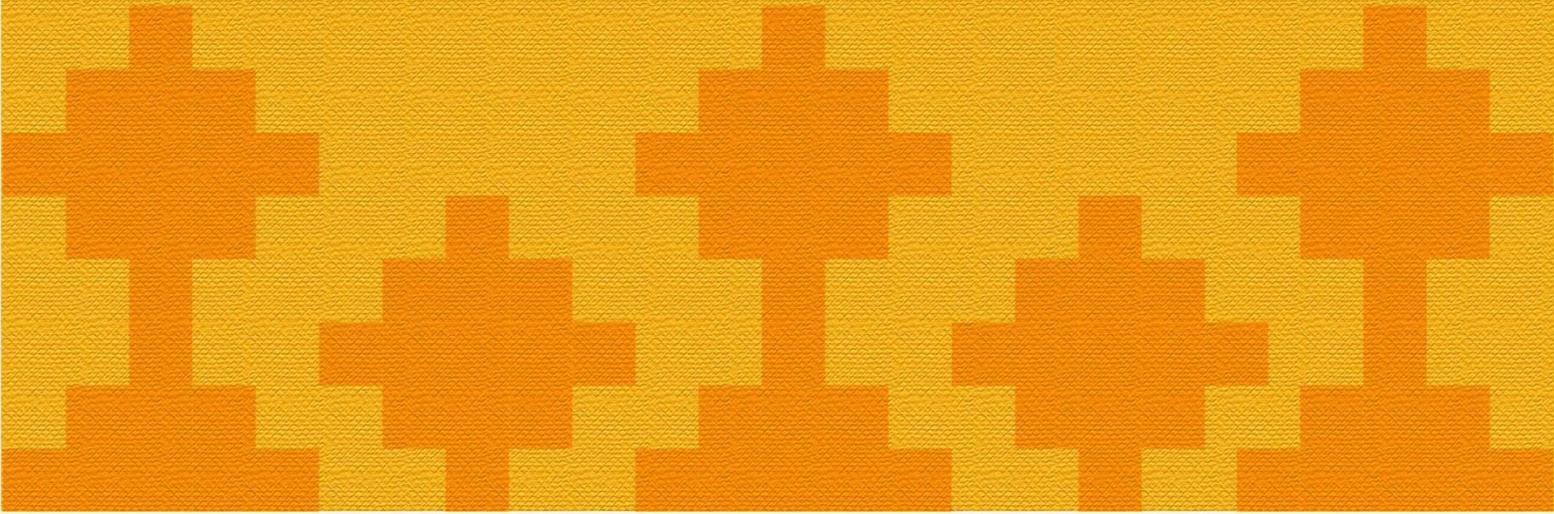




La economía del
**cambio
climático
en Bolivia**

Validación de
modelos climáticos



Banco Interamericano de Desarrollo

La economía del cambio climático en Bolivia
Validación de modelos climáticos



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Andrade, Marcos F.

La economía del cambio climático en Bolivia: validación de modelos climáticos / Marcos F. Andrade
p. cm. – (Monografía del BID; 184)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climatic changes—Bolivia. 2. Environmental economics—Bolivia.

I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. II. Título. III. Serie.
IDB-MG-184

Número de referencia de la CEPAL, Naciones Unidas: LC/L.3806

Palabras clave: Cambio Climático, Meteorología, Modelos Climáticos, PRECIS, Bolivia

Clasificación JEL: Q54, O54.

Este documento es uno de los análisis sectoriales que conforman la serie “La economía del cambio climático en Bolivia” del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América Latina y el Caribe, coordinado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y con el apoyo de UKAID del gobierno Británico.

Se agradece el apoyo del Ministerio de Ambiente y Agua en la realización de este estudio, en especial al Programa Nacional de Cambios Climáticos, ahora Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra.

Esta serie fue coordinada por Carlos Ludeña en colaboración con Leonardo Sánchez-Aragón (BID) y Carlos de Miguel, Karina Martínez y Mauricio Pereira (CEPAL).

El presente documento fue preparado por Marcos F. Andrade con los aportes de Gualberto Carrasco quien colaboró en la elaboración de los mapas del clima presente y Luis Blacutt por las discusiones e ideas acerca del clima actual. Se agradece la colaboración del SENAMHI.

<http://www.iadb.org>

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright ©2014 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	VALIDACIÓN DE LAS SALIDAS DEL MODELO.....	2
2.1	Observaciones de superficie	2
2.2	El modelo climático regional PRECIS	4
2.3	Datos modelados usados para la validación	5
2.4	Características y elementos del clima en Bolivia.....	5
2.5	Validación de las salidas del modelo.....	10
2.6	Discusión y conclusiones acerca de la validación	19
3.	PROYECCIONES FUTURAS	21
3.1	Escenarios climáticos	21
3.2	Análisis de las corridas climáticas respecto al presente	22
3.3	Discusión.....	32
4.	CONCLUSIONES.....	36
5.	REFERENCIAS.....	37

Resumen

Los efectos del cambio climático sobre Bolivia son de interés tanto científico como político. Para estudiar estos efectos se usó los datos producidos por el modelo climático regional PRECIS para la región de Bolivia. La validación del modelo se realizó comprando los datos observados en superficie a nivel mensual en el periodo 1961-1990, con aquellos obtenidos del modelo. Adicionalmente, se analizaron los valores climatológicos para los periodos 1961-1990 y 2071-2100. El análisis muestra un incremento promedio de 4,4°C para el territorio boliviano con el máximo incremento en la zona norte del país y en la zona del Altiplano Sur. Los cambios proyectados en temperatura indicarían que el incremento estaría por encima de la variabilidad climática. Por su parte, los resultados sugieren una mayor precipitación en la zona de tierras bajas durante el verano con el consiguiente riesgo de inundaciones.

Las características asociadas a los modelos de clima, así como las incertidumbres asociadas a sus proyecciones, hacen que las conclusiones obtenidas en este estudio deban ser tratadas con precaución. Un análisis de varias corridas con condiciones de contorno y condiciones iniciales diferentes, así como estudios de sensibilidad, son recomendables para reducir la incertidumbre en las proyecciones.

La economía del cambio climático en Bolivia

Validación de modelos climáticos

1. Introducción¹

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 enormemente. Debido a que el clima es un sistema altamente no-lineal² (Palmer & Willams, 2008; Andrade, 2008), una de las herramientas más usadas para estudiar el clima futuro son los modelos climáticos numéricos, pues 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 observados.

Dada la complejidad del sistema climático, los modelos numéricos todavía no pueden representar ciertos procesos de forma adecuada. Uno de los factores está relacionado con la resolución espacial del modelo y otro con 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 que son incorporados de ese modo a la simulación (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 en la actualidad para el estudio del clima futuro son los denominados Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (AOGCM, por sus siglas en inglés). Estos modelos resuelven las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, el océano y otros sistemas 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 AOGCM típicamente tienen una resolución horizontal de unos 150 a 300 km³ (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 analizar fenómenos a escala planetaria o sinóptica pero claramente no es adecuada para estudiar fenómenos a escala regional o peor aún 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 GCM. Estas debilidades llevaron de manera natural al desarrollo de los denominados Modelos de Escala Regional (RCM, por sus siglas en inglés). Estos son modelos que tienen un dominio mucho menor que los GCM y una resolución mucho mayor a los mismos. A la fecha estos modelos

¹ Partes de la introducción y de la sección 2 relacionada con la validación fueron extraídas o adaptadas de Andrade & Blacutt (2010) con autorización de la *Revista Boliviana de Física*.

² Para una explicación más detallada, ver <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/arch/nonlinear.shtml>

³ Aunque el modelo japonés JMA-GSM ha sido perfeccionado para correr globalmente a 20 km de resolución espacial y seis minutos de resolución temporal (Mizuta et al., 2006).

pueden llegar a una resolución de kilómetros, aunque típicamente trabajan entre 10 y 50 km de resolución horizontal. Los RCM se relacionan con los GCM a través de los bordes del dominio elegido, pues las condiciones de borde son impuestas por los GCM para asegurar consistencia general (global).

2. Validación de las salidas del modelo

A pesar de los avances en la representación de los sistemas y procesos involucrados en el sistema tierra, los modelos numéricos, sean estos GCM o RCM, deben ser evaluados a fin de establecer cuán bien representan la realidad. Este proceso, denominado comúnmente validación, se 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 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.

2.1 Observaciones de superficie

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 mensual. Los datos fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. La distribución espacial de las estaciones utilizadas se muestra en el gráfico 2.1. Las 52 estaciones utilizadas tenían datos de precipitación acumulada mensual, en tanto que solamente 29 tenían registro de temperatura. En todos los casos se exigió que hubiera por lo menos el equivalente a diez años de datos, aunque no formaran series continuas de tiempo. Como se observa en el gráfico 2.1, 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 de 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 tuvo acceso a datos de otras fuentes, debido a que se encontraron algunas diferencias, alguna de ellas significativas, se decidió usar los datos provistos por SENAMHI solamente. En todo caso, independientemente de cuál 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.

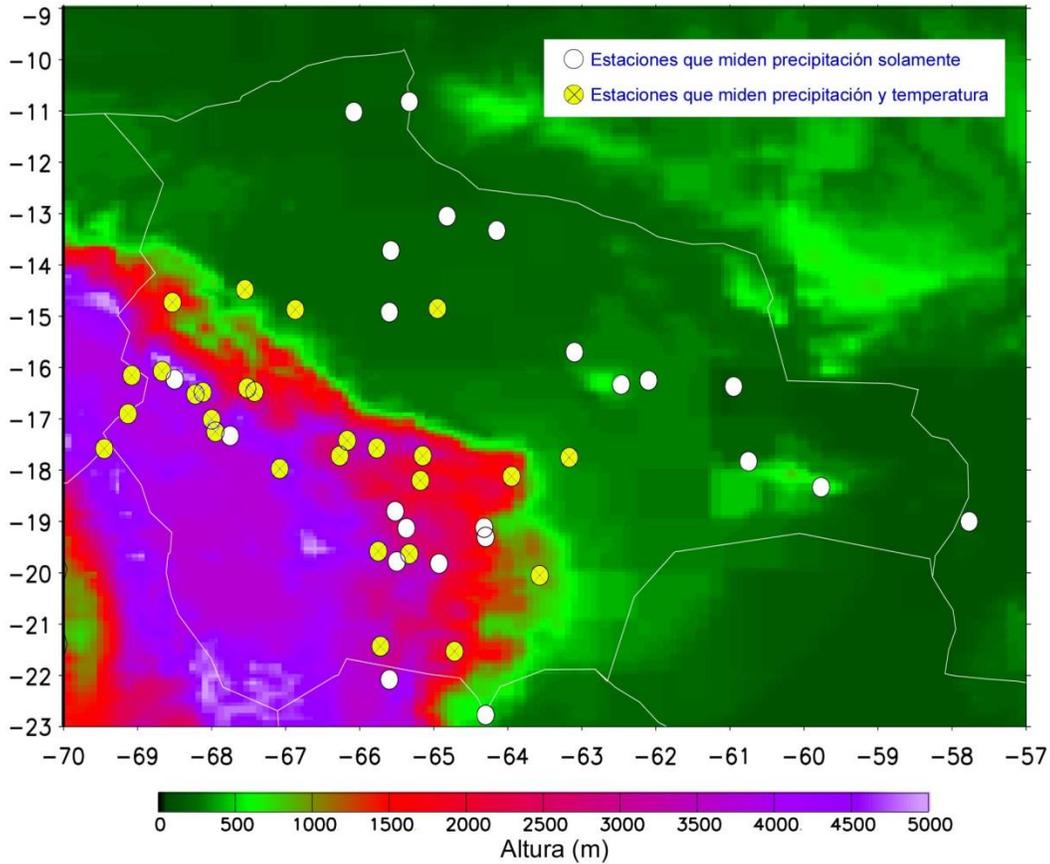
Cuadro 2.1

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	2.250	x	x
APOLO (AASANA)	-14,73	-68,53	1.406	x	x
ARANI	-17,57	-65,77	2.740	x	x
ASCENCION DE GUARAYOS	-15,70	-63,10	246	x	
AYO-AYO	-17,01	-68,00	3.956	x	x
BELEN	-16,07	-68,67	3.820	x	x
BERMEJO	-22,77	-64,30	385	x	
CALAMARCA	-16,90	-16,13	3.954	x	x
CAMIRI	-20,05	-63,57	810	x	x
CAPINOTA	-17,72	-66,27	2.400	x	x
CHARAÑA	-17,58	-69,45	4.057	x	x
CHINOLI	-19,63	-65,33	3.450	x	x
CHULUMANI	-16,40	-67,52	1.750	x	x
COCHABAMBA	-17,42	-66,17	2.560	x	x
CONCEPCION	-16,25	-62,10	497	x	
COPACABANA	-16,15	-69,08	3.815	x	x
EL ALTO	-16,52	-68,22	4.071	x	x
GUAYARAMERIN	-10,82	-65,33	130	x	
IRUPANA	-16,47	-67,42	1.885	x	x
LA PAZ (Centro)	-16,48	-68,12	3.635	x	x
LA PAZ (San Calixto)	-16,48	-68,12	3.658	x	x
MAGDALENA	-13,33	-64,15	141	x	
MAIRANA	-18,12	-63,95	1.300	x	x
ORURO	-17,97	-67,08	3.701	x	x
PADILLA	-19,30	-64,30	2.102	x	
PATACAMAYA	-17,25	-67,95	3.789	x	x
PEÑAS	-16,23	-68,50	3.986	x	
POTOSI	-19,58	-65,75	3.950	x	x
PUERTOSUAREZ	-19,00	-57,77	133	x	
PUNA	-19,78	-65,50	3.280	x	
QUILA-QUILA	-19,13	-65,37	3.526	x	
RAVELO	-18,80	-65,52	3.205	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	3.820	x	
TARIJA	-21,53	-64,72	1.875	x	x
TOTORA	-17,72	-65,15	2.906	x	x
TRINIDAD	-14,85	-64,95	157	x	x
TUPIZA	-21,43	-65,72	2.952	x	x
TURUCHIPA	-19,82	-64,93	3.360	x	
VILLAZON	-22,08	-65,60	3.443	x	
VILLA SERRANO	-19,12	-64,32	2.108	x	
YACUIBA	-22,02	-63,70	643	x	x

Gráfico 2.1
Distribución espacial de las estaciones usadas en el presente estudio (ver tabla 1).



Fuente: Andrade & Blacutt, 2010

Los colores de fondo representan la elevación de la superficie en el territorio boliviano con base en 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.

2.2 El modelo climático regional PRECIS

El modelo PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) forma parte de la versión del modelo de circulación británico HadRM3P. La versión del modelo con la que se trabajó fue la 1.2 (Alves, 2007). 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 tanto no determina de manera directa la precipitación. En cuanto a la física del modelo, se recurre 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 con el esquema dado por Smith (1990) que fue luego modificado por Gregory y Morris (1996). La precipitación y el

balance de precipitación- evaporación siguen el esquema descrito por Senior y Mitchell (1993). La radiación sigue el esquema desarrollado por Edwards y Slingo (1996) y modificado por Cusack et al. (1999). Bajo este esquema, el espectro se divide en seis bandas de onda corta y ocho bandas de onda larga. 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 uno de escala global, el método que se sigue para la resolución, por las condiciones de borde, sigue el de relajación newtoniana, en el que se estima que los primeros 400 km cercanos al borde del dominio consisten en la zona de amortiguamiento que debe ser descartada antes de cualquier análisis, debido a que esa es la zona en que el modelo global se acopla con el modelo regional.

El modelo puede resolver las ecuaciones en dos resoluciones espaciales, una a 50 km y otra a 25 km (que aproximadamente corresponden a 0,5° y 0,25° de latitud – longitud en regiones cercanas al Ecuador, respectivamente). En cuanto a los resultados, PRECIS brinda promedios horarios, mensuales y anuales, aunque es posible configurar el sistema para guardar solamente valores diarios y/o mensuales.

2.3 Datos modelados usados para la validación

El modelo PRECIS se corrió a 50 km de resolución para los periodos 1961-1990 y 2071-2100, por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) del Brasil y los resultados provistos fueron temperatura del aire media mensual (nivel superficial) además de temperatura mínima y máxima mensuales. También se entregaron precipitación media mensual en mm/día. Las condiciones de borde fueron proporcionadas por el modelo del Hadley Centre HadAM3P (Pope et al., 2000; Jones et al., 2004), que es un modelo global con las condiciones oceánicas prescritas de temperatura superficial del mar. El cuadro 2.2 resume las características de la corrida usada en este estudio.

Cuadro 2.2 Características de la corrida usada en el presente trabajo.

Nombre experimento:	PRECIS-CCST
Modelo:	HadRM3P (Sistema PRECIS)
Condiciones de Borde:	HadAM3P
Simulaciones:	1961-1990 (línea base) y escenarios A2 y B2 para 2071-2100 (futuro)
Resolución espacial:	50 km
Dominio:	De 40°S a 12,5°N en latitud y de 96,5°O a 20,0°O en longitud (154 x 106 puntos)

Las salidas del modelo, en una malla de 50 km, fueron interpoladas 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) y las observaciones fueron entonces calculadas para cada variable y estación.

