



Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro para el año 2100

RESUMEN TÉCNICO



GEF



Banco Mundial



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Higiología - SENAMHI



ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO MANTARO PARA EL AÑO 2100

Autor: SENAMHI

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
Centro de Predicción Numérica – CPN

Año: 2009

El presente estudio se realizó en el año 2007, como parte de la fase de preparación del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), el cual es implementado en Bolivia, Ecuador y Perú con financiamiento del Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF) a través del Banco Mundial, coordinado por la Secretaría General de la Comunidad Andina e implementado en el Perú por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

Ministerio del Ambiente – MINAM

Av. Javier Prado Oeste 1440, San Isidro, Lima.
Teléfono: (511) 6116000
<http://www.minam.gob.pe>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)

Jr. Cahuiide 785 Jesús María
Teléfonos: (51 – 1) 6141414 (central) y 6141408 (CPN)
<http://www.senamhi.gob.pe>

Diseño: Q&P Impresores
Ricardo Eslava Escobar

Impresión: Omega Representaciones y Servicios S.R.L.
Av. Francisco Pizarro # 544 - Int. "J" - Rimac

Primera Edición: Marzo 2010

Tiraje: 400 Ejemplares

El contenido de este documento puede ser reproducido mencionando la fuente o con autorización del autor.

Fotos: Prom Perú.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro para el año 2100

Resumen Técnico

Ministro del Ambiente

Antonio Brack Egg

Viceministra de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales

Rosario Gómez Gamarra

Director General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos

Eduardo Durand López-Hurtado

Especialista Técnico Nacional PRAA

Ana Iju Fukushima

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Presidente Ejecutivo

May. General FAP (r) Wilar Gamarra Molina

Directora Científica

Dra. Elizabeth Silvestre Espinoza

Directora General de Meteorología

Ing. Amelia Díaz Pabló

EQUIPO TÉCNICO SENAMHI

Autores:	Grinia Avalos - Responsable Amelia Díaz Clara Oria Luis Metzger Delia Acuña
Coordinación local:	Gabriela Rosas
Apoyo en programación: Especialista analista SIG: Consultas técnicas:	Gerardo Jácome Elizabeth Herrera Marcia Valdez Wilfredo Yzarra Juan Carlos Huamaní Nelson Quispe Héctor Vera Félix Cubas
Soporte computacional:	Richard Miguel San Martín
Recopilación:	Jorge Dávila
Edición:	Grinia Avalos, Jorge Dávila, Dante Bracamonte, Rusbel Galán.

PRESENTACIÓN

El Ministerio del Ambiente (MINAM) es el organismo del Poder Ejecutivo rector del sector ambiental, que desarrolla, dirige, supervisa y ejecuta la política nacional del ambiente, siendo el punto focal en el Perú de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés). La Estrategia Nacional de Cambio Climático aprobada por D.S. 086-2003-PCM, fue desarrollada de manera multisectorial y representa el alto nivel de prioridad que el país confiere a los serios retos y amenazas que representa el cambio climático en el Perú.

En este contexto y gracias al aporte del Special Climate Change Fund del Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF), a través del Banco Mundial, el CONAM (fusionado actualmente al Ministerio del Ambiente), coordinó la fase de preparación del Proyecto Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), el cual tiene como objetivo principal la implementación de medidas piloto de adaptación al cambio climático, para las comunidades que viven en valles que se surten de agua a partir de cuatro glaciares tropicales selectos en Bolivia, Ecuador y Perú.

Como parte de las actividades de la fase de preparación del proyecto, se priorizaron dos áreas de intervención en el Perú: la Subcuenca del Shullcas perteneciente a la Cuenca del Mantaro en la región Junín, que es alimentada por el nevado Huaytapallana, y la Subcuenca de Santa Teresa perteneciente a la Cuenca del Vilcanota-Urubamba en la región Cusco, que es alimentada por el nevado Salkantay. Con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre las condiciones climáticas actuales y futuras se desarrollaron escenarios de cambio climático para ambas cuencas.

El desarrollo de los escenarios de cambio climático fue encargado al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), dada su especialización y experiencia en la observación y análisis de variables climáticas a nivel nacional y regional. Los escenarios fueron desarrollados en base al Modelo Japonés de Alta Resolución, procesado en el supercomputador más veloz del mundo para cuando se hizo este experimento, "el Simulador de la Tierra o Earth Simulator", con el apoyo de los científicos del Meteorological Research Institute de Japón. Los resultados de este trabajo aparecen en el presente documento.

