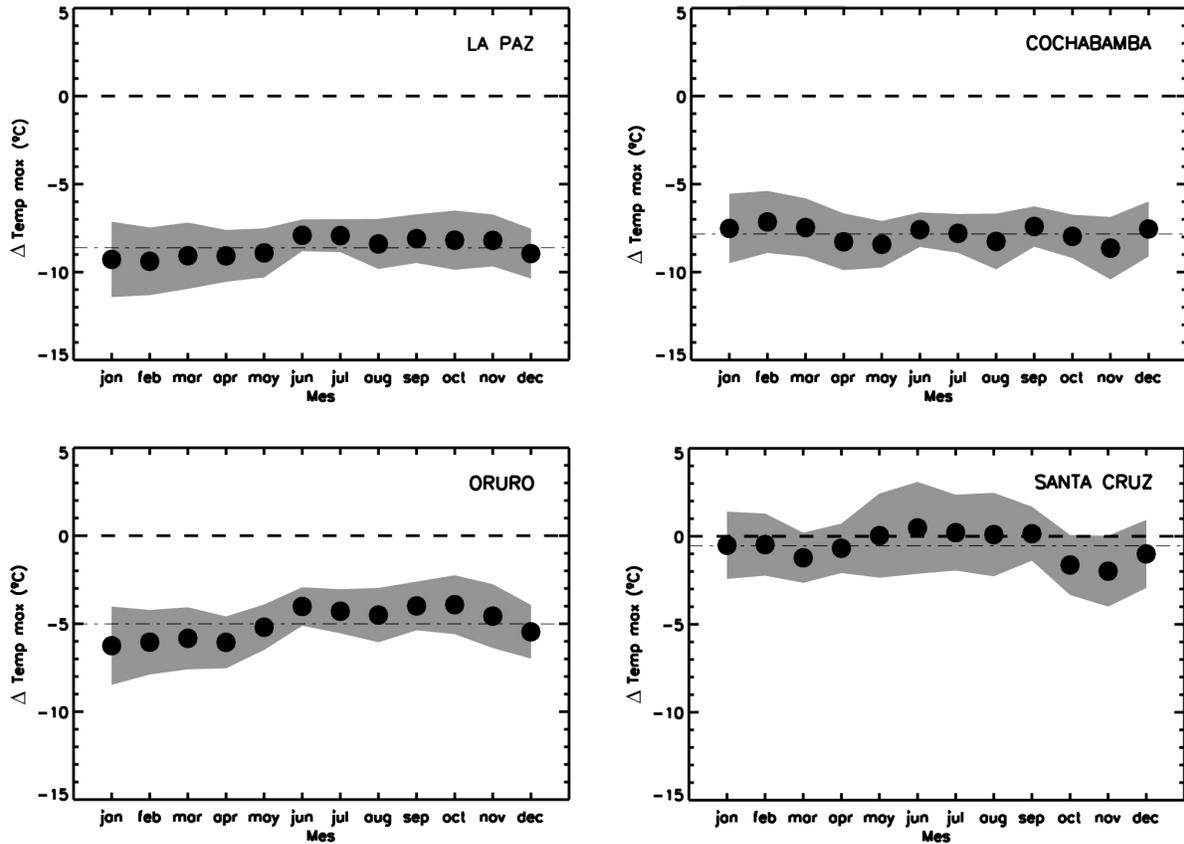


FIG. 6.— Lo mismo que para la Fig. 4 pero para la temperatura máxima media mensual.

estaciones de tierras bajas muestran un acuerdo (estadístico) muy bueno entre lo predicho por el modelo y las observaciones. En este caso, sin embargo, es importante tomar en cuenta que a pesar que las diferencias absolutas en invierno no parecen ser grandes, la precipitación en esta temporada del año es baja en prácticamente todas las regiones de Bolivia.

