

Fortaleciendo la capacidad y desarrollando estrategias de adaptación a los fenómenos de Cambio Climático en comunidades de montaña de la Cordillera Real de Los Andes Centrales de Bolivia



**INSTITUTO DE HIDRÁULICA
E HIDROLOGÍA**

PROYECTO ILLIMANI

“ESTUDIO DE ESCENARIOS DE CAMBIOCLIMÁTICO EN CUENCA DEL RÍO SAJHUAYA”

INFORME FINAL

Daniel R. Espinoza Romero

IDRC
International Development
Research Centre



CRDI

Centre de recherches
développement intern



**LA PAZ – BOLIVIA
Noviembre 2011**



Índice de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Área de Estudio.....	1
1.3	Objetivos.....	2
1.4	Alcance	2
1.5	Metodología	3
2	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	4
2.1	Modelos climáticos globales (modelos de circulación general del IPCC “GCM”).....	4
2.2	Escenarios de Cambio Climático.....	7
2.3	Modelo de Clima para estudios de cambio climático en la región	11
2.4	Información climática utilizada	14
2.4.1	Datos climáticos con resolución de 10 minutos (16.66 km).....	14
2.4.2	Datos climáticos con resolución de 0.50 grados (50 km).....	16
2.4.3	Datos climáticos con resolución de 0.50 y 0.25 grados (50 km y 25 km).....	19
2.5	Evaluación regional de escenarios de cambio climático	20
2.5.1	Escenarios de precipitación.....	20
2.5.2	Escenarios de temperatura media	24
2.6	Análisis combinado de escenarios de cambio climático.....	28
2.6.1	Escenarios de precipitación a 2050	28
2.6.2	Escenarios de temperatura media 2050	29
2.6.3	Escenarios para temperatura máxima y mínima.....	31
2.7	Evaluación de los modelos de circulación general en la región de estudio	33
2.8	Escenarios de cambio climático par la zona de estudio a 2050.....	35
3	CONCLUSIONES	37
3.2	Escenarios de cambio climático regionales.....	37
3.2.1	Temperatura media	37
3.2.2	Precipitación.	38



3.2.3	Glaciar reducido	38
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
	REFERENCIAS Web.....	40
	ANEXOS.....	41
	Variación de la precipitación mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario A2 del GCM CNRM CM 3.1	42
	Variación de la precipitación mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario B1 del GCM CNRM CM 3.1	44
	A-02 Mapas de temperatura media mensual (1951-2002) y cambio de la temperatura media mensual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1	45
	Temperatura media mensual 1951-2002	45
	Cambio de la Temperatura media mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario A1B del GCM CNRM CM 3.1	47
	A-03 Mapas de variación de precipitación mensual para el periodo 2001-2030 del modelo ECHAM 4 para el escenario A2.....	49
	A-04 Mapas de variación de temperaturas media mensual para el periodo 2001-2030 del modelo ECHAM 4 para el escenario A2.....	50



Índice de Tablas

Tabla 1: Enfoques o Supuestos del futuro para los escenarios de cambio climático del IPCC	8
Tabla 1: Enfoques o Supuestos del futuro para los escenarios de cambio climático del IPCC (Continuación)	9
Tabla 2: Resumen de los perfiles demográficos, sociales, económicos y tecnológicos de los escenarios de cambio climático del IPCC.....	10
Tabla 3: Información utilizada: Campos atmosféricos del Centro Europeo de predicción del clima (ECMWF ERA-40 reanálisis) y los campos simulados por 14 GCMs-AO del IPCC (AR4/CMIP3).....	13
Tabla 4: Variación de precipitación mensual y anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16.66 km)	21
Tabla 5: Variación de precipitación mensual y anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km).....	21
Tabla 6: Variación de temperatura media mensual y anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16.66 km).....	25
Tabla 7: Variación de temperatura media mensual y anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km)	25
Tabla 8: Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura media para la zona de estudio en base a las salidas de los GCM's CNRM.....	35
Tabla 9: Variación mensual y anual de la precipitación [%/año] para (2040-2060) respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático	36
Tabla 10: Variación mensual y anual de la temperatura media [°C/año] para (2040-2060) respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático.....	36
Tabla 11: Variación mensual y anual de la precipitación [%] para 2050 respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático	36
Tabla 12: Variación mensual y anual de la temperatura media [°C] para 2050 respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático	36



Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de relieve e hidrográfico de la región.....	2
Figura 2: Modelos de circulación general acoplados atmósfera-océano (GCM-AO)	5
Figura 3: Temperaturas superficiales medias globales observadas y simuladas.....	7
Figura 4: Esquema de Escenarios SRES.....	8
Figura 5: Calentamiento global de la superficie y proyecciones para el siglo XXI.....	10
Figura 6: Esquema de la interacción entre elementos de la dinámica ó circulación atmosférica a 850 hPa en América del Sur.....	12
Figura 7: Mapas de precipitación anual (1951-2002) y variación de la precipitación anual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5º ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1	17
Figura 8: Mapas de temperatura media anual (1951-2002) y cambio de la temperatura media anual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5º ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1	18
Figura 9: Mapas de variación de temperatura media anual (izq.), variación de precipitación media anual (cent.) y número de meses con incremento de lluvias (der.) para los periodos 2001-2030 (arriba) y 2070-2100 (abajo).....	19
Figura 10: Salida de los modelos GCMs sobre la región de estudio, para resolución de 10 minutos (a) y 0.5 grados (b).....	20
Figura 11: Variación de precipitación mensual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16.66 km).....	22
Figura 12: Variación de precipitación mensual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5º ó 50 km)	22
Figura 13: Variación de precipitación anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16.66 km).....	23
Figura 14: Variación de precipitación anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5º ó 50 km)	23
Figura 15: Variación de temperatura media mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16.66 km).....	26
Figura 16: Variación de temperatura media mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5º ó 50 km)	26
Figura 17: Variación de temperatura media anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16.66 km).....	27



Figura 18: Variación de temperatura media anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km)	27
Figura 19: Variación de precipitación mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte	28
Figura 20: Variación de precipitación anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte	29
Figura 21: Variación de temperatura media mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte	30
Figura 22: Variación de temperatura media anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte	30
Figura 23: Tendencias de temperatura máxima, media y mínima anual [°C] en la estación de El Alto (AASANA)	32
Figura 24: Tendencias de temperatura máxima, media y mínima anual [°C] en la estación de La Paz (Central)	32



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El cambio climático se entiende como las alteraciones y/o anomalías graduales en el ciclo hidrológico global, percibidas esencialmente en las temperaturas y precipitaciones, con consecuencias como sequía prolongada, inundaciones, temperaturas extremas en invierno y verano. Sin embargo cabe diferenciar el cambio climático de la variabilidad climática, que depende de las condiciones atmosféricas extremas que exceden con mucho a lo normal. Los fenómenos que producen esos contrastes son frentes fríos muy organizados, células estacionarias secas, perturbaciones tropicales y células con una humedad desproporcionada.

La mayoría de los sistemas de recursos hidráulicos han sido diseñados y están en operación basados en el supuesto de un clima y una hidrología estacionaria. Si esta suposición de estacionalidad no es válida, los sistemas actuales pueden ser deficientes.

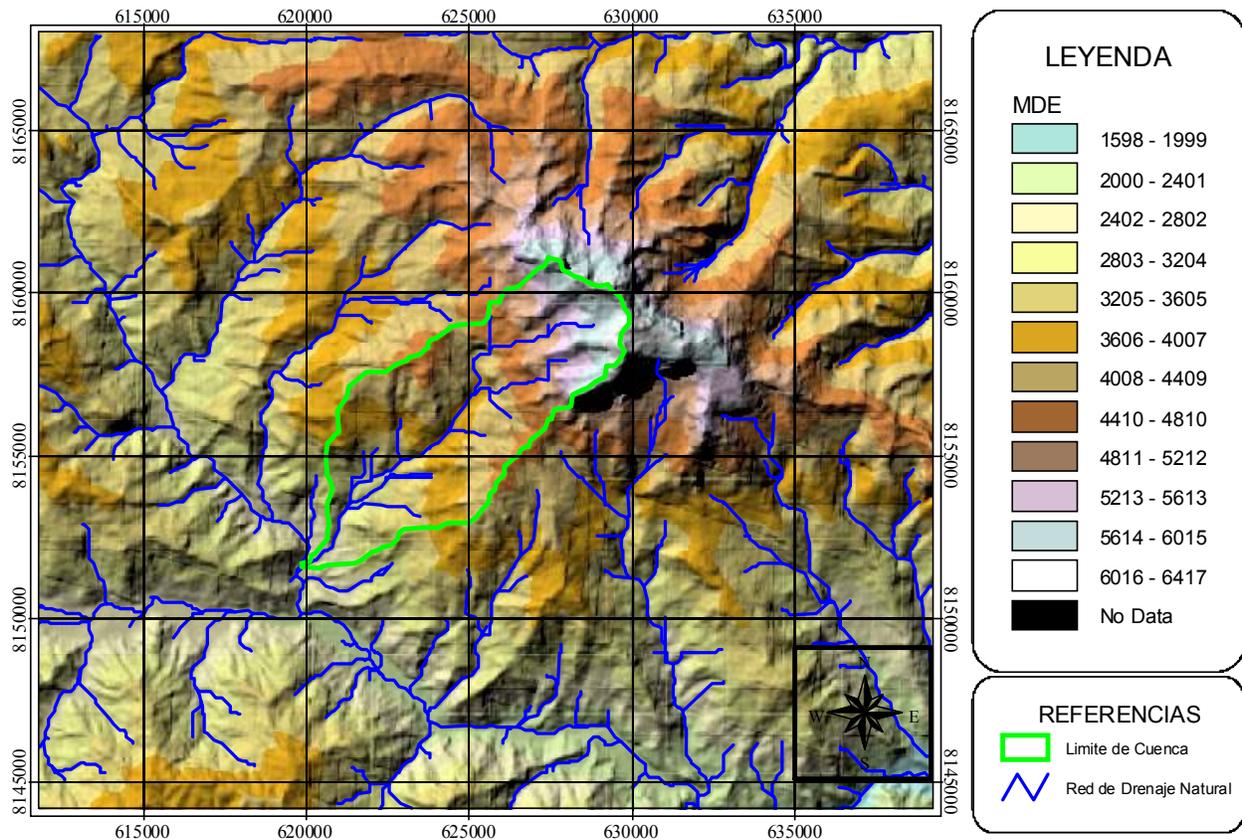
En el último decenio se han desarrollado varias investigaciones sobre el tema de climatología y cambios climáticos en la región de Sudamérica y Bolivia, por instituciones como el PNUMA (programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente), ONGs, Universidades y programas de doctorados. Algunos de estos estudios han sido publicados como artículos científicos ó como informes de alguna investigación científica en particular.

Para el capítulo de escenarios de cambio climático del presente estudio se han revisado algunas publicaciones, como la de “Patrones de circulación a gran escala y su relación con las lluvias en la cuenca del Amazonas: aproximación por método de redes neuronales” (*Espinoza J.C. et al, 2010*) que se describen en el capítulo 2 correspondiente. Además se revisó y se tomó algunos resultados del estudio “Implementación y validación de un modelo climático regional para Bolivia” (*Seiler C., 2009*).

1.2 Área de Estudio

Se estableció como área de estudio la región del Nevado Illimani, ubicado en el departamento de La Paz, específicamente en las provincias de Murillo y Sud Yungas. La zona de estudio comprende la montaña Illimani con pico máximo de 6400 m.s.n.m. aproximadamente y los valles sobre la cordillera Real de La Paz sobre los 2300 m.s.n.m. La región de estudio forma parte de la cuenca del río La Paz, esta de la cuenca del río Boopi, esta de la cuenca del río Alto Beni, y esta de la Cenca del río Beni.

La figura 1 muestra el mapa de relieve elaborado con el modelo digital de elevación, en el cual se observa las variaciones altitudinales y el contexto orográfico de la región que se consideran para el desarrollo del presente estudio. A este mapa se ha sobrepuesto la red hidrográfica y el límite de cuenca a estudiar.



(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19 Sur)

Figura 1: Mapa de relieve e hidrográfico de la región
(Fuente: Elaboración propia)

1.3 Objetivos

El objetivo general es realizar un análisis y evaluar los posibles escenarios futuros de cambio climático respecto al comportamiento y evolución temporal a nivel mensual de variables climáticas como la precipitación y temperatura en la región del nevado Illimani, en base a salidas de modelos de circulación general.

1.4 Alcance

El estudio de cambio climático comprende las siguientes actividades

Análisis de escenarios de cambio climático. Se evalúa localmente las salidas de modelos de clima global o modelos de circulación general disponibles para la región del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), con downscaling estadístico. Se realiza un análisis comparativo entre las salidas de los GCM's con Downscaling estadístico y proyecciones obtenidas a partir del análisis de tendencias regional. Con ello se dan recomendaciones sobre cual de la(s) salida(s) a usar para el presente estudio (escenarios de cambio climático para la



región). Se generan series sintéticas de precipitación, temperaturas medias, máximas y mínimas para escenarios de cambio climático en base a las series históricas y a los gradientes o variaciones esperados según salidas de los modelos de circulación general.

1.5 Metodología

Para desarrollar el presente estudio se siguieron los siguientes pasos.

- Recopilación de información: salidas de variación o gradientes esperados en temperatura y precipitación de modelos de circulación general del IPCC con downscaling estadístico, para diferentes escenarios de cambio climático.
- Creación y armado de la base de datos climáticos en Sistema de Información Geográfica, en el que se manejan, manipulan, procesan, observan, comparan, analizan espacialmente y gráficamente los datos mensuales y anuales de datos generados por los GCM's con downscaling estadístico.
- Revisión y extracción de las proyecciones de las tendencias regionales del informe "Análisis de tendencias climáticas en la región de la cuenca del río Sajhuaya" Proyecto Illimani.
- Evaluación local de escenarios climáticos de las salidas de los modelos de circulación general del IPCC con downscaling estadístico respecto a las variación en precipitaciones y temperaturas en la zona de estudio.
- Análisis combinado de proyección de tendencias regionales en estaciones y salidas de los GCM's a nivel mensual.
- Definición de escenarios de cambio climático para variación de temperatura y precipitación al año 2050 en base a las salidas de los GCM's con downscaling estadístico.
- Generación de series sintéticas de precipitación, temperatura media, máxima y mínima para escenarios de cambio climático definidos en base a series históricas del estudio de "Oferta de agua histórica en la cuenca del Río Sajhuaya"



2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

2.1 Modelos climáticos globales (modelos de circulación general del IPCC “GCM”)

*Fuente: Climatic Research Unit (CRU)
website: <http://www.cru.uea.ac.uk/>*

Los modelos climáticos usan métodos cuantitativos para simular las interacciones de la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, y el hielo. Se utilizan para variedad de propósitos que implican el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático global y proyecciones futuras del clima. Todos los modelos climáticos realizan un balance, la energía entrante en forma de radiación electromagnética de onda corta (visible y ultravioleta) a la tierra, con la energía de salida como (infrarrojo) de onda larga de radiación electromagnética de la tierra. Cualquier desequilibrio produce un cambio en la temperatura media de la tierra.

Ha habido grandes avances en el desarrollo y uso de modelos en los últimos 20 años y los modelos actuales dan una guía confiable para el futuro sobre el cambio climático. Los modelos computacionales no pueden predecir el futuro con exactitud, debido a la gran cantidad de incertidumbres respecto a la dinámica de la atmósfera y los fenómenos climáticos. Los modelos se basan principalmente en leyes de la física, pero además utilizan técnicas empíricas, por ejemplo, los estudios detallados de los procesos involucrados en la formación de nubes. Los modelos de computadora más sofisticados simulan el sistema climático completo, que implica la vinculación de la atmósfera y el océano, e incluyen la interacción entre diversos elementos, tales como el hielo y la tierra (CRU).

Los modelos climáticos han sido utilizados con éxito para reproducir las características principales del clima, los cambios de temperatura en los últimos cien años, y las principales características del Holoceno (hace 6.000 años) y el Último Máximo Glacial (21.000) años. Los modelos actuales nos permiten atribuir las causas del cambio climático del pasado, y predecir las características principales del clima futuro, con un cierto grado de confianza (CRU).

El tema más comentado sobre los modelos en los últimos años han sido las temperaturas relacionadas a las emisiones de dióxido de carbono “CO₂” (y otros gases de efecto invernadero). Las proyecciones futuras de los modelos presentan una tendencia incremental en el registro de temperatura de la superficie, así como un aumento más rápido de la temperatura a mayor altitud (CRU).

Los modelos climáticos son sistemas de ecuaciones diferenciales basados en las leyes básicas de la física, en el movimiento de fluidos, y en la química. Para “correr” un modelo, los científicos dividen el planeta en una cuadrícula de 3 dimensiones, se aplican las ecuaciones básicas, y se evalúan los resultados. Los modelos atmosféricos calculan los vientos, transferencia de calor, radiación, humedad relativa, y la meteorología de superficie dentro de cada cuadrícula y evalúan las interacciones con los puntos vecinos.

Los GCM-AO combinan dos modelos de circulación general, el atmosférico y el oceánico. De este modo, tienen la ventaja de eliminar la necesidad de especificar los flujos a través de la interfaz de la superficie del océano. Estos modelos son la base de las predicciones del modelo sofisticado del clima futuro, como los discutidos por el IPCC¹. Los GCM-AO representan la complejidad de los modelos climáticos y asimilan tantos procesos como sean posibles. Los modelos son las únicas herramientas que pueden proporcionar información regional detallada sobre predicciones a futuro del cambio climático; sin embargo, estos están todavía en desarrollo. Los modelos más simples son generalmente susceptibles a un análisis simple y un fácil entendimiento de resultados. Por el contrario los GCM-AO son a menudo tan difícil de analizar como el sistema climático (*Randall, 2007*).

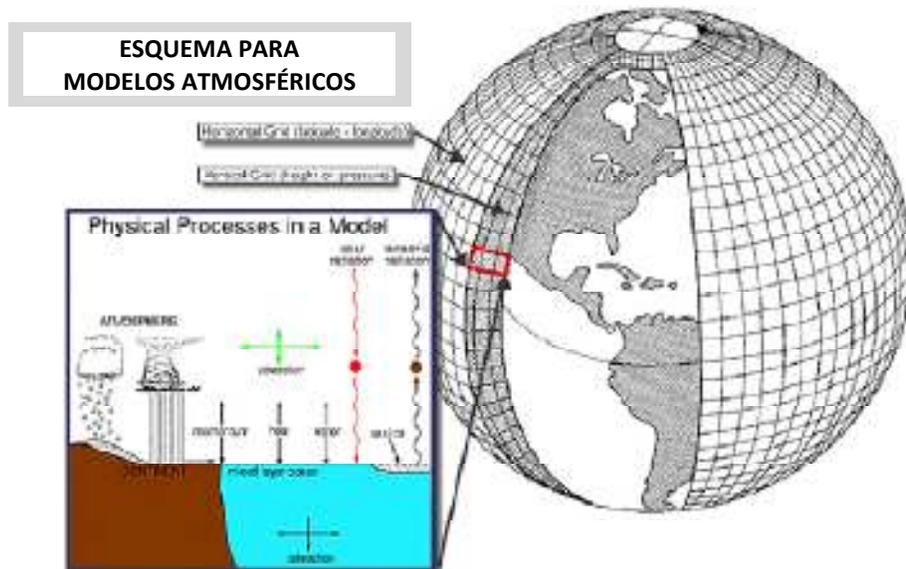


Figura 2: Modelos de circulación general acoplados atmósfera-océano (GCM-AO)

Los GCM-AO pueden simular temperaturas extremadamente cálidas, los brotes de aire frío y días con heladas razonablemente bien. Los modelos utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación (*AR4, 2007*) para la proyección de cambios en los ciclones tropicales, son capaces de simular la frecuencia actual y la distribución de los ciclones, pero la intensidad no es simulada adecuadamente. La simulación de precipitaciones extremas depende de la resolución, la parametrización, y del lugar elegido. En general, los modelos tienden a producir demasiados días con precipitaciones débiles (<10 mm día⁻¹) y muy poca precipitación en general en eventos intensos (> 10 mm día⁻¹) (*Randall, 2007*).

Los patrones de tiempo a gran escala de las variaciones estacionales en varios campos atmosféricos importantes son mejor simulados por los GCM-AO de lo que eran en el momento del Tercer Informe de Evaluación (*TAR 2001*). En particular, los errores en la simulación de la

¹ IPCC: La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988. Se trata de un grupo abierto a todos los Miembros de las Naciones Unidas y de la OMM.



media mensual, de distribución global de las precipitaciones, de la presión del nivel del mar y de la temperatura superficial del aire han disminuido. En algunos modelos, la simulación de las nubes de bajo nivel sobre el océano, que son importantes para la correcta simulación de la temperatura superficial del mar y el comportamiento de nube en un clima cambiante, también han mejorado. No obstante, sigue habiendo importantes deficiencias en la simulación de nubes y precipitación tropical (importantes para las repercusiones regionales y globales) (*Randall, 2007*).

Desde el TAR, los avances en la formulación de GCM-AO han mejorado la representación de la variabilidad a gran escala sobre una amplia gama de escalas de tiempo. Los modelos reproducen los patrones atmosféricos dominantes de la variabilidad extra-tropical incluyendo los modos anulares del norte y el sur, la Oscilación Decenal del Pacífico, el del Pacífico Norte de América y los patrones de océano frío – tierra caliente. Los GCMs-AO simulan la variabilidad multi-decadal del Atlántico, aunque el rol relativo de los procesos de baja y alta latitud difieren entre los modelos. Para los trópicos, existe una mejora general en la simulación del patrón espacial y la frecuencia del ENSO², pero sigue habiendo problemas en la simulación de la fase de cierre de temporada y la asimetría entre El Niño y La Niña (*Randall, 2007*).

Confiabilidad de los GCM's para proyecciones a futuro del cambio climático

Hay confianza en que los modelos climáticos proporcionan estimaciones cuantitativas posibles del cambio climático a futuro, sobre todo a escala continental y superiores. La confiabilidad en los modelos se fundamenta por los principios físicos considerados y de su capacidad de reproducir las características observadas del clima actual y los cambios climáticos pasados. La confiabilidad de las estimaciones de modelos es mayor sobre algunas variables climáticas (por ejemplo, temperatura) que para otros (por ejemplo, precipitación). Durante varias décadas de desarrollo, los modelos han proporcionado respuestas robustas y sin ambigüedades significativas del calentamiento climático, debido al aumento de gases de efecto invernadero (*Randall, 2007*).