El Ministerio del Ambiente expresa su felicitación al equipo técnico-científico del SENAMHI por los muy buenos resultados del trabajo encomendado, el cual se constituye en una herramienta indispensable para asegurar un proceso coherente de planificación del desarrollo regional, incorporando al mismo los impactos del cambio climático.

Antonio Brack Egg
Ministro del Ambiente

AGRADECIMIENTOS



Al Banco Mundial en las personas de Walter Vergara, Alejandro Deeb y Alfred Grunwaldt

Al Meteorological Research Institute - MRI de Japón, en las personas de Hiroki Kondo, Manabu Komiya, Akira Noda, Shoji Kusunoki, Ryo Mizuta por su permanente apoyo técnico.

Al Ministerio del Ambiente (MINAM)

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	3
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	7
1. Alcance y estructura de este informe	8
1.1 Tendencias actuales y futuras del clima global	8
1.1.1 Tendencia actual del clima global	8
1.1.1.1 Temperatura global	8
1.1.1.2 Nivel del mar	8
1.1.2 Tendencias futuras del clima global	9
1.1.2.1 Temperatura global del aire	9
1.1.2.2 Nivel y temperatura superficial del mar	9
CAPÍTULO 2	
LA CUENCA DEL RÍO MANTARO	
2.1 Ubicación y características geográficas	10
2.1.1 Recurso hídrico	10
2.1.2 El río Shullcas	11
CAPÍTULO 3	
DIAGNÓSTICO CLIMÁTICO DE LA CUENCA	
3.1 Sistemas atmosféricos predominantes durante el periodo lluvioso	12
3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del Río Mantaro	12
3.3 Clasificación climática de la cuenca	14
3.4 Climatología de la cuenca	15
3.4.1 Precipitación	15
3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación	15
3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación	16
3.4.2 Temperatura máxima	16
3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima	16
3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima	18
3.4.3 Temperatura mínima	19
3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima	19
3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima	20
3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas	20
3.5.1 Heladas	20
3.5.2 Periodos secos	21
3.5.3 Periodos húmedos	24
3.5.4 ENOS	24

3.6 Tendencias climáticas observadas	27
3.6.1 Tendencias promedio de las precipitaciones observadas	27
3.6.1.1 Tendencia anual	27
3.6.1.2 Tendencias estacionales	27
3.6.2 Tendencias promedio de la temperatura máxima	28
3.6.2.1 Tendencia anual	28
3.6.2.2 Tendencias estacionales	28
3.6.3 Tendencias promedio de la temperatura mínima	29
3.6.3.1 Tendencia anual	30
3.6.3.2 Tendencias estacionales	30
3.7 Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático	30
3.7.1 Precipitación	30
3.7.2 Temperatura	32
CAPÍTULO 4	
ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA	
4.1 El modelo y el experimento del Time-Slice	35
4.1.1 El modelo	35
4.1.2 El experimento del Time-Slice	36
4.2 Escenarios climáticos en la Cuenca del Río Mantaro	36
4.2.1 Escenarios proyectados	37
4.2.1.1 Temperatura máxima	37
4.2.1.2 Temperatura mínima	39
4.2.1.3 Precipitación	43
4.3 Proyecciones del caudal del río Mantaroal año 2035	46
RESUMEN Y CONCLUSIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	50
CONCEPTOS Y TÉRMINOS BÁSICOS	53

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

*“En los últimos cien años (1906-2005)
la temperatura mundial se ha incrementado
en 0,74 °C, IPCC (2007)”.*

El Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), financiado por el Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF) mediante el Banco Mundial, implementado en el Perú por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y contando con el apoyo de instituciones científicas especialistas en cambio climático del Perú, Ecuador y Bolivia, realizó su fase de preparación, desde finales del 2006 a diciembre del 2007, durante la cual se desarrollaron diversos estudios que constituyeron la línea de base del proyecto.

En el Perú, el SENAMHI fue designado para determinar escenarios climáticos futuros en las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba, ambas con componente glaciar, considerando la experiencia desarrollada en la realización de este tipo de estudios sobre cambio climático en las cuencas de los ríos Santa y Piura (PROCLIM, 2005). Dichos estudios sirvieron de base científica para la caracterización de vulnerabilidades e identificación de oportunidades, constituyéndose en información importante para la toma de decisiones y la planificación futura de las diversas actividades económicas de las cuencas.

Alcance y estructura del informe

En el presente documento se presentan los resultados de la tendencia y extremos climáticos observados en la Cuenca del Mantaro; así como los escenarios futuros de la temperatura y precipitación para finales del Siglo XXI. Para un mejor entendimiento del presente documento, éste ha sido estructurado de la siguiente manera:

Los Capítulos 1 y 2 abordan tópicos sobre las tendencias actuales del clima a nivel global basados en el último informe científico del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (AR4, 2007) y generalidades socioeconómicas de la cuenca de interés.