La Fig. 8 muestra las diferencias promedio anuales para las cuatro variables en estudio para las distintas estaciones donde hay datos. Las diferencias, expresadas a través de círculos de colores, corresponden a las estaciones usadas en el análisis. Cuanto más cercanos estos valores a cero, mejor el desempeño del modelo climático. Esto sin embargo podría llevar a falsas conclusiones pues no expresa posibles dependencias estacionales, como en la mayoría de las estaciones de altura. El gráfico muestra que de manera sistemática, y para las cuatro variables estudiadas, los valores entregados por el modelo se hallan cercanos a los valores observados en las zonas bajas. Un análisis estación por estación muestra que el modelo también reproduce bien el comportamiento estacional en esta área. Esto sugiere que el modelo realiza un buen trabajo en dicha región. Sin embargo, en lugares donde el gradiente altitudinal es grande o en estaciones situadas en lugares planos pero a gran altitud, como son las estaciones del Altiplano boliviano, la diferencia entre los valores modelados y medidos es relativamente grande. El modelo subestima sistemáticamente la temperatura tanto media como mínima y máxima. Esta diferencia no parece ser, sin

embargo, dependiente de la altura. La Tabla 3 sintetiza cuantitativamente lo expresado al mostrar, por región, los valores medios de las diferencias de cada variable estudiada, la correspondiente desviación estándar y la raíz cuadrática media. En prácticamente todos los casos estos parámetros estadísticos son más pequeños para las zonas bajas que para los valles y zonas altas indicando un mejor desempeño del modelo en aquella región.

Dada la evidente falta de información en grandes regiones del territorio objeto de estudio se usaron datos interpolados espacialmente (ver sección 3.1) para tener una mejor idea del comportamiento del modelo. Es necesario, sin embargo, tener presente que la falta de estaciones en varias de las regiones de este territorio podrían hacer que los valores en dichas áreas sean solamente producto de la interpolación y por tanto podrían no representar adecuadamente el comportamiento de la temperatura o precipitación en dichas regiones. Por esa razón, las comparaciones que a continuación se presentan tienen por objeto proveer una estimación cualitativa del comportamiento espacial promedio del modelo respecto a las estimaciones basadas en observaciones en el periodo 1961–1990.

Las Figs. 9a y 9b muestran, respectivamente, las climatologías de la temperatura media mensual y precipitación acumulada anual obtenidas de los datos interpolados. Para fines de claridad se han interpolado espacialmente a una malla más fina aún dichos resultados y sobrepuesto los valores