La figura 3 muestra los valores medios globales de temperaturas cercanas a la superficie durante el siglo XX a partir de observaciones (negro) y las obtenidas de 58 simulaciones de 14 modelos climáticos diferentes, inducida por factores naturales y antrópicos que influyen en el clima (amarillo). La media de todas estas corridas de GCMs también se muestra (línea roja gruesa). Se muestran anomalías en temperatura respecto a la media desde 1901 hasta 1950. Las líneas verticales grises indican las fechas de grandes erupciones volcánicas.

² "El Niño", Oscilación del Sur, variabilidad observada en el Índice de Oscilación Austral, implica la alteración ó anomalías físicas en el océano pacífico tropical que afecta a los estados de la atmósfera. Se caracteriza por un aumento generalizado de la temperatura del mar desde el centro del océano hasta las costas occidentales de Sudamérica.

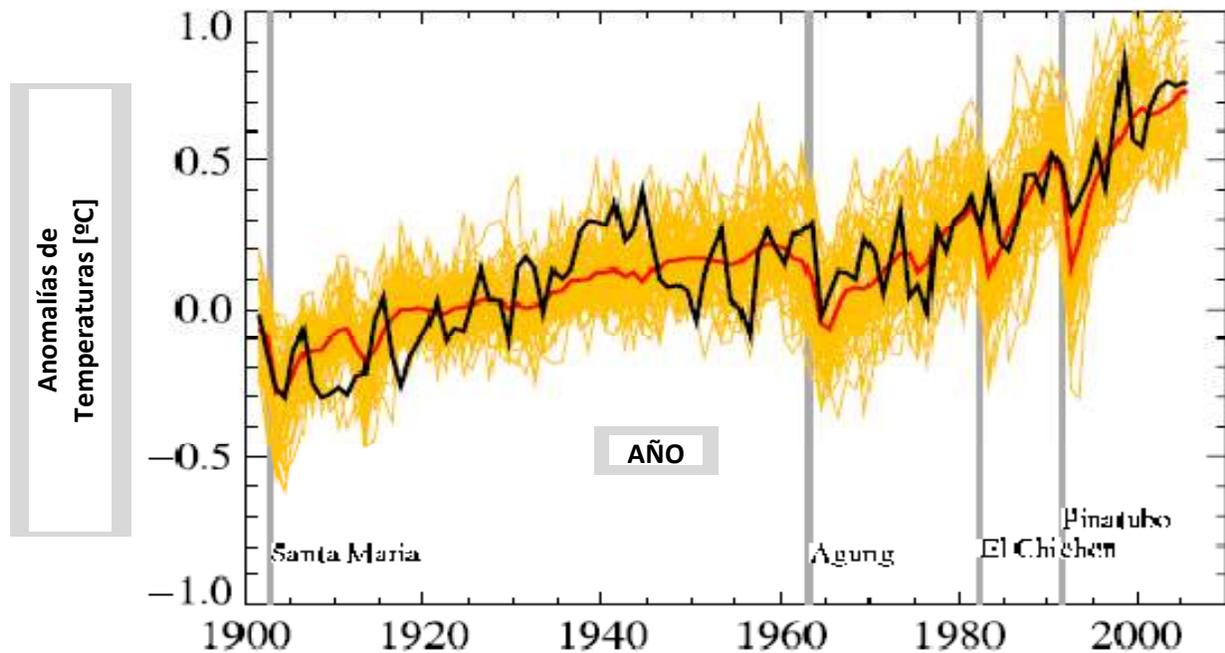
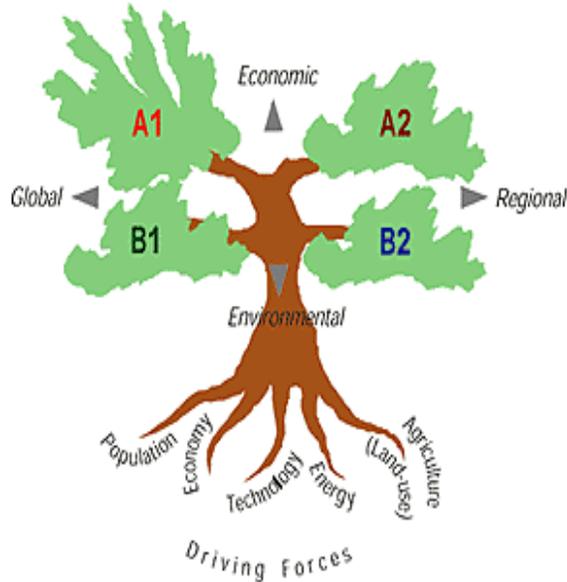


Figura 3: Temperaturas superficiales medias globales observadas y simuladas

2.2 Escenarios de Cambio Climático

Fuente: http://sres.ciesin.org/final_data.html
http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/091.htm
<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/091.htm>
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=81>

Los escenarios son representaciones o supuestos del futuro o futuros alternativos. No son ni predicciones ni pronósticos. Por el contrario, cada escenario es una representación alternativa de cómo el futuro podría desarrollarse. Un conjunto de escenarios ayudan a comprender la posible evolución futura de sistemas complejos. Algunos sistemas, los que se conocen bien y para los cuales se dispone de información completa, pueden ser modelados con cierta confiabilidad, como ocurre con frecuencia en las ciencias físicas, y su predicción de su estado futuro. Sin embargo, muchos sistemas físicos y sociales, son poco conocidos, y la información sobre las variables relevantes es incompleta, que sólo puede apreciarse a través de intuición y son mejor reveladas con referencias históricas y/o representaciones. (IPCC, 2007)



Las cuatro familias de escenarios de cambio climático se simplifican como las ramas de un árbol bidimensional. En realidad, las cuatro familias de escenarios comparten un espacio unidimensional de muchas más dimensiones, dadas las numerosas suposiciones necesarias para definir cualquier escenario para una modelación con un enfoque en particular. El diagrama esquemático ilustra que los escenarios se basan en los principales motores de las emisiones de gases de efecto invernadero. Cada familia de escenarios se basa en una particularidad de algunas de las principales fuerzas motrices (IPCC, 2007). Las tabla 16 y 17 resumen las características de cada escenario futuro.

Figura 4: Esquema de Escenarios SRES

Datos, nombre IPCC y periodos	Descripción
Clima del siglo XX (20C3M) 1870 – 1999	Las concentraciones de CO ₂ en la atmosfera y otros datos de entrada como los gases de efecto invernadero, se basan en registros históricos o estimaciones de inicio en la época de la Revolución Industrial, que implica el uso de tasas incrementales observadas en siglo XX.
Año 2000 máxima CO ₂ (Commit)	Las concentraciones de CO ₂ y gases de efecto invernadero en la atmosfera se mantienen fijos a niveles del año 2000. Este experimento se basa en las condiciones que ya existen (por ejemplo, "compromiso" el cambio climático).
550 ppm máxima CO ₂ (SRES B1) 2000 – 2100	<p>Las concentraciones de CO₂ en la atmosfera alcanzarán 550 ppm en el año 2100 en un mundo convergente caracterizado por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bajo crecimiento de población (9 mil millones en el 2050) • alto crecimiento del PIB • bajo consumo de energía • cambios grandes de uso de la tierra y suelo • baja disponibilidad de recursos • introducción media de tecnologías nuevas y eficientes. <p>El tema subyacente es el rápido cambio en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información, con reducciones en el consumo de materiales, y la introducción de tecnologías limpias y tecnologías eficientes en recursos. El énfasis está en soluciones globales a la sostenibilidad económica, social y ambiental, incluyendo una mayor equidad, pero sin iniciativas climáticas adicionales. (IPCC, 2007)</p>

Tabla 1: Enfoques o Supuestos del futuro para los escenarios de cambio climático del IPCC



Datos, nombre IPCC y periodos	Descripción
<p>720 ppm máxima CO₂</p> <p>(SRES A1B) “Equilibrado”</p> <p>A1FI – Énfasis en combustibles fósiles. A1B – Balance en todas las fuentes de energía. A1T – Énfasis en Fuentes de energía no fósiles.</p> <p>2000 – 2100</p>	<p>Las concentraciones de CO₂ en la atmosfera alcanzarán 720 ppm en el año 2100 en un mundo caracterizado por:</p> <ul style="list-style-type: none">• bajo crecimiento de población bajo (9 mil millones en el 2050)• muy alto crecimiento del PIB• muy alto consumo de energía• pocos cambios de uso de la tierra y suelo• disponibilidad media de recursos• rápida introducción de tecnologías nuevas y eficientes• <p>Las cuestiones importantes subyacentes son la convergencia entre regiones, la capacidad de construir e incrementar la interacción cultural y social, con una reducción sustancial de las diferencias regionales en el ingreso per cápita. La familia de escenarios A1 se desarrolla en cuatro grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema energético. En este mundo, la gente persigue la riqueza personal en vez de la calidad ambiental. (IPCC, 2007)</p> <p>“Equilibrio” se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía en particular, en el supuesto de que tasas similares en adelantos se aplican a todas las fuentes de energía y tecnologías de uso final.</p>
<p>850 ppm máxima CO₂</p> <p>(SRES A2)</p> <p>2000 – 2100</p>	<p>Las concentraciones de CO₂ en la atmosfera alcanzarán 850 ppm en el año 2100 en un mundo muy heterogéneo caracterizado por:</p> <ul style="list-style-type: none">• alto crecimiento de población• crecimiento medio del PIB• alto consumo de energía• medios /grandes cambios de uso del suelo y tierra• baja disponibilidad de recursos• lenta introducción de tecnologías nuevas y eficientes <p>El tema subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales y culturas, con énfasis en los valores familiares y las tradiciones locales. Patrones de fertilidad a través de las regiones convergen muy lentamente, lo que da lugar a un elevado crecimiento demográfico. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones y al crecimiento económico per cápita, menor preocupación en el crecimiento económico rápido. El cambio tecnológico está más fragmentados y es más lenta respecto a otras líneas evolutivas. (IPCC, 2007)</p>

Tabla 1: Enfoques o Supuestos del futuro para los escenarios de cambio climático del IPCC (Continuación)

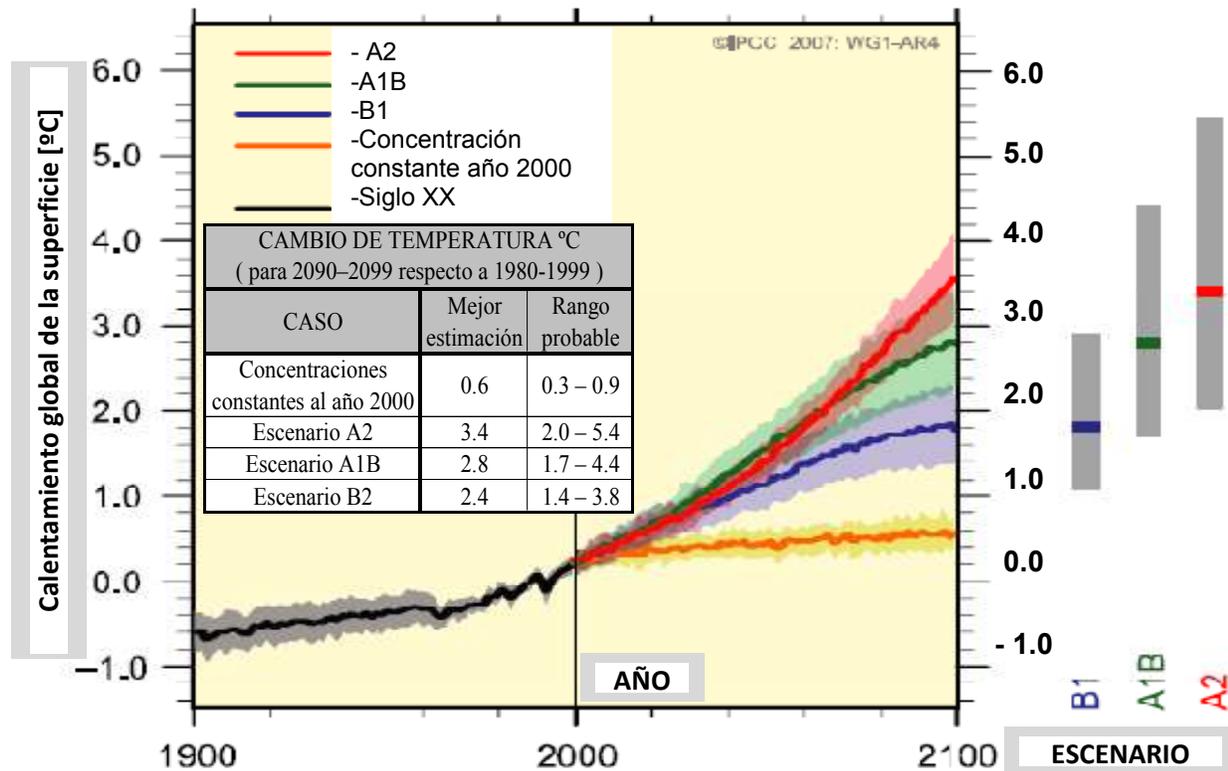


Figura 5: Calentamiento global de la superficie y proyecciones para el siglo XXI

Las líneas continuas son promedios globales del multi-modelo de calentamiento de la superficie respecto al periodo 1980-1999, y los promedios de las proyecciones de las simulaciones para los escenarios A2, A1B y B1 para el siglo XXI. El sombreado denota el rango de ± 1 de la desviación estándar de cada uno de los promedios anuales del modelo. La línea naranja es para el experimento donde las concentraciones se mantienen constantes respecto a valores del año 2000. Las barras grises de la derecha indican la mejor estimación (línea sólida en cada barra) y el rango de probabilidades asignadas para los seis escenarios de referencia del SRES. La evaluación de la mejor estimación y rangos probables en las barras grises incluye los GCMs-AO en la parte izquierda de la figura, así como los resultados de una jerarquía de modelos independientes y las limitaciones de observación. (IPCC, 2007)

Características del Escenario			
Perfil	SRES – A1B	SRES – A2	SRES – B1
Crecimiento poblacional	Bajo	Alto	Bajo
Crecimiento PIB	Muy Alto	Medio	Alto
Uso energético	Muy Alto	Alto	Bajo
Cambio uso del suelo	Bajo	Medio / Alto	Alto
Disponibilidad de recursos	Medio	Bajo	Bajo
Ritmo de cambios tecnológicos	Rápido	Lento	Medio

Tabla 2: Resumen de los perfiles demográficos, sociales, económicos y tecnológicos de los escenarios de cambio climático del IPCC



Las estimaciones del calentamiento son evaluadas a partir de una jerarquía de modelos que abarcan un modelo climático simple, varios modelos del Sistema Terrestre de complejidad intermedia y un gran número de GCMs-AO. La composición para el año 2000 es obtenida solo de los GCMs-AO.

2.3 Modelo de Clima para estudios de cambio climático en la región

Se ha tomado de referencia estudios y proyectos doctorales en climatología regional de sud América, específicamente para el proyecto HYBAM³ del IRD⁴. Específicamente existe un proyecto que implica el estudio de la climatología y la evaluación de los modelos de circulación general en la zona tropical de la cuenca del río Amazonas, con el fin de investigar posibles escenarios a futuro de cambio climático previstas por los GCM's del IPCC.

Uno de los alcances de este proyecto es el de identificar los GCM's que mejor representan la circulación o dinámica atmosférica en la región analizada (*ver figura 6*), estudiando los patrones de circulación (CPs)⁵ o tipos de tiempo simuladas por los GCM's y observadas, a escala espacial de Sud América y escala temporal de variabilidad climática estacional, intra-estacional y sinóptica (diaria).

A continuación describimos la definición de los elementos del sistema atmosférico regional de Sudamérica:

- Intertropical ConvergenceZone (ITCZ) por su nombre en inglés, es la zona donde convergen los vientos alisios de ambos hemisferios. También es conocida como Ecuador Meteorológico.
- South AtlanticConvergenceZone (SACZ) por su nombre en inglés, es la zona donde convergen la humedad y precipitación en la zona del atlántico sur al este del continente Sudamericano. Está relacionada con las lluvias intensas en el Amazonas durante el verano y principios de otoño.

³HYBAM: ProcessusHydrologiques des BassinsAndinsAmazoniens, programa de investigación francés, que tiene como líneas de investigación hidrología, recursos hídricos, la modelación hidrológica, el cambio climático, en los Andes y en la Cuenca Amazónica.

⁴IRD: Institut de recherchepour le développement (Instituto de investigación para el desarrollo de Francia)

⁵CPs: "Patrones de Circulación" La hipótesis es que ciertos estados de la circulación atmosférica comúnmente definidos con variables climáticas (vientos, presiones, etc.) son considerados como más persistentes que otros, ellos ocurren con mayor frecuencia y/o persistencia(*e.g., Michelangeli et al. 1995*). Estos estados son comunmente definidos sobre variables como: la presión a nivel del mar, la altura de geopotencial, los vientos, etc. (*e.gMoron et al., 2008; Bettoli et al., 2009; Rust et al., 2009; Espinoza et al.; 2010a*). Entonces días con semejantes condiciones de circulación son asignados a un CP característico. Un CP puede ser visto como un grupo de días que presentan semejante circulación atmosférica. Un número reducido de estos estados atmosféricos pueden ser considerados como patrones de circulación, regímenes de circulación o tipos de tiempo. Los CPs son relevantes para una discreta descripción del complejo sistema atmosférico.

- Monzón sudamericano. Viento de carácter periódico que suele aparecer en el Océano. Se denomina así la estación de grandes lluvias que acompaña este tipo de viento (periodos regulares de mal tiempo).
- Vientos Alisios. Son los vientos que soplan regularmente en los océanos Pacífico y Atlántico de las zonas tropicales hacia el ecuador. En condiciones normales, la presión atmosférica reinante en el ecuador es inferior a la de los trópicos. El aire tiende, entonces, a circular en la dirección norte-sur (en el hemisferio norte) y sur-norte (en el hemisferio sur). Pero al combinarse con la rotación de la Tierra, la dirección real en que soplan es noreste a suroeste en el hemisferio norte, y de sureste a noroeste en el hemisferio sur. Su velocidad es de unos 20 kilómetros por hora.
- Cordillera de los Andes. Sistema montañoso comprendido entre los 11° y 56 de latitud sur, que bordea el la costa del pacífico a lo largo de 7.500 km, con alturas media de 4.000 metros y picos que alcanzan los 6.000 metros o más. El efecto en la dinámica atmosférica y en el clima es relevante en cuanto influye como obstáculo a la circulación de vientos, ascensos, descensos, cambios de dirección, etc.

durante Enero durante Julio

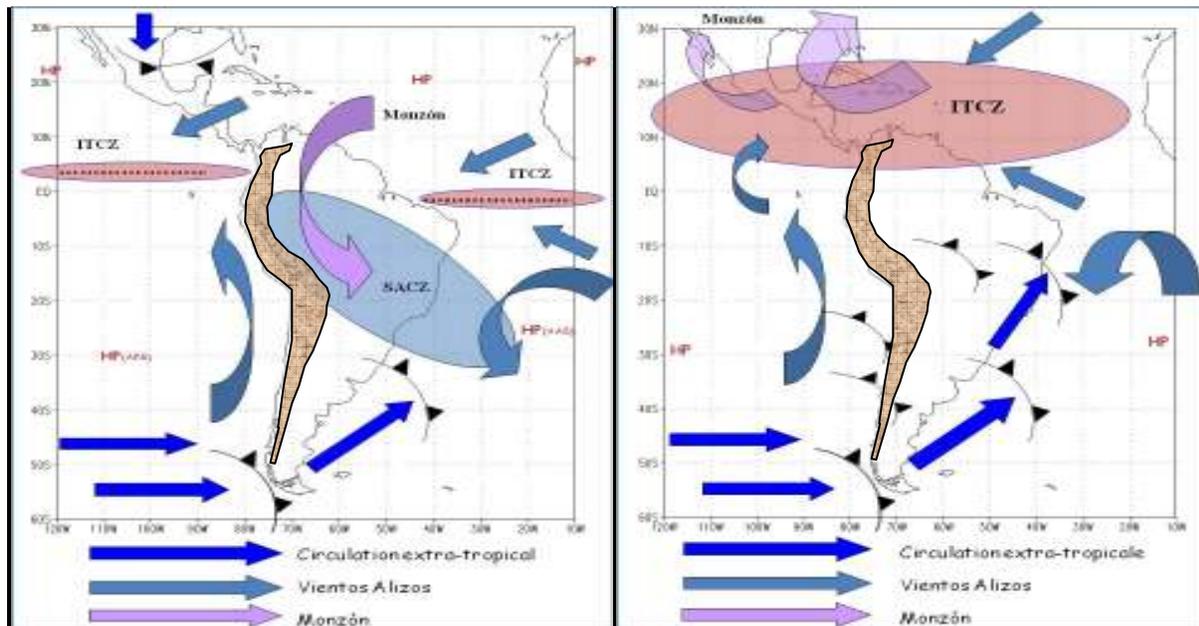


Figura 6: Esquema de la interacción entre elementos de la dinámica ó circulación atmosférica a 850 hPa en América del Sur

(Fuente: Espinoza, 2010)



El estudio de evaluación de patrones de circulación en la cuenca amazónica se basa en un método de redes neuronales, conocido como "cartas auto organizadas" (SOM o cartas de Kohonen) fue utilizado para identificar por primera vez en América del Sur tropical, los tipos de tiempo (TT) óCPs y las características de circulación atmosférica a gran escala (*Espinoza, 2009*). Este trabajo muestra que el paso de perturbaciones tropicales a la penetración adicional a bajas latitudes se ve favorecida por los Andes, ésta genera anomalías del viento meridional y geopotencial, las principales causas de la introducción de los CPs en la cuenca del Amazonas. Por otra parte, se han identificado las relaciones entre el CPs y las precipitaciones extremas.

En este estudio, según la definición del CPs, se pudo evaluar y comparar los patrones de la variabilidad en el reanálisis atmosférico y simulaciones de 14 modelos de circulación general acoplados atmósfera y océano (GCM-AO) del IPCC (*IPCC-AR4/CMIP3*)(ver *tabla 3*). Varias pruebas estadísticas se utilizaron para identificar los modelos que mejor reproducen la circulación atmosférica observada. Se identificaron sesgos sistemáticos en la mayoría de los modelos. El sesgo principal está relacionado con las trayectorias inadecuadas de los vientos de bajo nivel que cruzan los Andes en lugar de ser desviados por el obstáculo que genera la cordillera. Además, fue analizada la relación entre los CPs y las lluvias observadas y simuladas.