En el Capítulo 3 se realiza un análisis diagnóstico de las series históricas de la temperatura y la precipitación con la finalidad de conocer las manifestaciones del clima en la cuenca y estimar los extremos climáticos en esa región, para lo cual se ha empleado el RCLIMDEX, software desarrollado en la Universidad de East Anglia, del Reino Unido. Este capítulo incluye también un análisis de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (sequías, heladas y ENOS) en los últimos cuarenta años.

El Capítulo 4 se refiere a los escenarios futuros del clima estacional (2099-2100) en la Cuenca del Río Mantaro, elaborado en base a las salidas del Modelo Climático Atmosférico Global de Altísima Resolución (20 km) del Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) y la Agencia Meteorológica Japonesa (JMA). Este modelo TL959L60 fue procesado en uno de los supercomputadores más veloces del mundo, el Earth Simulator. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

El Resumen Técnico de los Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro para el año 2100, cuenca estratégica para la seguridad alimentaria y energética del país, constituye una herramienta indispensable para realizar proyecciones de los impactos potenciales socioeconómicos. Esto permitirá una adecuada planificación por parte de los tomadores de decisión, con el afán de mitigar posibles daños en la región e implementar eficientemente medidas de adaptación frente al cambio climático.

1.1 Tendencias actuales y futuras del clima global

Todo indica que existe una relación directa entre el calentamiento global y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocado, principalmente, por las sociedades industrializadas. En los siguientes párrafos se brinda al lector algunos alcances sobre las tendencias actuales y futuras del clima global, basados en el Cuarto Informe de Evaluación – AR4¹ del IPCC² (2007).

1.1.1 Tendencia actual del clima global

Muchas observaciones constatan el aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo, así como el aumento del nivel del mar. En suma, desde que las temperaturas de la superficie de la Tierra comenzaron a registrarse en 1850, once de los doce años más cálidos se han producido en los últimos doce años (1995-2006). En los últimos cien años (1906-2005), la temperatura mundial se ha incrementado en 0,74 °C y el nivel del mar aumentó en 17 cm durante el Siglo XX. El IPCC en el AR4 (2007) enfatiza que la probabilidad de que el calentamiento sea causado por procesos climáticos naturales es sólo 5%.

1.1.1.1 Temperatura global

El IPCC menciona que las recientes variaciones del clima en diversas regiones, en especial los incrementos de la temperatura, ya han afectado muchos sistemas físicos y biológicos; añade además que entre 1901 y el 2005 la temperatura ha aumentado 0,74 °C.

Según las observaciones realizadas desde 1961, el promedio global de la temperatura del océano se ha incrementado hasta en profundidades de 3 000 m; constatándose que el océano ha estado absorbiendo más del 80% del calentamiento añadido al sistema climático. Ese calentamiento causa que el agua del mar se expanda por el derretimiento del hielo de los polos, lo cual contribuye a que el nivel del mar aumente.

1.1.1.2 Nivel del mar

El nivel promedio global del nivel del mar se encuentra en una tasa de 1,8 (1,3 a 2,3) mm año⁻¹ para el periodo 1961-2003. Esta tasa fue mayor entre 1993 y el 2003, aproximadamente 3,1 (2,4 a 3,8) mm año⁻¹. Si la rápida tasa desde 1993 hasta el 2003 refleja variabilidad en décadas o un incremento en un periodo largo de tiempo, la tendencia es incierta. Hay gran certeza de que la tasa del nivel del mar observado se ha incrementado desde el Siglo XIX hasta el Siglo XX. Durante todo el Siglo XX se estima que el incremento ha sido de 0,17 (0,12 a 0,22) mm, según datos del IPCC.

1 Assessment Report 4.

2 Siglas en inglés del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

1.1.2 Tendencias futuras del clima global

El IPCC, haciendo uso de diferentes escenarios y modelos climáticos, genera proyecciones de las diferentes tendencias climáticas, mas no se pueden confundir dichas proyecciones como predicciones, pues los escenarios se basan en supuestos relacionados con la emisión del CO₂ como consecuencia de las actividades humanas en relación con su ambiente. Para esto se presentan las diferentes tendencias futuras en los siguientes aspectos:

1.1.2.1 *Temperatura global del aire*

Según el reporte especial de escenarios de emisión (SRES, Special Report on Emission Scenarios) para los próximos 20 años, se proyecta un calentamiento de aproximadamente 0,2 °C por década. Aunque los niveles de concentración de todos los GEI y aerosoles se mantuvieran constantes al año 2000 se esperaría un calentamiento de aproximadamente 0,1 °C por década, siendo el nivel máximo extremo proyectado de la temperatura a nivel global de 6,4 °C.