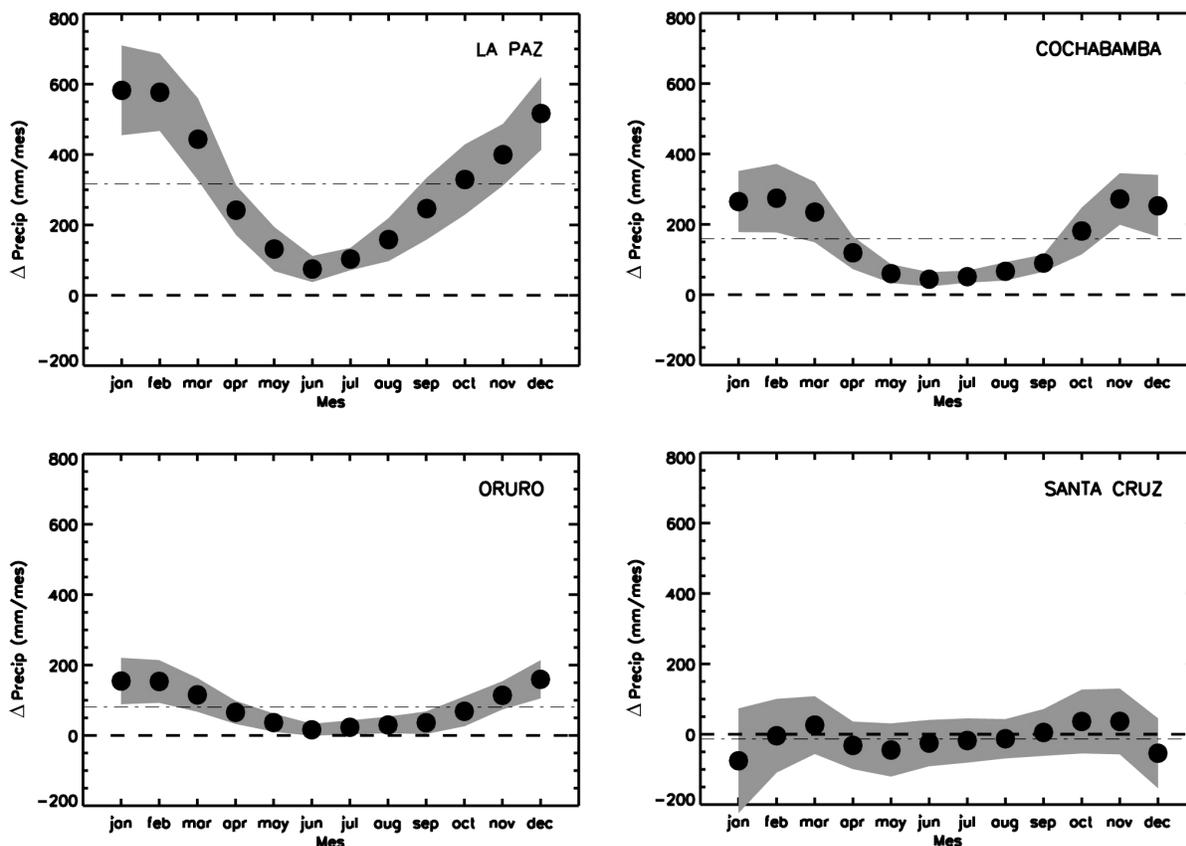


FIG. 7.— Precipitación acumulada mensual para el periodo de estudio. Se muestran sólo algunas estaciones seleccionadas de las tres regiones mencionadas en el texto. Símbolos y área sombreada tienen el mismo significado que en la Fig. 4.

promedio para el periodo 1961–1990 obtenidos de las observaciones de estaciones de superficie (representados por los círculos). Las figuras muestran una correspondencia razonable entre datos medidos y datos interpolados tanto para temperatura como para precipitación. Los rasgos más relevantes mostrados por los datos interpolados coinciden con características reportadas por el SENAMHI boliviano (Carrasco 2009, comunicación personal), por ejemplo el máximo de precipitación en la zona central de Bolivia. Las Figs. 9c y 9d muestran los valores climatológicos de temperatura y precipitación, respectivamente, pero obtenidos por PRECIS. En estos gráficos también se presentan los valores provenientes de las estaciones de superficie y se mantienen las escalas de colores como en 9a y 9b a fin de facilitar la comparación con los valores “observados”. Los gráficos muestran que los datos modelados de temperatura reproducen cualitativamente bien los datos observados pues las zonas frías y calientes están adecuadamente representadas en términos espaciales. Por el contrario, en el caso de la precipitación se observa que el modelo produce excesiva precipitación en toda la zona de fuerte gradiente altitudinal y falla en reproducir el máximo observado de precipitación centrado aproximadamente en $64^{\circ}O$ y $16^{\circ}S$. Para poder comparar de mejor manera estas diferencias se calcularon los valores “modelo menos observaciones” (Figs. 8e y 8f). Estas diferencias indican que las temperaturas (Fig. 8e) están en general razonablemente modeladas (comparadas con los datos interpolados)

aunque en gran parte del territorio boliviano se observa subestimación de las mismas. Por otro lado, aunque el modelo reproduce razonablemente bien la distribución espacial de la precipitación, en el sentido que reproduce adecuadamente el hecho que exista mayor precipitación en zonas bajas que en zonas altas, muestra una fuerte sobreestimación en la región de los valles. A pesar de eso, en una parte importante del área de interés la diferencia entre modelo y observaciones es menor a 500mm/año (en valor absoluto).