Reanalysis	ID	Institution
ERA40	ERA-40	ECMWF-EU
IPCC Model		
cccma_cgcm3_1	cccma1	CCCMA Canada
cnrm_cm3	cnrm	Meteo-France, Toulouse
csiro_mk3_0	csiro0	CSIRO Australia
csiro_mk3_5	csiro5	CSIRO Australia
gfdl_cm2_0	gfdl0	NOAA-USA
gfdl_cm2_1	gfdl1	NOAA-USA
inmcm3_0	inmcm30	INMCM - Russia
ingv_echam4	ingv	INGV - Italy
ipsl_cm4	ipsl4	IPSL-France
miroc3_2_hires	miroc32h	CCSR/NIES/FRCGC Japan
miroc3_2_medres	miroc32m	CCSR/NIES/FRCGC Japan
miub_echo_g	miub	MIUB-Germany
mpi_echam5	mpie5	MPI-Germany
mri_cgcm2_3_2a	mri232a	MRI Japan

Tabla 3: Información utilizada: Campos atmosféricos del Centro Europeo de predicción del clima (ECMWF ERA-40 reanálisis) y los campos simulados por 14 GCMs-AO del IPCC (AR4/CMIP3)
(Fuente: *Espinoza, 2010*)

Los resultados de este trabajo ayudaron a seleccionar los modelos adecuados para predecir cambios climáticos en la región tropical y sus impactos e influencia en la meteorología e hidrología.

Por último, los modelos GCMs validados que reproducen razonablemente los CPs en América del Sur son (*Espinoza et al, en preparación*):



- *INGV ECHAM4 (Modelo Italo-Alemán)*
- *CNRM CM3.0 (Modelo Francés)*
- *MIROC 3.2 de alta resolución (Modelo Japonés)*

2.4 Información climática utilizada

Los GCMs tienen un formato de salida estándar para las variables, campos o capas para cada elemento simulado del sistema de circulación o climático global, este formato es el Net CDF⁶. Las salidas de modelos están disponibles en la página web del IPCC. La mayoría del software que maneja estos datos tiene aplicaciones sobre sistemas operativos diferentes al Windows (Solaris, AIX, IRIX, Linux, OS X del Mac, Unix Tru64, etc.). Para el alcance del presente estudio se ha buscado salidas de precipitación y temperaturas en la región en formatos espaciales más manejables como el formato ASCII que es fácilmente exportable a archivos GRID para SIGs⁷. La información utilizada en el presente estudio se describe a continuación.

2.4.1 Datos climáticos con resolución de 10 minutos (16.66 km)

Datos CMIP3 de multi-modelo para proyecciones futuras del clima del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP'sWorldClimateResearchProgrammes), específicamente los datos climáticos del siglo XX fueron tratados estadísticamente con **CRU CL 2.0** para reducir la escala (downscaling estadístico)⁸. Los datos CMIP3 multi-modelos también fueron utilizados por el IPCC (Intergovernmental Panel of ClimateChange) para el 4º informe de evaluación. Están

⁶ El **NetCDF** (Network Common Data Format) es un formato abstracto para matrices multidimensionales diseñado en el UnidataProgram Center en Boulder, Colorado. La característica de este formato que contiene la suficiente información para poder saber qué clase de data se encuentra en el archivo (tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creo, etc.) a diferencia de otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación. Este formato permite la representación de datos escalares, vectoriales y la representación de mallas irregulares, sin embargo solo los datos escalares, sobre mallados regulares, son importados de forma directa.

⁷ SIGs: Sistemas de Información geográfica

⁸ **Downscaling estadístico.** Los GCMs de simulación de clima global presentan en general resolución entre 1° y 2.5°, que implica problemas para identificar impactos locales a escala de cuenca hidrográfica mediante los GCM. Estos problemas pueden ser determinados y evaluados a escalas menores mediante técnicas estadísticas (Downscaling estadístico, aplicando técnicas estadísticas) o basadas igualmente en la física de la atmósfera (Downscaling dinámico, aplicando modelos regionales de circulación RCMs).

El downscaling estadístico consiste en la búsqueda de relaciones o de una función de transferencia estadística, que es la relación entre los CPs y variables locales simuladas a gran escala que los GCMs tienen más problemas en reproducir (como las llluvias) o entre variables locales observadas (como las provenientes del reanálisis).

Los GCMs todavía no pueden representar ciertos procesos de forma adecuada debido a la complejidad del sistema climático. Uno de los factores está relacionado a la resolución espacial de los GCMs y otro a la complejidad de ciertos procesos físicos, 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 que representen los procesos complejos o no resueltos a gran escala y relacionarlos con datos observados. La parametrización reemplaza procesos físicos por representaciones sencillas. Por esto las parametrizaciones son típicamente las fuentes más importantes de error.



disponible los datos para los modelos modelo INGV ECHAM4, CNRM y MIROC de mediana resolución.

Se descargaron datos futuros de clima actuales y proyecciones para diferentes escenarios de emisiones (A1B, A2 o B1, que son los más estudiados dentro de toda la familia de escenarios), las variables descargadas son precipitación y temperaturas para los periodos 1975 (media 1961-1990), 2050 (media 2041-2060) y 2090 (media 2081-2100).

Los datos de menor escala están disponibles en la web (<http://ccr.aos.wisc.edu/model/ipcc10min/futclimateinfo.html>), son productos con el apoyo de la Universidad de Wisconsin de Estados Unidos de Norte América, Departamento de Geografía, Nelson Institute's Land Tenure Center, y Conservación Internacional.

REDUCCIÓN DE ESCALA DE DATOS. Una descripción completa de los datos y los métodos se publicó en marzo de 2010. El artículo completo está disponible en (<http://ccr.aos.wisc.edu/publications/pdfs/globaldownscale.pdf>): reducción de escala global de proyecciones climáticas para evaluar los impactos del cambio climático.

FORMATO DE DATOS. Los datos son globales, y la reducción de escala para las simulaciones de clima para el siglo XX y XXI fueron obtenidos de los archivos CMIP3 multi-modelo. Se modificaron las simulaciones del siglo XXI respecto a sus diferencias de medias de las observaciones del siglo XX. Estas diferencias o "anomalías" son reducidas a resolución de 10 minutos con una interpolación spline y luego agregados cada 10 minutos, la climatología media del siglo XX utilizada es del CRU CL2.0. El rango de datos va desde -180 hasta 180 de longitud y -90 a 90 de latitud. La proyección es geográfica con el datum WGS84. Los datos vienen para los doce meses en archivos ArcASCII, comprimidos en archivos zip.

DENOMINACIÓN DE ARCHIVOS. Cada archivo ASCII tiene una convención de nombres asociados a las propiedades de datos. La convención de nombres es la siguiente: vyyYYmmss (s) MMM, donde:

- v es bien (p) para la precipitación o (t) para la temperatura.
- yyYY son los dos dígitos del año para el inicio del período de clima medio, seguido de los dos dígitos del año para el final del período de clima medio. Periodos de validación son "6190" para el siglo XX, que implica 1961-1990, "4160" para proyecciones, implica 2041-2060 y "8100" proyectada implica 2081-2100.
- mm son los dos dígitos correspondientes al mes en cuestión
- ss (s) son los dos o tres caracteres, correspondientes a los escenarios de emisiones, es decir, códigos, A1B, B1 o A2
- MMM son los tres caracteres correspondientes al código del modelo del IPCC

Unidades temp = temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C} * 10$)
prec = precipitación media mensual (mm)



2.4.2 Datos climáticos con resolución de 0.50 grados (50 km)

Los datos climáticos globales históricos y de Modelos de Circulación General fueron tomados directamente de la reducción estadística (downscalingstatistical) **WCRP CMIP3** de proyecciones climáticas de la Universidad de Santa Clara, que fueron presentados en el 4º Informe de Evaluación del IPCC. Solamente están disponibles los datos del modelo francés CNRM CM3.1 (http://www.engr.scu.edu/~emaurer/global_data/)

DESCRIPCIÓN DE DATOS. Reducción de escala a 50 km de los datos climáticos históricos y proyecciones a futuro, sobre todo el globo. Las proyecciones originales del Programa de investigación de clima mundial (WorldClimateResearchProgramme's, WCRP's) de la fase tres de la comparación de modelos acoplados (CoupledModelIntercomparison Project phase 3 CMIP3) datos multi-modelo, están referenciados en el cuarto reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático Cuarto Informe de Evaluación. Los datos fueron obtenidos con el método bias de reducción de escala con corrección espacial.

DETALLE DE LA INFORMACIÓN

Resolución: 50 kilómetros (0.5º) (proyección Geográfica, WGS84)

Extensión espacial y formato: Mundial en formato ASCII

Variables climáticas: precipitación y temperatura promedio

Alcance temporal: 1950 - 2099 de series temporales mensuales simulados

(http://www.engr.scu.edu/~emaurer/global_data/)

1901 – 2002 de series temporales mensuales simulados

Series temporales de la Unidad de investigaciones del Clima ver 2.10

(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrq/>)

PROPÓSITO. Los archivos fueron desarrollados para proporcionar información para el análisis de planificación para proyecciones del clima a una resolución espacial más fina "reducción de escala". Dicha información permite desarrollar soporte técnico como apoyo a la toma de decisiones y a las estrategias de adaptación regional y local a los cambios climáticos. Varios tipos de análisis sustentan esta información, ejemplo:

- Evaluación a nivel regional distribuido de frecuencia de proyecciones.
- Evaluación local específica de frecuencia de proyecciones.
- Evaluación de impactos del cambio climático para los sistemas sociales y naturales.
- Exploración de la planificación basada en riesgos y las respuestas políticas.

Los mapas de precipitación mensual (1951-2002) y variación de la precipitación mensual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5º ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1 se los adjunta en anexo A-01.

1951-2002
HISTORICO

2040-2069
A 1 B

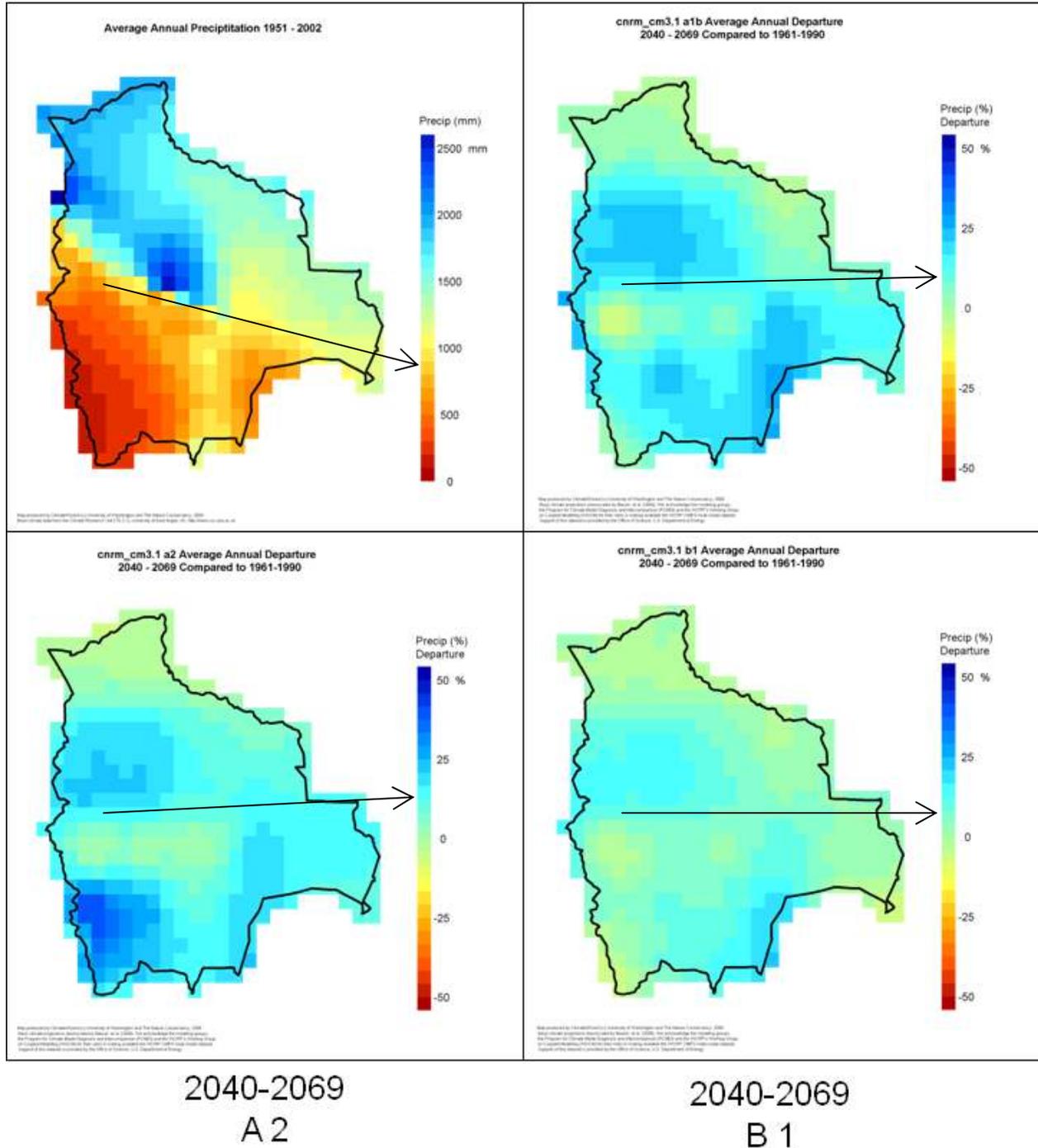
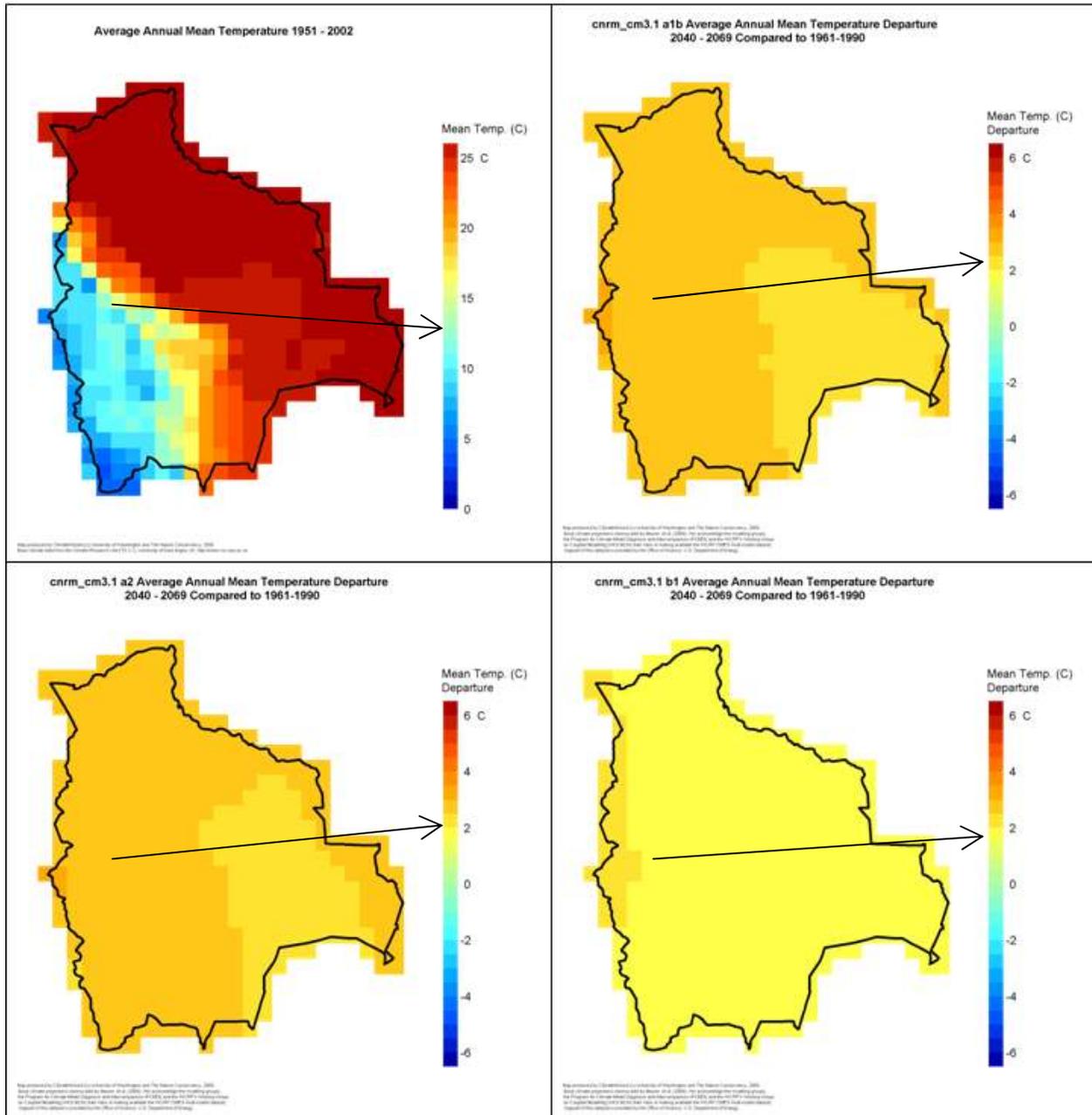


Figura 7: Mapas de precipitación anual (1951-2002) y variación de la precipitación anual anual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1

1951-2002
HISTORICO

2040-2069
A 1 B



2040-2069
A 2

2040-2069
B 1

Figura 8: Mapas de temperatura media anual (1951-2002) y cambio de la temperatura media anual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1

Los mapas de temperatura mensual (1951-2002) y cambio de la temperatura media mensual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del downscaling estadístico WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1 se los adjunta en anexo A-02.

2.4.3 Datos climáticos con resolución de 0.50 y 0.25 grados (50 km y 25 km)

La información climática para Bolivia generada en el estudio “Implementación y validación de un modelo climático regional para Bolivia” (Seiler C., 2009), que genera datos mensuales y anuales para el escenario A2 del modelo **ECHAM4** a resolución de 25 Km, fue adoptada para respaldar la otra información evaluada. Lastimosamente no se ha podido acceder a la información espacial digital en formatos ASCII, GRID o Imagen para evaluar los datos locales reales. Simplemente se tiene acceso al informe y a las gráficas generadas en el informe.

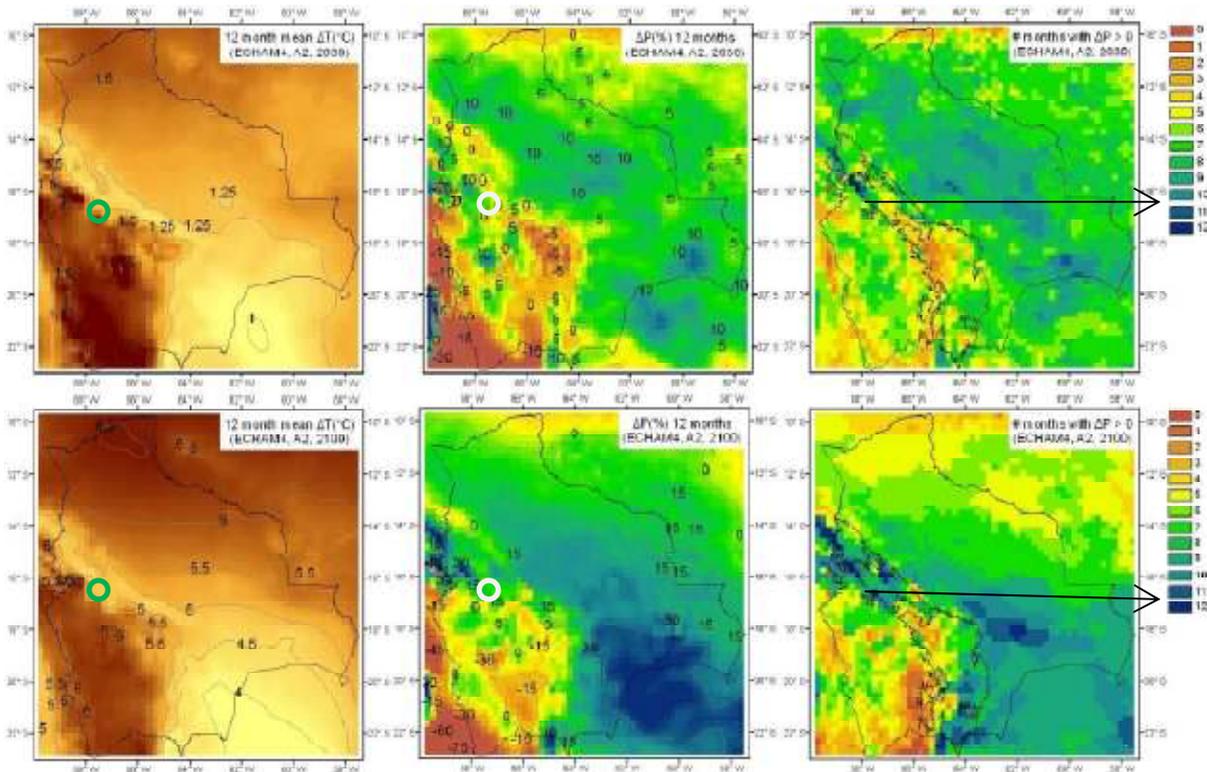


Figura 9: Mapas de variación de temperatura media anual (izq.), variación de precipitación media anual (cent.) y número de meses con incremento de lluvias (der.) para los periodos 2001-2030 (arriba) y 2070-2100 (abajo)

(Fuente: Seiler C., 2009)

Los mapas de variación de temperatura media y de variación de precipitación mensual para el periodo (2001-2030) se adjuntan en anexo A-03 y A-04 respectivamente.

2.5 Evaluación regional de escenarios de cambio climático

Se ha trabajado con datos climáticos GRID espaciales de los tres modelos descritos en el punto 2.4.1, con los del modelo francés CNRM descrito en el punto 2.4.2 y con las gráficas del modelo alemán ECHAM 4 descrito en el punto 2.4.3.

Espacialmente se han evaluado los escenarios de cambio climático a partir de los valores de las proyecciones de los GCMs para temperaturas y precipitaciones en la zona de estudio, o subcuencas de interés.

La figura 10 muestra ejemplos de la malla o grilla de las salidas de los GCMs para diferentes resoluciones. Para la grilla con resolución de 10 minutos (16.66 km) se ha tomado el valor promedio de los cuadrantes alrededor de a subcuenca (líneas rojas). Para la grilla con resolución de 0.5 grados (50 km) se ha tomado el valor del cuadrante en el que se encuentra el límite de subcuenca (línea roja).