Asimismo, el IPCC señala que en muchos países los sistemas naturales como arrecifes de coral y atolones, glaciares, los manglares, los bosques boreales y tropicales son vulnerables al cambio climático y estima que algunos quedarán irreversiblemente dañados debido a que estos sistemas trabajan en un rango químico establecido y un cambio de estos rangos son fatales por la vulnerabilidad de éstos.

1.1.2.2 *Nivel y temperatura superficial del mar*

Según el último informe del IPCC, se estima también, que el nivel del mar subirá entre 18 y 59 cm al 2100, con umbrales de 15 a 90 cm, y se proyecta que continuará subiendo por siglos.

El calentamiento previsto reducirá la cobertura de nieve y los casquetes polares; incluso no se descarta que a finales de siglo el hielo se derrita completamente en el Polo Norte, lo que elevaría el nivel medio del mar en unos siete metros. Una de las consecuencias inmediatas del calentamiento de los océanos es el incremento de la temperatura del aire adyacente al océano, con la consecuente alteración de los patrones atmosféricos.

CAPÍTULO 2

LA CUENCA DEL RÍO MANTARO

“Sabías que el Nevado Huaytapallana ha perdido 5 km de su superficie en los últimos 10 años”³.

2.1 Ubicación y características geográficas

La Cuenca del Río Mantaro está ubicada en el centro del Perú, entre los paralelos 10°34'30" y 13°35'30" de latitud sur, y entre los meridianos 73°55'00" y 76°40'30" de longitud oeste. Tiene un área de 34 550,08 km² y su ámbito abarca parcialmente territorios de las regiones de Junín, Pasco, Huancavelica y Ayacucho. Limita al Norte con otros territorios de la región Pasco; al Este con otros territorios de las regiones Pasco, Junín y Ayacucho; al Sur con otros territorios de las regiones Ayacucho y Huancavelica; al Oeste con otros territorios de la región Huancavelica y con la región Lima. Además, en la cuenca se concentran importantes capitales de provincia como Junín, La Oroya, Jauja, Concepción, Chupaca y Huancayo en la región Junín; Cerro de Pasco en la región Pasco; Pampas, Huancavelica, Churcampa, Acobamba y Lircay en Huancavelica; además Huanta y Ayacucho en la región Ayacucho.

2.1.1 Recurso hídrico

El caudal del río Mantaro depende de las precipitaciones en toda la cuenca, del nivel del lago Junín y de las lagunas ubicadas al pie de los nevados de la Cordillera Occidental y Oriental. La presencia del río Mantaro le infiere gran importancia a la región por ser la generadora de cerca del 35% de la energía eléctrica del país; la producción agrícola del valle provee de alimentos a Lima y adicionalmente la población involucrada supera los 700 000 habitantes, por lo que es considerada como la cuenca más densamente poblada de la Sierra del Perú.

El Mantaro, luego de pasar por Huancayo, que se localiza en su margen izquierda, sigue una dirección de N-S-SE y penetra en territorio del departamento de Huancavelica, formando igualmente un valle intensamente humanizado. En Huancavelica, después de recibir por su margen derecha las aguas de su afluente el río Lircay, cambia de dirección y se desplaza en dirección SE-N-NO, formando un primer meandro encajonado, puesto que luego de formar una curva muy pronunciada sus aguas invierten nuevamente su dirección y corren NO a SE, dando origen a otra curva o meandro encajonado. En el desarrollo de los dos meandros o curvas, las aguas del Mantaro descienden aproximadamente 2 000 m, aprovechando este desnivel se ha construido la Central Hidroeléctrica del Mantaro.

Siete son en total los ríos que drenan en el Valle del Mantaro, de los cuales el Yacus, Seco, Achamayo, Shullcas y Chanchas lo hacen por la vertiente o ladera oriental, es decir, descienden desde las cumbres de la cadena montañosa orientales; mientras que el río Cunas desciende desde las cumbres de la montaña occidental. Todos estos ríos describen subcuencas de diferentes formas y características.