2.4 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 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 (~10 hPa) comparadas con las que ocurren en medias latitudes (Saucier, 2003). La orografía de Bolivia también juega un papel importante en el clima boliviano, 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 500 msnm; 24% del territorio se encuentra entre 500 y 3.500 msnm, y el restante 16% arriba de esa altura en la zona Andina (ver cuadro 2.1). La parte baja se puede dividir en por lo menos dos regiones: una húmeda con mucha precipitación, ligada al área amazónica y otra mucho más seca en la zona denominada Chaco, alrededor de 20°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 (Ibishi, 2008). Las zonas altas, en contraste, son regiones con baja precipitación y bajas temperaturas. Los mapas 2.1 y 2.2 muestran la temperatura media y precipitación, calculadas a partir de los datos manejados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia para el periodo 1961-1990.

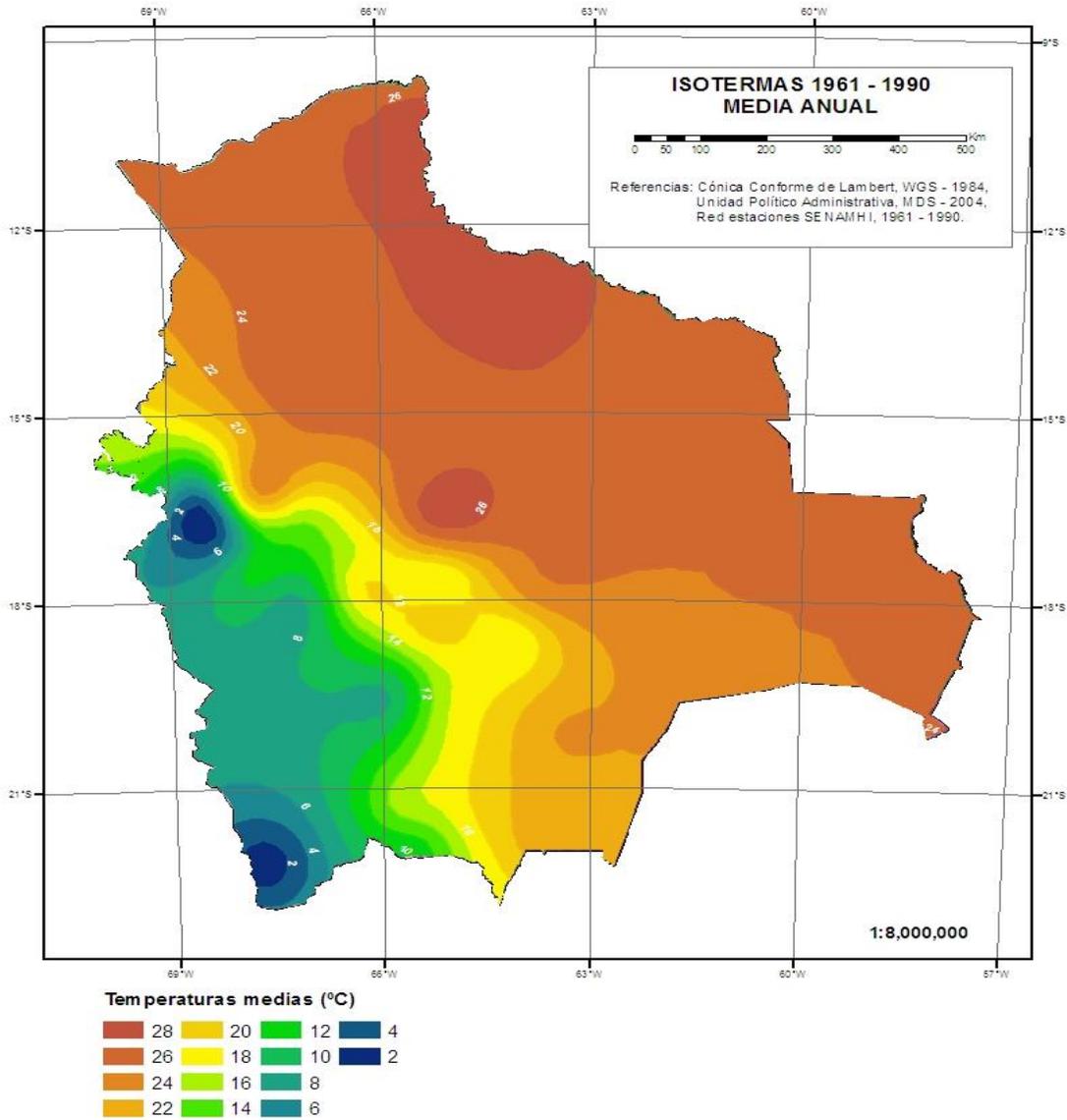
La precipitación en Bolivia depende fuertemente del transporte de humedad desde el área amazónica y/o atlántica (Marengo et al., 2004). Este transporte es máximo durante la época de lluvias, típicamente entre diciembre y marzo, y se inhibe casi por completo en época seca. Durante la época de lluvias, 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 barrera por su altura y gran gradiente altitudinal (gráfico 2.2), 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., 2004). Este comportamiento está modulado por características de escala sinóptica como la llamada Alta de Bolivia, que es un anticiclón estacionario ubicado a una altura aproximada de 200 mb 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 del 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 850 hPa 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. Curiosamente, muy poco de esa humedad se precipita en la zona del Chaco boliviano (Marengo et al., 2004). El comportamiento anual del SALLJ está controlado al menos en parte, por la posición e intensidad de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur y de la Zona de Convergencia Inter Tropical (SACZ e ITZC, por sus siglas en inglés, respectivamente) (Marengo et al., 2004). Cuando el SALLJ es intenso la intensidad de la SACZ es menor y viceversa.

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 cae en el Altiplano entre diciembre y marzo (Vuille, 1999). En invierno, por el contrario, existe un intenso flujo de aire seco de manera casi permanente desde el Occidente, que inhibe la precipitación casi por completo (Garreaud, 1999). Aparte de las características sinópticas anteriormente mencionadas, existe al menos otra que juega un rol importante en el clima del Altiplano. Esta es la Alta Subtropical del Pacífico (ASP) que modula la intensidad de la convección que se genera sobre el Altiplano. Típicamente, cuando la ASP se encuentra desplazada hacia el Este, se inhiben los procesos convectivos y aunque haya humedad disponible por el transporte del SALLJ, no se generan sistemas precipitantes (Falvey & Garreaud, 2005). Adicionalmente, la SACZ también ejerce influencia sobre la cantidad de humedad disponible sobre el norte de la Amazonia y por ende sobre el Altiplano, cuando se dan las condiciones adecuadas. En general, cuando la SACZ se intensifica, la precipitación sobre el Altiplano se reduce y viceversa (Nogues-Paegle and Mo, 1997).

Mapa 2.1

Temperatura media anual para el periodo 1961-1990 basada en datos del SENAMHI Bolivia.

Para fines de claridad, los datos de las estaciones fueron interpolados utilizando las funciones Radial Basis del programa ArcGis 9.3

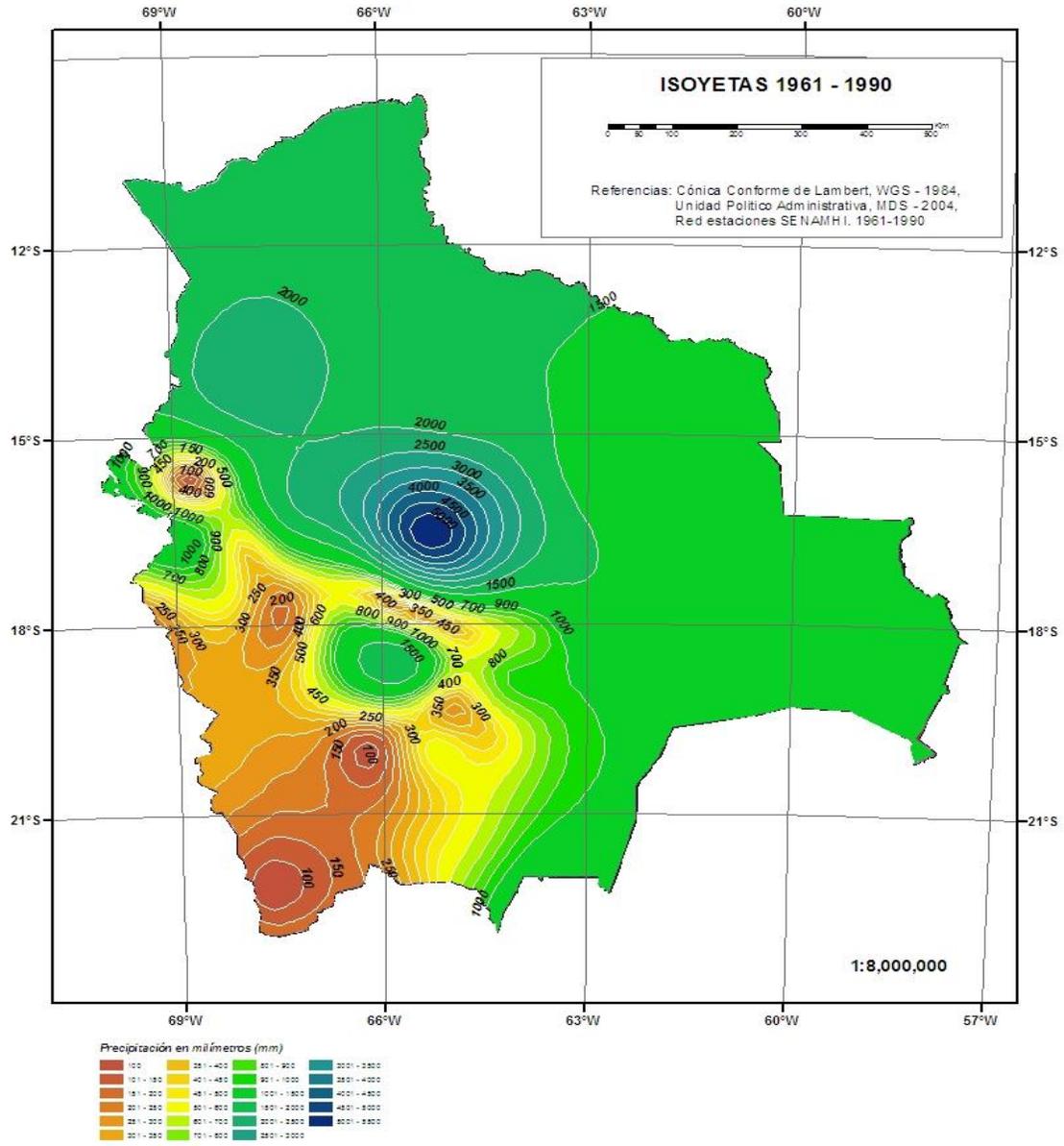


Fuente: Elaborado por el meteorólogo Gualberto Carrasco

Mapa 2.2

Precipitación anual acumulada promedio para el periodo 1961-1990 basada en datos del SENAMHI Bolivia.

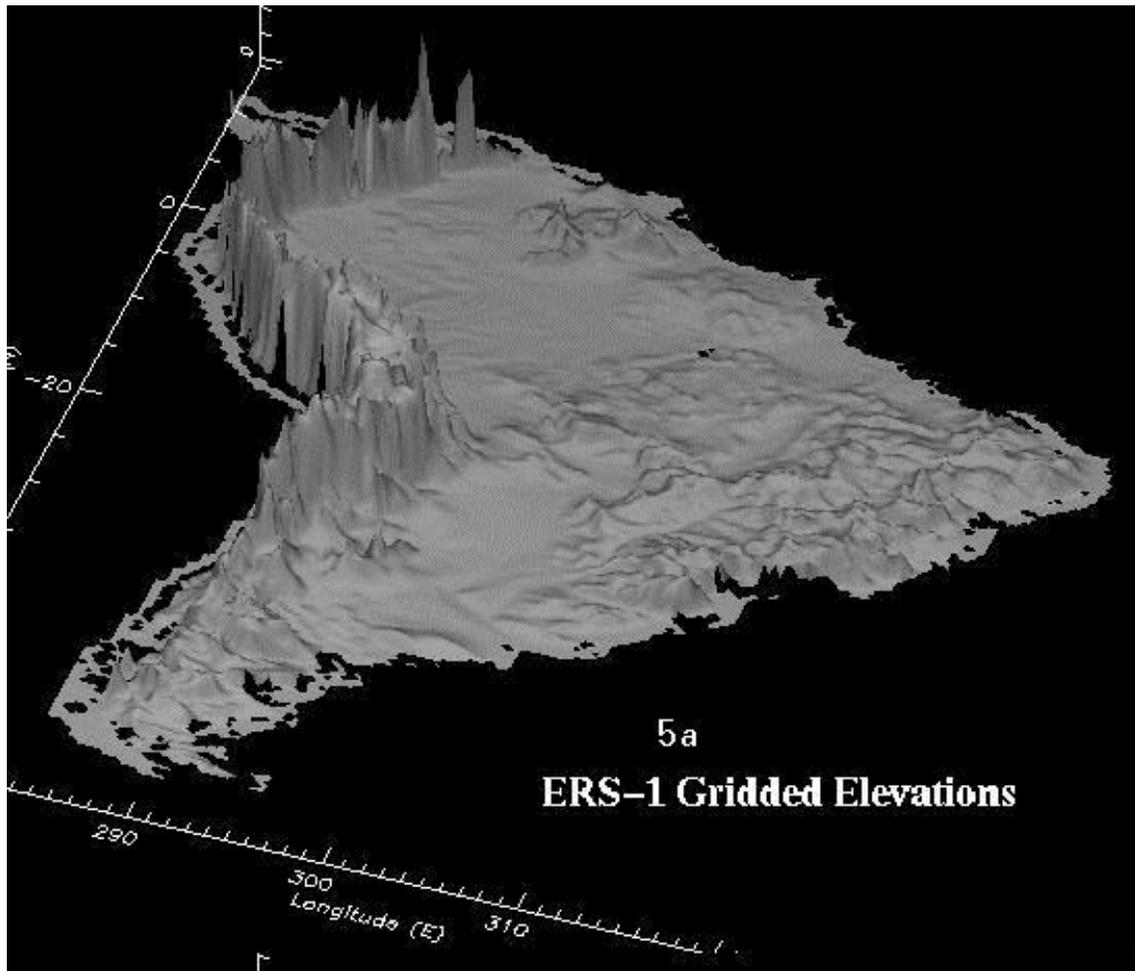
Para fines de claridad, los datos de las estaciones fueron interpolados utilizando las funciones Radial Basis del programa ArcGis 9.3



Fuente: Elaborado por el meteorólogo Gualberto Carrasco.

Gráfico 2.2 Elevación de superficie de Sudamérica.

La escala vertical está exagerada para mostrar las diferencias entre tierras bajas y la región andina.



Fuente: Brenner et al., 2003, <http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/frey> (Figure 5)

Aunque todas las características sinópticas mencionadas antes están presentes la mayor parte del año, la intensidad relativa de las mismas varía a lo largo del año, permitiendo producción y transporte de humedad de una región a otra o inhibiéndola. En general, el SALLJ y la Alta de Bolivia son más intensas en el verano, mientras que la ASP está más desplazada hacia el Noroeste permitiendo el transporte de humedad desde el Este, creando a su vez las condiciones ideales para tener las precipitaciones más intensas en ese periodo.

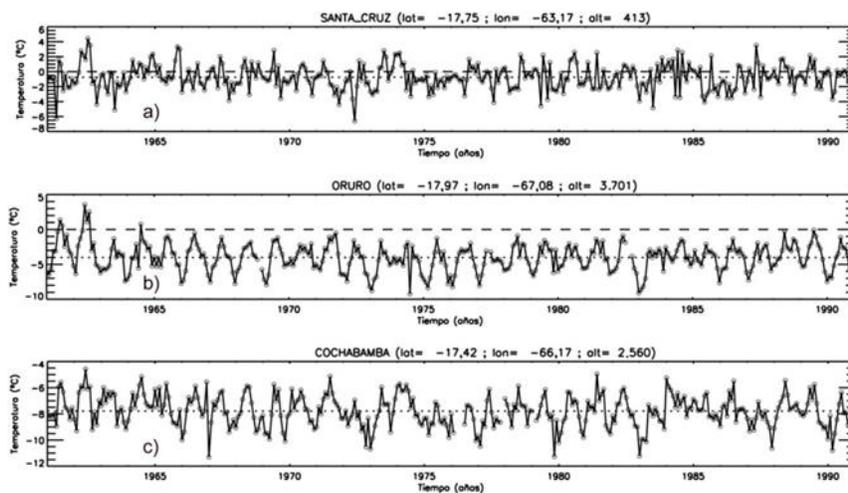
Fenómenos como El Niño y La Niña, que son las fases positivas (calientes) y negativas (frías) de un fenómeno conocido como El Niño Southern Oscillation (ENSO, por sus siglas en inglés) modifican drásticamente el comportamiento climático en muchas regiones del territorio boliviano. Durante El Niño, el Altiplano sufre típicamente una disminución de lluvias, en tanto que en regiones bajas se observa un aumento relativo de precipitación, de por sí elevada (Garreaud & Aceituno, 2001). Sin embargo, la señal de El Niño sobre el territorio boliviano no es totalmente clara (Ronchail et al., 2005), pues sequías e inundaciones extremas no siempre coinciden con las fases positivas o negativas de ENSO. Si bien en la zona altiplánica es donde más fuertemente se observan los efectos de ENSO, la zona oriental de Bolivia recibe también una importante influencia del Atlántico (principalmente a través de la contribución de humedad). Esto hace que la señal de ENSO sea más compleja sobre la zona Este de Bolivia.