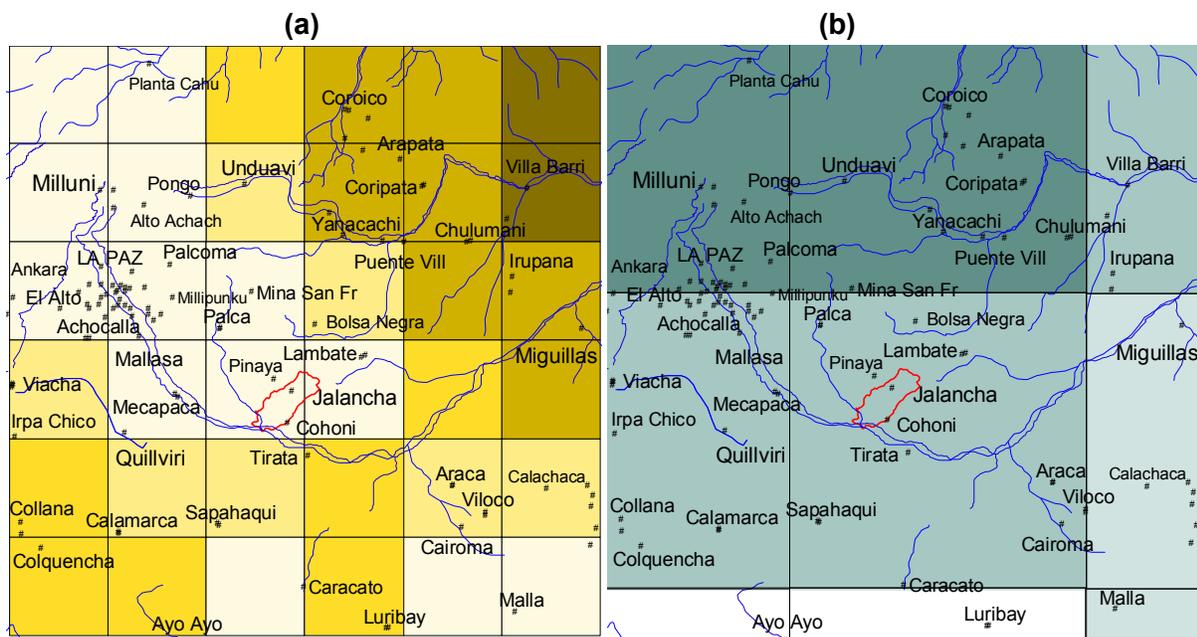


Figura 10: Salida de los modelos GCMs sobre la región de estudio, para resolución de 10 minutos (a) y 0.5 grados (b)

(Fuente: *Elaboración propia*)

2.5.1 Escenarios de precipitación

Las tablas 4 y 5, y las figuras 11, 12, 13 y 14 presentan y permiten comparan las salidas o simulaciones de escenarios que dan proyecciones de variación o cambios en la precipitación mensual y anual de 3 modelos con Downscaling estadístico CRU CL2.0 y del modelo CNRM



con Downscaling estadístico WCRP CMIP3 para la zona de estudio. Existe diferencia entre ambas salidas, en cuanto a magnitudes de variación de la precipitación (reducción e incremento), incluso para el mismo modelo CNRM, pero con diferente método de downscaling. Las diferencias se pueden deber a muchos factores como son el tipo de metodología estadística para el downscaling, la información utilizada, calibración del modelo estadístico, las técnicas de parametrización, representación incorrecta del efecto orográfico en las lluvias. Cabe recalcar que la confiabilidad de las estimaciones de los modelos para precipitación es menor que para las temperaturas (*ver punto 2.1 sobre modelos climáticos*).

		MODELO GLOBAL CIRCULACION IPCC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ESCENARIO	A 1 B	CNRM CM3	-42	-47	-69	-39	-77	-99	-100	-48	-65	-66	-53	-39	-62
		INGV ECHAM4	-23	-34	-40	-79	-99	-75	-100	-71	-73	-66	-64	-43	-64
		NIES MIROC 32m	-47	-56	-69	-66	-94	-65	-8	-71	-100	-71	-80	-67	-66
	A 2	CNRM CM3	-42	-50	-62	-54	-64	-100	-99	-35	-50	-65	-57	-39	-60
		INGV ECHAM4	-31	-32	-48	-80	-91	-95	-74	-27	-56	-69	-63	-42	-59
		NIES MIROC 32m	-51	-60	-67	-72	-55	-50	-8	-58	-100	-83	-82	-82	-64
	B 1	CNRM CM3	-46	-63	-64	-36	-90	-100	-100	-73	-54	-51	-55	-32	-64
		INGV ECHAM4		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
		NIES MIROC 32m	-59	-68	-68	-59	-58	-65	-25	-63	-87	-77	-80	-77	-66

Tabla 4: Variación de precipitación mensual y anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **CRU CL2.0** (10 minutos ó 16.66 km)

(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

		MODELO GLOBAL CIRCULACION IPCC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ESCENARIO	A 1 B	CNRM CM3	15	27	17	26	-6	2	-5	-5	0	8	12	5	13
	A 2	CNRM CM3	19	20	24	6	8	-3	-20	-1	10	3	14	12	14
	B 1	CNRM CM3	12	9	14	14	-1	1	-21	-19	2	10	7	10	8

Tabla 5: Variación de precipitación mensual y anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km)

(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

En la figura 11 se observa comportamiento mensual diferente entre los 3 modelos CRU CL2.0, con valores que proyectan una reducción de lluvias entre el 20 y 60% entre noviembre a mayo y de 10 a 100 % para junio a septiembre.

Los resultados WCRP CMIP3 del modelo CNRM presentados en la figura 12 muestran valores diferentes y contrarios a las salidas del modelo CRU CL2.0. Para el modelo CNRM se tiene un incremento de las lluvias entre octubre y abril entre el 10 y 25% y reducción de las lluvias para julio y agosto entre 20 y 30 %.

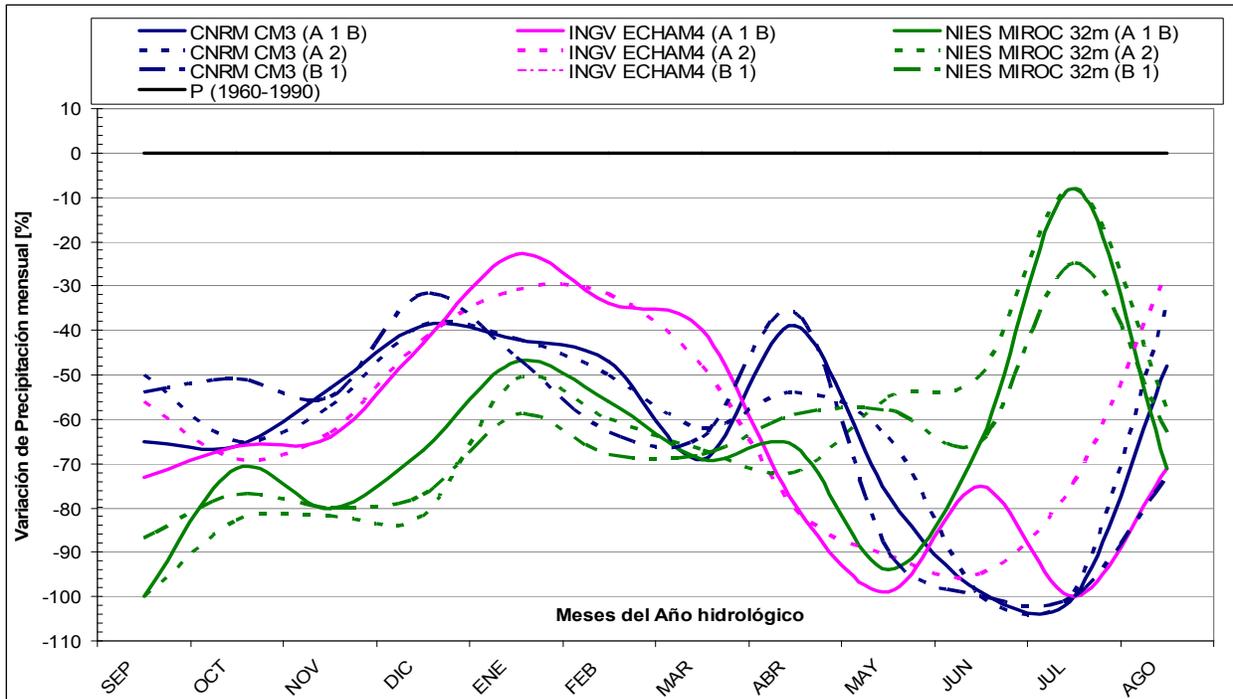


Figura 11: Variación de precipitación mensual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **CRU CL2.0** (10 minutos ó 16.66 km)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

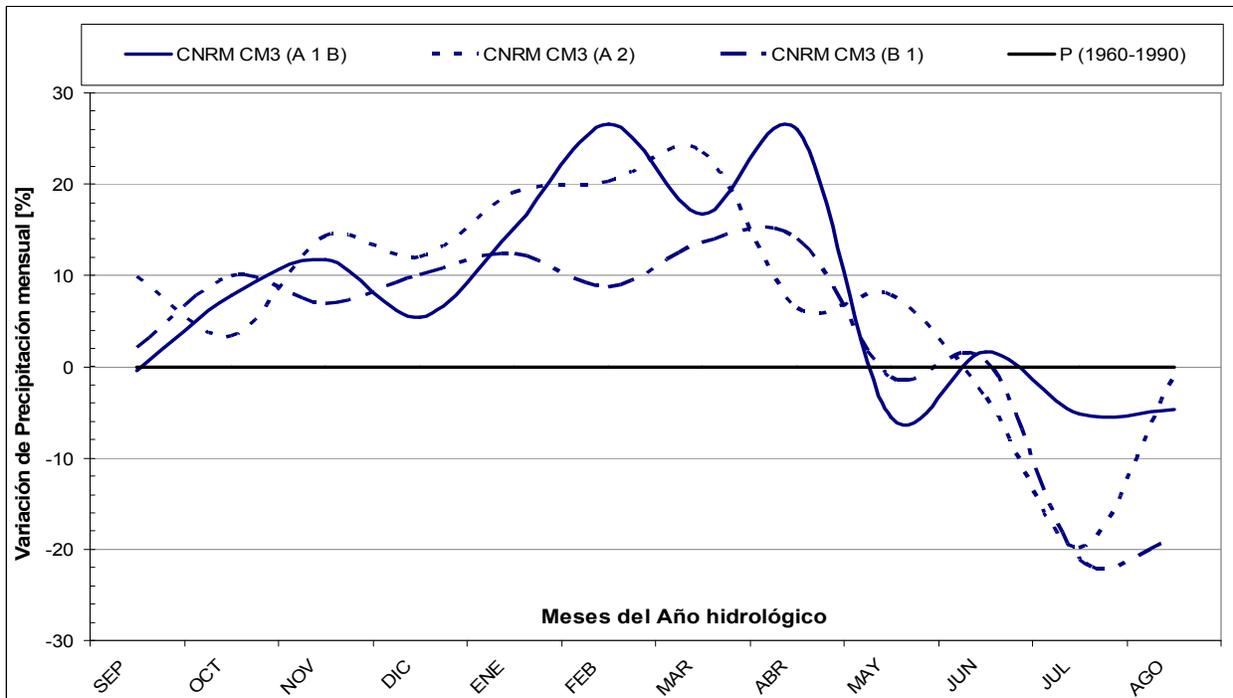


Figura 12: Variación de precipitación mensual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

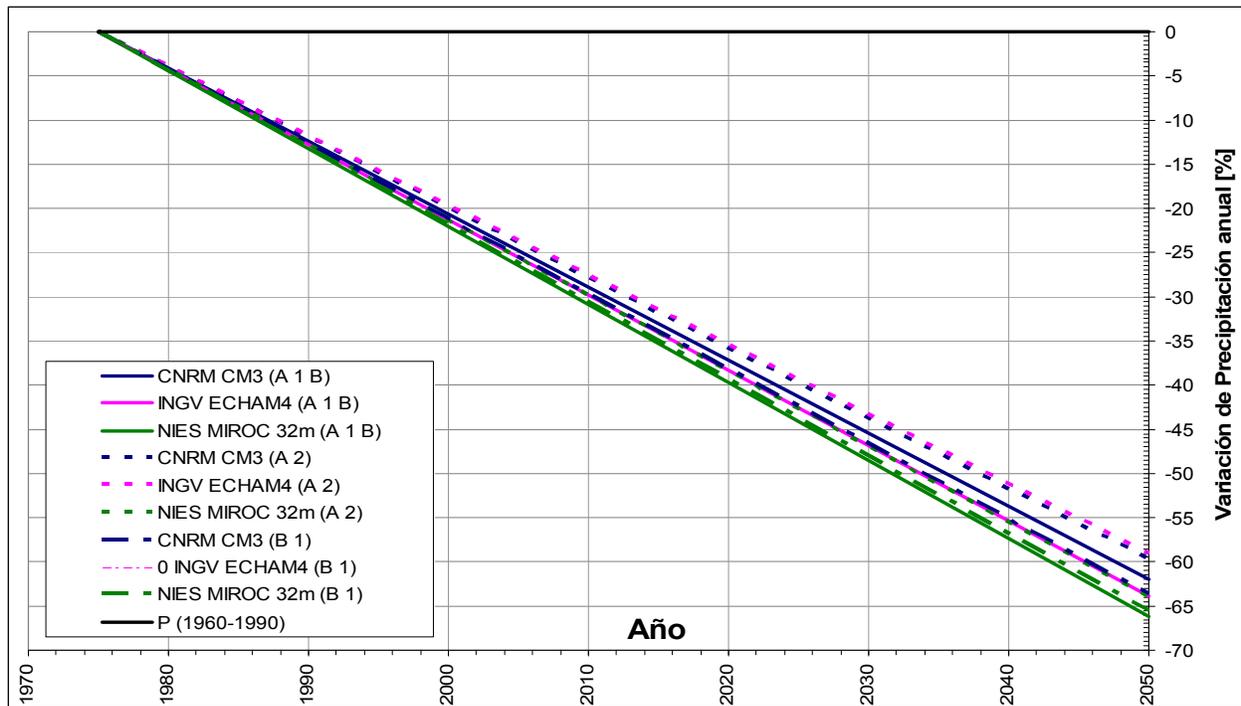


Figura 13: Variación de precipitación anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **CRU CL2.0** (10 minutos ó 16.66 km)
(Fuente: *Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's*)

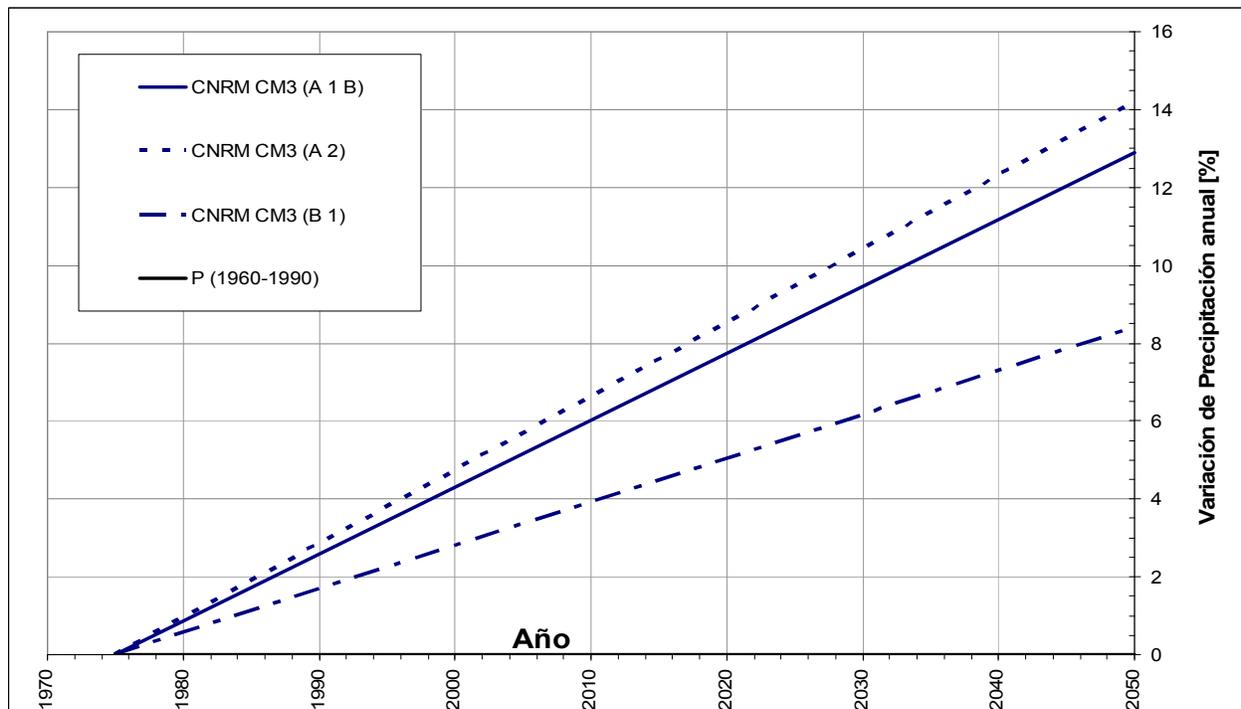


Figura 14: Variación de precipitación anual [%] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km)
(Fuente: *Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's*)



En la figura 12 y 13 se observa que la variación de precipitación del modelo CNRM CM3 (WCRP CMIP3) difiere mes a mes de un escenario a otro, es decir, que la variación no es constante ni paralela de un escenario a otro, tanto para el downscaling CRU CL2.0 como para el WCRP CMIP3.

Las figuras del anexo 3 que presentan la variación de precipitación mensual para el periodo 2001-2030, por el ECHAM4 simulado para 25 km, muestran incremento de lluvias para los meses de marzo abril entre el 15 y 30 %, para enero no se esperan cambios y para febrero disminución de lluvias menores a 5%. Para los meses de mayo a diciembre se tienen reducción de lluvias proyectadas desde no significativas (menos de 5%) hasta un 25%. Lastimosamente solamente se cuentan con las figuras con escalas graficas con degradación de colores del informe del estudio realizado por Seiler 2009, y no así datos espaciales puntuales que permitan conocer la magnitud real simulada por el modelo dinámico.

Anualmente la variación de precipitación (2040-2060) de las proyecciones del **CRU CL2.0** para los 3 modelos, indican reducción desde 60 hasta 65 % en lluvias (*Figura 15*), mientras que las proyecciones del **WCRP CMIP3**(*Figura 12*) indican un incremento de lluvias entre 8 y 14 % aproximadamente. La figura 9 presenta una variación de precipitación anual de 5 % aproximadamente para el escenario A2 y periodo 2001-2030, simulado por el ECHAM4 (25 km) en la región de estudio.

Los datos presentados muestran ciertas incertidumbres o un espectro de incremento en las lluvias, que será evaluado, comparado y analizado con las tendencias puntuales regionales observadas (tendencias en estaciones representativas).

2.5.2 Escenarios de temperatura media

Las tablas 6 y 7, y las figuras 15, 16, 17 y 18 presentan y permiten comparan las salidas o simulaciones de escenarios para las proyecciones de variación temperatura media mensual y anual de 3 modelos del Downscaling estadístico CRU CL2.0 y del modelo CNRM del Downscaling estadístico WCRP CMIP3 para la zona de estudio. Existe diferencia entre ambas salidas, en cuanto a magnitudes de variación de la temperatura media, incluso para el mismo modelo CNRM. Las diferencias se pueden deber a varios factores como son el tipo de metodología estadística para el downscaling, la información utilizada, el tipo de calibración, las técnicas de parametrización, representación incorrecta del gradiente térmico respecto a la variación altitudinal. Comparando las salidas de variación de temperatura los GCMs, con las figuras 3 y 5 que muestra el calentamiento global en superficie y proyecciones para el siglo XXI, las salidas del **CRU CL2.0** presentan valores altos entre 3 y 5°C de variación que está dentro el espectro o rango probable, mientras que las salidas del **WCRP CMIP3** presentan valores también dentro del rango entre 1.6 y 3.3°C, por lo que se ha decidido considerar estas salidas y compararlas con las tendencias regionales observadas, para definir cual de los escenarios futuros tiene mayor probabilidad de ocurrencia.



		MODELO GLOBAL CIRCULACION IPCC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ESCENARIO	A 1 B	CNRM CM3	4.1	4.3	4.8	5.1	5.1	5.1	4.7	5.1	4.4	4.2	4.5	4.5	4.6
		INGV ECHAM4	5.1	3.6	3.7	4.4	5.3	3.7	4.2	4.1	4.3	5.1	5.1	4.6	4.4
		NIES MIROC 32m	-1.3	-0.6	-0.1	-0.9	2.1	2.0	2.7	1.8	-0.5	-0.2	-0.1	-0.4	0.4
	A 2	CNRM CM3	3.8	3.9	4.6	5.1	5.2	4.8	4.8	4.8	4.2	3.9	4.4	4.3	4.5
		INGV ECHAM4	4.9	3.8	3.8	4.3	5.5	4.0	4.4	3.9	4.1	4.9	5.2	4.6	4.4
		NIES MIROC 32m	-1.4	-0.5	-0.2	-1.2	2.0	1.9	2.5	1.3	-0.5	0.0	0.0	-0.5	0.3
	B 1	CNRM CM3	3.1	3.4	4.0	4.5	4.6	4.4	4.2	4.1	3.6	3.3	3.5	3.5	3.8
		INGV ECHAM4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
		NIES MIROC 32m	-1.6	-0.8	-0.4	-1.3	1.8	1.4	2.0	0.9	-1.1	-0.5	-0.6	-0.7	-0.1

Tabla 6: Variación de temperatura media mensual y anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **CRU CL2.0** (10 minutos ó 16.66 km)

(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

		MODELO GLOBAL CIRCULACION IPCC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ESCENARIO	A 1 B	CNRM CM3	2.9	2.8	2.6	2.6	2.3	2.4	2.4	3.0	3.3	2.9	2.9	3.0	2.8
	A 2	CNRM CM3	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.2	2.5	2.9	3.2	2.8	2.9	2.9	2.7
	B 1	CNRM CM3	2.0	2.1	1.8	1.8	1.6	1.6	1.7	2.0	2.4	2.0	2.1	2.2	1.9

Tabla 7: Variación de temperatura media mensual y anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km)

(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

En la figura 15 se observa un comportamiento similar en algunos meses, de las salidas de los modelos CNRM CM3 y INGV-ECHAM4 (CRU CL2.0), dejando de lado las magnitudes. Mientras que el modelo MIROC proyecta variación de las temperaturas bastante diferentes a los de los otros dos modelos.