5. DISCUSIÓN

La comparación de datos de superficie con las salidas del modelo muestra que éste realiza un buen trabajo en zonas bajas al reproducir razonablemente bien valores mensuales de temperatura media, mínima y máxima, así como la precipitación acumulada mensual. Por el contrario, en lugares donde la pendiente es elevada o la altura de superficie es alta el modelo subestima de manera sistemática la temperatura y sobreestima la precipitación. La variable que es mejor estimada por el modelo es la temperatura mínima mientras que la temperatura máxima es la que más pobre desempeño tiene en el grupo de las temperaturas. En el caso de la precipitación, se observa un aceptable desempeño del modelo en la región de tierras bajas. En esta zona, la mayor parte de los valores modelados se hallan dispersos alrededor de los valores observados. En la región de valles, por el contrario, se observa una marcada sobreestimación de la precipitación a casi

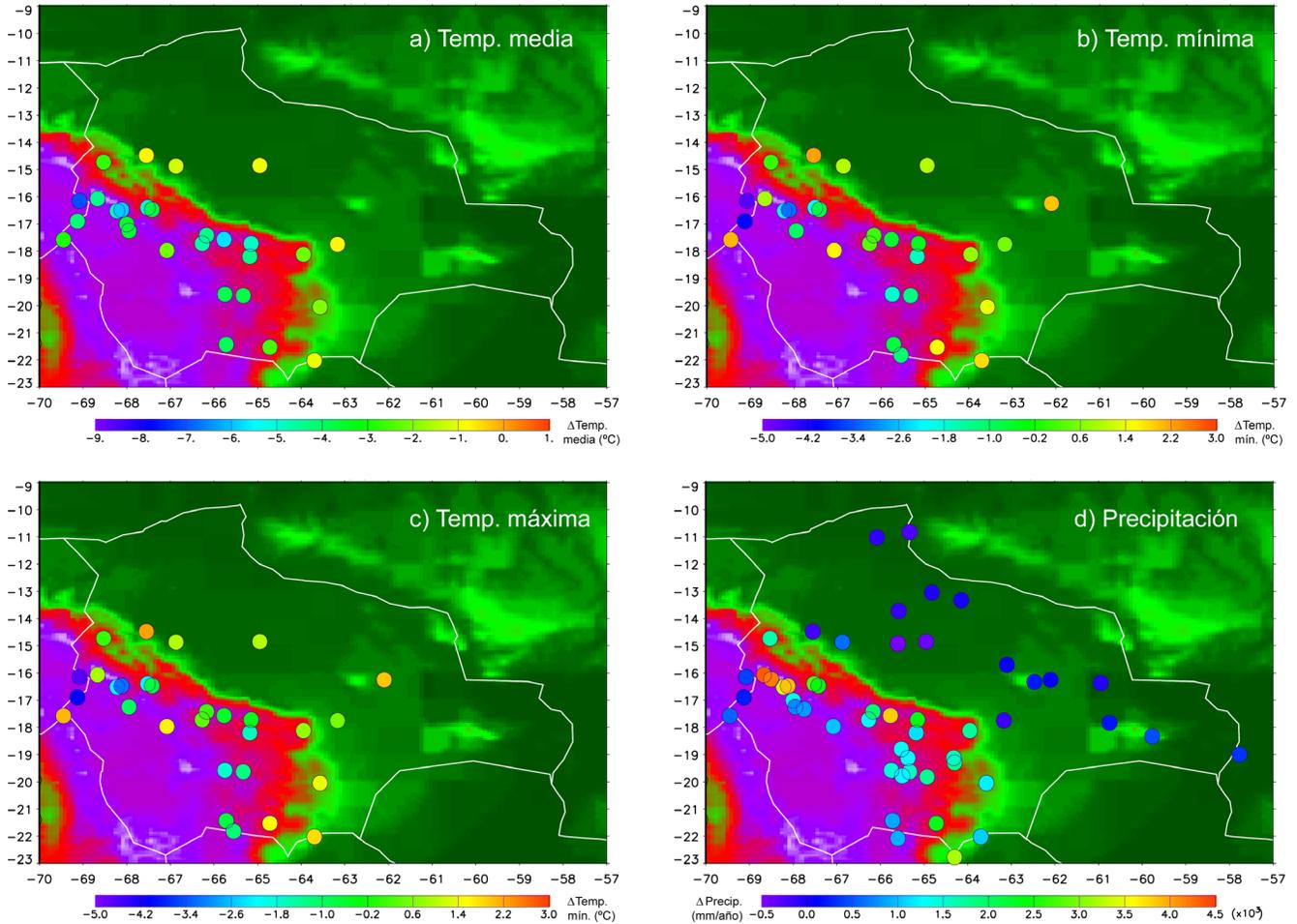


FIG. 8.— Valores anuales promedio, para el caso de las temperaturas (a,b y c), y acumulados anualmente (d), para el caso de la precipitación, de las diferencias “modelo menos observaciones”. Los colores de fondo representan la variación de altura del terreno respecto a nivel del mar. Los círculos de colores muestran las diferencias de las variables meteorológicas estudiadas para las diferentes estaciones usadas en el presente estudio. Nótese las distintas escalas en todos los gráficos (*color online*).

cualquier altura. Del mismo modo, en la región altiplánica se observa una elevada sobreestimación de la precipitación. A pesar de este hecho, el modelo es capaz de reproducir el ciclo estacional produciendo mucha más lluvia en la estación húmeda que en la época seca como se espera. El buen comportamiento mostrado por el modelo en tierras bajas, sin embargo, debe ser analizado con cuidado. Una comparación a escala continental (Marengo et al. 2009) muestra que el modelo subestima la precipitación en regiones al este y noreste de la región de estudio en el presente trabajo. Esto podría indicar que el buen acuerdo