2.5 Validación de las salidas del modelo

Las salidas del modelo, en una malla de 50 km, fueron interpoladas 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 bilinear simple⁴, y las observaciones fueron entonces calculadas para cada variable y estación. Aunque conceptualmente lo que se busca con modelos climáticos es encontrar el comportamiento del sistema desde el punto de vista climatológico es interesante comparar las series temporales de datos modelados y observados. Al tomar la diferencia entre ambas series temporales (datos modelados menos datos observados), se observa que en tierras bajas (Santa Cruz, por ejemplo) la diferencia promedio entre valores modelados y observados de temperatura media es relativamente pequeña (gráfico 2.3a), del orden de 1°C, aunque con variaciones individuales de hasta 5°C. No se observa una dependencia estacional evidente. En tierras altas (Oruro), sin embargo, se observan diferencias marcadas entre valores modelados y observados, mostrando, en algunos casos, una evidente dependencia estacional (gráfico 2.3b). En las regiones de altura intermedia, típicamente valles (Cochabamba para este ejemplo), 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 (gráfico 2.3c). Comportamiento similar se observa para las temperaturas mínimas y máximas medias mensuales.

Gráfico 2.3
Diferencias modelo.

Observaciones para la temperatura media mensual entre 1961 y 1990 para estaciones seleccionadas: a) Diferencias para Santa Cruz, ciudad localizada en tierras bajas, a 400 msnm; b) Diferencia para Oruro, una ciudad situada en medio del Altiplano boliviano a 3700 msnm; y c) Diferencia para la ciudad de Cochabamba, situada en la zona central de Bolivia, en la zona de los valles, a 2560 msnm



Temperatura media

Fuente: Elaboración propia

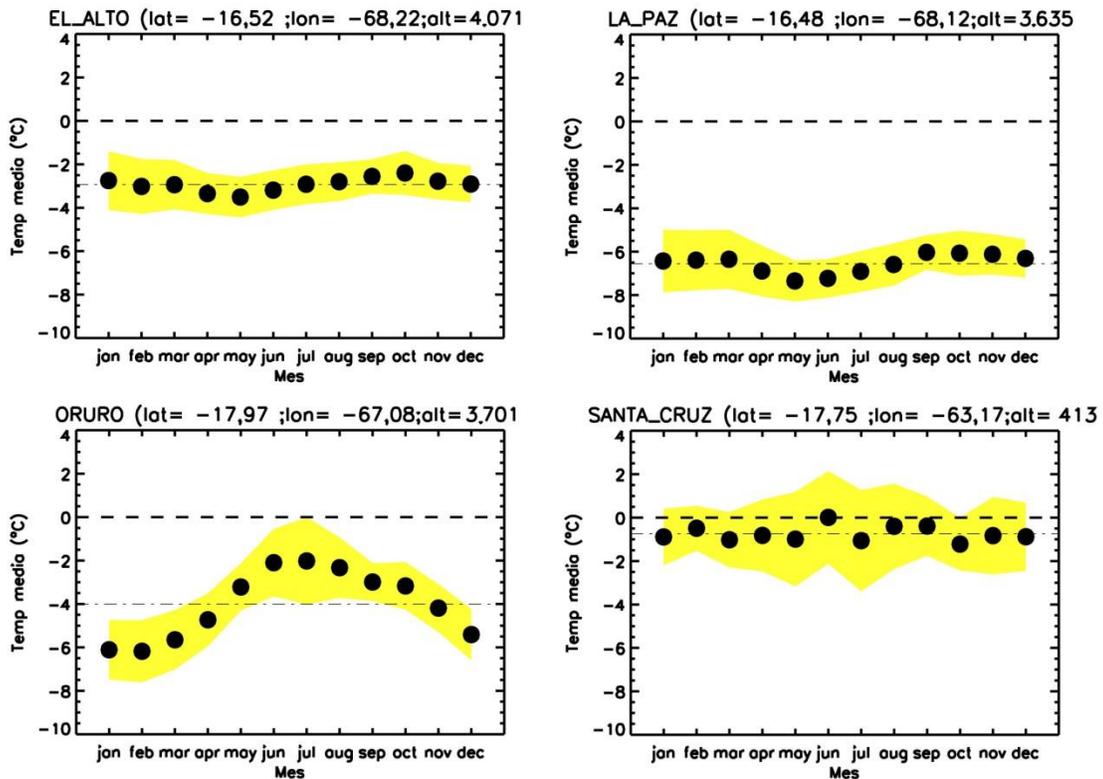
⁴ *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Copyright (C) 1988-1992 by Cambridge University Press.

Los gráficos 2.4, 2.5 y 2.6 muestran los valores promedio mensuales de las diferencias entre valores modelados y observados para el periodo 1961-1990 para la temperatura media, temperatura 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. Si el modelo reprodujera las observaciones perfectamente, todos los puntos en estos gráficos estarían sobre esta línea y exactamente en cero, con variabilidad nula. En todos los casos se seleccionaron estaciones “representativas” de las regiones altas sobre el Altiplano, valles (con fuertes gradientes altitudinales) y tierras bajas (con poca pendiente) para ilustrar el comportamiento típico observado en estaciones localizadas en estas regiones. En el caso de las temperaturas medias mensuales se observa (gráfico 2.4) 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 (El Alto) y la de los valles (La Paz), donde las diferencias medias llegan hasta 7°C, mostrando que el modelo subestima la temperatura media en prácticamente todas las estaciones (excepto en Copacabana, no mostrada). Sin embargo, existen algunas estaciones, Oruro por ejemplo, donde la diferencia modelo-observaciones exhibe una clara dependencia temporal 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.

Gráfico 2.4

Temperatura media mensual promedio para el periodo 1961-1990 para estaciones seleccionadas.

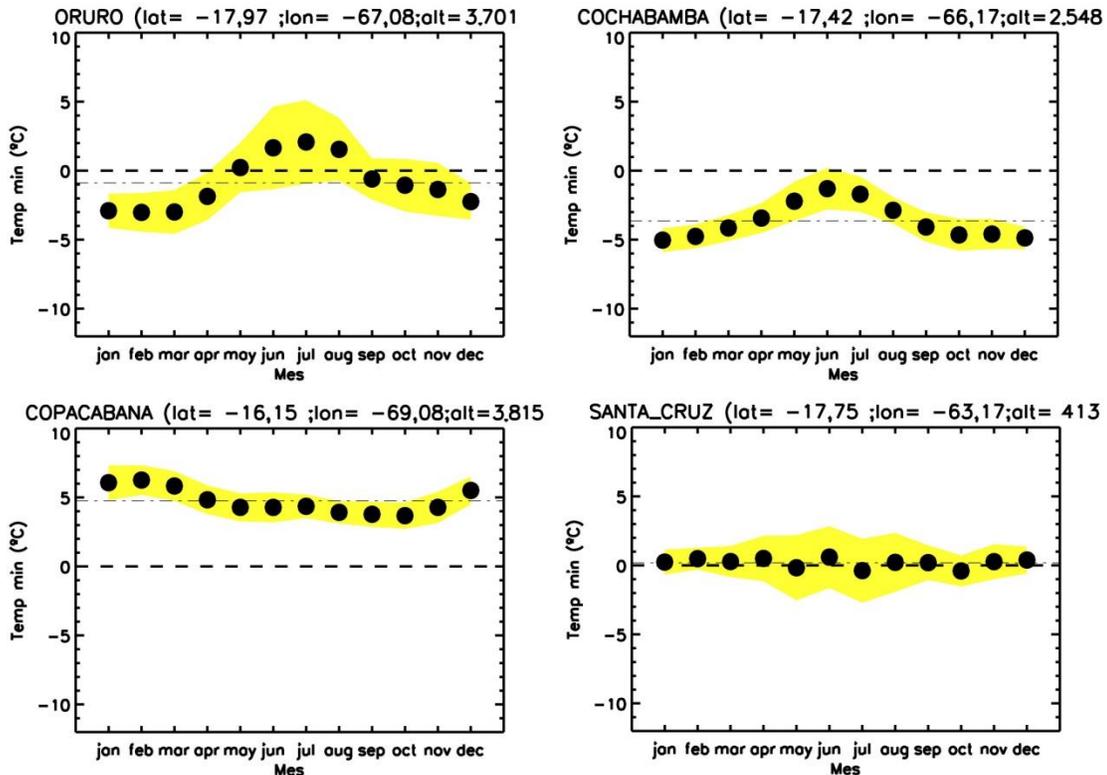
Los puntos llenos indican el promedio de la diferencia entre datos modelados y observados, en tanto que la región sombreada indica la variabilidad ($\pm \sigma$) de esa diferencia en el periodo de estudio.



Fuente: Elaboración propia basada en Andrade & Blacutt, 2010

Para la temperatura mínima promedio mensual 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. 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 500 msnm, excepto para el caso de Copacabana (gráfico 2.5).

Gráfico 2.5
Lo mismo que para el gráfico 2.4 pero para la temperatura mínima media mensual

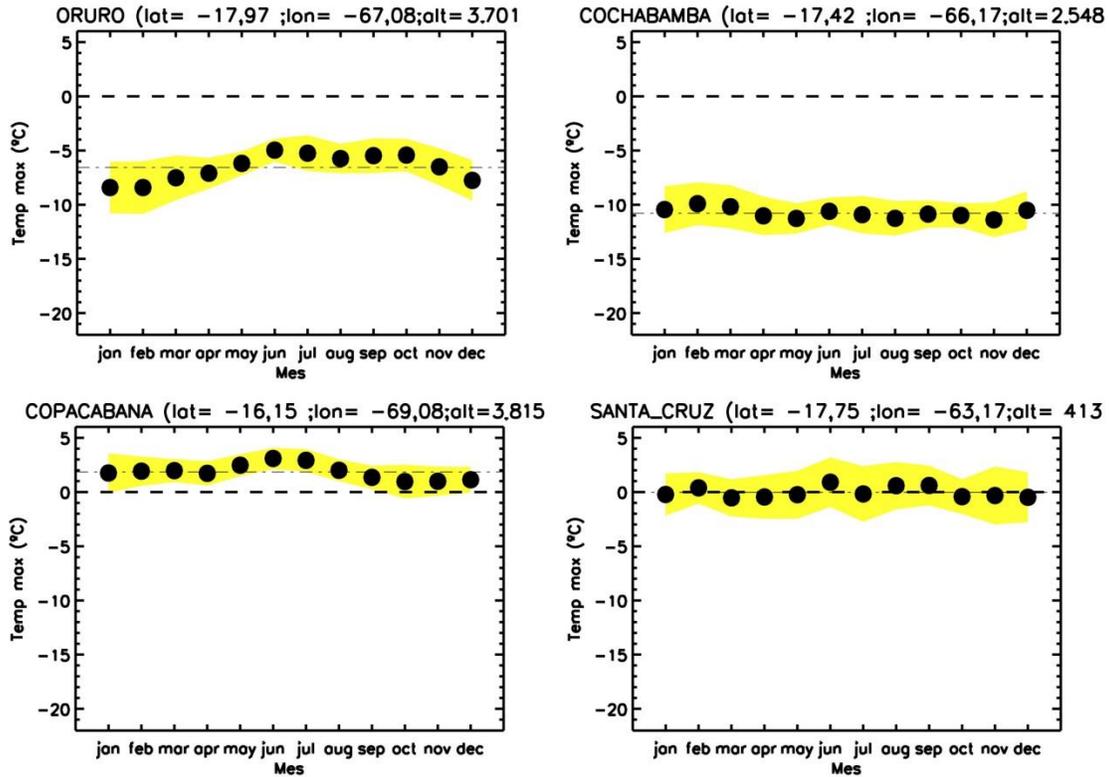


Fuente: Elaboración propia basada en Andrade & Blacutt, 2010

En el caso de la temperatura máxima promedio mensual, la dependencia de la diferencia de los valores modelados con los observados es relativamente pequeña (gráfico 2.6), pero la diferencia promedio anual es más grande que en el caso de la temperatura mínima. Una vez más la diferencia mensual promedio más grande ocurre en la región de los valles, mientras que el modelo muestra un acuerdo muy bueno con las observaciones en tierras bajas.

Gráfico 2.6

Lo mismo que para el gráfico 2.4 pero para la temperatura máxima media mensual



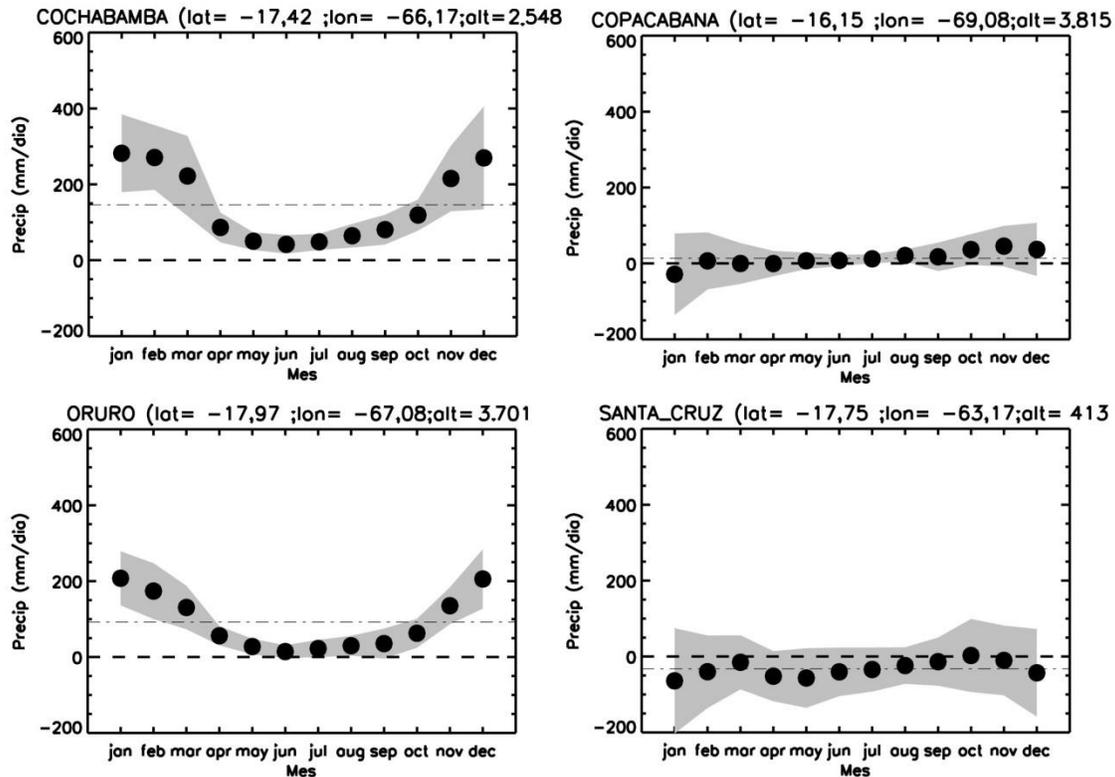
Fuente: Elaboración propia basada en Andrade& Blacutt, 2010

En el caso de la precipitación (gráfico 2.7), 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 solo sobreestima la precipitación en prácticamente todas las estaciones de la zona (excepto Copacabana), 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, como lo evidencia el gráfico 2.7. Como era de esperarse, dicha variabilidad es mayor durante la época de lluvias. Es interesante ver que las estaciones de tierras bajas muestran un acuerdo muy bueno entre lo predicho por el modelo y las observaciones. En este caso, sin embargo, es importante tener en cuenta que a pesar de 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.

Gráfico 2.7

Precipitación acumulada mensual para el periodo de estudio.

Se muestran solo algunas estaciones representativas de las tres regiones principales de Bolivia. Símbolos y área sombreada tienen el mismo significado que antes. La línea punteada delgada indica el valor medio de la diferencia.



Fuente: Elaboración propia basada en Andrade & Blacutt, 2010

El gráfico 2.8 muestra las diferencias promedio anuales para las cuatro variables en estudio, para las distintas estaciones donde hay datos. Las diferencias, expresadas en círculos de colores, corresponden a las estaciones usadas en el análisis. Cuanto más cercanos a cero estos valores, 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. Dicho eso, 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 hace 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. El gráfico también muestra el comportamiento “anormal” de la región de Copacabana, pues es la única estación del área Andina en la que el modelo sobreestima la temperatura y produce una precipitación muy parecida a la observada. Se necesitan más datos para verificar que este comportamiento es real y, de ser así, tratar de entender los mecanismos físicos que inducen al mismo.