En la figura 16 y 18 se observa que el escenario B1 del modelo CNRM CM3 con downscaling estadístico WCRP CMIP3 es el que presentan menor variación de la temperatura mensual y anual para el periodo 2040-2060. Las figuras del anexo 4 que representan la variación térmica media mensual para el periodo 2001-2030 simulada por el modelo ECHAM4 (Seiler, 2009), también predicen un incremento en todos los meses del año, con magnitudes entre 1.0 y 1.5°C.

La variación térmica anual para 2040-2060 según las proyecciones del CRU CL2.0 son casi 1.6 veces mayor en magnitud que las del WCRP CMIP3 (Figuras 39 y 40). El modelo ECHAM4 (figura 9) estima una variación térmica media anual del orden de 1.25° C para el periodo 2001-2030 para el escenario A2. Considerando que los periodos son diferentes, las estimaciones de los modelos ECHAM4 (Seiler, 2009) y el modelo CNRM CM3 con downscaling WCRP CMIP3 se aproximan entre sí.

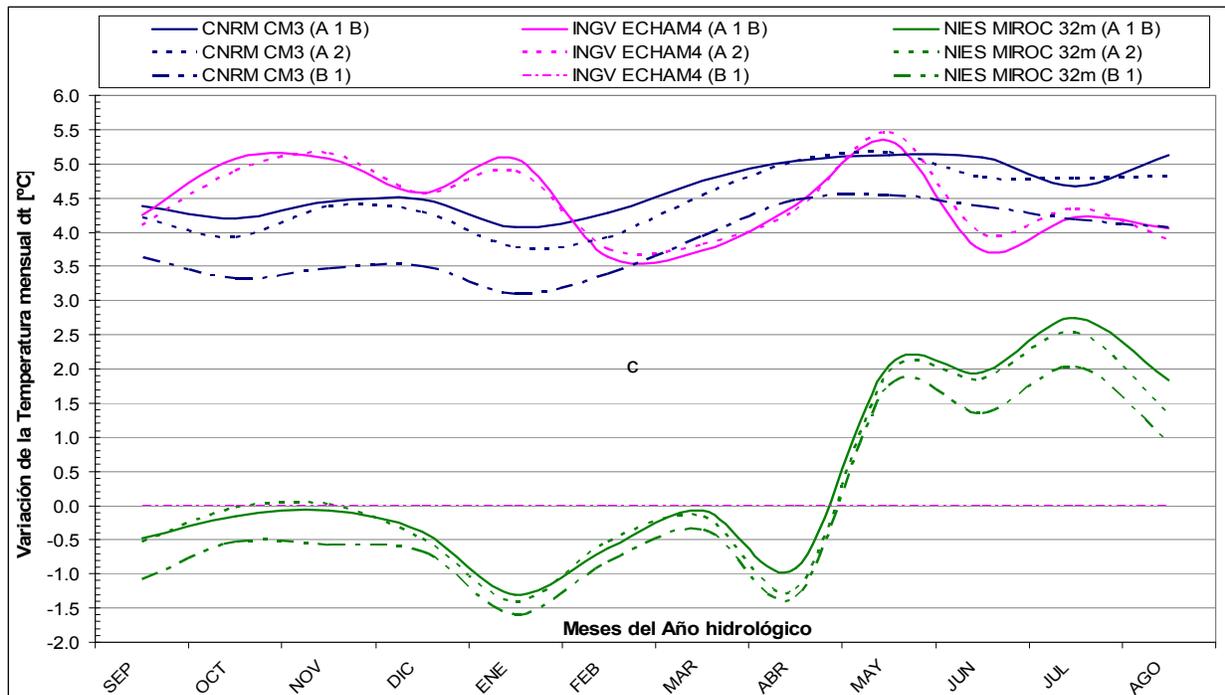


Figura 15: Variación de temperatura media mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **CRU CL2.0** (10 minutos ó 16.66 km)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

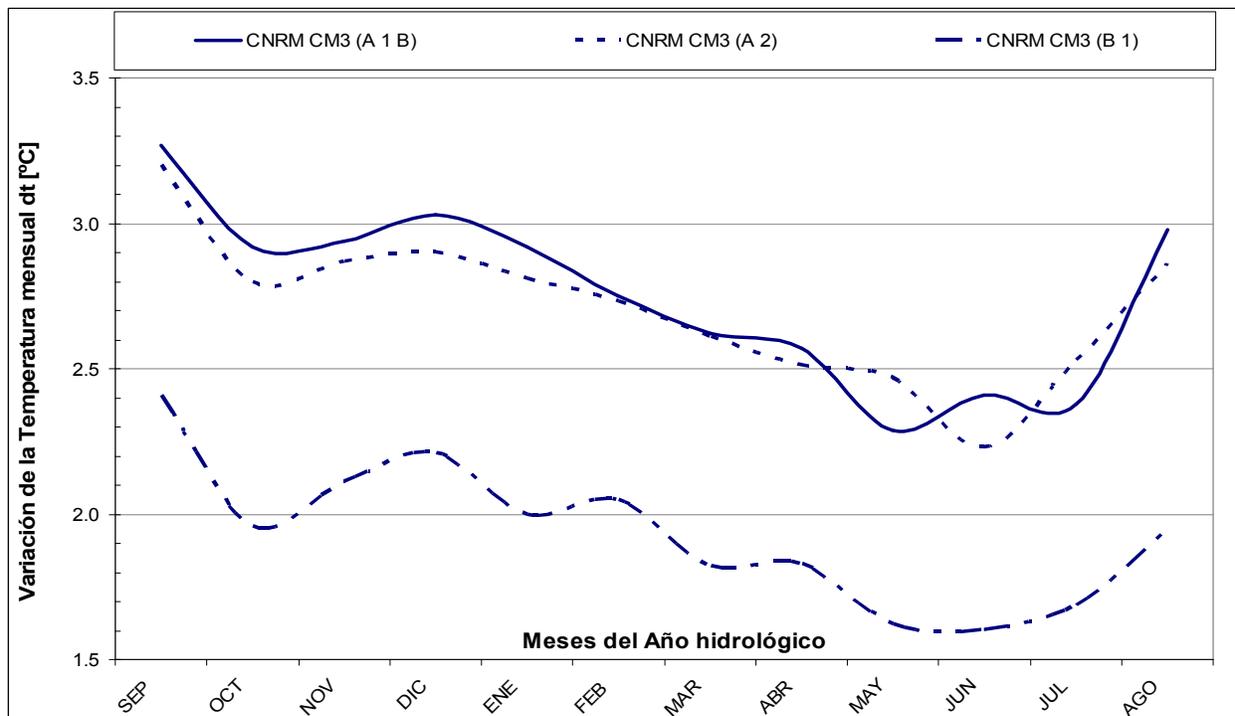


Figura 16: Variación de temperatura media mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

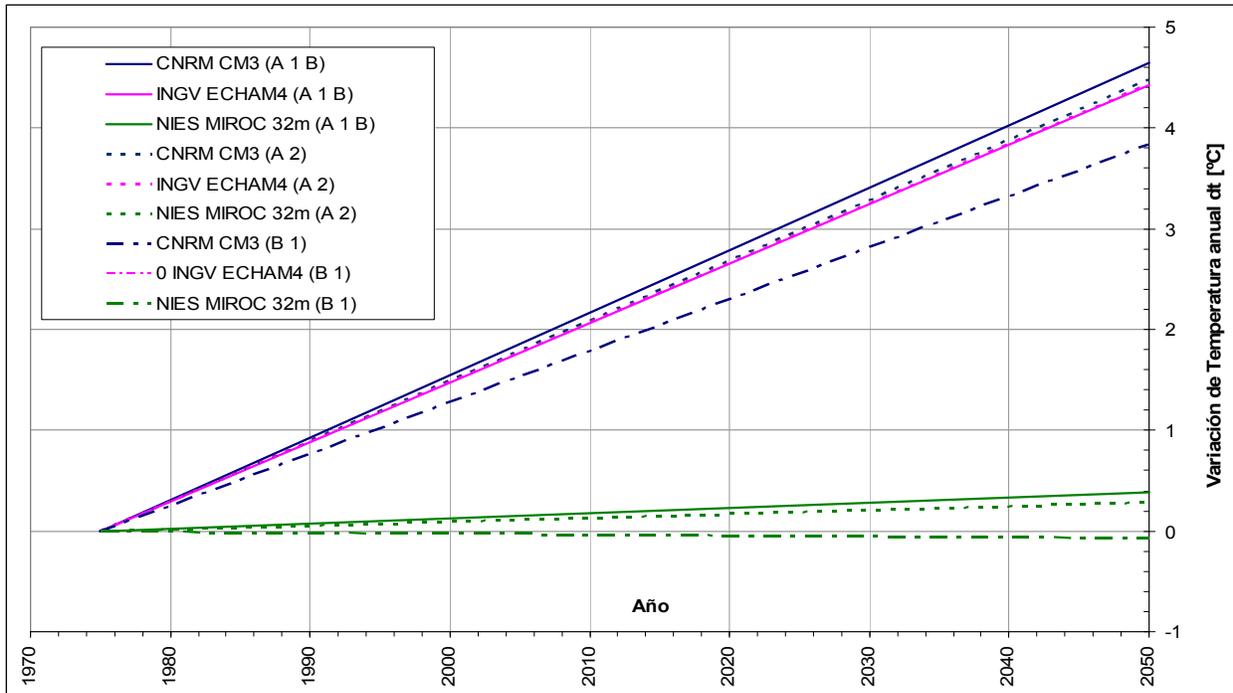


Figura 17: Variación de temperatura media anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **CRU CL2.0** (10 minutos ó 16.66 km)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)

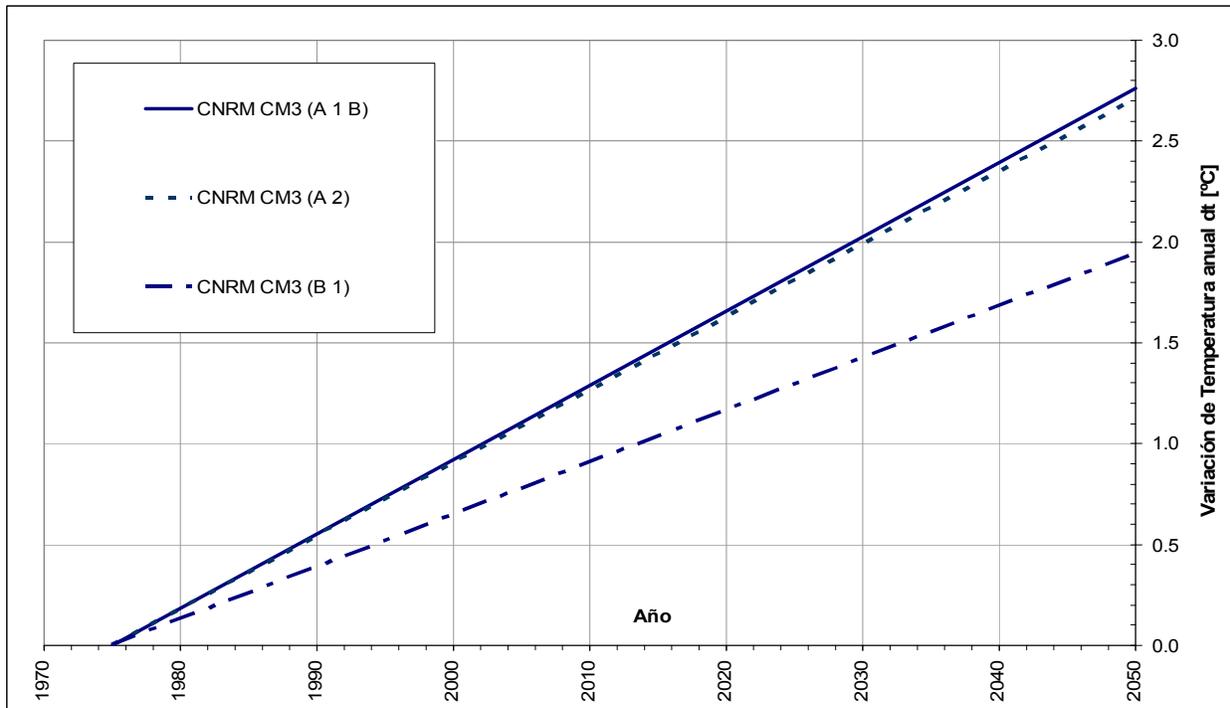


Figura 18: Variación de temperatura media anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's)



2.6 Análisis combinado de escenarios de cambio climático

En este punto se realiza el cruce o comparación de escenarios de cambio climático a 2050 termoplumiométricos de las salidas de modelos de circulación general con las proyecciones de las tendencias significativas en estaciones regionales de referencia (*para mayor referencias de tendencias regionales y proyecciones referirse al informe “Análisis de tendencias climáticas en la región de la cuenca del río Sajhuaya” del Proyecto Illimani, por Espinoza 2011*).

2.6.1 Escenarios de precipitación a 2050

La figura 19 muestra el análisis combinado de escenarios de cambio climático para precipitaciones a nivel mensual de GCM's contra las proyecciones de las tendencias regionales en estaciones representativas. Se puede ver que en varios meses hay por lo menos 2 estaciones con tendencias positivas (aumento de lluvia en octubre, enero, marzo, abril, junio). Para otros meses las estaciones no detectan cambios significativos o solamente una estación capta una tendencia significativa. Si bien en magnitud los valores que se muestran son diferentes entre GCM CNRM CM3 y proyección de tendencias, varios de los meses coinciden en cuanto al signo de variación de lluvia, es decir, presentan ambos un incremento de lluvias.

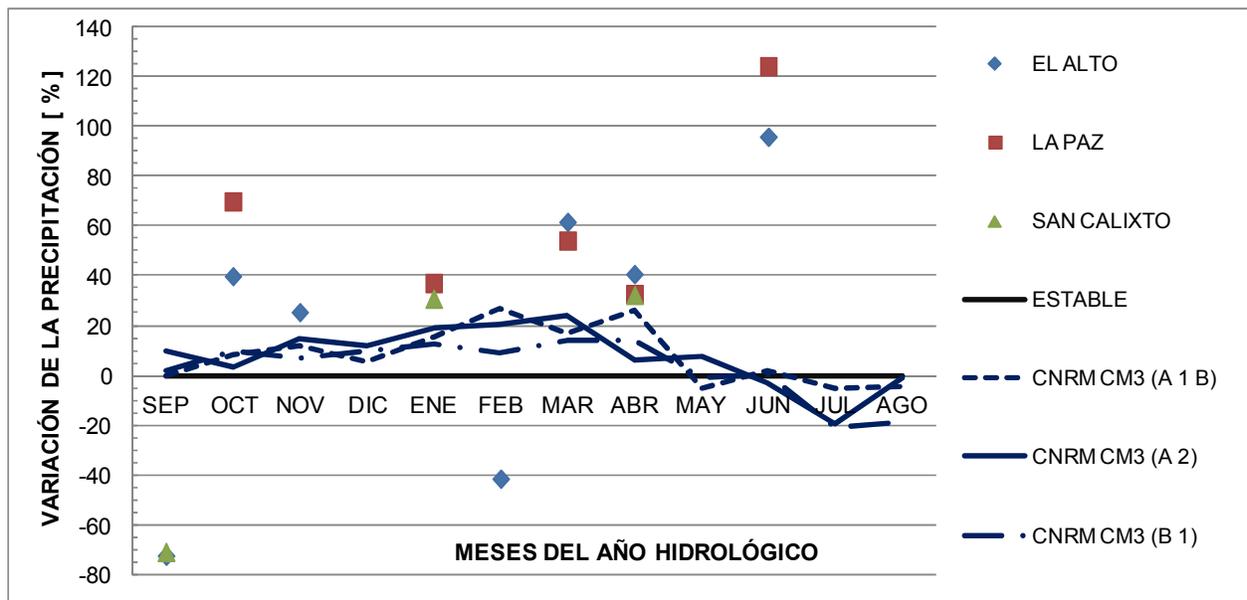


Figura 19: Variación de precipitación mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km) del **CNRM CM3** y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte (1946-2009) (*Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's y análisis de tendencias regionales*)

La figura 20 muestra el análisis combinado de escenarios de cambio climático para precipitaciones a nivel anual de GCM's contra las proyecciones de las tendencias regionales en



estaciones representativas o con significancia, en este caso solamente contra la tendencia en La Paz. Se puede ver que está muy por encima de los escenarios simulados por el CNRM CM3.

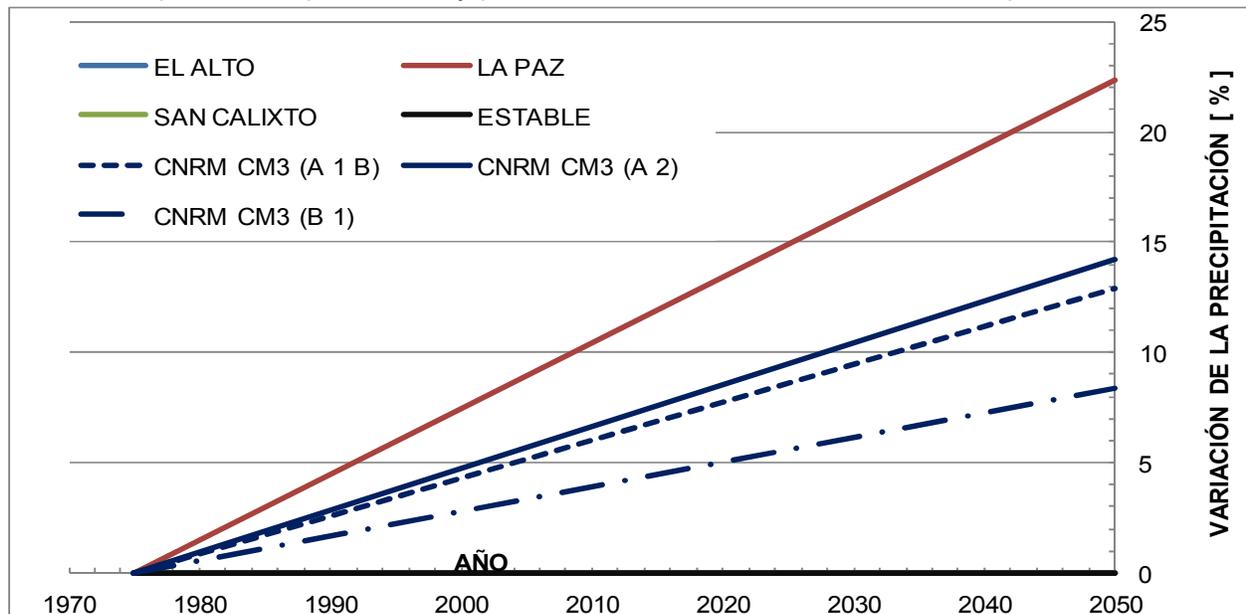


Figura 20: Variación de precipitación anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km) del **CNRM CM3** y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte (1946-2009) (Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's y análisis de tendencias regionales)

2.6.2 Escenarios de temperatura media 2050

La figura 21 muestra el análisis combinado de escenarios de cambio climático para temperatura media a nivel mensual de los GCM's contra las proyecciones de las tendencias regionales en estaciones representativas. Se puede ver claramente el efecto isla de calor en la estación de La Paz que para todos los meses las tendencias muestran incremento o aumento de la temperatura fuerte en varios meses. La estación de El alto las tendencias significativas positivas son más leves que para el caso de La Paz, y para Viacha los cambios evidentes en la serie no son significativos por lo que implica una estabilidad en el comportamiento de la temperatura media. Si bien en magnitud los valores que se muestran son diferentes entre GCM CNRM CM3 y proyección de tendencias, varios de los meses coinciden en cuanto al signo de variación de temperatura media y la forma de la curva media mensual.

La figura 22 muestra el análisis combinado de escenarios de cambio climático para temperatura media a nivel anual de GCM's contra las proyecciones de las tendencias regionales en estaciones representativas o con significancia, en este caso contra la tendencia en La Paz y El Alto. Se puede ver que para el caso de La Paz la temperatura esperada está muy por encima de los escenarios simulados por el CNRM CM3, mientras la temperatura en El Alto esperada a 2050 está muy por debajo de los escenarios simulados por los GCM's.