entre modelo y observaciones en las regiones bajas podría, al menos en parte, deberse a que esta región se encuentra en la zona de transición entre sub y sobreestimación. Es necesario un estudio más profundo que permita entender las causas de estos sesgos para asegurar que el modelo realiza un buen trabajo por las causas correctas.

El modelado de los parámetros meteorológicos sobre Bolivia no es trivial. En primer lugar porque este país se encuentra en la región tropical, segundo porque su territorio posee elevados gradientes altitudinales y tercero porque no existe la suficiente cantidad de información de superficie o de niveles de altura que permitan afinar adecuadamente los procesos parametrizados en el modelo y/o validar los resultados

de los mismos. En nuestro caso, si bien el modelo realiza un trabajo aceptable en cuanto al parámetro de temperatura, produce desviaciones importantes respecto a los valores observados en el caso de la precipitación, especialmente en regiones con fuerte gradiente altitudinal. La causa de estas diferencias podría deberse, al menos en parte, al hecho de que el modelo utiliza un sólo esquema de parametrización para la convección para todo el dominio (Jones et al., 2004). Los procesos convectivos son diferentes en zonas bajas comparados a los sistemas en tierras altas, siendo los sistemas convectivos de mesoescala los mayores aportantes a la lluvia en las tierras bajas (Halverson et al. 2002; Lang & Barros 2004). Como la parametrización es única para una región con orografía tan variada, es difícil que el modelo represente adecuadamente ambos procesos simultáneamente. De hecho el estudio de las parametrizaciones para el Altiplano es un tópico pendiente de investigación. Adicionalmente, la pobre resolución de la orografía de la región (a una resolución de 50 km es posible tener variaciones de 1800 m de altura entre puntos de retícula adyacentes) podría también contribuir a los sesgos observados. Comparaciones hechas entre corridas realizadas a 25 y 50 km de resolución con PRECIS (Seiler 2009) muestran, sin embargo, diferencias relativamente menores entre