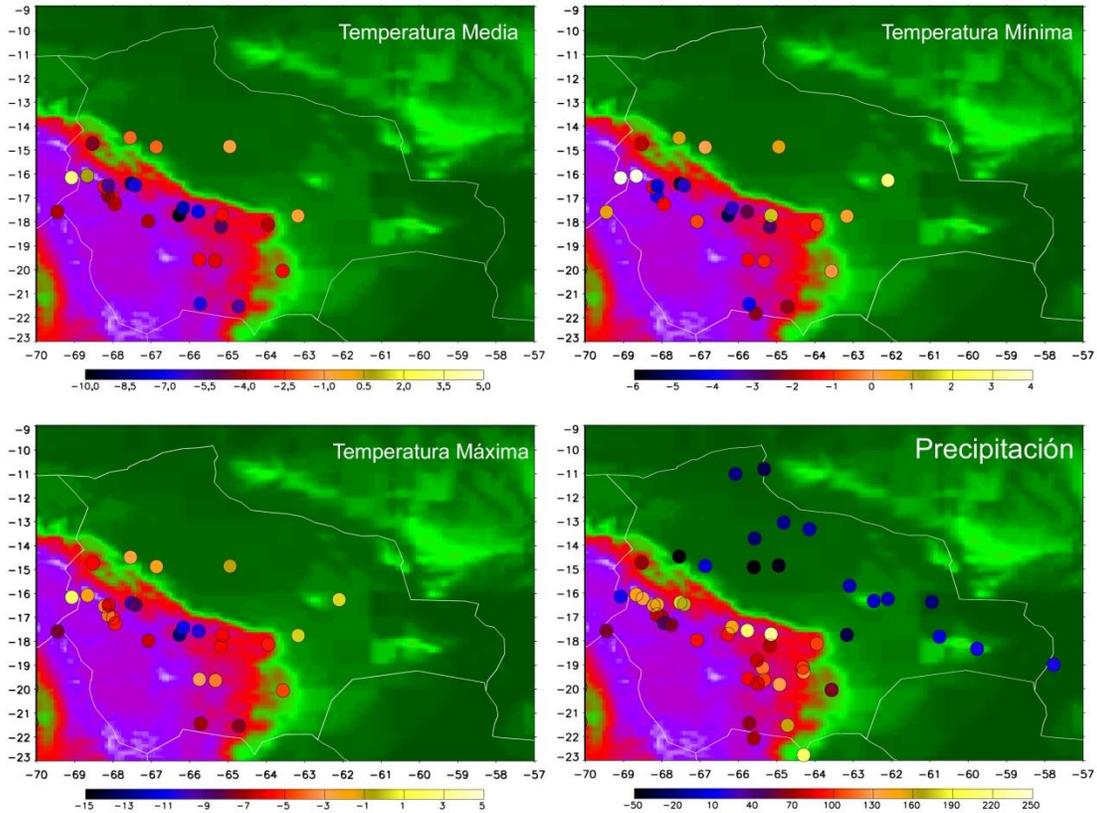
Gráfico 2.8

Valores anuales promedio de las diferencias “modelo menos observaciones” para las cuatro variables de estudio.

Los colores de fondo representan la variación de altura del terreno respecto al nivel del mar.

Los círculos de colores muestran las diferencias de las variables meteorológicas.

Nótese las distintas escalas en los todos gráficos



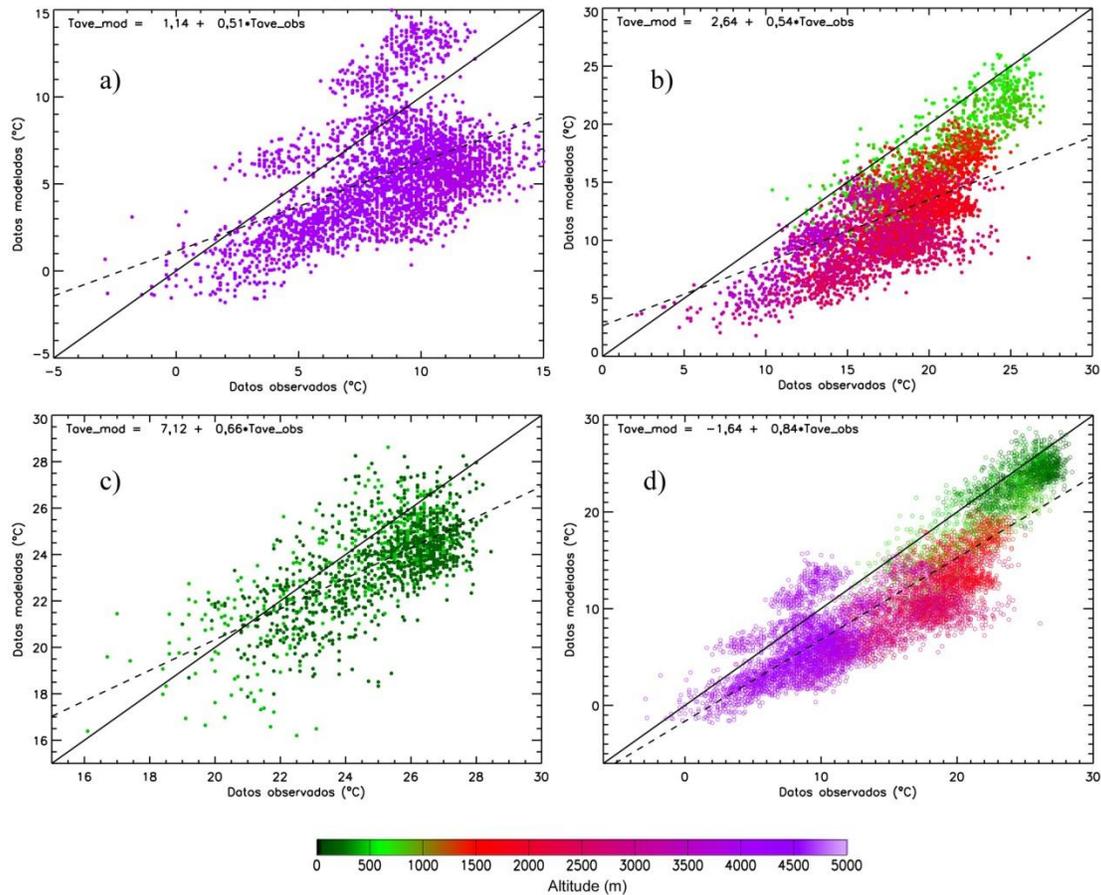
Fuente: Elaboración propia basada en Andrade & Blacutt, 2010

A fin de evaluar mejor el comportamiento del modelo se decidió hacer una comparación de todos los puntos donde existían observaciones. Los gráficos 2.9 a 2.11 muestran dichas comparaciones. Cada punto en este gráfico es la comparación directa entre el dato observado y el dato modelado a nivel mensual. Por ejemplo, el gráfico 2.9 muestra el caso de la temperatura media para el caso de localidades arriba de 3.500 msnm (gráfico 2.9a), estaciones situadas entre 500 y 3500 msnm (gráfico 2.9b), estaciones ubicadas a menos de 500 msnm (gráfico 2.9c) y todas las estaciones indistintamente de su altura (gráfico 2.9d). Los colores de cada punto indican la altura a la que se encuentra la estación donde los datos fueron obtenidos (o interpolados para el

Gráfico 2.9

Comparación de todas las medidas mensuales de temperatura media, tanto observadas como modeladas, usadas en este trabajo para el periodo 1961-1990.

a) Datos para alturas superiores a 3500 msnm; b) Datos correspondientes a alturas entre 500 y 3500 msnm; c) Datos para alturas menores a 500 msnm; y d) Todos los datos disponibles. Los colores indican la altura de la estación donde los datos fueron medidos. La línea sólida indica la relación ideal perfecta entre datos modelados y observados. La línea punteada fue obtenida a través de una regresión lineal simple para indicar cualitativamente la relación lineal entre los datos modelados y observados



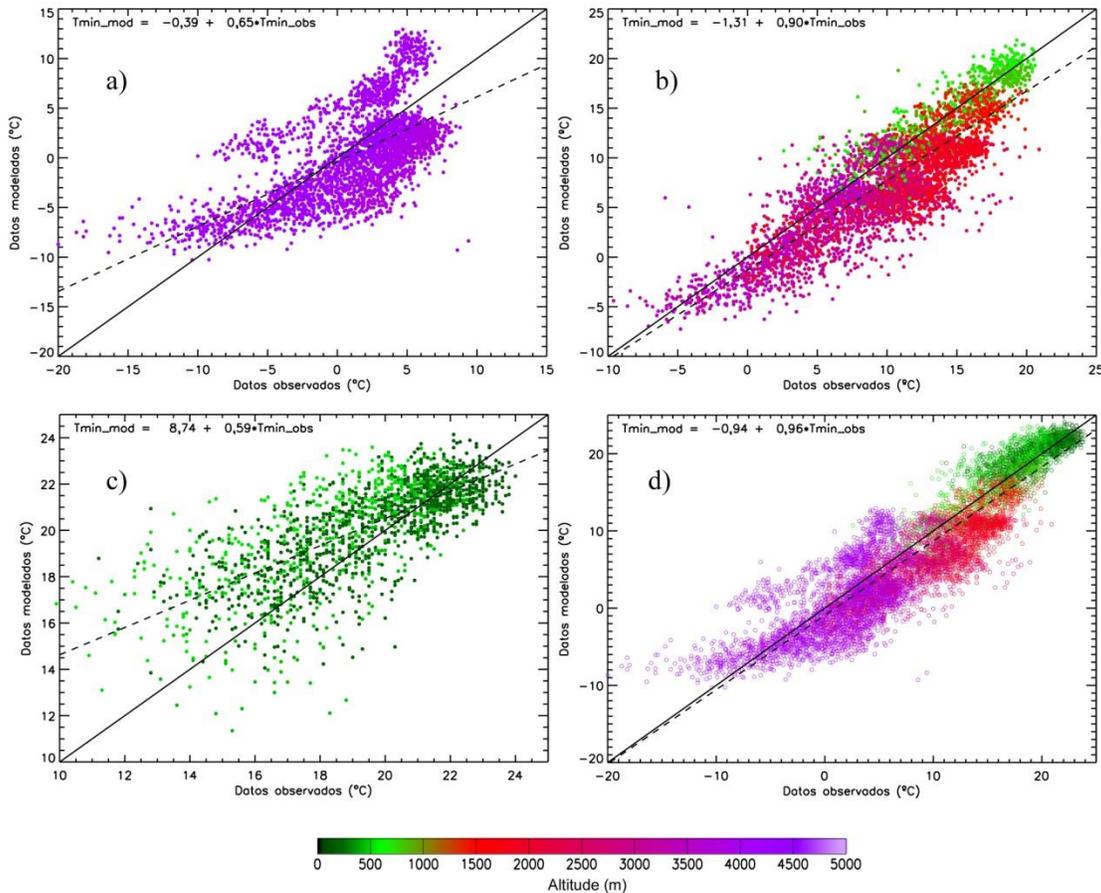
Fuente: Elaboración propia

caso del modelo). La curva sólida indica la línea de acuerdo absoluto entre valores modelados y observados. Se observa que existe subestimación de la temperatura media modelada en prácticamente todas las estaciones consideradas. Excepto por algunos valores, probablemente correspondientes a la estación de Copacabana, prácticamente todos los puntos para la zona altiplánica y la mayor parte de los casos en la zona de los valles corresponden a este caso. En cambio, en las zonas bajas, si bien se observa una subestimación, ésta es menor que en los otros casos. De hecho, existen varios puntos que muestran que el modelo sobreestima la temperatura media en esta región. Curiosamente, los datos de la zona de valles muestran que las estaciones más bajas en el rango establecido tienden a mostrar un mejor desempeño que estaciones situadas en zonas más altas. A pesar de esto, no existe una clara dependencia funcional de la diferencia con la altura.

Gráfico 2.10

Comparación de todas las medidas mensuales de temperatura mínima, tanto observadas como modeladas, usadas en este trabajo para el periodo 1961-1990.

Colores y demás atributos como en gráfico 2.9



Fuente: Elaboración propia

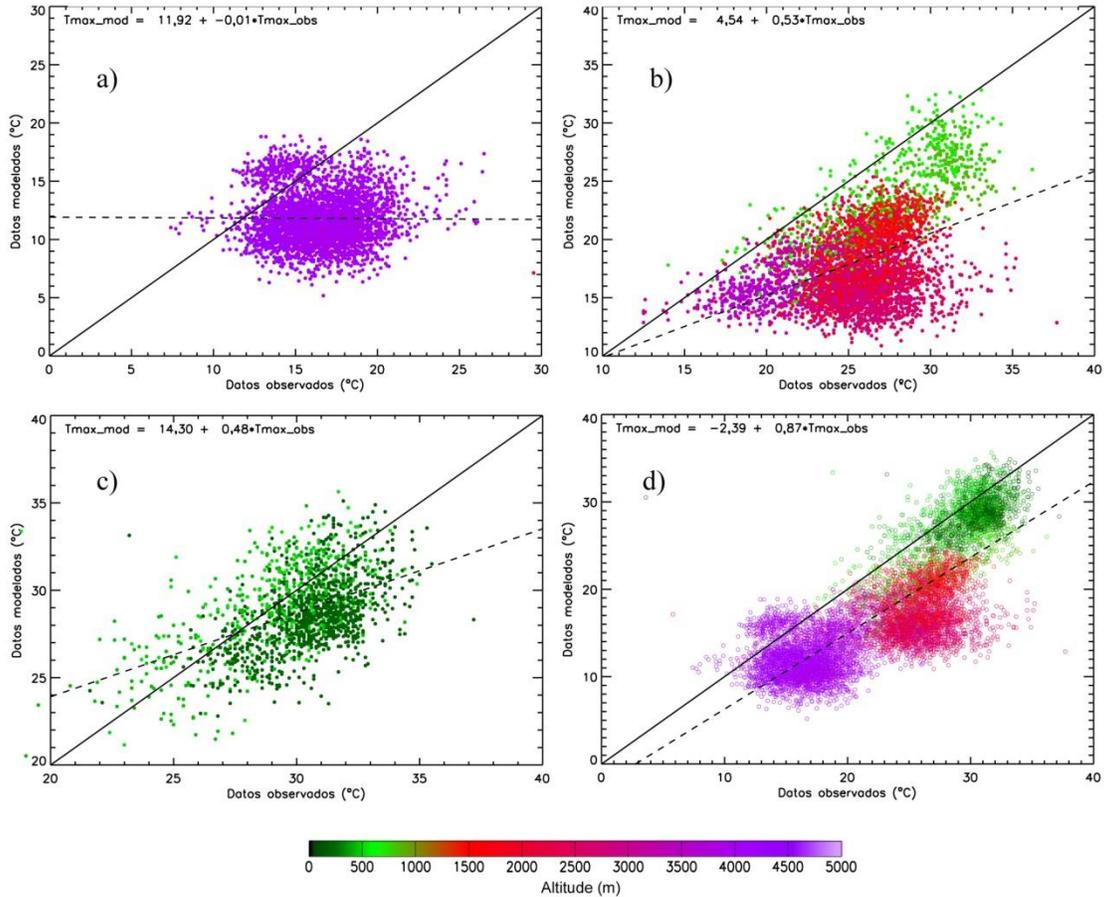
El gráfico 2.10 muestra la comparación para los datos correspondientes a la temperatura mínima. En este caso, el acuerdo entre datos observados y modelados es mejor que en el caso de la temperatura media. De hecho, en la zona correspondiente a los valles el acuerdo es bastante bueno (gráfico 2.10b), mientras que en las zonas bajas (gráfico 2.10c), se observan más puntos que indican sobreestimación de la temperatura que en el caso de la temperatura media, pero de todos modos la dispersión de puntos se da alrededor del valor ideal de acuerdo total. El gráfico 2.10d, que toma en cuenta a todos los datos, muestra que la recta de regresión tiene una pendiente de $0,962 \pm 0,008$ que indica un excelente acuerdo entre datos observados y modelados (el acuerdo “total” se daría si la pendiente fuera 1,0).

Por el contrario, en el caso de la temperatura máxima (gráfico 2.11) se observa que en general los puntos muestran una menor relación lineal entre datos observados y modelados, indicando un rendimiento más pobre del modelo en el cálculo de esta variable. Esto es más evidente en la región Andina (alturas mayores a 3.500 msnm, en este trabajo), donde la pendiente calculada es muy cercana a cero (gráfico 2.11a). Los puntos correspondientes a los valles y zonas bajas muestran mayor dispersión que en los casos de la temperatura media y mínima. Además, las nubes de puntos están mucho más localizadas espacialmente y distribuidas en forma no lineal. La recta de regresión para todos los datos indica también una diferencia mayor entre los datos observados y modelados.

Gráfico 2.11

Comparación de todas las medidas mensuales de temperatura máxima, tanto observadas como modeladas, usadas en este trabajo para el periodo 1961-1990.