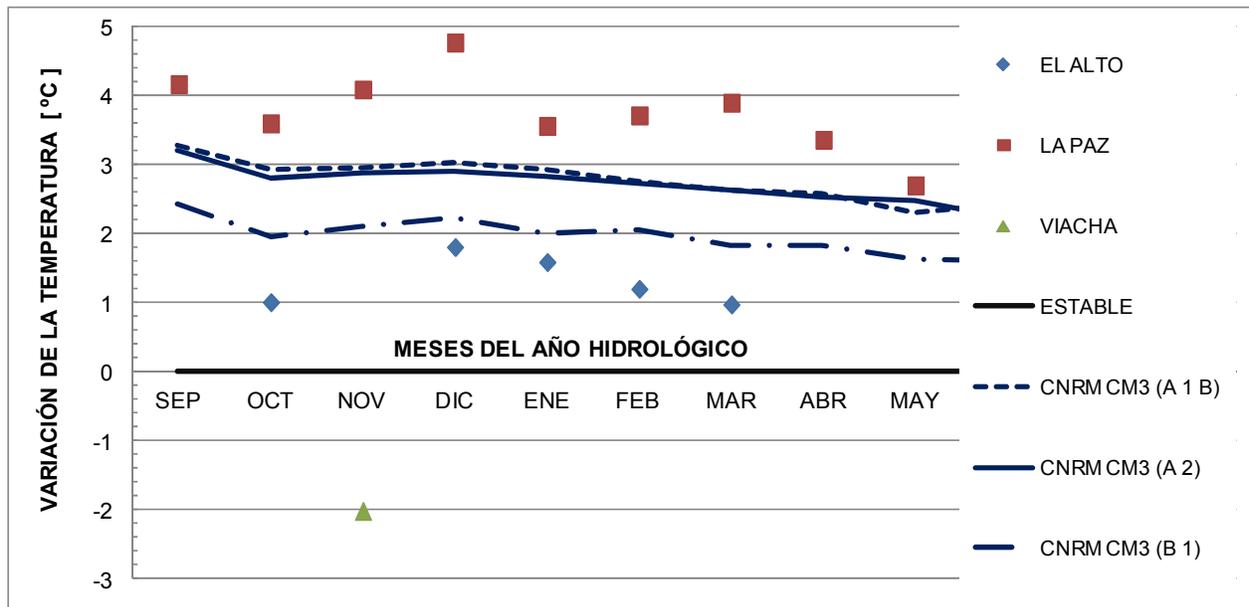


Figura 21: Variación de temperatura media mensual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km) del **CNRM CM 3** y tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's y análisis de tendencias regionales)

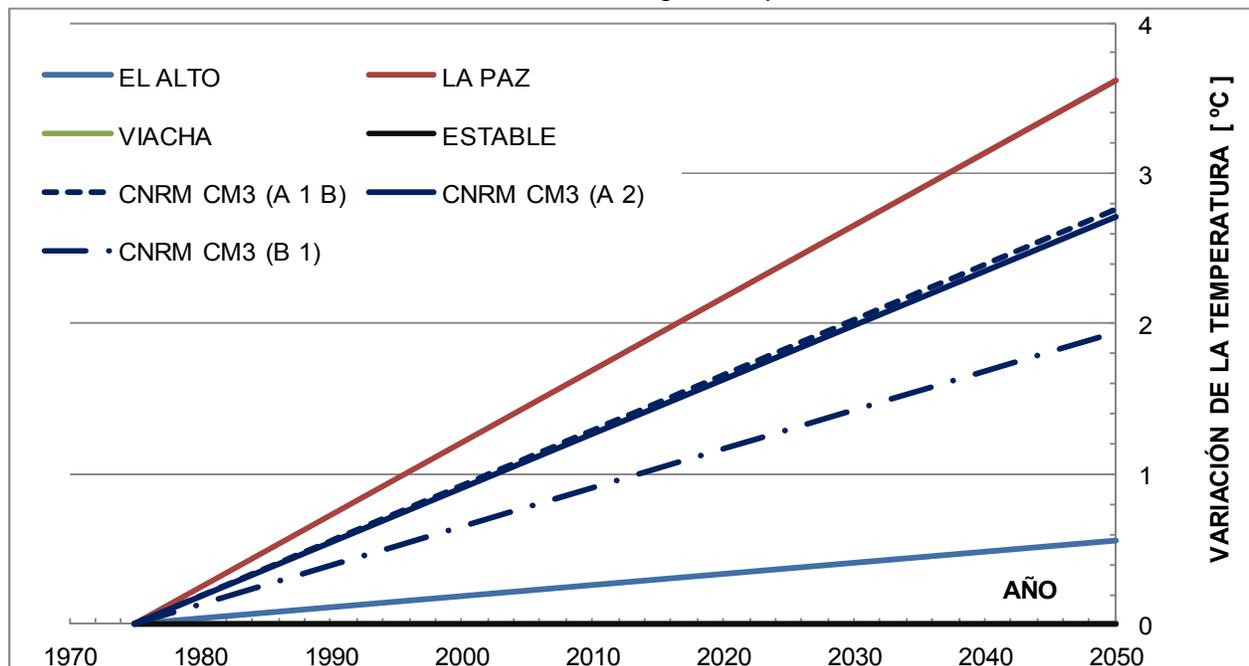


Figura 22: Variación de temperatura media anual [°C] (2040-2060) respecto a (1960-1990), datos del Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (0.5° ó 50 km) del **CNRM CM3** y proyección de tendencias de temperatura media mensual con significancia leve, media y/o fuerte (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia en base a salidas de simulaciones de los GCM's y análisis de tendencias regionales)



2.6.3 Escenarios para temperatura máxima y mínima

A requerimiento de la institución contratante, se ha pedido estimar la variación de temperatura máxima y mínima a nivel mensual y anual para escenarios futuros de cambio climático. Para ello se ha tomado como referencia el análisis de tendencias de estos dos parámetros sobre las estaciones de El Alto y La Paz a nivel anual sobre su serie histórica (1960-2009). Esto con el fin de evaluar, inferir, estimar y correlacionar estos comportamientos respecto a las tendencias de temperatura media anual. Se ha recurrido a esta metodología de análisis ya que la base de datos y salidas de simulaciones de los GCMs evaluados en el presente estudio **NO** dan salidas de variaciones de las temperaturas máximas y mínimas medias para los diferentes escenarios de cambio climático.

Las figuras 23 y 24 muestran las tendencias en las series históricas anuales de temperatura máxima media, temperatura media, temperatura mínima media para las estaciones de El Alto y La Paz.

Para **El Alto** se ve que el gradiente térmico entre temperaturas máximas y mínimas medias se incrementa, es decir, que las temperaturas máximas medias tienden a incrementarse (tasa o pendiente de $+0.0247^{\circ}\text{C/año}$) y las temperaturas mínimas medias tienden a disminuir (tasa o pendiente de $-0.0137^{\circ}\text{C/año}$), para este caso ninguna de las tendencias son paralelas o se asemejan a la tendencia de temperaturas medias, la cual presenta una tasa baja de incremento de $+0.0054^{\circ}\text{C/año}$).

Para **La Paz** central se ve que el gradiente térmico se incrementa tanto en temperaturas máximas y mínimas medias, así como la temperatura media. La tasa o pendiente de tendencias es positiva para las tres variables de temperatura, con la relevancia que esta tasa va aumentando desde las temperaturas mínimas ($+0.0265^{\circ}\text{C/año}$), a las temperaturas medias ($+0.0371^{\circ}\text{C/año}$) hasta las temperaturas máximas ($+0.0475^{\circ}\text{C/año}$). Este efecto en las temperaturas son provocadas por el efecto “Isla de calor” que se genera en ciudades grandes y va aumentando en cuanto al crecimiento en el tiempo de la mancha urbana de una ciudad.

Esta **metodología es compleja y no es aplicable a nivel mensual**, entonces, los resultados de la estimación anual de variación de temperaturas máximas y mínimas medias del GCM, se las podría distribuir mensualmente por simplificación.

En conclusión, para estimar la variación climática de temperaturas máximas y mínimas medias, para escenarios futuros de cambio climático (2050), respecto a los casos expuestos para estimar estos (*que no se tienen mayores referencias para indagar sobre este cambio, y que no son suficientes para justificar posibles cambios en el clima* al existir gran incertidumbre al respecto), **se ha definido aplicar las mismas variaciones de temperatura media temperatura media dadas por las salidas del modelo GCMNRM CM3 tanto para temperatura máxima como para temperatura mínima.**

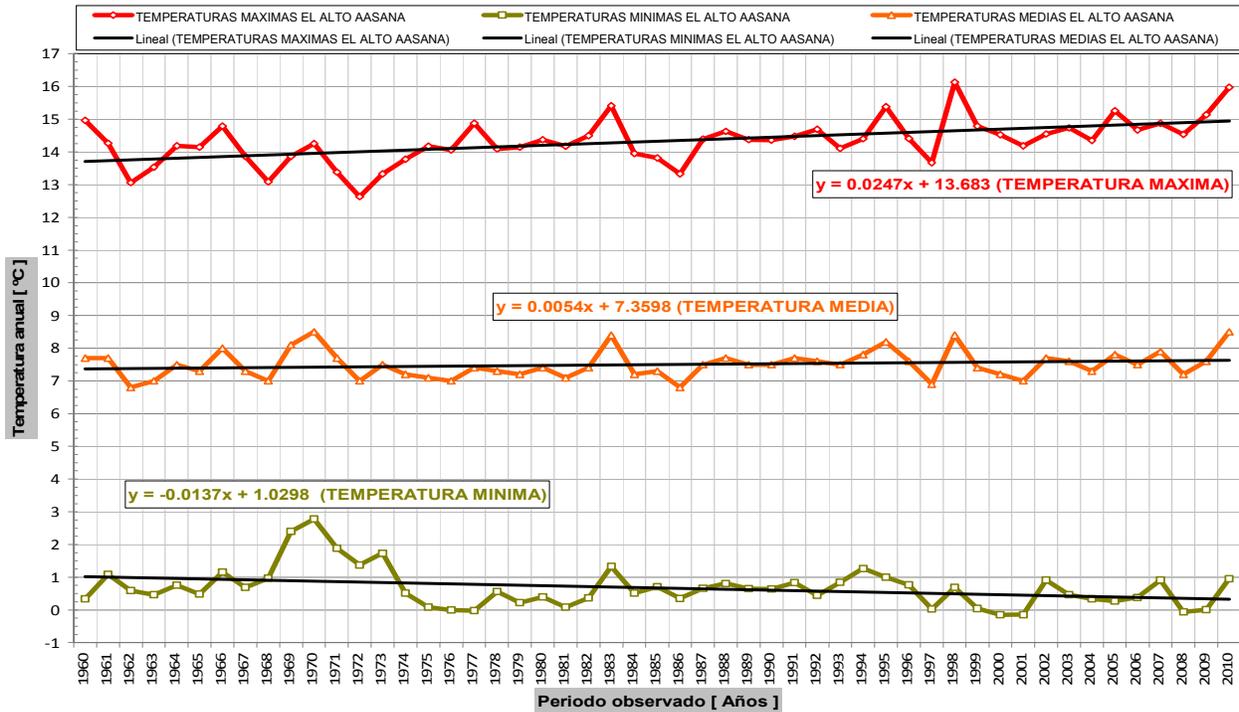


Figura 23: Tendencias de temperatura máxima, media y mínima anual [°C] en la estación de El Alto (AASANA)
(Fuente: Elaboración propia)

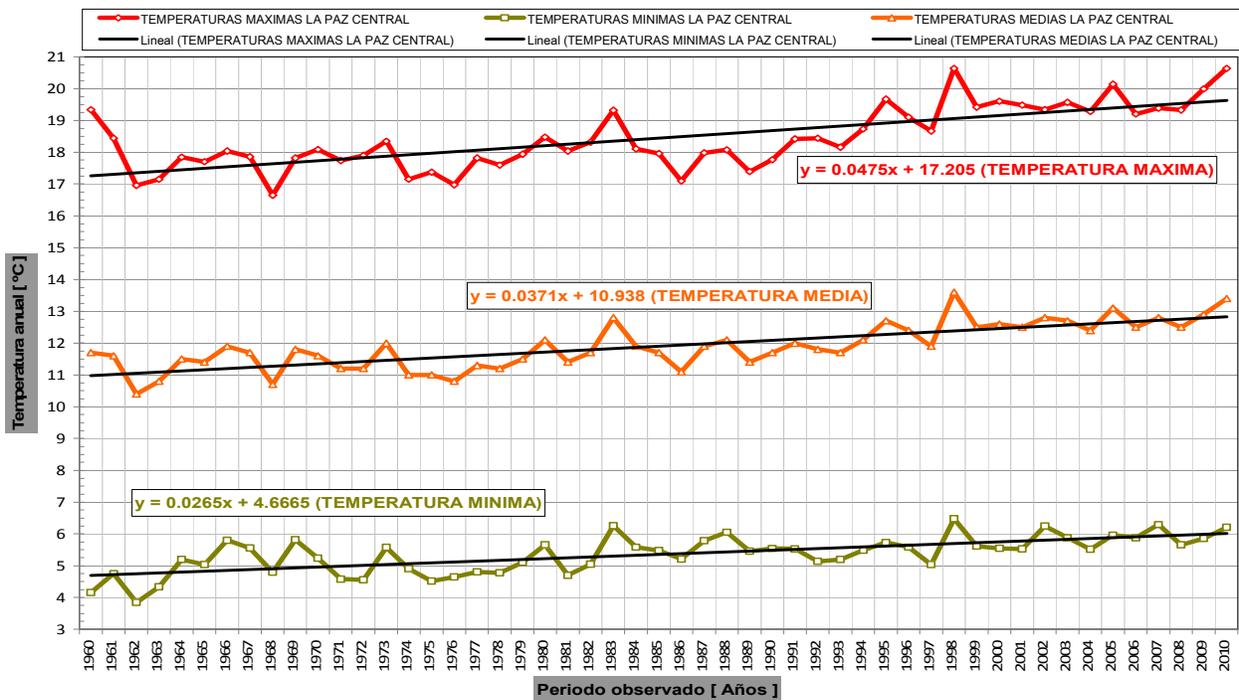


Figura 24: Tendencias de temperatura máxima, media y mínima anual [°C] en la estación de La Paz (Central)
(Fuente: Elaboración propia)



2.7 Evaluación de los modelos de circulación general en la región de estudio

Las diferencias en los GCM's con downscaling estadístico, pueden deberse a factores como: el tipo de metodología estadística para el downscaling, la información utilizada (consistencia, validación), las técnicas de parametrización, representación incorrecta del gradiente térmico o pluviométrico respecto a la diferencia altitudinal, o diferencia en los periodos evaluados entre GCM's y análisis de tendencias en estaciones, lo cual se complica en zonas montañosas como en el presente caso de estudio. Las proyecciones de los GCM's están evaluadas para el periodo **2050** (2040-2060) respecto a 1975 (1960-1990).

Los modelos GCMs tienen mayor dificultad en reproducir o simular las lluvias respecto a otras variables como la temperatura. La simulación del clima está en función a la dinámica atmosférica regional intraestacional. Para mejorar la confiabilidad del downscaling estadístico se debe calibrar su parametrización, lo cual es complejo y requiere de mucha información de respaldo.

Es importante resaltar el medio físico y geográfico de la zona de estudio respecto a la resolución de los GCM's (10 min=16.6 km y 0.5°=50Km) y sus limitantes. La zona de estudio implica una cuenca de alta montaña sobre la cordillera oriental de los Andes. La cuenca se desarrolla entre los 6400 y 2300 m.s.n.m aproximadamente, con presencia de glaciares, zona nival, valles interandinos, puna. Dentro este contexto el comportamiento del clima está influenciado por el gradiente altitudinal, obstáculos (serranía y cordillera), circulación de vientos a diferentes altitudes (200, 400, 500 o 850 Hpa por ejemplo), etc. La representación de diferentes condiciones en un solo valor debe ser cuidadosamente analizado, evaluado, y tomado en cuenta. Esto implica una limitante en un estudio más preciso de la zona.

Las diferencias en las tendencias regionales en estaciones termo-pluviométricas, pueden deberse a factores como: errores sistemáticos (durante el relleno de datos), diferencia de condiciones físico-geográficas entre estaciones, errores instrumentales o de operador de instrumento, o diferencias en el periodo de análisis, o efectos urbanos como es el caso de la ciudad de La Paz (isla de calor). En general las estaciones regionales fueron evaluada sobre el periodo 1946-2009 y 1976-2009 (63 y 33 años respectivamente) para precipitaciones y sobre el periodo 1976-2009 (33 años) para temperaturas.

En cuanto a los datos puntuales de temperatura media observados en estaciones y su análisis de tendencias, puede que el periodo de observación no sea lo suficientemente largo para evaluar mejor el comportamiento temporal y evaluar asimismo la variabilidad climática en la región. Esta condición puede inducir a captar tendencias significativas o no captar ninguna en las series temporales cortas. Otra limitante para la zona de estudio es que no existen estaciones en la zona o en la cuenca con observaciones consistentes y sobre periodos largos, que reflejen y representen mejor el comportamiento local de lluvias y temperaturas, a las de las estaciones de referencia.



En climatología, meteorología e hidrología mientras mayor el número de datos (días, meses, años observados o medidos), menor es la incertidumbre a proyectar futuros escenarios en base a observaciones. Por el contrario análisis sobre periodos observados cortos, se tiene un rango de variación climática de mayor amplitud o mayor grado de incertidumbre.

Se han descartado las salidas o proyecciones a 2050 de precipitación y temperaturas de los 3 modelos (CNRM, INGV ECHAM4 y MIROC) con Downscaling estadístico CRU CL2.0 (10 minutos ó 16 km) debido a que las estimaciones de variación para las variables precipitación y temperatura media son diferentes respecto al análisis de tendencias en las estaciones de El Alto, La Paz, San Calixto y Viacha, en cuanto a magnitud y signo de variación (aumento o disminución), y que además están sobreestimados o son mayores al espectro o rango probable esperado, ya que del análisis de tendencias a nivel mensual resulta que el comportamiento evolutivo de la series cronológicas son estables o no presentan significancia a ser considerada.

Comparando el análisis de tendencias anual con las salidas del modelo **CNRM** Downscaling estadístico **WCRP CMIP3** (30 minutos ó 50 km) y el ECHAM4 (25 km) (*Seiler, 2009*), estas salidas son más consistentes, factibles y se asemejan mejor al comportamiento regional en magnitud de variación de precipitación, que las salidas con Downscaling estadístico **CRU CL2.0**, por lo que se ha decidido considerar al modelos CNRM (WCRP CMIP3) para escenarios futuros de cambio climático en la región.

Las salidas de escenarios de variación de precipitaciones del **CNRM** (WCRP CMIP3), comparada con las proyecciones del análisis de tendencias mensual han servido para tomar la decisión de adoptar los valores más confiables y factibles. Las tendencias de precipitación anual en la estación de La Paz indican un incremento hasta del 22% de lluvias evaluadas sobre la serie (1946-2009). No existen proyecciones con significancia relevante para esperar una disminución de las lluvias en estaciones regionales.

Cabe mencionar que las salidas de temperatura media del modelo **CNRM** (WCRP CMIP3), presenta algunas diferencias en algunos meses entre los diferentes escenarios de hasta 1.0°C entre uno y otro escenario. Las diferencias pueden deberse a varios factores internos del modelo GCM o a las técnicas de downscaling estadístico. Es relevante rescatar la similitud en el comportamiento de las tendencias de temperatura media anual de la estación La Paz (central) y las proyecciones del **CNRM CM3** (WCRP CMIP3) para el escenario (A1B) a pesar de que el valor anual esperado esta 0.8°C por encima de las simulaciones de los GCM's.

Los escenarios de cambio climático para la zona de estudio para 2050 y a futuro cercano serán desarrollados en el siguiente punto.



2.8 Escenarios de cambio climático por la zona de estudio a 2050

Para establecer escenarios de cambio climático de la zona de estudio se ha considerado que el escenario **B1** del modelo **CNRM CM3**(WCRP CMIP3) comparado con salidas del ECHAM4 para el escenario A2(Seiler, 2009), proyectan variaciones de precipitación anual más consistentes al análisis de tendencias en estaciones regionales.

Entonces el escenario **B1** del modelo **CNRM CM3** (WCRP CMIP3) será adoptado como el **escenario probable** para la **variación de precipitación anual, y la variación mensual** será adoptada de este mismo escenario.

Para la **variación de temperatura media anual y mensual** en la región de estudio, se ha adoptado el escenario **B1** del modelo **CNRM CM3** (WCRP CMIP3). Si bien no está próximo a las tendencias de la estación central La Paz y El Alto, se ha adoptado esta debido a la influencia y efecto de Isla de Calor que se genera en la estación La Paz por encontrarse en la misma ciudad.

Se ha definido el escenario **A1B** del modelo **CNRM** (WCRP CMIP3) como el escenario húmedo, tanto para precipitación como para temperaturas medias.

No existen evidencias sustentables tanto en los GCM como en tendencias para plantear un escenario seco, por lo que se lo ha descartado. Sin embargo podría considerarse la probabilidad de que se presente un escenario seco, es decir que se presente una disminución de lluvias en el futuro.

La tabla 8 resume los escenarios adoptados para la zona de estudio.

		ESCENARIOS DE MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL	
		PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA MEDIA
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	PROBABLE	CNRM CM3 (B1) (WCRP CMIP3)	CNRM CM3 (B1) (WCRP CMIP3)
	HÚMEDO	CNRM CM3 (A 1 B) (WCRP CMIP3)	CNRM CM3 (A 1 B) (WCRP CMIP3)

Tabla 8: Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura media para la zona de estudio en base a las salidas de los GCM's CNRM

(Fuente: *Elaboración propia*)

Se ha calculado la variación mensual y anual de las simulaciones de las variables precipitación y temperatura media sobre 75 años del **GCM CNRM3 (WCRP CM3)**, es decir 1975 a 2050 (2040-2060 respecto a 1960-1990) para los diferentes escenarios adoptados (*tablas 9 y 10*), usando una interpolación lineal, debido a que no se conoce la evolución temporal de estas variaciones. Cabe recalcar que no se han considerado en ningún caso las proyecciones realizadas de las tendencias regionales.



ESCEANRIO DEL GCM IPCC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO HIDRO
CNRM CM3 (B 1)	0.16	0.12	0.18	0.19	-0.02	0.01	-0.28	-0.25	0.03	0.13	0.09	0.13	0.11
CNRM CM3 (A 1 B)	0.20	0.35	0.22	0.35	-0.07	0.02	-0.07	-0.06	-0.01	0.11	0.16	0.07	0.17

Tabla 9: Variación mensual y anual de la precipitación [%/año] para (2040-2060) respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático
(Fuente: Elaboración propia)

ESCEANRIO DEL GCM IPCC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO HIDRO
CNRM CM3 (B 1)	0.027	0.027	0.024	0.024	0.022	0.021	0.023	0.026	0.032	0.026	0.028	0.029	0.026
CNRM CM3 (A 1 B)	0.039	0.037	0.035	0.034	0.031	0.032	0.032	0.040	0.044	0.039	0.039	0.040	0.037

Tabla 10: Variación mensual y anual de la temperatura media [°C/año] para (2040-2060) respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático
(Fuente: Elaboración propia)

Las tablas 11 y 12 muestran las variaciones intermensuales de temperatura media y precipitación para los escenarios de cambio climático, obtenidas de la multiplicación de las tablas 9 y 10 por 75 años, que corresponde a la proyección a 2050 respecto a 1975 (1960-1990).

ESCEANRIO DEL GCM IPCC	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	AÑO HIDRO
CNRM CM3 (B 1)	2.1	9.9	6.9	10.0	12.3	8.7	13.6	14.1	-1.1	0.7	-21.1	-18.9	8.4
CNRM CM3 (A 1 B)	-0.4	7.9	11.7	5.4	15.2	26.6	16.7	26.0	-5.5	1.7	-5.2	-4.7	12.9

Tabla 11: Variación mensual y anual de la precipitación [%] para 2050 respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático
(Fuente: Elaboración propia)

ESCEANRIO DEL GCM IPCC	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	AÑO HIDRO
CNRM CM3 (B 1)	2.4	2.0	2.1	2.2	2.0	2.1	1.8	1.8	1.6	1.6	1.7	2.0	1.9
CNRM CM3 (A 1 B)	3.3	2.9	2.9	3.0	2.9	2.8	2.6	2.6	2.3	2.4	2.4	3.0	2.8

Tabla 12: Variación mensual y anual de la temperatura media [°C] para 2050 respecto a (1960-1990) según las salidas de los GCM's para los escenarios de cambio climático
(Fuente: Elaboración propia)



Las condiciones futuras a 2050 son favorables desde el punto de vista que se esperan altos escurrimientos debido al incremento de temperaturas, lluvias y pérdida de la masa glacial, nival por fusión.