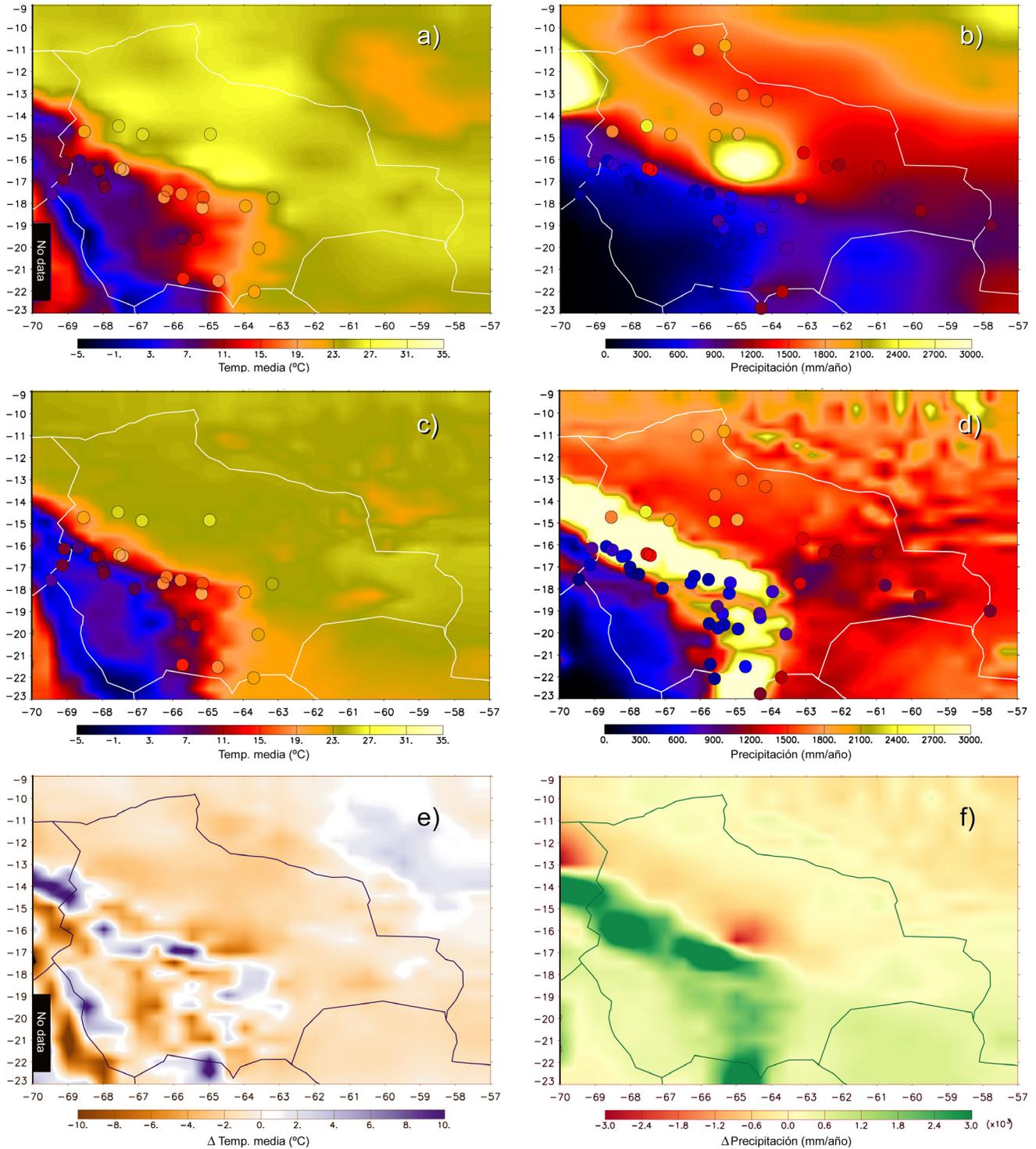


FIG. 9.— Comparación de los resultados entregados por el modelo con datos de superficie interpolados espacialmente. Estos valores, a una resolución original del orden de 50km, fueron interpolados a una malla mucho más fina para fines de claridad. Las figuras (a) y (b) muestran la climatología de los datos observados para el periodo 1961–1990, mientras las figuras (c) y (d) muestran los valores climatológicos de los datos modelados para el mismo periodo. Las figuras (e) y (f) muestran la diferencia de (c)–(a) y (d)–(b), respectivamente. Los círculos muestran los valores climatológicos de las observaciones obtenidas de las estaciones de superficie (*color online*).

los resultados de ambas corridas. En todo caso, resultados de otros modelos también muestran sobreestimación de la precipitación sobre zonas de fuertes gradientes altitudinales (Solman et al. 2007).

Por último es bueno mencionar que en el contexto del cambio climático se espera que ocurran cambios en las distribu-

ciones de precipitación así como incremento o decremento de eventos extremos (IPCC 2007). Por eso la capacidad del modelo de reproducir eventos que afectan al territorio boliviano como inundaciones, sequías y heladas, por ejemplo, debe ser evaluada. Una inadecuada parametrización o una pobre representación de la orografía regional no explican

TABLA 3
 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO PARA TODAS LAS ESTACIONES DENTRO DE
 CADA UNA DE LAS REGIONES DEFINIDAS EN EL TEXTO.

	Temp. Media (°C)			Temp. Mínima (°C)			Temp. Máxima (°C)			Precipitación (mm/mes)		
	Media	Desv. Est.	RCM ^a	Media	Desv. Est.	RCM ^a	Media	Desv. Est.	RCM ^a	Media	Desv. Est.	RCM ^a
Tierras bajas	-1.01	1.17	1.03	1.25	1.31	1.41	-1.60	1.65	1.70	14.6	80.6	67.7
Valles	-3.70	1.35	3.92	-0.26	1.70	1.16	-5.71	1.95	6.05	136.6	67.5	144.0
Zonas altas	-4.49	1.23	4.72	-1.68	1.68	2.87	-6.94	1.77	7.19	161.7	56.4	204.7

^aRaíz Cuadrática Media.