Colores y demás atributos como en el gráfico 2.9



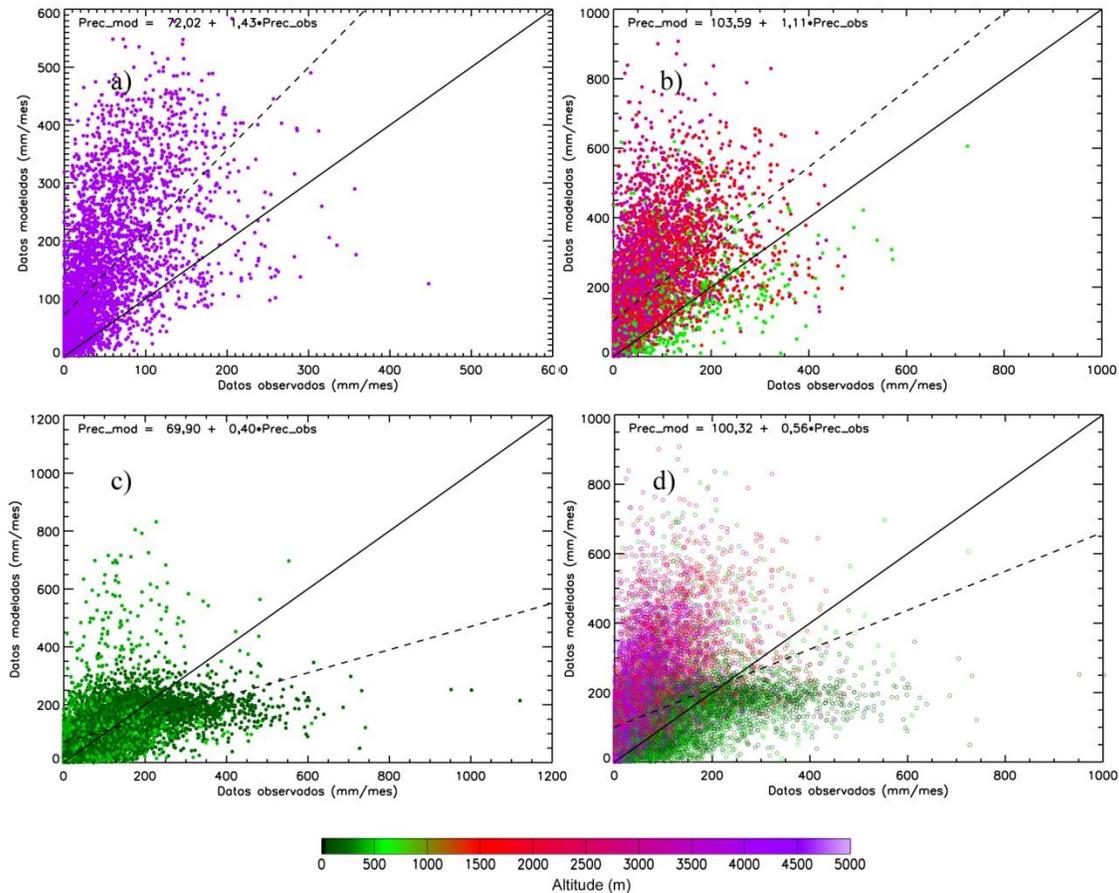
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el gráfico 2.12 muestra la comparación para el caso de la precipitación mensual acumulada. En este caso se observa claramente la sobreestimación hecha por el modelo para las zonas altas y valles (altura de superficie > 500 msnm). En el caso de tierras bajas también se observan discrepancias, pero distribuidas de manera más uniforme, de forma que hay puntos que muestran sobreestimación mientras otros muestran subestimación, dando como resultado un valor medio cercano a cero. Un análisis de la raíz cuadrática media indica que la dispersión en tierras bajas es mucho menor que la que se observa en los valles y tierras altas.

Gráfico 2.12

Comparación de todas las medidas mensuales de precipitación acumulada mensual observadas y modeladas, usadas en este trabajo para el periodo 1961-1990.

Colores y demás atributos como en el gráfico 2.9



Fuente: Elaboración propia

2.6 Discusión y conclusiones acerca de la validación

La comparación de datos de superficie con las salidas del modelo muestra que el modelo realiza un buen trabajo en zonas bajas (*i.e.*, localidades situadas a menos de 500 msnm) 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 (> 3.500 msnm) el modelo subestima de manera sistemática la temperatura y sobreestima la precipitación. La variable mejor estimada por el modelo es la temperatura mínima. 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 desempeño aceptable del modelo en la región de tierras bajas (y planas). La mayor parte de los valores modelados se hallan dispersos alrededor de los valores observados aunque se observa subestimación de precipitación para valores mayores a 250 mm/mes. En la región de valles (entre 500 y 3.500 msnm), por el contrario, se observa una marcada sobreestimación de la precipitación a casi cualquier altura. Del mismo modo, en la región altiplánica (> 3.500 msnm), 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.

Un caso especial es la estación localizada en Copacabana (16,15S, 69,08W) pues de manera sistemática muestra valores diferentes a estaciones relativamente cercanas (gráficos 2.5, 2.6 y 2.7). En el caso de temperatura es la única estación que muestra un sesgo positivo (es decir el modelo sobreestima la temperatura) en el área. Una posible causa que explique este comportamiento es la presencia del lago Titicaca. Es necesario un análisis más profundo para este caso, para entender claramente las causas de este comportamiento “anómalo”.⁵

El modelado de los parámetros meteorológicos sobre Bolivia no es trivial. Como se mencionó anteriormente, los modelos numéricos del clima (y los del tiempo también) deben recurrir a parametrizaciones. PRECIS no es la excepción, pues debe recurrir a parametrizaciones para representar fenómenos relacionados con convección, nubosidad y precipitación. Este tópico es todavía un tema de investigación. Basados en resultados producidos por otros modelos (IPCC, 2007), se sabe que los modelos tienen problemas de sesgos, especialmente en la región Andina. En este sentido, la primera sospechosa de la excesiva precipitación observada en regiones de altura y valles es la parametrización de la convección y posterior generación de lluvia, así como procesos de interacción tierra-atmósfera (Alves & Marengo, 2009). La pobre resolución de la orografía de la región (a una resolución de 50 km es posible tener variaciones de 1.800 m de altura entre puntos de retícula adyacentes) probablemente también contribuye a los sesgos observados. En todo caso, resultados de otros modelos también muestran sobreestimación de la precipitación sobre zonas de fuertes gradientes altitudinales (Solman et al., 2007).

Un estudio más profundo, utilizando datos diarios además de otras variables no reportadas para el presente (radiación saliente de onda larga, por ejemplo), permitirá mejorar la evaluación del modelo sobre Bolivia. En el contexto del cambio climático se espera que ocurran cambios en las distribuciones 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. Además, es importante estudiar el comportamiento de características regionales que controlan el clima en Bolivia, para establecer si estas características son correctamente reproducidas por el modelo.

⁵ Estudios posteriores a la realización del presente trabajo, así como conversaciones con el Hadley Centre mostraron que había un error con la altura a la que se pusieron los cuerpos de agua (el lago Titicaca) en el modelo. Esto explica el comportamiento anómalo de esta región.

3. Proyecciones futuras

3.1 Escenarios climáticos

Si bien es cierto que la confianza de la comunidad científica acerca de la relación concentración de gases de efecto invernadero vs. temperatura se ha incrementado en el último tiempo (IPCC, 2007), hay mucha menos certeza acerca de los efectos locales del incremento observado (y proyectado) en la concentración de dichos gases. Estos últimos -los efectos locales- son de particular importancia al momento de realizar estudios de impacto, adaptación y mitigación. Por esa razón, usando modelos de escala regional (RCM), se intenta estudiar los posibles impactos que el calentamiento de la superficie terrestre pueda tener sobre la vida de las personas, los ecosistemas, la biodiversidad, etc., a consecuencia del incremento proyectado de la concentración de gases de efecto invernadero en los próximos 100 años.

Ahora bien, independientemente de si se trata de RCM o GCM, para poder estudiar los posibles efectos del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero es necesario poder predecir o proyectar esas concentraciones en el futuro. Está claro que para poder hacer una proyección del clima a largo plazo (de hasta 100 años) es necesario establecer supuestos, de la manera más rigurosa posible, acerca del comportamiento de los “forzantes” que controlan de una u otra manera el clima terrestre. Dada la variedad de factores que afectan estos forzantes y por tanto la fuerte incertidumbre en su evolución temporal, fue necesario crear un grupo de “escenarios” que permitan explorar los posibles efectos de diversos caminos en los que los forzantes puedan evolucionar en el futuro. Para este propósito, el IPCC produjo lo que se denomina “escenarios climáticos” (IPCC Emissions Scenarios, Special Report, 2000). Estos escenarios son estimaciones razonables, bajo diferentes supuestos -económicos principalmente- de cuáles serían las emisiones (y por tanto las concentraciones) de gases de efecto invernadero en los siguientes 100 años. Estas emisiones tienen fundamentalmente origen antrópico.

La idea básica es poder preparar una gama de posibilidades que permitan medir la sensibilidad del sistema climático (o algún elemento particular del mismo) ante los posibles cambios futuros. El caso más optimista se presenta en el escenario B1 donde se espera que la humanidad actúe de manera que se reduzcan las emisiones, la población mundial alcance un máximo a mediados de este siglo y se actúe con un enfoque de sostenibilidad medioambiental. El caso más pesimista es el escenario A1FI donde se espera un rápido crecimiento económico, una población mundial que crezca hasta mediados de siglo y decline posteriormente, y exista un uso intensivo de combustibles fósiles⁶. En este punto es importante hacer notar que estos escenarios climáticos producen proyecciones del clima y no pronósticos del mismo. La diferencia es que los pronósticos se basan en una cantidad muy grande de información del estado actual del sistema tierra (atmósfera, océano, superficie terrestre, etc.) para, utilizando las leyes de la física, pronosticar el estado de este sistema en un futuro cercano.

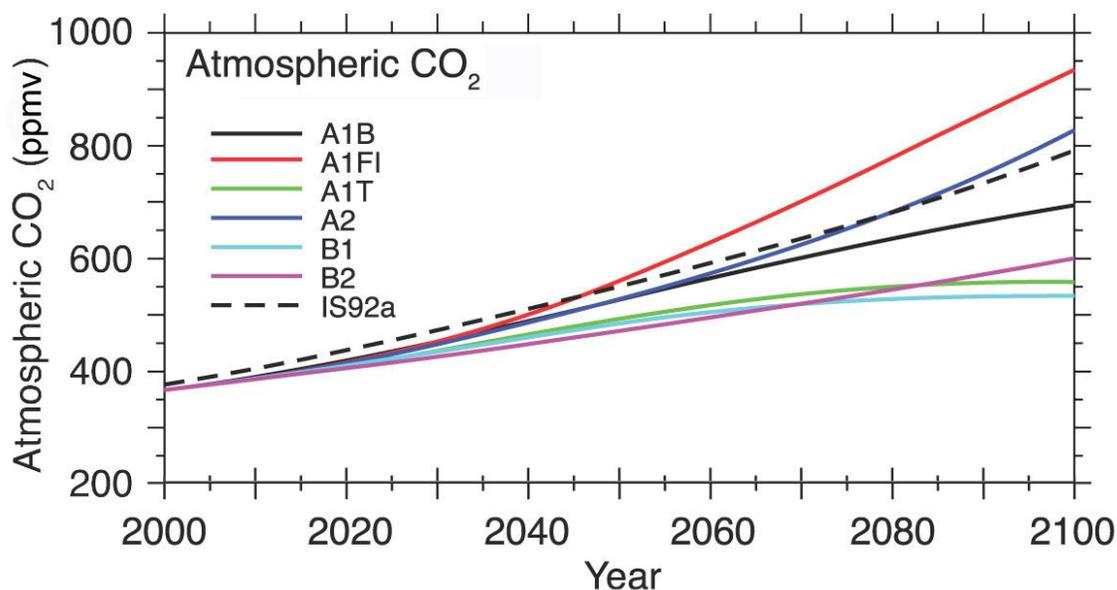
Por la naturaleza caótica del sistema y la imperfección de los sistemas de medida, a la fecha se pueden lograr pronósticos del tiempo razonablemente precisos hasta 10 o 14 días en el futuro. Por el contrario, las proyecciones climáticas, que son objeto de este estudio, están basadas en modelos que usan las leyes de la física para poder garantizar la consistencia de todos los parámetros representados por el modelo, utilizando como “controladores” a los forzantes externos -más precisamente a la evolución de los mismos- tales como la

⁶ Para mayores detalles consultar el Special Report on Emissions Scenarios del IPCC (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>).

concentración de gases de efecto invernadero, el uso de suelos, la demanda energética y otros factores que de una u otra manera influyen en el clima del planeta.

El gráfico 3.1 muestra la evolución temporal de las emisiones de dióxido de carbono, uno de los gases de efecto invernadero más importantes, proyectada hasta fines de siglo. Como se observa allí, se espera que la concentración del CO₂ se incremente continua y monótonamente, a pesar de que bajo algunos escenarios las emisiones podrían declinar, como se proyecta en el caso más optimista (ver IPCC, 2007 e IPCC, 2001). Uno de los casos más extremos prevé que la concentración de CO₂ llegue a unas 850 partes por millón de volumen (ppmv) a fines del presente siglo. En todo caso parece ya muy difícil que pueda evitarse que la concentración de CO₂ no exceda los 450 ppmv a finales de siglo (en la actualidad está en el orden de 390 ppmv⁷).

Gráfico 3.1
Proyecciones de concentraciones de dióxido de carbono (en ppmv) hasta fines de siglo.
Para una descripción de los distintos escenarios ver IPCC, 2007



Fuente: Adaptado de IPCC, 2007

3.2 Análisis de las corridas climáticas respecto al presente

El clima presente

En la sección previa se demostró que el modelo parece llevar a cabo un trabajo razonable en las zonas bajas y planas del país mientras subestima temperatura y sobreestima precipitación para las regiones de los valles y el altiplano (fundamentalmente regiones mayores a 500 msnm).

Esta subestimación/sobreestimación, sin embargo, no es la misma en todas partes aunque muestra que, en general, el modelo es capaz de reproducir el comportamiento estacional en las variables analizadas, existiendo en muchos casos solamente una diferencia (estadística) sistemática entre valores observados y calculados. Lo

⁷ <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

importante, en todo caso, es que el modelo reproduce climatológicamente las principales características de temperatura y precipitación de Bolivia, aunque los valores numéricos producidos por el modelo no siempre correspondan a los observados.

Diferencias presente-futuro

A pesar de las diferencias observadas entre valores modelados y observados, la única manera razonable de evaluar los posibles cambios del clima en el futuro es evaluar los cambios que proyecta el modelo respecto de los datos que él mismo calcula para el tiempo presente. Dada la variabilidad natural del sistema climático y las incertidumbres asociadas a las proyecciones realizadas por los modelos climáticos actuales (ver discusión más adelante), lo más importante, por el momento, es buscar la “dirección” del cambio (si una determinada variable mostrará tendencias positivas o negativas). En ese sentido, en la presente sección se estudiarán cambios en temperatura (media, mínima y máxima) como en precipitación respecto al periodo 1961-1990 definido como clima presente. El periodo elegido para caracterizar el clima futuro es el periodo 2071-2100. La razón para elegir un futuro relativamente lejano está relacionada una vez más con la variabilidad climática y la manera cómo funcionan los modelos climáticos.

A fin de realizar la comparación presente-futuro, se decidió analizar el comportamiento de temperatura y precipitación de forma mensual. Esto es, se calcularon los promedios mensuales de temperatura y precipitación para los doce meses del año para los dos periodos mencionados. De este modo, el comportamiento anual de las variables estudiadas a lo largo del año pudo ser comparado sin incorporar la variabilidad (natural) debida a cambios estacionales. Adicionalmente, y dado el fuerte gradiente altitudinal en Bolivia, se decidió tomar ciertas regiones para realizar la comparación del clima presente con el clima futuro. Las cuatro zonas elegidas fueron denominadas: Altiplano Sur, Chaco, Pando y Santa Cruz. Las coordenadas que definen dichas regiones están descritas en el cuadro 3.1. El principal criterio para esa definición está relacionado con la pendiente del terreno. Basados en la forma en la que la topografía está representada por el modelo y la diferencia de ésta con la altura “verdadera” (descrita aquí como altura de superficie a una resolución de 5 min de arco, unos 9 km aproximadamente) se decidió elegir regiones relativamente planas para evitar que procesos de parametrización afectados por la orografía puedan influir de manera importante y directa sobre las comparaciones.

Cuadro 3.1

Definición de las regiones usadas en la comparación del clima presente con el clima futuro

Región	Latitud Sur (°)		Longitud Oeste (°)	
	de:	a:	de:	a:
Altiplano Sur	18	21	68	67
Chaco	19	22	64	62
Pando	10	13	68	65
Santa Cruz	16	19	61	59

Fuente: Elaboración propia

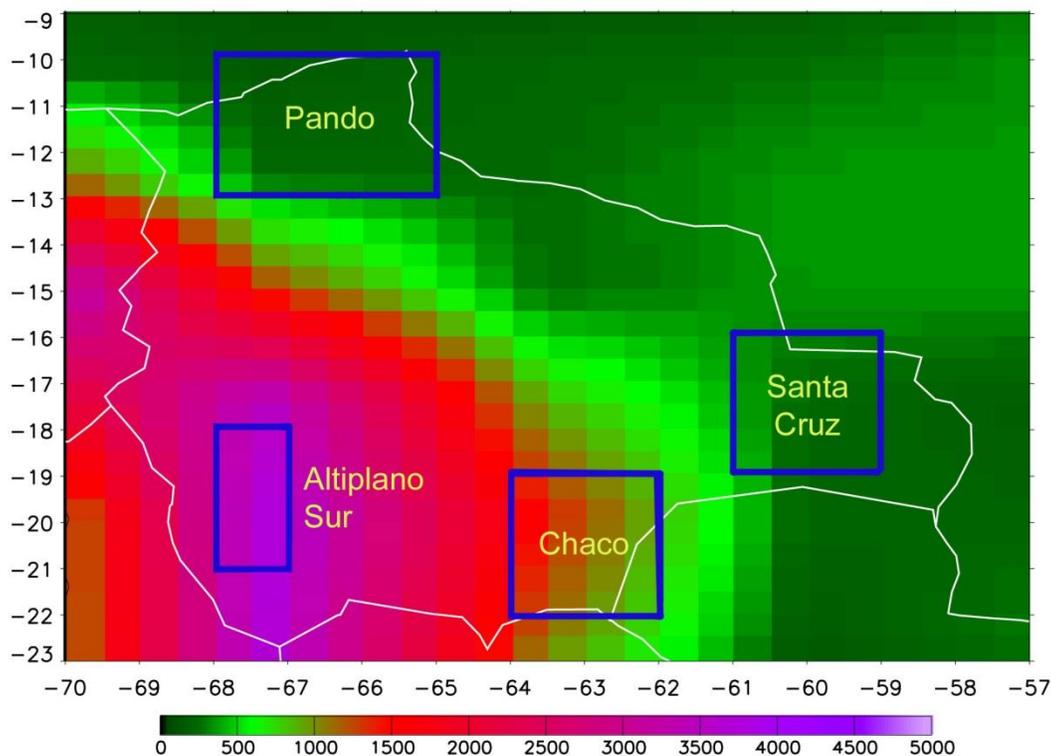
La comparación entre resultados para el escenario B2 y A2 (no mostrada aquí) indica que, en general, la diferencia entre ambos escenarios no es cualitativamente diferente. Por esa razón, la discusión se realiza para

el escenario A2 solamente (el más pesimista). A continuación se presentan los resultados de dicha comparación.