Con el objeto de plantear alguna condición desfavorable para los recursos hídricos de la cuenca del río Sajhuaya se ha investigado sobre corridas o simulaciones del modelo hidrogliaciológico bajo condiciones de pérdida en superficie de cobertura glacial y nival. Se ha definido que el escenario **B1** del modelo **CNRM CM3** (WCRP CMIP3) para las variaciones de lluvia y temperatura con reducción de cobertura glacial constante para la serie simulada en las subcuencas cabeceras de Jalancha Y Khapi hasta alcanzar un **20%** del área para cada zona altitudinal. Esto implica que las áreas de las subcuencas **Jalancha 6.32 km²** (con 91% cobertura glacial) y **Khapi 2.24 km²** (con 92% de cobertura glacial) se reducen drásticamente hasta alcanzar una cobertura glacial en **Jalancha de 1.040 km² (16 %)** y en **Khapi de 0.408 km² (18 %)**. Cabe recalcar que este escenario se da para una reducción drástica del glacial que no se conoce ni se puede estimar para cuando o que año aproximadamente se presentaría este escenario.

3 CONCLUSIONES

3.2 Escenarios de cambio climático regionales

Se han evaluado los escenarios proyectados por las simulaciones de modelos de circulación general (GCMs) para las precipitaciones y temperaturas medias a nivel mensual y anual. Se ha establecido que el modelo francés **CNRM CM3** con downscaling estadístico **WCRP CMPI3** con resolución de 50 km x 50 km presenta proyecciones consistentes y factibles respecto a las tendencias en estaciones meteorológicas de la región.

3.2.1 Temperatura media

El escenario más probable es el **B1** que implica una emisión baja de gases de efecto invernadero (CO₂). A nivel anual se proyecta un incremento hasta **1.9 °C** para el año **2050** respecto al periodo 1960-1990. Para los escenarios A1B y A2 que implican tasas media y alta de emisión de CO₂ proyectan incrementos en temperatura de hasta 2.5°C a nivel anual.

A nivel mensual los incrementos para el año **2050** más bajos corresponden al escenario **B1**; para los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, abril los incrementos están entre **1.5 y 2.0°C**; para septiembre se tiene incrementos hasta **2.9°C**; para marzo, junio y julio los incrementos son de **1.3°C**.

Los incrementos para escenarios **A1B** y **A2** para el año **2050** a nivel mensual varían entre **2.0 y 3.5°C**, con incrementos máximos en los meses de septiembre y agosto, y los más bajos en marzo, mayo, junio y julio.



3.2.2 Precipitación.

Se ha definido que el escenario más probable para cambios en la precipitación es el **B1** (baja emisión de CO₂). Se proyecta un incremento de lluvias a nivel anual hasta del **16%** para el año **2050** respecto al periodo 1960-1990. El escenario **A2** proyecta un incremento de **15%** y el escenario **A1B** de hasta **21%**.

Para el escenario **B1**, las proyecciones a **2050** a nivel mensual indican incrementos de lluvia para los meses entre octubre y junio varían entre **10** y **25%**, y para los meses de julio, agosto y septiembre se tienen decrementos entre **10%** y **30%**.

3.2.3 Glaciar reducido

Se ha definido la condición desfavorable para los recursos hídricos de la cuenca del río Sajhuaya. Esta condición es la pérdida drástica de cobertura glacial y nival. Sobre el escenario **B1** del modelo **CNRM CM3** (WCRP CMIP3) para las variaciones de lluvia y temperatura se ha definido la cobertura glacial constante para la serie simulada en las subcuencas cabeceras de Jalancha Y Khapi hasta alcanzar el **20%** del área para cada zona altitudinal. Esto implica que las áreas de las subcuencas **Jalancha 6.32 km²** (con 91% cobertura glacial) y **Khapi 2.24 km²** (con 92% de cobertura glacial) se reducen drásticamente hasta alcanzar una cobertura glacial en **Jalancha de 1.040 km² (16 %)** y en **Khapi de 0.408 km² (18 %)**. Cabe recalcar que este escenario se da para una reducción drástica del glaciar que no se conoce ni se puede estimar para cuando o que año aproximadamente se presentaría este escenario.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade M. & Blacutt L. 2010. Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: Comparación con datos de superficie. Revista Boliviana de Física. La Paz – Bolivia
- AR4, IPCC. 2007. Fourth assessment report Climate Change. Intergovernmental Panel On climate Change.
- Espinoza D., 2011. Informe Final “Estudio Hidroclimático para la región del Chaco Boliviano”. Centro de Apoyo a la Gestión Sustentable de Agua y Medio Ambiente. Proyecto Promoción de la Gobernación y Ejercicio Pleno del Derecho al Agua. La Paz - Bolivia
- Espinoza J.C., 2010. Documentos Seminario Taller Internacional de Climatología “Que modelo de clima utilizar en la región tropical de Sudamérica para estudios de impacto ambiental”, Quito-Ecuador
- Espinoza J.C, Boulanger J.P., Lengaigne M., Ronchail J., Rust H., Vrac M., 2009. Evaluación de la capacidad de los modelos del IPCC en reproducir tipos de tiempos en Sudamérica tropical. III ORE HYBAM. Tabinga - Leticia.
- Espinoza J.C., Lengaigne M., Ronchail J., Serge J, 2010. Large-scale circulation patterns and related rainfall in the Amazon Basin: a Neuronal Networks approach.
- IPCC. 2007. Fourth assessment report Climate Change. Intergovernmental Panel On climate Change.
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor. 2007. Climate Models and Their Evaluation. In: 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
- Seiler C. 2009. Implementación y validación de un modelo climático regional para Bolivia. Fundación amigos de la Naturaleza (Fan-Bolivia)
- TAR, IPCC. 2001. Third assessment report Climate Change. Intergovernmental Panel On climate Change.



REFERENCIAS Web

<http://ccr.aos.wisc.edu/model/ipcc10min/futclimateinfo.html>

<http://ccr.aos.wisc.edu/publications/pdfs/globaldownscale.pdf>

http://es.wikipedia.org/wiki/Isla_de_calor

http://sres.ciesin.org/final_data.html

<http://www.cru.uea.ac.uk/>

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrq/>

http://www.engr.scu.edu/~emaurer/global_data/

<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/091.htm>

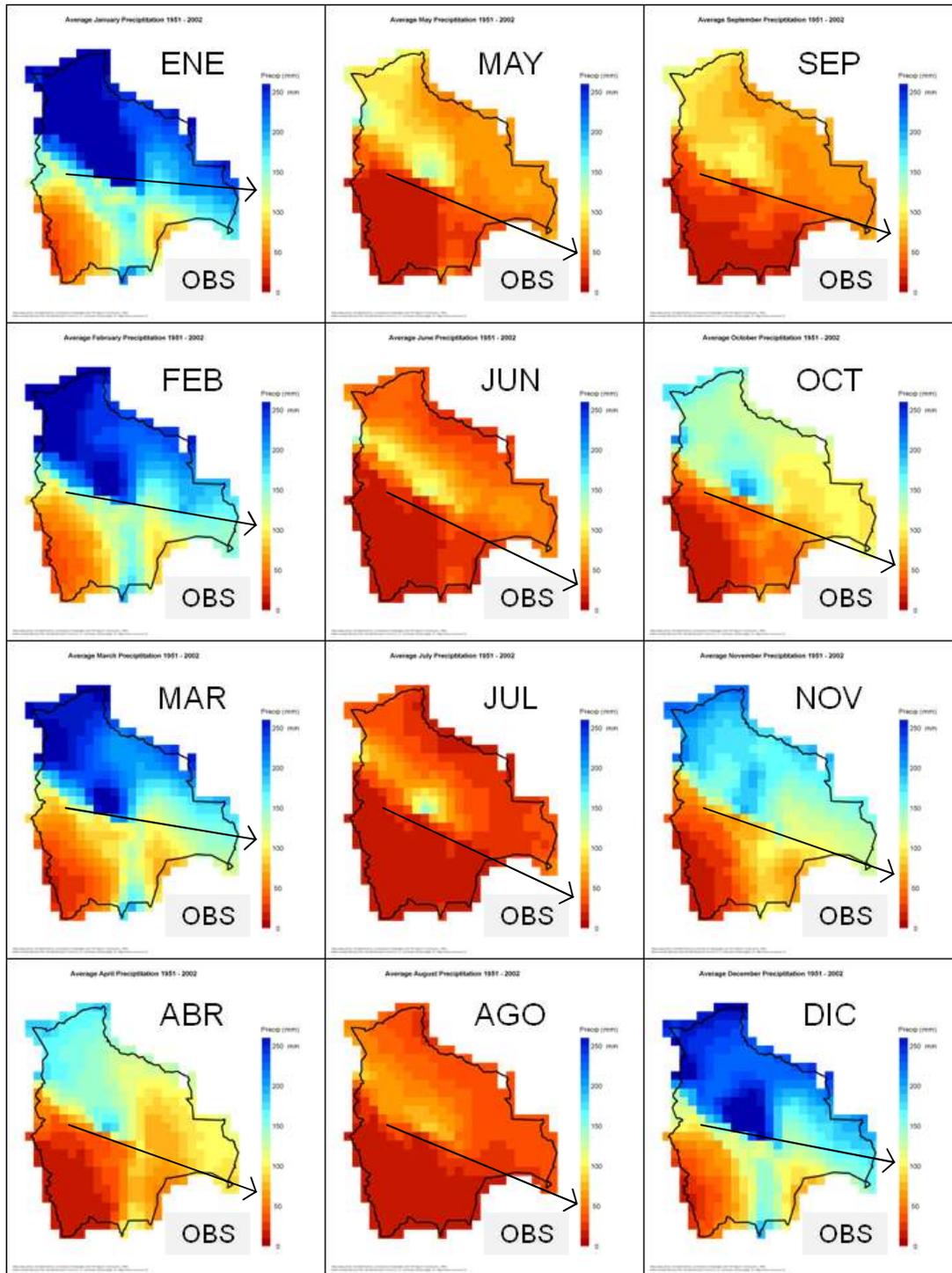
http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/091.htm

<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=81>

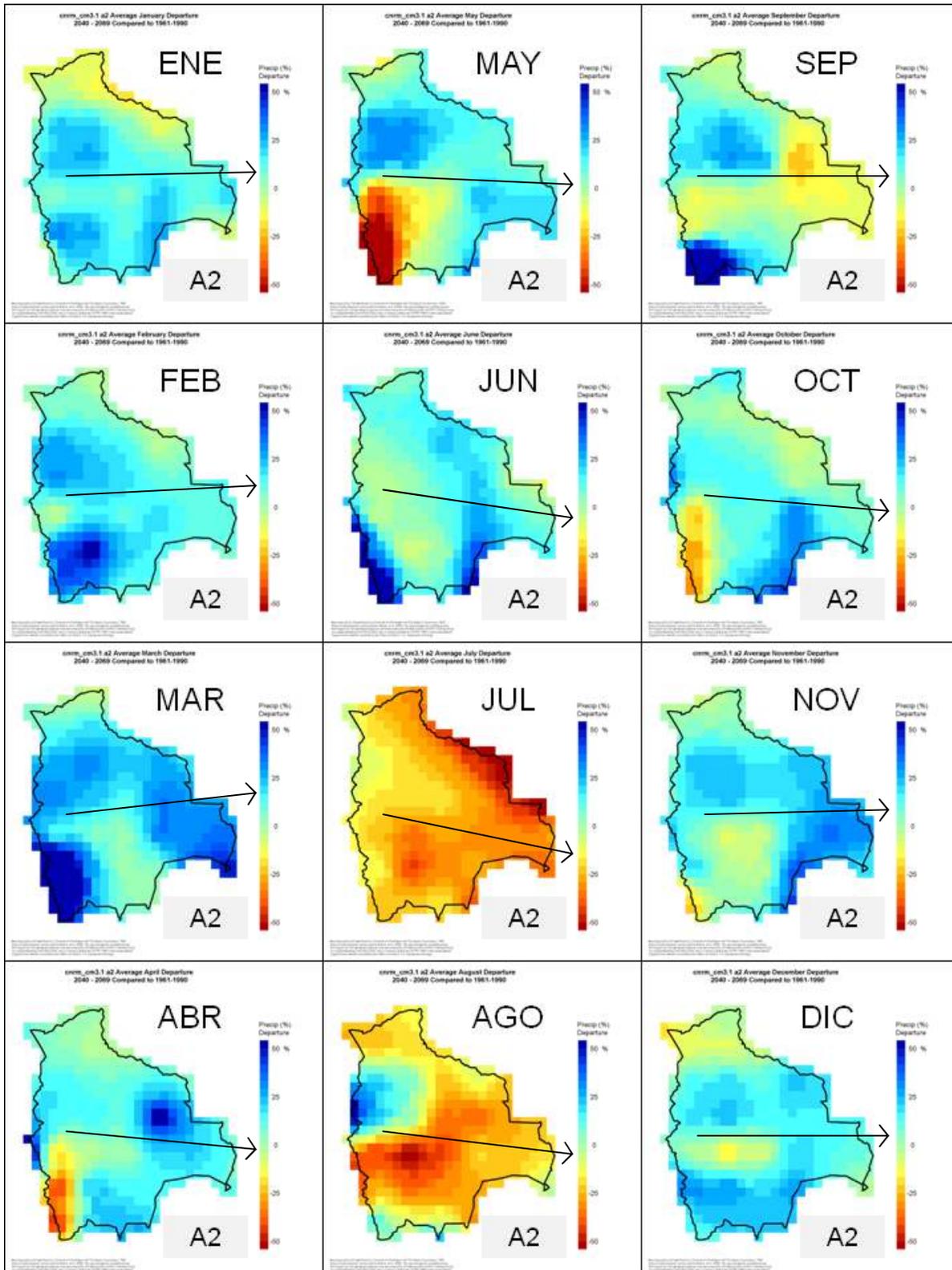


ANEXOS

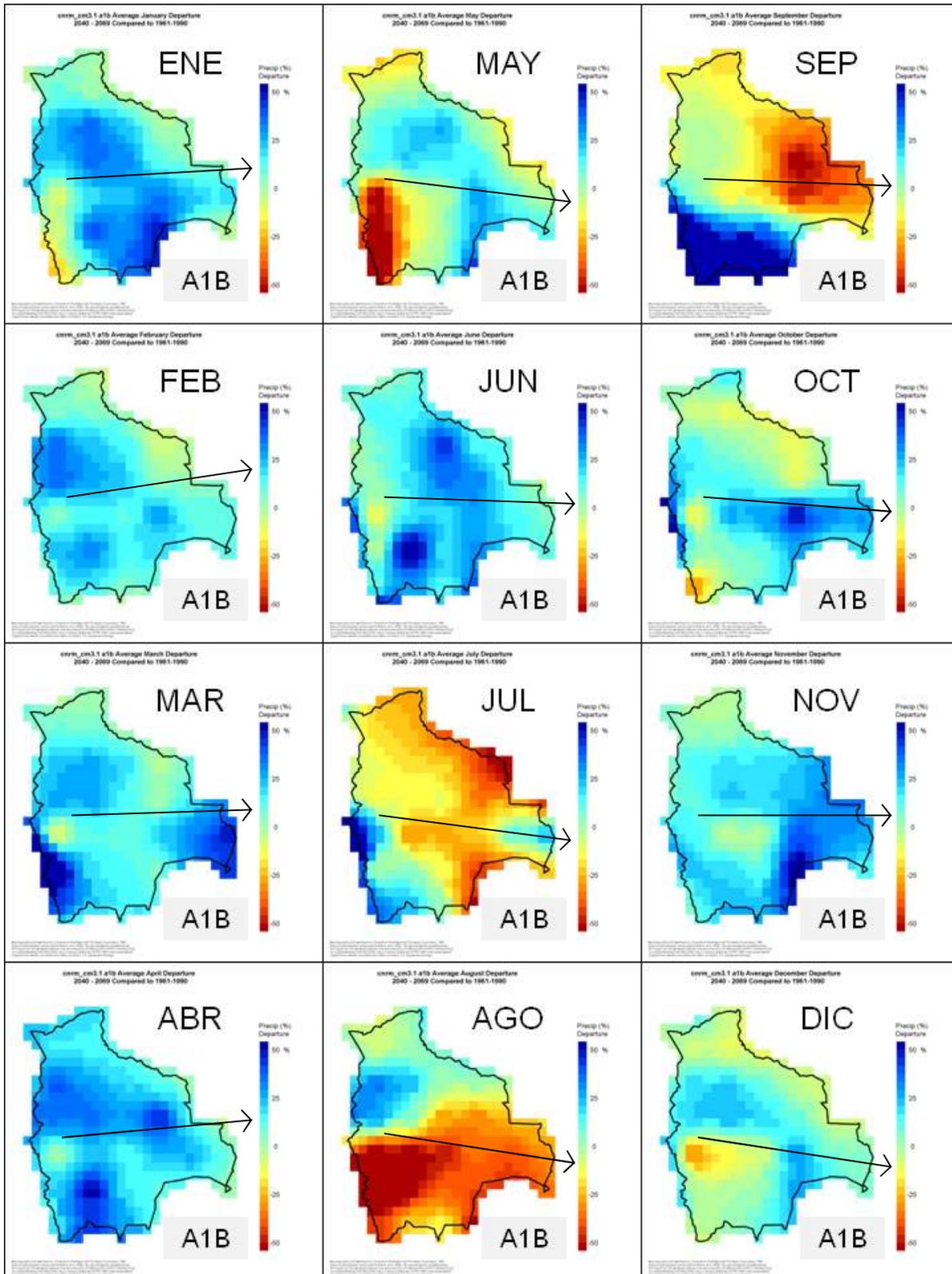
A-01 Mapas de precipitación mensual (1951-2002) y variación de la precipitación mensual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1



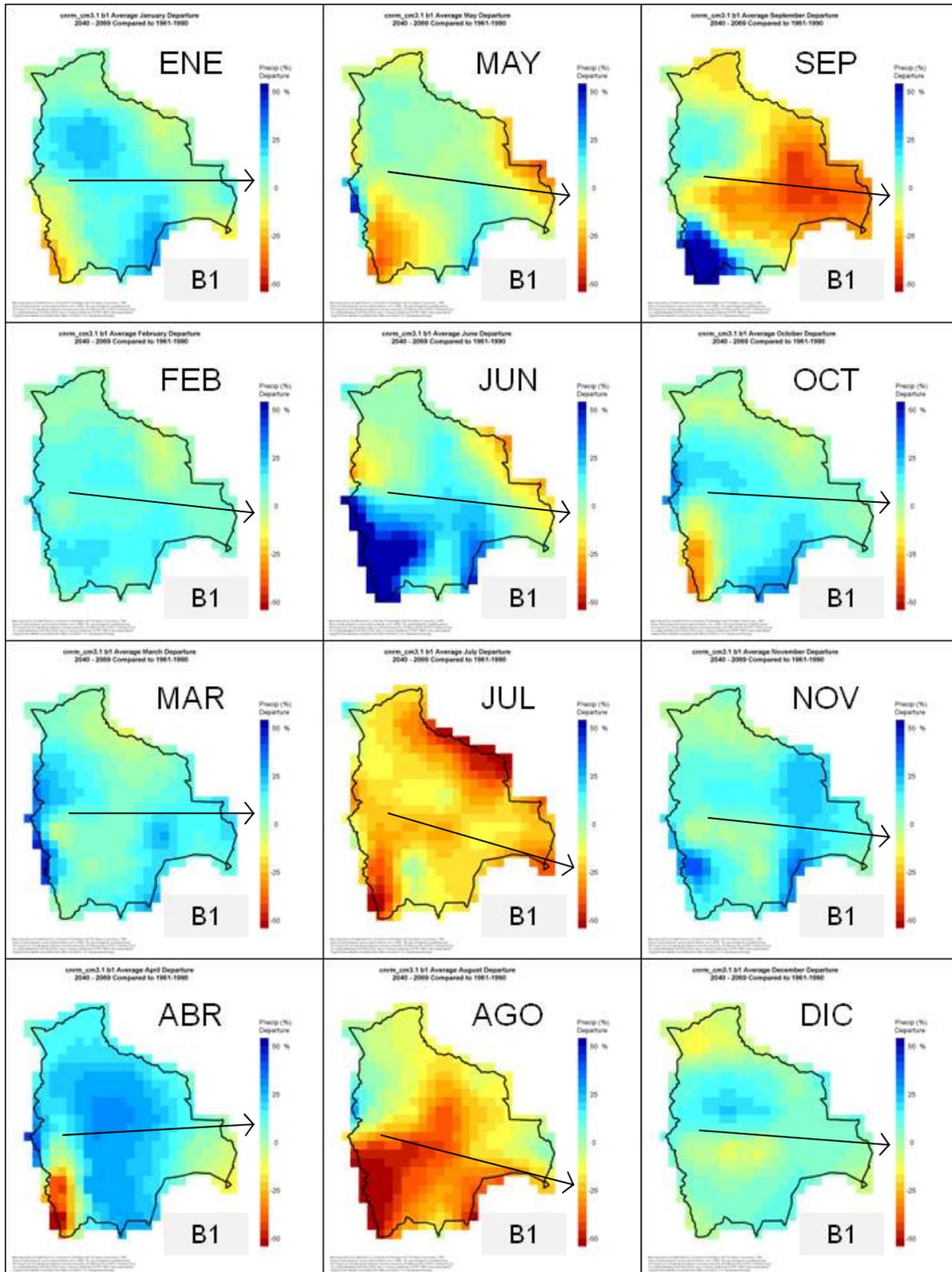
Precipitación mensual 1961-1990



Variación de la precipitación mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario A2 del GCM CNRM CM 3.1