completamente las diferencias observadas. Por esa razón, un análisis de variables de altura como vientos, transporte de humedad asociado y otros parámetros que permitan evaluar cuan bien reproduce el modelo las características regionales que controlan el clima en Bolivia es también recomendable. Un estudio más profundo podría permitir mejorar el desempeño del modelo sobre Bolivia.

6. CONCLUSIONES FINALES

La comparación de resultados del modelo con datos observados en superficie a nivel mensual de temperatura y precipitación en el periodo 1961–1990 indica que el modelo tiene un buen desempeño en zonas bajas (menos de 500 *msnm*). Sin embargo, en zonas de altura intermedia (entre 500 y 3500 *msnm*) y zonas altas (altura mayor a 3500 *msnm*) el modelo subestima, en algunos casos fuertemente, tanto temperatura media y temperatura máxima. La temperatura mínima también es subestimada en estas regiones pero en menor manera que las otras dos variables de temperatura. En todo caso, la temperatura mínima es la variable mejor modelada por

PRECIS para Bolivia. Con respecto a la precipitación se observa una sobreestimación para las regiones con altura mayor a 500 *m* pero un comportamiento aceptable para alturas menores. La sobreestimación más fuerte se da en la región con el gradiente altitudinal más grande. Estos resultados son corroborados a través de una comparación de los datos entregados por el modelo contra datos de superficie interpolados espacialmente. En este caso se observa claramente que las mayores diferencias se producen en las regiones de gran gradiente altitudinal. En las otras regiones, tierras bajas y parte del altiplano, las diferencias son relativamente menores.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contó con el apoyo de *Conservation International*, oficina regional Bolivia, y la colaboración del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) a través del climatólogo Gualberto Carrasco. Agradecemos también a los dos revisores por sus comentarios y sugerencias que permitieron hacer mucho más claro este manuscrito.