Gráfico 3.2

Altura de superficie sobre el nivel del mar (en metros), utilizada por el modelo para las simulaciones analizadas en el presente trabajo.

Cada “pixel” indica un área de 50 km x 50 km. Las regiones rectangulares indican las cuatro regiones usadas para el análisis de los cambios de temperatura y precipitación, como fueron definidas en el cuadro 3.1



Fuente: Elaboración propia

Temperatura

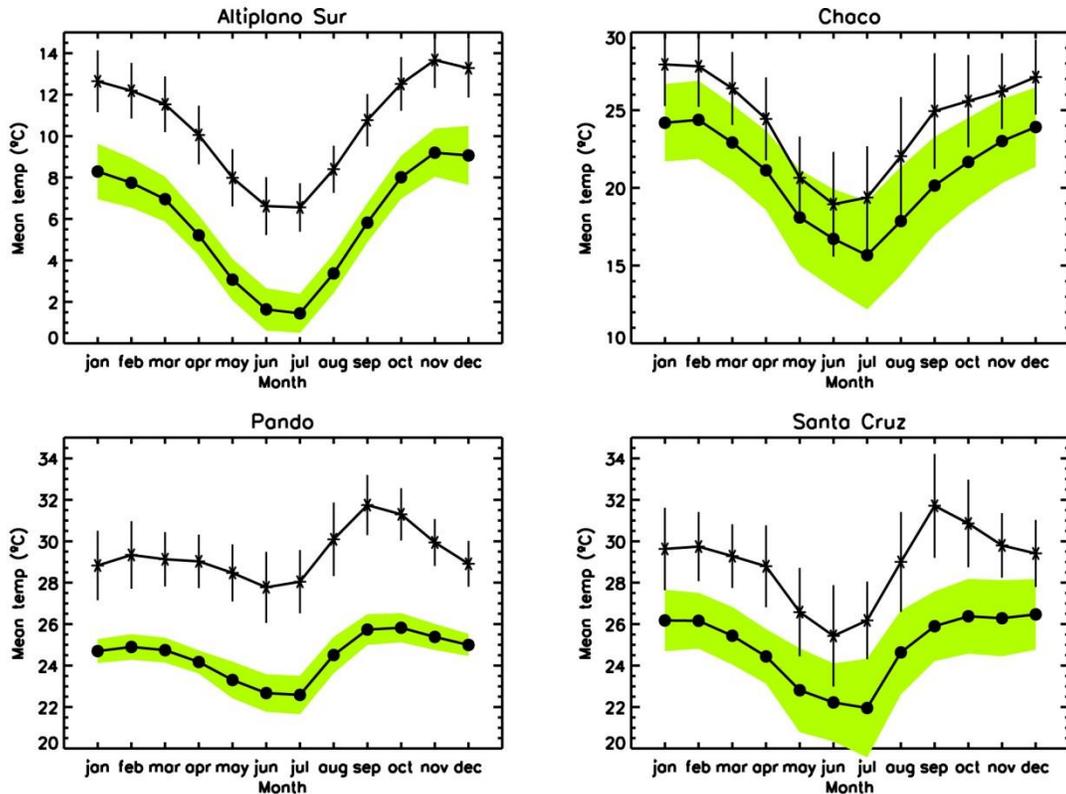
El gráfico 3.3 muestra los resultados para la temperatura media. Los círculos negros indican la media de temperatura para cada mes del año para el periodo 1961-1990. El área sombreada representa la variabilidad alrededor de la media ($\pm 1 \sigma$) para el mismo periodo. Los asteriscos también indican la media, pero para el periodo 2071-2100. En este caso las barras indican la variabilidad para este periodo. Como se observa, en las cuatro regiones de estudio se espera, de acuerdo a esta corrida, un incremento promedio de alrededor de 4°C. El mayor incremento, en valor absoluto, ocurre en la zona norte del país, representado por la región denominada Pando (4,9°C). En el Altiplano Sur el incremento proyectado es del orden de 4,6°C, menor al de Pando; pero considerando que en esa región la temperatura media actual es mucho menor que en Pando, ese cambio podría ser mucho más significativo. Finalmente, en el área de Santa Cruz y el Chaco, el incremento proyectado en la temperatura media fluctúa entre 4°C y 3,5°C respectivamente. En prácticamente todos los casos y para todos los meses los cambios observados son estadísticamente significativos ($p < 0,01$). En realidad, el valor-p tiende prácticamente a cero para todos los casos excepto para la zona del Chaco, donde $p > 0,01$ para junio y $p > 0,001$ para mayo (ver gráfico 3.2b). Adicionalmente, puede observarse que no existen

fuertes indicios que indiquen cambios en el comportamiento estacional de esta variable, aunque en la zona de Santa Cruz se observa un incremento relativamente más grande en el mes de septiembre que en el resto del año.

Gráfico 3.3

Temperatura media mensual para el clima presente (círculos llenos) y para el clima futuro (asteriscos) para las regiones definidas en la tabla 2.1.

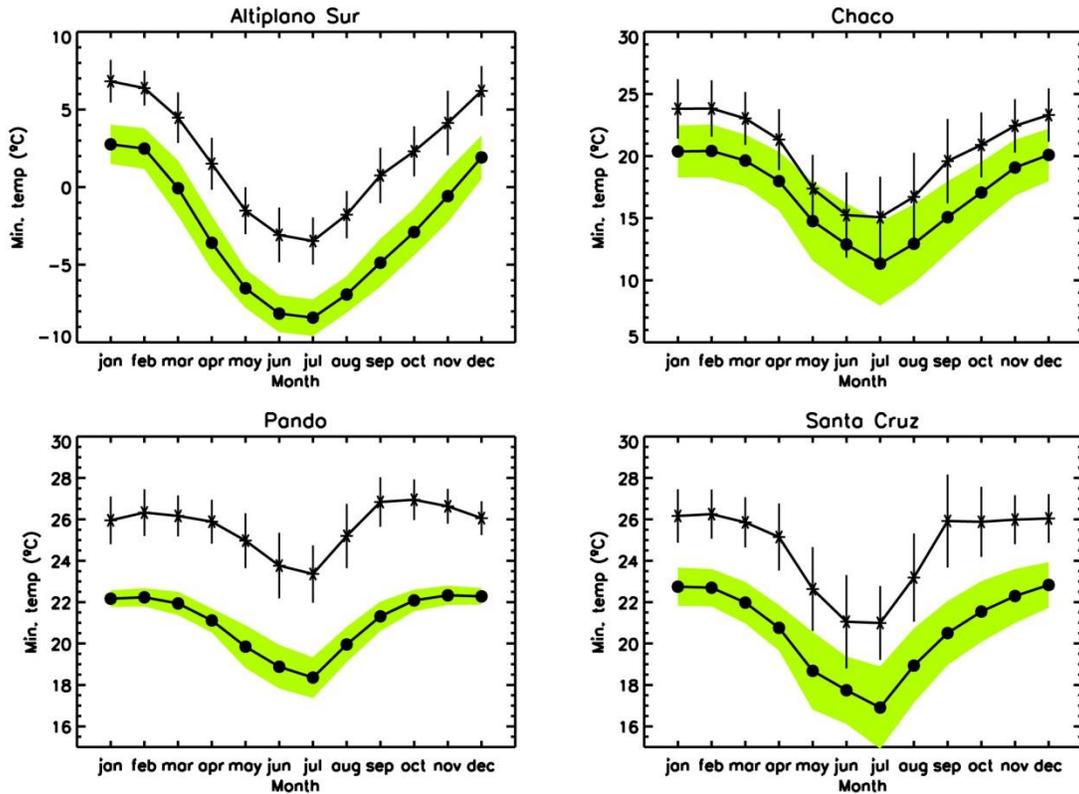
El área sombreada y las barras indican la variabilidad mensual (representada por $\pm\sigma$) para los periodos de estudio



Fuente: Elaboración propia

El mismo análisis fue hecho para la temperatura mínima y la temperatura máxima. El gráfico 3.4 corresponde a la temperatura mínima, donde se observa que el comportamiento cualitativo se parece mucho al de la temperatura promedio mensual. De hecho, los incrementos de temperatura promedio son 4,8°C, 3,4°C, 4,6°C y 4,0°C para las zonas del Altiplano Sur, Chaco, Pando y Santa Cruz respectivamente. En este caso, también $p < 0,001$ para todos los casos excepto junio cuando $p=0,00104$, mostrando que las diferencias son estadísticamente significativas.

Gráfico 3.4
 Como en 3.3, pero para el promedio mensual de la temperatura mínima

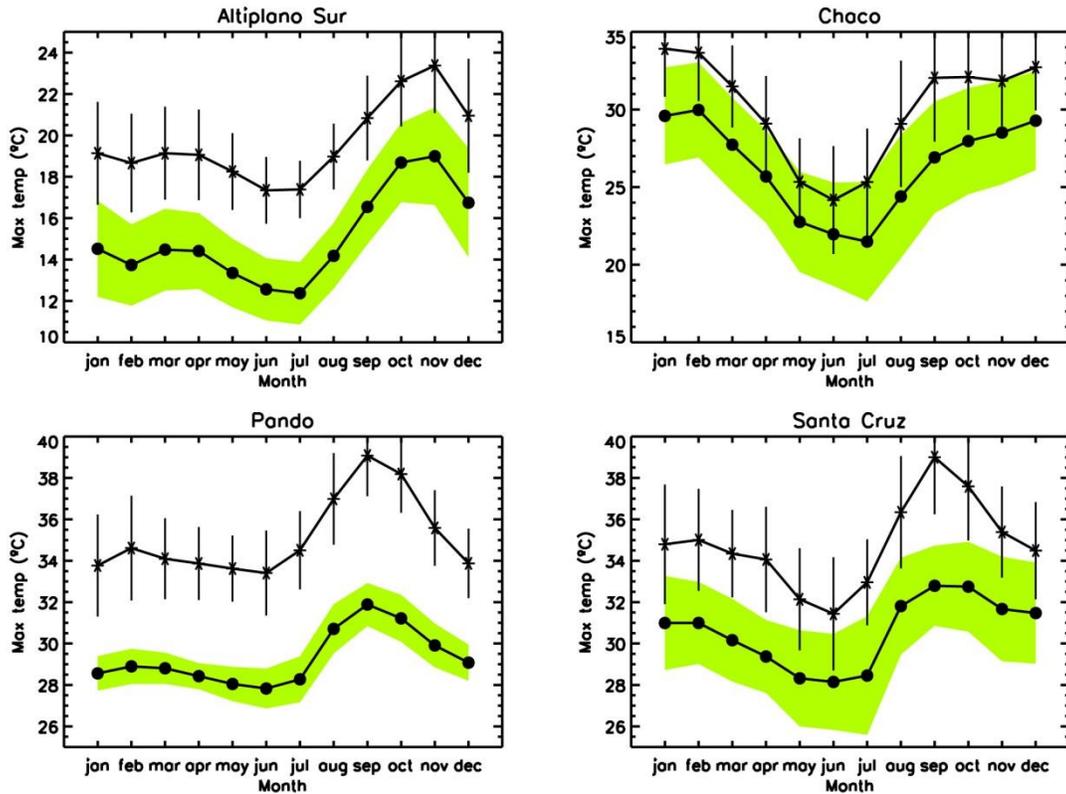


Fuente: Elaboración propia

El gráfico 3.5 muestra el cambio por mes de la temperatura máxima. En este caso, el incremento promedio fue más alto que para la temperatura media o mínima con un valor de 4,6°C; sin embargo, las características generales observadas anteriormente para estas dos últimas variables se repiten en el caso de la temperatura máxima; esto es, la forma general de la curva a lo largo del año es la misma que para el presente, y el menor cambio se da en la zona del Chaco. Adicionalmente, puede observarse que en las regiones de Pando y Santa Cruz el incremento promedio más fuerte se da en el mes de septiembre. Los incrementos para las cuatro regiones de estudio son 4,6°C, 3,7°C, 5,8°C y 4,2°C para el Altiplano Sur, Chaco, Pando y Santa Cruz respectivamente. Como en los casos anteriores, la diferencia entre la temperatura máxima del presente (simulada por el modelo) y el futuro es estadísticamente significativa a nivel $p < 0,001$ excepto en junio en la región del Chaco, donde $p=0,00165$.

Gráfico 3.5

Como en 3.3, pero para el promedio mensual de la temperatura máxima

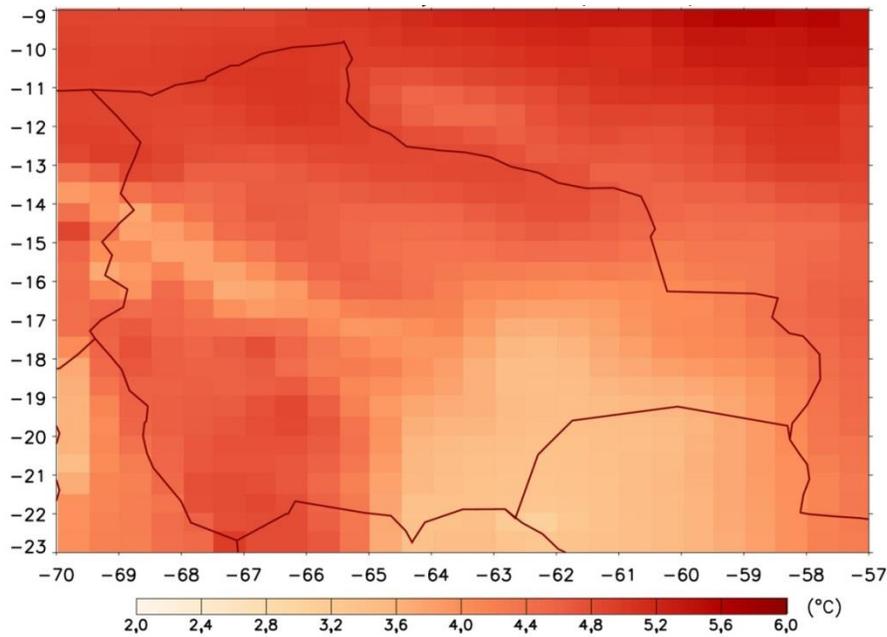


Fuente: Elaboración propia

Para tratar de entender el cambio de temperatura de forma espacial se graficaron los cambios entre el presente y el futuro para la temperatura media (gráfico 3.6). En este gráfico se observa que el máximo cambio se da en la parte norte de Bolivia y el mínimo en la zona del Chaco en la frontera con Paraguay y Argentina. También se observa un incremento relativo menor en la zona de fuerte pendiente de superficie (los Yungas por ejemplo). Las causas por las que se tendría un incremento relativamente menor (del orden de 0,5 a 1°C) en estas dos regiones podrían estar relacionadas con cambios en el transporte de humedad y/o precipitación. Un estudio más detallado es necesario para entender este comportamiento.

Gráfico 3.6

Diferencia de la temperatura media, en grados centígrados, entre el futuro (2071-2100) y el presente (1961-1990) para el escenario A2



Fuente: Elaboración propia

Precipitación

El gráfico 3.7 muestra el comportamiento de la precipitación así como su variabilidad (representada una vez más por una desviación estándar). En este caso se usa la precipitación acumulada mensual para la comparación. Como se mencionó, el modelo reproduce correctamente el comportamiento cualitativo. Esto es, el modelo predice abundante precipitación en la época de lluvias y poca precipitación en época seca. Aunque se sabe que el modelo sobreestima la precipitación de manera sistemática sobre el área de valles y el altiplano, se espera que la comparación entre dos periodos calculados por el mismo modelo elimine, al menos en parte, ese sesgo.