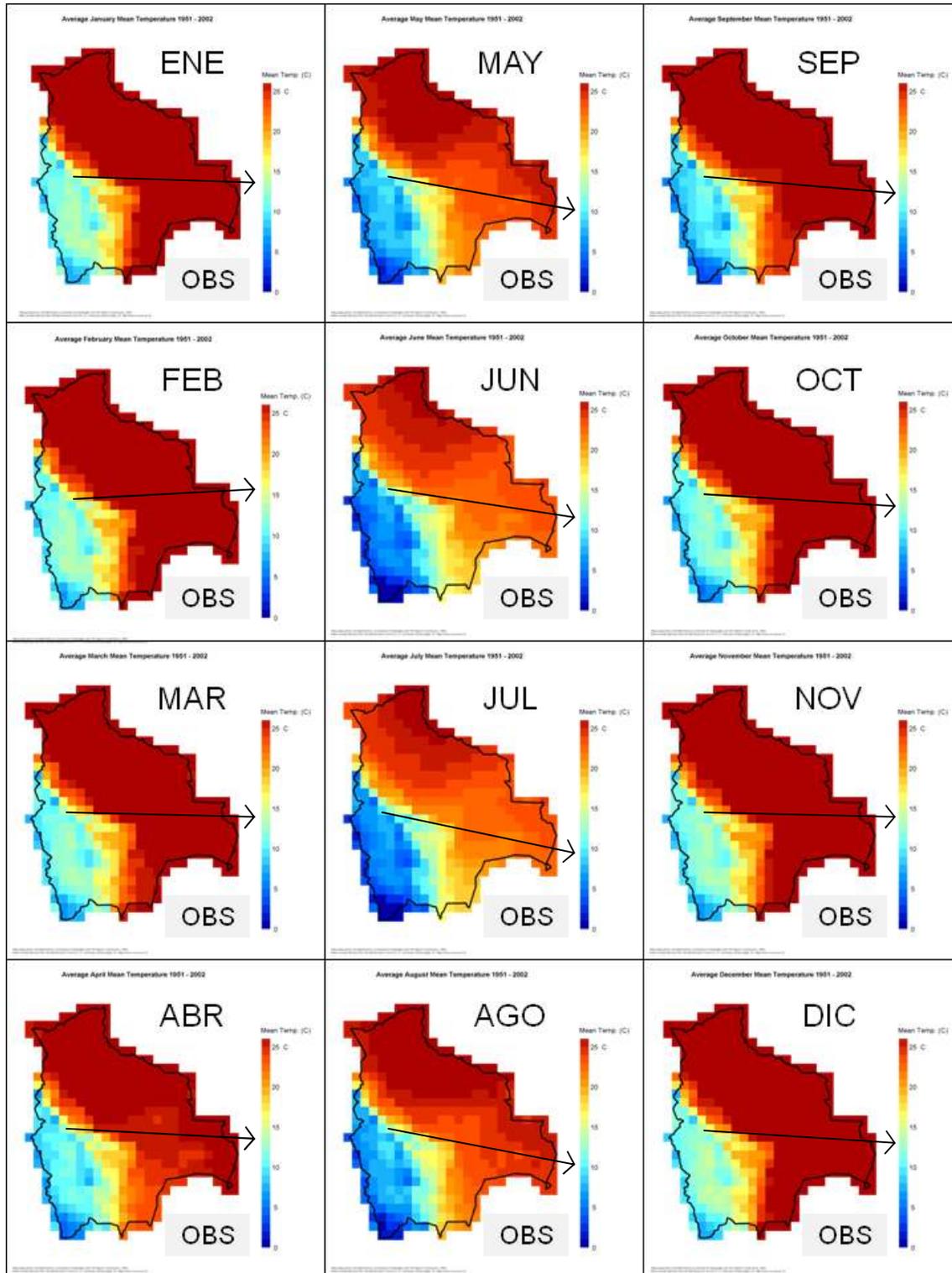
Variación de la precipitación mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario A1B del GCM CNRM CM 3.1



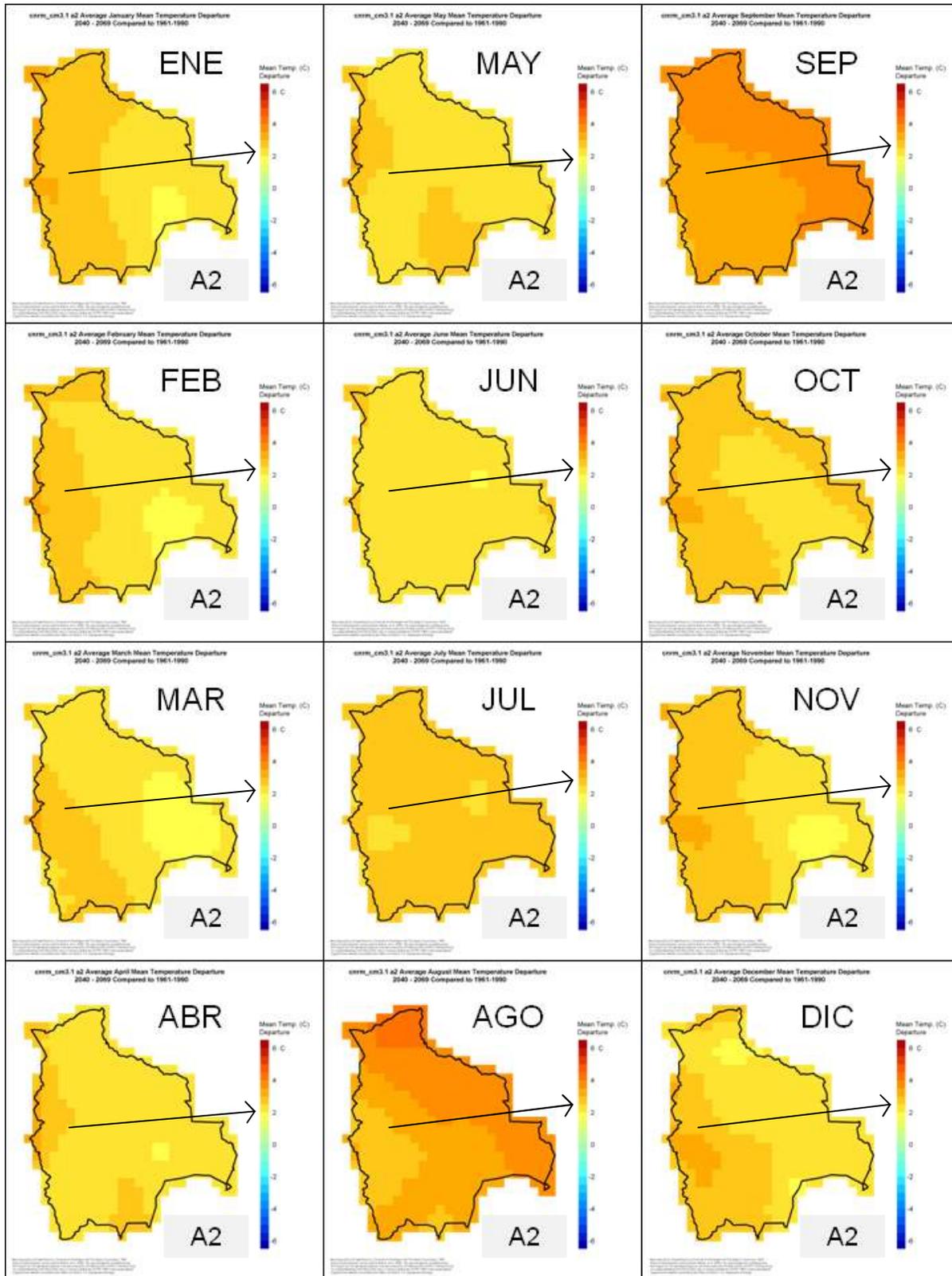
Variación de la precipitación mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario B1 del GCM CNRM CM 3.1



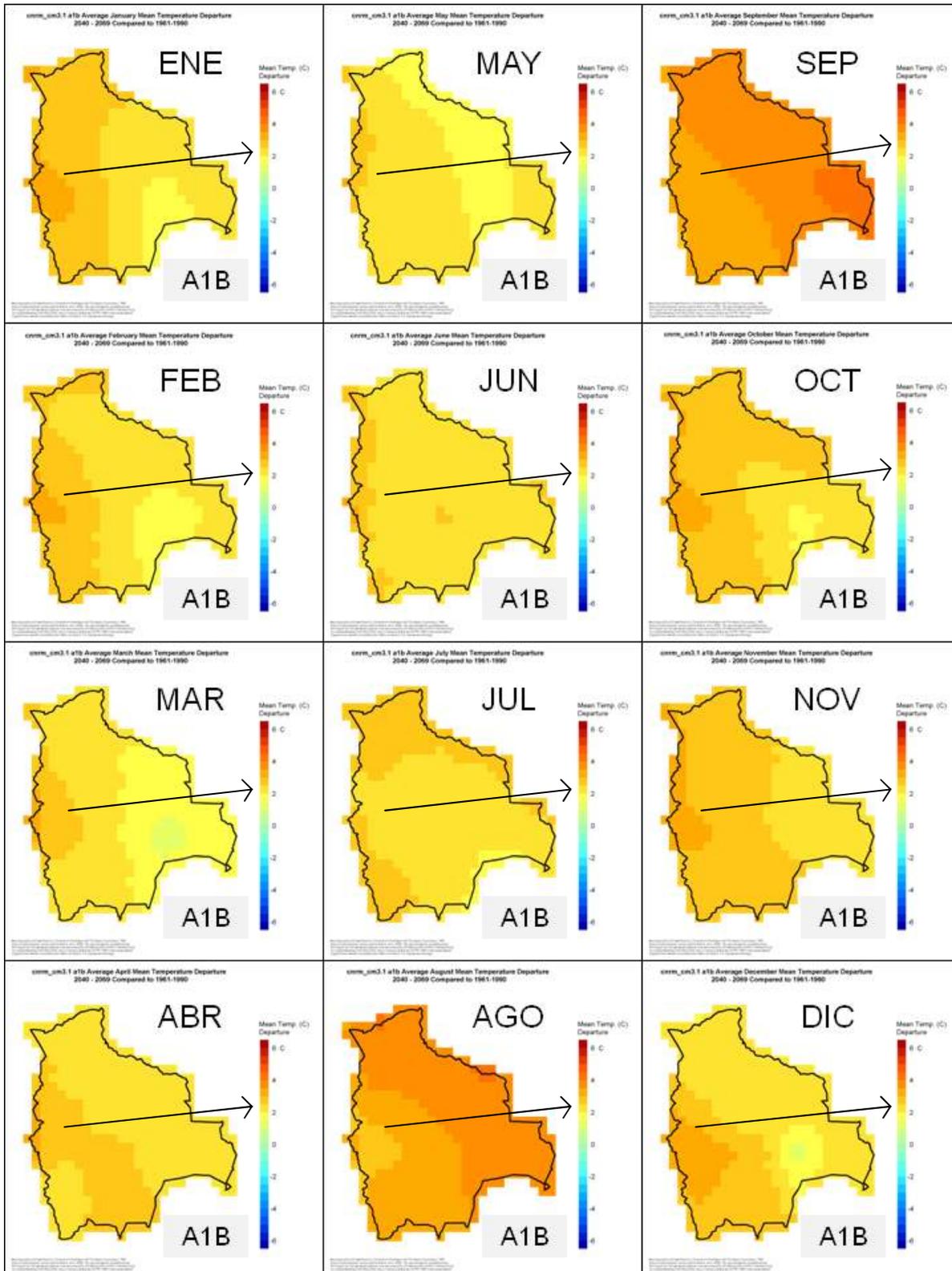
A-02 Mapas de temperatura media mensual (1951-2002) y cambio de la temperatura media mensual (2040-2069) respecto a (1961-1990) para escenarios de Cambio Climático del WCRP CMIP3 (0.5° ó 50 km) del GCM CNRM CM 3.1



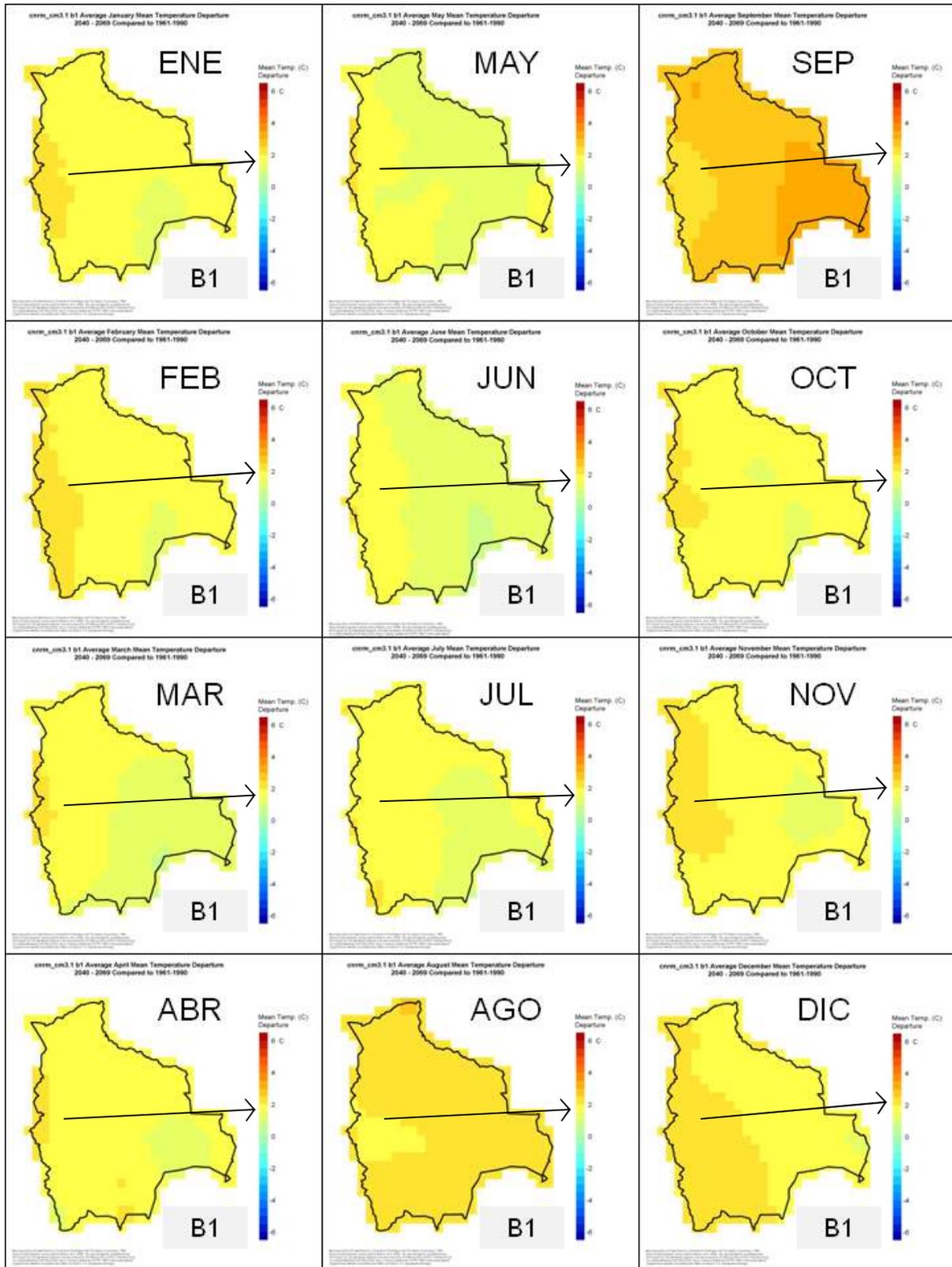
Temperatura media mensual 1951-2002



Cambio de la Temperatura media mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario A2 del GCM CNRM CM 3.1



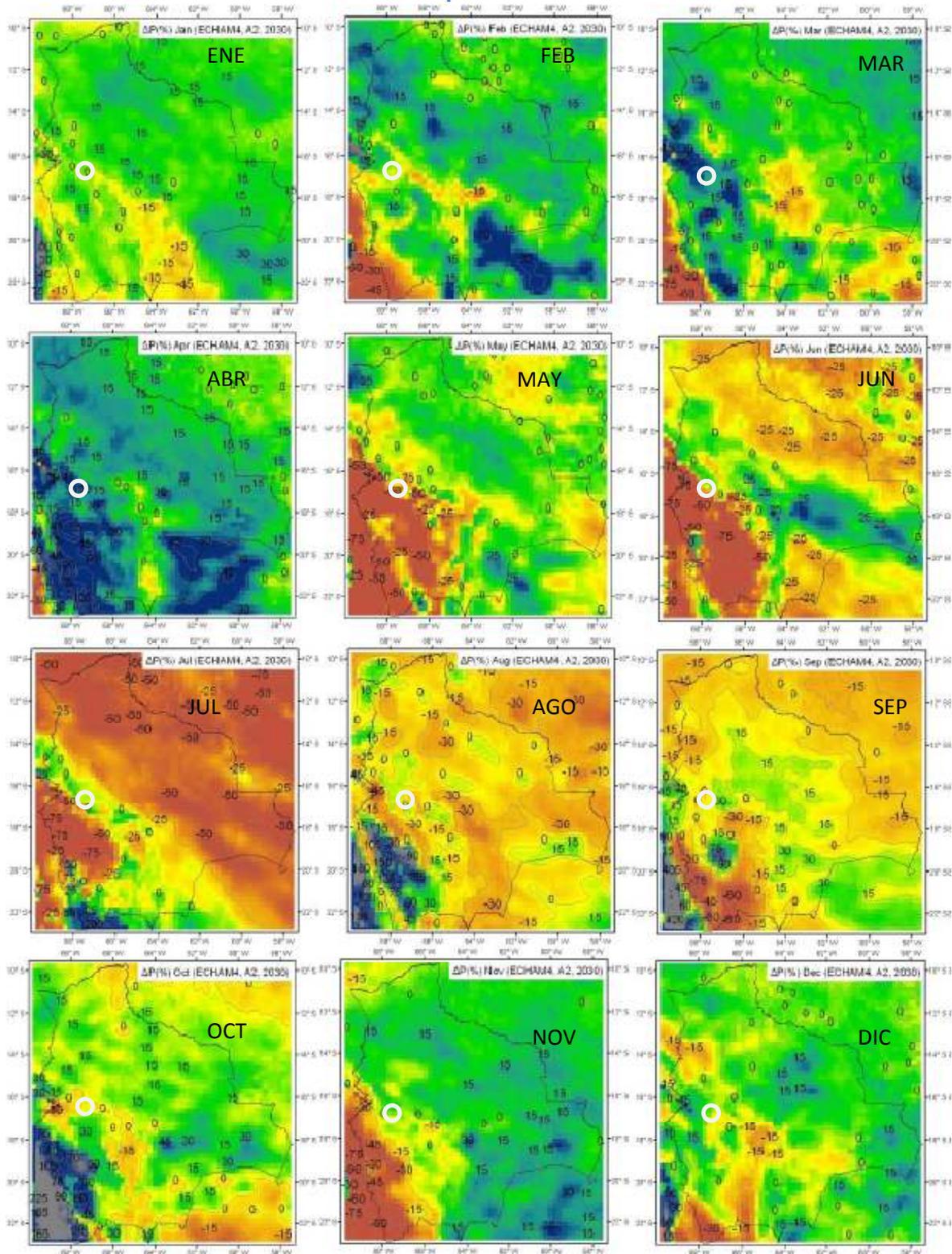
Cambio de la Temperatura media mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario A1B del GCM CNRM CM 3.1



Cambio de la Temperatura media mensual 2040 – 2069 respecto a 1961 – 1990 Escenario B1 del GCM CNRM CM 3.1



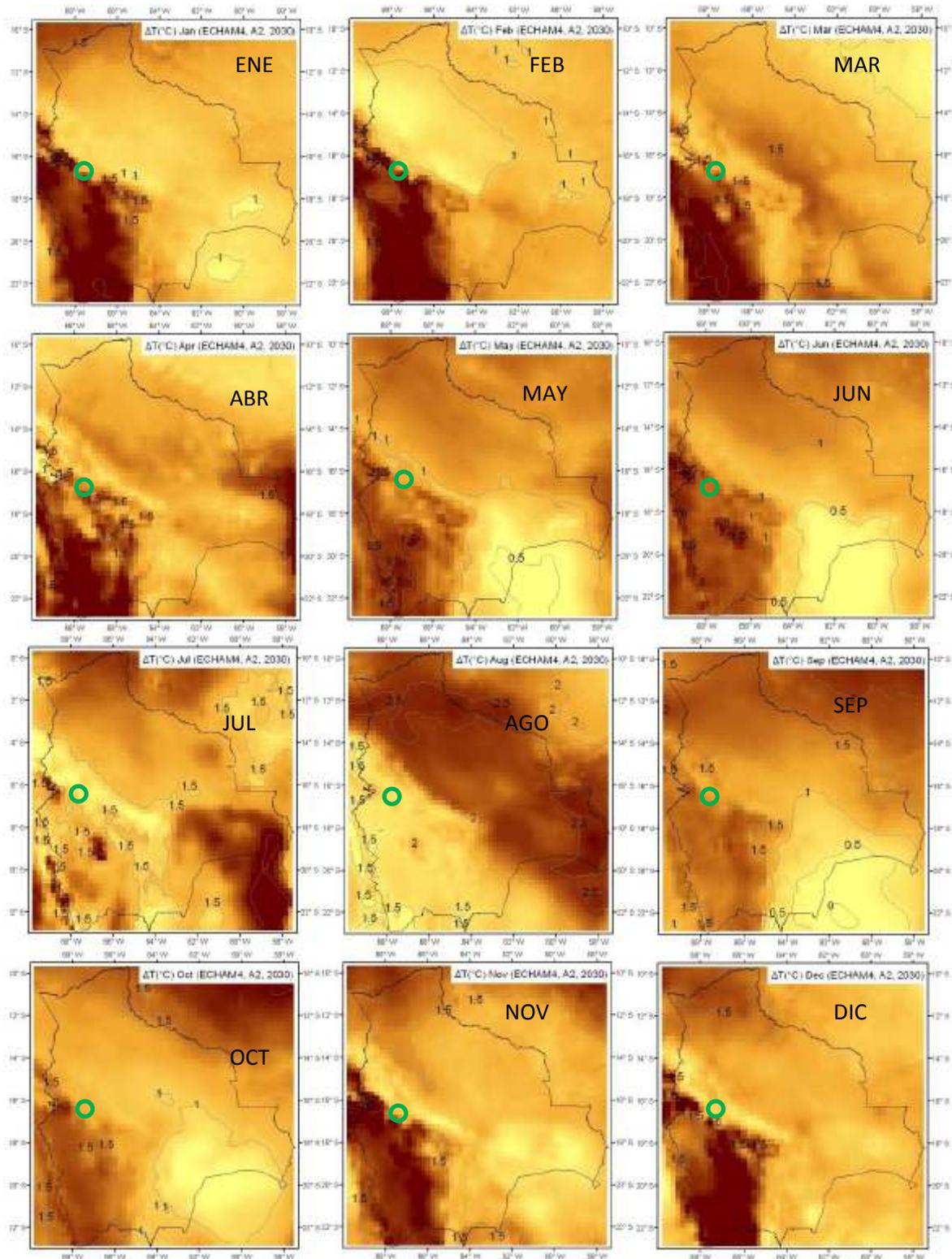
A-03 Mapas de variación de precipitación mensual para el periodo 2001-2030 del modelo ECHAM 4 para el escenario A2



(Fuente: Seiler C., 2009)



A-04 Mapas de variación de temperaturas media mensual para el periodo 2001-2030 del modelo ECHAM 4 para el escenario A2



(Fuente: Seiler C., 2009)