REFERENCIAS

- Andrade, M. F. 2008, RBF, 14, 42
- CCSP. 2008, Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [Bader D.C., C. Covey, W.J. Gutowski Jr., I.M. Held, K.E. Kunkel, R.L. Miller, R.T. Tokmakian and M.H. Zhang (Authors)] (Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D.C., USA, 124 pp)
- Cusack, S. and Edwards, J. M. & Crowther, J. M. 1999, *J. Geophys. Res.*, 104, n. D2, 2051
- Davies, H. C. & Turner, R. E. 1977, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 103, 225
- Edwards, J. M. & Slingo, A. 1996, *J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 689
- Garreaud, R. D. 1999, *Mon. Wea. Rev.*, 127, 901
- Garreaud, R. D. & Aceituno, P. 2001, *J. Climate*, 14, 2779
- Garreaud, R. D. et al. 2008, Present-day South American climate, *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, doi:10.1016/j.palaeo.2007.10.032
- Gregory, D. & Morris, D. 1996, *Clim. Dyn.*, 12, n. 9, 641
- Halverson, J. B., Rickenbach, T., Roy, B., Pierce, H., & Williams, E. 2002, *Monthly Weather Review*, 130, 1493
- Ibisch, P. L., Beck, S. G., Gerkmann, B., & Carretero, A. 2008, Ecorregiones y ecosistemas. Pp. 47-88. en: Biodiversidad: La riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación (P. L. Ibisch & G. Mérida, Eds.) (Ministerio de Desarrollo Sostenible. Editorial FAN. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. IUCN)
- IPCC. 2007, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds.) (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp)
- Jones, R. G., Murphy, J. M., & Noguer, M. 1995, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 1413
- Jones, R. G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G. J., & Mitchell, J. F. B. 2004, Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS (Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp)
- Keeling, C. D. 1960, *Tellus*, 12, 200
- Lang, J. L. & Barros, A. P. 2004, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 829
- Legates, D. R. & Willmott, C. 1990a, *Int. J. Climatol.*, 10, 111
- . 1990b, *Theor. Appl. Climatol.*, 41, 11
- Lenters, J. D. & Cook, K. H. 1997, *J. Atmos. Sci.*, 54, 656
- Marengo, J. A., Douglas, M. W., & Silva Dias, P. L. 2002, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8079, doi:10.1029/2001JD001188
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. 2009, *International Journal of Climatology*, 29, 2241
- Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C., & Nicolini, M. 2004, *J. of Climate*, 17, 2261
- Mizuta, R. et al. 2006, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 165
- Organization, W. M. 1984, *Technical Regulations, Vol. I (WMO Publication No. 49. Geneva, Switzerland)*
- Palmer, T. N. & Williams, P. D. 2008, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, 2421
- Peixoto & Ort. 1992, *Physics of Climate (Springer-Verlag)*
- Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R., & Stratton, R. A. 2000, *Climate Dynamics*, 16, 123
- Rojas, M. & Seth, A. 2003, *Journal of Climate*, 16, 2454
- Ronchail, J. et al. 2005, *Journal of Hydrology*, 302, 223
- Saucier, W. J. 2003, *Principles of Meteorological Analysis (Dover Phoenix Editions)*
- Seiler. 2009, http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS_Christian_Seiler_FAN_Bolivia_v1.2.pdf
- Soares, W. & Marengo, J. A. 2008, Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario (DOI:10.1002/joc.1800)
- Solman, S. A., Nuñez, M. N., et al. 2007, *Clim. Dyn.*, 30, 533
- Vera, C. et al. 2006, *J. Climate*, 19, 4977
- Vuille, M. 1999, *International Journal of Climatology*, 19, 1579