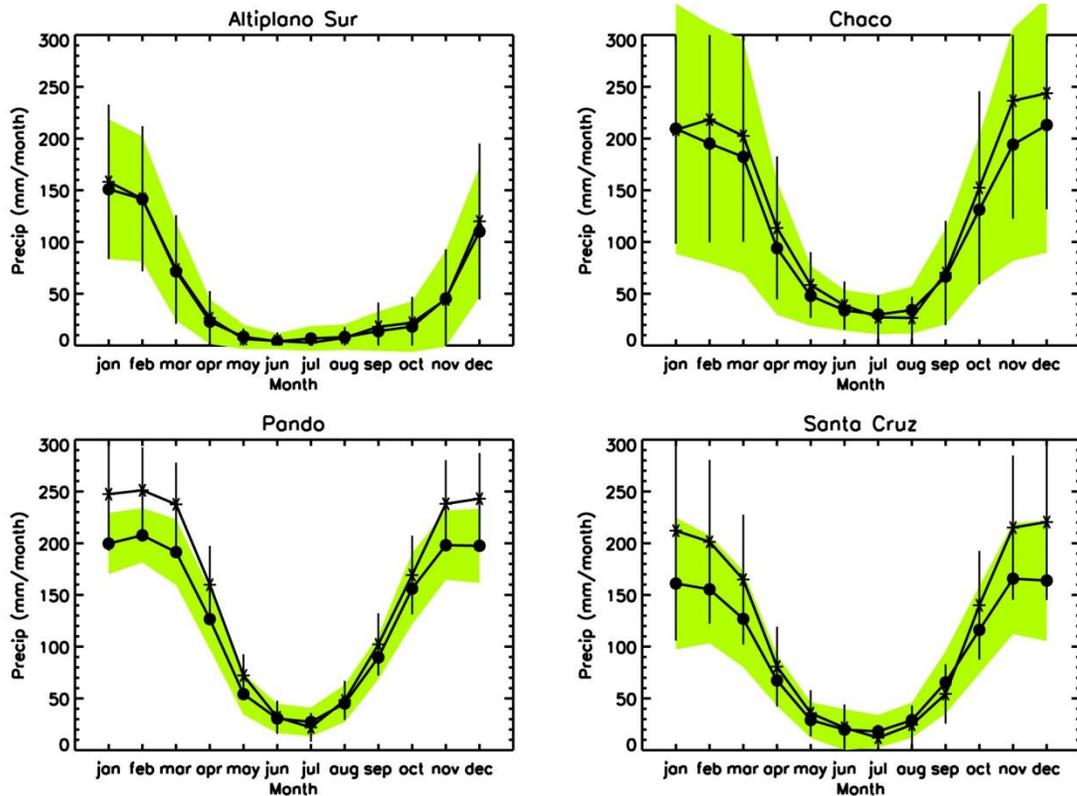
En el caso de la precipitación, los gráficos del comportamiento medio a lo largo del año muestran que el cambio promedio entre el presente y el futuro es relativamente pequeño y en muchos casos no es estadísticamente significativo. Por ejemplo, en el caso del Altiplano Sur las medias de precipitación son prácticamente idénticas con un ligero incremento en la variabilidad. Como resultado, el valor-p para todos los meses es marcadamente superior a 0,05 indicando que no existe diferencia estadísticamente significativa entre el presente y el futuro en esta región. En el caso del Chaco, a pesar de que las proyecciones del modelo indican que la precipitación sería superior a la actual, el cambio es menor a la variabilidad tanto del presente como del futuro. En este caso, el valor-p es también marcadamente superior a 0,05 indicando que el cambio proyectado no es estadísticamente significativo.

En el caso de Pando, el gráfico 3.7 muestra que se espera mayor precipitación en casi todos los meses del año, siendo este incremento estadísticamente significativo ($p < 0,05$) para los meses correspondientes al verano (de noviembre a mayo en este caso). El incremento proyectado es del orden de 20% para ese periodo. Para esta región también se observa un ligero incremento de la variabilidad.

Gráfico 3.7

Precipitación acumulada mensual promedio para el clima presente (círculos llenos) y para el clima futuro (asteriscos) para las regiones definidas en la tabla 2.1.

El área sombreada y las barras indican la variabilidad mensual (representada por $\pm\sigma$) para los periodos de estudio



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la precipitación también muestra un incremento para los meses de verano (entre noviembre y marzo para este caso) en la zona de Santa Cruz. El incremento es estadísticamente significativo ($p < 0,05$) en los mencionados meses y está en el orden del 30%. Por el contrario, el modelo indica un ligero decremento en la precipitación para la época seca pero no es estadísticamente significativo. Similar a las otras regiones, la precipitación muestra una mayor variabilidad para el periodo 2071-2100.

Así como se hizo para las temperaturas, se hicieron gráficos de los cambios en precipitación para toda Bolivia. En este caso, en vez de analizar los cambios absolutos se optó por graficar los cambios porcentuales entre el presente y el futuro. Dado el claro comportamiento estacional de esta variable y, en general, la no significancia estadística de los cambios proyectados, se decidió graficar los cambios por mes así como por estación seca y húmeda. El gráfico 3.8a muestra dichos cambios sin tener en cuenta su significancia estadística, mientras que el gráfico 3.8b muestra los mismos cambios pero enmascarando aquellas regiones en las que el cambio no es estadísticamente significativo.

El gráfico 3.6a muestra que el modelo predice un incremento de precipitación en la zonas bajas entre noviembre y mayo, en tanto que predice una reducción en la precipitación acumulada entre junio y octubre para la misma zona, siendo el decremento más marcado en el mes de junio. La zona occidental del país

muestra, en general, una reducción de la precipitación a lo largo del año excepto en septiembre y octubre. El gráfico 3.8b, sin embargo, indica que los cambios son estadísticamente significativos solamente entre noviembre y mayo, y únicamente para parte del territorio boliviano. De hecho, $p < 0,05$ solamente para la parte noreste del territorio boliviano (desde Pando hasta Santa Cruz) donde el incremento está entre 20% y 30%. El único mes en el que el cambio en precipitación es estadísticamente significativo para la zona del norte de La Paz (y Pando) es mayo. Por el contrario, el análisis estadístico muestra que los cambios para el Altiplano boliviano no son estadísticamente significativos, como refleja el gráfico 3.8b, donde han sido sombreadas las áreas con $p > 0,05$.

A fin de presentar los resultados de precipitación de manera más compacta se decidió analizarlos para las estaciones seca y húmeda. El gráfico 3.9 muestra la diferencia entre presente y futuro para los meses de invierno (JJA)⁸ y verano (DEF)⁹. Esta figura muestra claramente lo descrito en el párrafo anterior, esto es, las salidas del modelo usadas en el presente estudio indican que en verano se tendría un incremento de precipitación estadísticamente significativo en tierras bajas, en tanto que los cambios proyectados para la zona del Altiplano y valles no pueden distinguirse de la variabilidad modelada en este periodo. Usando las cuatro zonas definidas, se establece que el incremento de precipitación proyectado para las zonas denominadas Pando y Santa Cruz están en el orden de 45% y 52% respectivamente. Por otro lado, el gráfico 3.9 muestra que para invierno los cambios proyectados no son estadísticamente significativos para prácticamente todo el territorio boliviano.

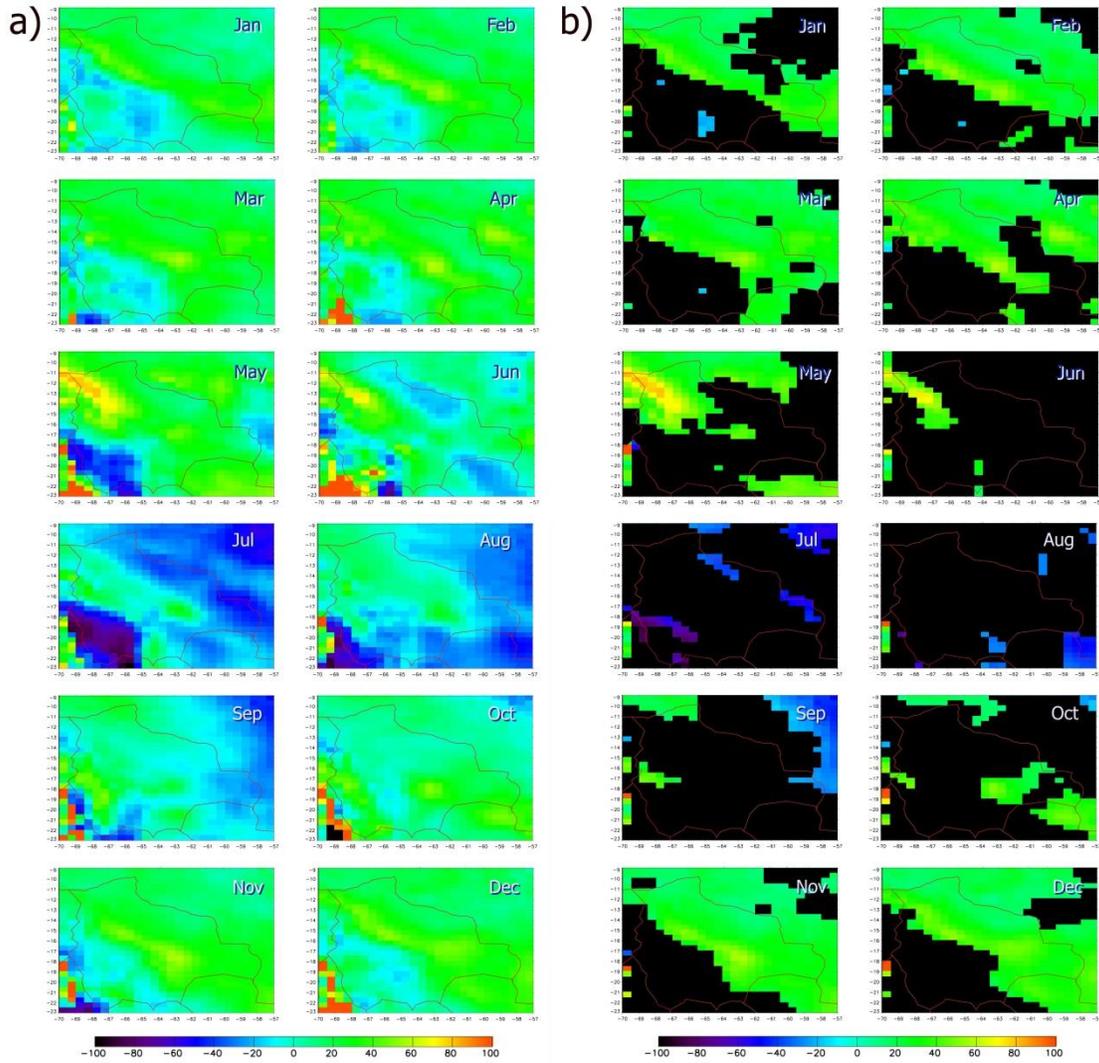
⁸ JJA = Junio, julio y agosto.

⁹ DEF = Diciembre, enero y febrero.

Gráfico 3.8

Cambio porcentual de la precipitación acumulada mensual promedio entre el clima presente y el clima futuro

a) Para todos los puntos sin discriminación, y b) Para puntos donde el cambio es estadísticamente significativo (áreas no sombreadas)

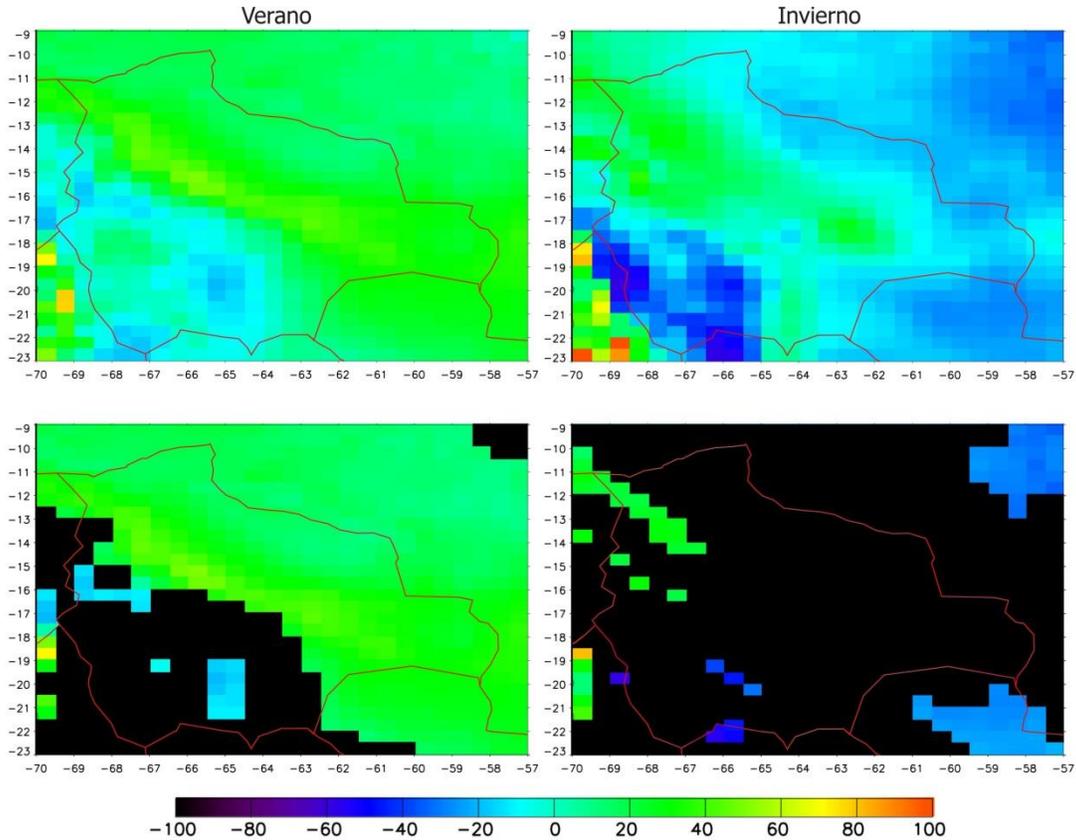


Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9

Cambio porcentual de la precipitación acumulada mensual promedio entre el clima presente y el clima futuro para verano e invierno.

Las zonas sombreadas señalan regiones donde el cambio no es estadísticamente significativo a un valor p de 0,05



Fuente: Elaboración propia

3.3 Discusión

Cambios en temperatura y precipitación: implicaciones

La conclusión más clara del presente estudio, al menos desde el punto de vista del clima, es que se espera un incremento de la temperatura, tanto media, mínima y máxima, en toda Bolivia. Ese incremento será, de acuerdo al modelo usado, de 4°C a 5°C para el escenario A2, el cual prevé un incremento en la concentración de CO₂ hasta unos 850 ppmv para finales del presente siglo. El incremento más fuerte ocurriría en la temperatura máxima que en promedio se incrementaría 4,6°C, mientras que las temperaturas mínimas y media se incrementarían alrededor de 4,2°C cada una. El incremento no sería uniforme en el territorio boliviano. El mayor incremento se daría en la zona norte del país y en el Altiplano, principalmente Altiplano sur. El menor incremento se daría en la zona del Chaco, que en promedio muestra un incremento del orden de 1°C menor que el resto del país. Esto no está del todo de acuerdo con otros resultados (Bradley et al., 2006), que sugieren que el mayor incremento de temperatura debería darse en las zonas elevadas. Esto puede deberse, en parte, a que el modelo usa una altura de superficie interpolada a 50 km de resolución que, al menos en zonas con alto gradiente altitudinal, tiende a subestimar la altura real.

La precipitación, por el contrario, muestra una variabilidad muchísimo más alta que la temperatura. Los resultados del modelo en ese sentido indican que para finales de siglo y en el caso del escenario A2, se tendría un incremento de la precipitación en las zonas bajas del país, de Pando a Santa Cruz, del orden de 30% y solamente en la época de verano. Debido a la fuerte variabilidad natural de la precipitación, no se puede concluir que los cambios proyectados por el modelo, para la zona del altiplano y valles bolivianos, sean significativos (con la información que se tiene tampoco puede decirse que no existirán cambios). Los resultados del modelo tampoco muestran cambios evidentes en las estaciones secas y húmedas como otros modelos sugieren para el futuro (Seth et al., 2009). Esto es, no se prevé una ampliación de la época seca o una reducción de la época de lluvias, ni una intensificación de las mismas. La razón para esto, al menos en parte, puede estar relacionada con que todo el análisis se realizó a nivel mensual y no a nivel diario. Por la misma razón, no fue posible investigar si el modelo indica algún incremento de eventos extremos, pues éstos son típicamente suavizados al efectuar el promedio mensual. Por la misma razón tampoco fue posible investigar posibles cambios en las funciones de distribución de la precipitación que requieren datos a nivel diario.

Aunque los resultados de la corrida usada en este estudio sugieren que la precipitación podría esencialmente no cambiar en la mayor parte del territorio boliviano (o al menos no muestra un cambio en el sentido estadístico), el incremento de la temperatura probablemente producirá cambios en la evapotranspiración y en el *stress* hídrico asociado (Hamlet & Lettenmaier, 1999). Se necesitan estudios más profundos para tratar de entender mejor cuáles serían las consecuencias de estos cambios en el ciclo hidrológico.

Adicionalmente, el incremento de temperatura podría influir de manera directa sobre la existencia de los glaciares a través de la tasa de derretimiento de los mismos. Por ejemplo, aun si la precipitación se mantuviese prácticamente sin alteración, especialmente en los periodos de recarga, el aumento de la temperatura media y cambios asociados con la cobertura de nubes, podrían hacer más intensos los procesos de sublimación o derretimiento, produciendo una pérdida neta de masa de hielo y nieve (Francou et al., 2003; Vuille et al., 2007).

Un incremento de la precipitación en las zonas bajas incrementaría las probabilidades de inundaciones en la zona; sin embargo, como se mencionó anteriormente, en un clima más caliente es probable que se incrementen eventos extremos (IPCC, 2007) pero no necesariamente el promedio, al menos desde el punto de vista climatológico. Eventos extremos, sin embargo, son sucesos típicamente de corta duración (unos pocos días), por lo que para explorar los posibles efectos del cambio climático desde el punto de vista de inundaciones o sequías, es necesario hacer el análisis con salidas a nivel diario en vez de a nivel mensual (como en este caso).

Cuidados que deben tenerse con los resultados

Los resultados de una corrida de un modelo deben tomarse con cuidado. La naturaleza caótica del sistema climático (Andrade, 2008) hace que aun usando un mismo modelo pero con inicializaciones ligeramente diferentes (el estado del sistema a tiempo cero), los resultados logrados pueden ser dramáticamente diferentes. Por esa razón, lo óptimo en todo caso es un ensamble de corridas antes que una sola corrida. Con PRECIS esto es solo parcialmente posible, pues las posibles condiciones laterales (típicamente modelo ECHAM o HADLEY) son bastante restringidas. Tampoco es posible alterar las condiciones iniciales pues están prescritas. Estos hechos limitan fuertemente los posibles miembros del ensamble si uno fuese a ser construido. Ese mismo hecho no permite, al menos con los resultados entregados para el presente estudio, construir una proyección en la que pueda especificarse la probabilidad de ocurrencia de cierto resultado (incremento de lluvias, por ejemplo).

El modelo elegido también es importante al momento de evaluar sus proyecciones. Aunque la *performance* del modelo se evalúa al realizar la comparación de los resultados con observaciones, es importante tomar en cuenta las características particulares del modelo que se esté usando al momento de tratar de interpretar las salidas para el futuro. Por ejemplo, en el caso de PRECIS la temperatura de superficie del océano está prescrita, lo que significa que no puede analizarse el impacto del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en eventos El Niño. Si bien los impactos de este fenómeno no han sido siempre los mismos sobre el territorio boliviano (Ronchail, 2005), existen evidencias observacionales que muestran que durante la última década del siglo pasado, eventos El Niño tuvieron fuerte impacto sobre los glaciares bolivianos (Francou et al., 2003). Bajo los escenarios de incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, con la consecuente elevación de la temperatura del planeta, se espera que exista incremento de amplitud (Lenton et al., 2008) y/o frecuencia de eventos El Niño (Sang-Wook et al., 2009). Por esta razón, es importante poder estimar los efectos del incremento de gases invernadero con un AOGCM que permita correr libremente las SST y así evaluar posibles cambios en frecuencia y/o amplitud de fenómenos como El Niño.

Al momento de evaluar los efectos proyectados por algún modelo es necesario tomar en cuenta la resolución espacial del mismo. Varias parametrizaciones dependen de la pendiente del terreno. Esto es especialmente cierto en regiones con un elevado gradiente altitudinal como en Bolivia. A 50 km de resolución espacial, la representación de altura de superficie del modelo (es decir la representación de la topografía) es relativamente pobre. Esto conduce naturalmente a errores en la representación de ciertos procesos o en los efectos que éstos puedan tener sobre el clima local. Los resultados, y los errores asociados a los mismos, deben tener en cuenta entonces la resolución espacial usada. Dicho esto, es interesante notar que en algunos casos las salidas de un GCM, con resolución más pobre aún, se acercan más a las observaciones (promedio) que un RCM conducido por las condiciones de contorno provistas por el GCM (Seiler, 2009).

Otros resultados para la región

Corridas de PRECIS sobre Bolivia han sido también realizadas por la ONG Fundación Amigos de la Naturaleza, FAN (Seiler, 2009). Los resultados de ese estudio muestran valores muy similares al presente estudio en cuanto a temperatura se refiere. Sin embargo, la precipitación muestra valores diferentes aunque los patrones de cambio son esencialmente los mismos. Las razones para estas discrepancias están relacionadas con la versión del modelo (la versión que usó FAN es ligeramente diferente a la que se usó en para el presente estudio) y con las condiciones laterales usadas. Mientras que se emplearon condiciones de borde del Hadley Centre para este estudio, FAN utilizó las condiciones del modelo ECHAM4. La otra diferencia está probablemente relacionada con el dominio usado para correr el modelo. Mientras FAN usa un dominio relativamente pequeño (1.600 km x 1.600 km aproximadamente, Seiler, comunicación personal), la corrida utilizada para este estudio fue realizada en un dominio de 7.500 km x 5.000 km aproximadamente. También se debe mencionar que existen diferencias en las conclusiones provistas por ambos estudios. Con casi los mismos valores de cambio anuales, los autores concluyen cosas diferentes al menos para la precipitación en la época seca.

Marengo et al. (2009) utiliza PRECIS para un análisis sobre Sudamérica¹⁰. En este caso, el análisis se realiza a nivel diario explorando la ocurrencia de eventos extremos de corta duración. El resultado más relevante relacionado con el presente trabajo se refiere al incremento de precipitación en la parte occidental de la Amazonía, que implica riesgos de inundación en esa región. Adicionalmente se observa un incremento de

¹⁰ Los datos utilizados en el presente trabajo han sido generados por Marengo y su grupo en el INPE del Brasil.

eventos de periodos secos sobre ciertas regiones del territorio boliviano, que son consistentes con las observaciones solamente en esta región (Marengo et al., 2009).

Vale la pena notar que los resultados obtenidos del análisis en este estudio de alguna manera están en contraposición con un modelo acoplado océano-atmósfera del mismo Hadley Centre, pero incluyen la retroalimentación del carbono dentro de sus procesos (Cox et al., 2004). En el mencionado estudio se observa un decremento de la precipitación para las zonas bajas, mientras que en este estudio se proyecta un aumento de esta variable para finales del presente siglo.

Trabajos recientes para Sudamérica sugieren cambios en ciertas características que controlan el clima en Bolivia. Seth et al. (2009) muestran que la posición media del Anticiclón del Atlántico se desplazaría hacia el Sur en un mundo más caliente. Este desplazamiento traería como consecuencia cambios en la Zona de Convergencia del Atlántico Sur, que a su vez regulan el flujo de humedad que llega/sale de la zona de Santa Cruz a través del SALLJ. Usando un subconjunto de modelos usados en el reporte del IPCC (2007) Seth et al. (2009) sugieren que el ciclo de lluvias se haría más intenso en la zona altiplánica pero a la vez más corto. Esto implicaría una ampliación del ciclo seco con las consiguientes consecuencias en el ciclo hidrológico. Aunque en el presente estudio se indica una posible intensificación del ciclo hidrológico, los resultados de la corrida usada no muestran un cambio estadístico en cuanto a precipitación se refiere en el área altiplánica boliviana, ni un acortamiento del ciclo de lluvias en la misma región.

No deberían extrañar resultados contrapuestos, si consideramos la variedad de modelos usados, las diferentes condiciones de borde usadas para correr los RCM y las diferentes condiciones iniciales empleadas para la realización de cada corrida en particular. El último reporte del IPCC (2007) así como otros estudios independientes (Reichler & Kim, 2008, por ejemplo) muestran una gran variabilidad en los resultados obtenidos por los distintos modelos.

Consideraciones adicionales acerca los modelos climáticos numéricos

En general, como muestran distintos trabajos (Reichler & Kim, 2008 y Solman & Le Treut, 2006, por ejemplo) los modelos climáticos indican una fuerte variabilidad que está relacionada con la naturaleza del sistema que se trata de simular, a las condiciones de borde que se usan, a las condiciones iniciales y a otros factores que introducen incertidumbres a las proyecciones que producen esos modelos. Por esa razón, un mismo modelo puede producir resultados distintos (a veces muy distintos) para condiciones ligeramente diferentes. En ese sentido, una sola realización de un modelo tiene una incertidumbre grande y los resultados de esta sola corrida deben tomarse con cuidado.

El IPCC (2007) indica que “la simulación del clima regional está todavía seriamente afectada por deficiencias en los modelos climáticos”, los cuales muestran sesgos cuando sus resultados son comparados con observaciones para el clima reciente. Adicionalmente, los modelos empleados en el último reporte del IPCC muestran, en lo que a precipitación se refiere, fuertes discrepancias (inclusive cambios de signo opuesto) para el clima futuro sobre Sudamérica. Mayores estudios y un mejoramiento en la red de observación del tiempo/clima son imprescindibles para mejorar las simulaciones del clima futuro y, tal vez tan importante como eso, reducir las incertidumbres asociadas a esas proyecciones.

Finalmente, es necesario mencionar algo acerca de proyecciones para un periodo relativamente cercano (centrado en 2030, por ejemplo). Proyecciones para tales periodos son requeridas por la comunidad científica y la sociedad en general para tratar de definir políticas de adaptación y/o mitigación¹¹. A pesar de que técnicamente es posible tener salidas de los modelos climáticos para este periodo, es necesario recordar que estos modelos son “manejados” por los forzantes externos que en este caso es, fundamentalmente, la concentración de gases de efecto invernadero. Dado que el incremento proyectado para estas concentraciones para el periodo mencionado no son muy grandes (unas 60 ppmv al ritmo actual), los cambios proyectados por los modelos tienen una fuerte influencia de la variabilidad interna generada por estos mismos modelos. Es decir, los cambios proyectados contienen mucho “ruido” que hacen que la razón señal/ruido sea muy baja, haciendo difícil obtener cambios significativos desde el punto de vista estadístico.

4. Conclusiones

El análisis de datos producidos por el modelo climático regional PRECIS muestra que bajo el escenario climático A2, donde se prevé que la concentración de CO₂ atmosférico llegará a unos 850 ppmv, el incremento promedio de la temperatura media sobre el territorio boliviano será del orden de 4,4°C, con el incremento más grande en el norte de Bolivia (~5,8°C) seguido por la zona de occidental (~4,6°C). El menor incremento se daría en la región sudeste del país con un cambio de temperatura aproximado de 3,7°C. Las temperaturas mínimas y máximas muestran un comportamiento similar. En general, el comportamiento promedio de las temperaturas a lo largo del año no muestra mayores cambios respecto al comportamiento modelado para el periodo 1961-1990 (aunque sí su magnitud). La variabilidad modelada tampoco presenta un incremento muy grande.

La precipitación muestra una variabilidad grande, tanto para el periodo presente como para el futuro. Los cambios proyectados por el modelo caen en su mayor parte dentro la variabilidad modelada. Por esta razón, la mayor parte de estos cambios no son estadísticamente significativos. El cambio más nítido proyectado por el modelo se produce en las regiones bajas, entre Pando y Santa Cruz, donde, en promedio, se proyecta un incremento de precipitación del orden de 30% para finales de siglo (bajo el escenario A2). Este incremento es significativo solamente en la época de verano. Si bien el cambio proyectado para otras regiones y épocas del año no es estadísticamente significativo, los datos producidos por PRECIS sugieren que en el futuro podría darse una reducción de la precipitación en las zonas altas de Bolivia en la época seca. Estos cambios, sin embargo, están de alguna manera enmascarados por la variabilidad “natural” de la precipitación (calculada también a partir de los datos del modelo). Sin embargo, hay que tener en cuenta que pequeños cambios en precipitación en la época seca podrían tener importantes efectos sobre la agricultura y los ecosistemas.

¹¹ CURSO-TALLER SOBRE MODELACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS, llevado a cabo en septiembre de 2009, organizado por la Universidad Mayor de San Andrés, el Vice ministerio de Ciencia y Tecnología, el Vice Ministerio de Biodiversidad, Medio Ambiente y Cambio Climático, con apoyo del Banco Mundial.

5. Referencias

- Alves L. 2007. Simulaciones da Variabilidade do Clima Presente sobre a América do Sul utilizando um Modelo climático Regional. M.S. Dissertation. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Sao Jose dos Campos, Sao Paulo, Brazil; 230.
- Alves L. M. & J. Marengo, 2009. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Andrade M., 2008. Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 14, 42-49.
- Andrade M. & L. Blacutt, 2010. Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: Comparación con estaciones de superficie. *Revista Boliviana de Física*, 16, 1-11.
- Bradley R., M. Vuille, H. F. Diaz, & W. Vergara, 2006. Threats to Water Supplies in the Tropical Andes. *Science*, 312, 1755-1756.
- Brenner A., H. Frey J. DiMarzio, L. Tsaoussi , 2003. Topography over South America from ERS Altimetry, 3rd ERS SYMPOSIUM, 2003, (<http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/frey/>)
- 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.
- Cox P. M., R. A. Betts, M. Collins, P. P. Harris, C. Huntingford & C. D. Jones, 2004. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 137-156.
- Cusack, S.; Edwards, J. M.; Crowther, J. M., 1999. Investigating k-distribution methods for parametrizing gaseous absorption in the Hadley Centre climate model. *J. Geophys. Res.*, v. 104, n. D2, p. 2051-2057.
- Edwards, J. M., & A. Slingo, 1996. Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 689-719.
- Falvey M. & Rene Garreaud, 2005. Moisture variability over the South American Altiplano during the SALLJEX observing season. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1-12.
- Franco, B., M. Vuille, P. Wagnon, J. Mendoza, and J.-E. Sicart, 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S, *Journal of Geophysical Research*, 108(D5), 4154, doi:10.1029/2002JD002959..
- Garreaud, R.D., 1999. 'Multi-scale analysis of the summertime precipitation over the central Andes', *Monthly Weather Review*, 127, 901-921.
- Garreaud, R.D. & Aceituno, P. 2001. Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano J. *Climate*, 14, 2779-2789.
- Gregory, D. & D. Morris, 1996. The sensitivity of climate simulations to the specification of mixed phase clouds. *Climate Dynamics*, v. 12, n. 9, p. 641-651.
- Hamlet A. & D. P. Lettenmaier, 1999. Effects of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Columbia River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 35, 1597.

- Ibisch, P., S.G. Beck, B. Gerkmann & A. Carretero, 2003. 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. 2008.
- IPCC, 2000. EMISSIONS SCENARIOS: A Special Report of IPCC Working Group III.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J. and Mitchell, J.F.B., 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp.
- Keeling C.D., 1960. The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere, *Tellus*, 12, 200-203.
- Lenters, J. D. and K. H. Cook, 1997. On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. *J. Atmos. Sci.* 54 pp. 656-678.
- Lenton T.M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf & H. J. Schellnhuber, 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 1786-1793.
- Marengo, J. A., M. W. Douglas, and P. L. Silva Dias, 2002. The South American low-level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC campaign, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 8079, doi:10.1029/2001JD001188.
- Marengo, J. A., W. R. Soares, C. Saulo, and M. Nicolini, 2004. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate*, 17, 2261-2280.
- Marengo J. A., R. Jones, L. M. Alves, M. C. Valverde, 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29, 2241-2255.
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai, and M. Nakagawa, 2006. 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model. -mean climate states-. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84, 165-185.
- Nogues-Paegle, J. and K.C. Mo, 1997. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review*, 125, 279-91.
- Palmer, T.N. and P.D. Willams, Introduction, 2008. Stochastic physics and climate modeling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366, 2421-2427.
- Peixoto J. P. & A. H. Oort., 1992. *Physics of climate*, Springer-Verlag, 564 pp.
- Pope VD, Gallani ML, Rowntree PR, Stratton RA., 2000. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3P. *Climate Dynamics* 16: 123-146.

- Reichler, T. & J. Kim, 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *BAMS*, 303-309.
- Ronchail J., L. Bourrel, G. Cochonneau, P. Vauchel, L. Phillips, A. Castro, J. Guyot, E. de Oliveira, 2005. Inundations in the Mamore basin (south-western Amazon—Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Hydrology* 302. 223-238.
- Sang-Wook Y., J. Kug, B. Dewitte, M. Kwon, B. Kirtman & F. Jin, 2009. El Niño in a changing climate, *Nature*, 461, doi:10.1038.
- 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
- Senior, C. & Mitchell, J. F. B., 1993. CO2 and climate: The impact of cloud parametrization. *Journal of Climate*, v. 6, n. 3, p. 393-418.
- Seth, A., M. Rojas, S. A. Rauscher, 2009. CMIP3 projected changes in the annual cycle of the South American Monsoon. *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-009-9736-6.
- Smith, R. N. B., 1990. A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 116, n. 492, p. 435-460.
- Solman S.A., Nuñez MN et al, 2007. Regional climate change experiments over southern South America. I: present climate. *Climate Dynamics* 30:533-552.
- Solman S. and Le Treut H., 2006. Climate change in terms of modes of atmospheric variability and circulation regimes over southern South America. *Climate Dynamics*, 26, 835-854.
- Vera, C., W. Higgins, J. Amador, T. Ambrizzi, R. Garreaud, D. Gochis, D. Gutzler, D. Lettenmaier, J. Marengo, C. R. Mechoso, J. Noguez-Paegle, P. L. Silva Dias, and C. Zhang, 2006. A Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, 19, 4977-5000.
- Vuille, M., 1999. Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 19, 1579-1600.
- Vuille, M., et al., 2007. Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global Planet. Change*, doi:10.1016/j.gloplacha.11.003.
- World Meteorological Organization, 1984. Technical Regulations, Vol. I. WMO Publication No. 49. Geneva, Switzerland.



www.iadb.org/cambioclimatico
Síguenos en twitter @BIDcambioclima