³ CONAM, <http://www.conam.gob.pe/cambioclimatico/pelicula/enperu.html>

2.1.2 El río Shullcas

El río Shullcas desciende por la vertiente oriental del Valle del Mantaro, desde la Cordillera Oriental de los Andes centrales del país. Es de régimen nivo-lacustre, es decir, es alimentado por los desagües de las lagunas Chuspicocha y Lazo Huntay y éstas, a su vez, por la fusión del hielo glaciar de la Cordillera de Huaytapallana, de allí que su caudal es permanente, discurriendo agua durante todo el año (los mayores caudales ocurren durante los meses de enero-marzo). La longitud del río es de 35,9 km, desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Mantaro. Sus nacientes se encuentran sobre los 4 750 msnm y su desembocadura en la confluencia con el río Mantaro se da sobre los 3 200 msnm. En la parte baja o curso inferior, esto es, en el cono de deyección del río Shullcas se emplaza el centro poblado más importante de la región central del país, nos referimos a Huancayo. Las aguas del río Shullcas constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Huancayo mediante la Planta de Tratamiento de SEDAM-Huancayo, con una dotación promedio de 400 litros por segundo; además, casi 2 mil hectáreas ubicadas en ambos márgenes del río Shullcas son atendidas a satisfacción por los cultivos instalados (INRENA, 2007).

CAPÍTULO 3

DIAGNÓSTICO CLIMÁTICO DE LA CUENCA

“Desde la década de los ochenta, el tiempo de retorno de periodos secos en la Cuenca del Mantaro se ha incrementado”.

3.1 Sistemas atmosféricos predominantes durante el periodo lluvioso

Los principales sistemas de gran escala responsables de la variabilidad de la precipitación en el Perú y, por ende, en la cuenca de interés son: la Alta de Bolivia (AB), la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS). El acoplamiento de los tres primeros asegura gran actividad convectiva en la región durante la estación de verano; mientras que la intensificación y la configuración del APS puede bloquear o facilitar el ingreso de sistemas frontales durante el invierno que a su paso también generan lluvias. El fortalecimiento y ubicación del AAS favorece la advección de aire caliente y húmedo procedentes de la hoya amazónica y que al chocar con los Andes orientales asciende por efecto orográfico, produciéndose un rápido enfriamiento de la masa de aire con lo cual se reduce, en gran parte, su capacidad de sostener la humedad inicial; esto produce fuertes precipitaciones que se extienden longitudinalmente por regiones adyacentes al este de los Andes (Avalos, 2005).

La AB (Figura N° 01 a) y ZCAS son sistemas típicos de verano y la ZCIT, APS y AAS son sistemas cuasi estacionarios con desplazamientos meridionales estacionales.

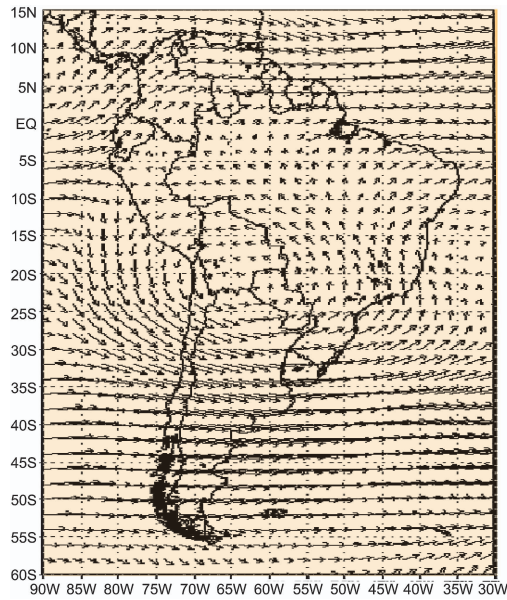
En las siguientes figuras se muestra la simulación de la posición, configuración y estacionalidad de los sistemas arriba mencionados durante el trimestre lluvioso diciembre, enero y febrero (verano Hemisferio Sur), teniendo como base la climatología del modelo japonés de alta resolución TL959L60 (20-km-mesh) MRI-JMA, con el propósito de conocer cuáles de estos sistemas son bien caracterizados por el modelo y cuáles merecen más atención; finalmente, determinar cuán confiables podrían ser las proyecciones del modelo para estudios de cambio climático.

Durante el verano del Hemisferio Sur, la intensidad promedio del APS oscila entre 1020 hPa y 1023 hPa, su centro se ubica entre los 20°-40°S, 80°-120°W aproximadamente (Satyamurty, 1999). En la Figura N° 01 c (dominio Sudamérica) se observa que el modelo simula coherentemente su variabilidad normal en términos de intensidad y ubicación del APS; inclusive, el modelo es capaz de simular correctamente el desplazamiento meridional estacional del sistema (no se muestra resultados de invierno).

3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del Río Mantaro

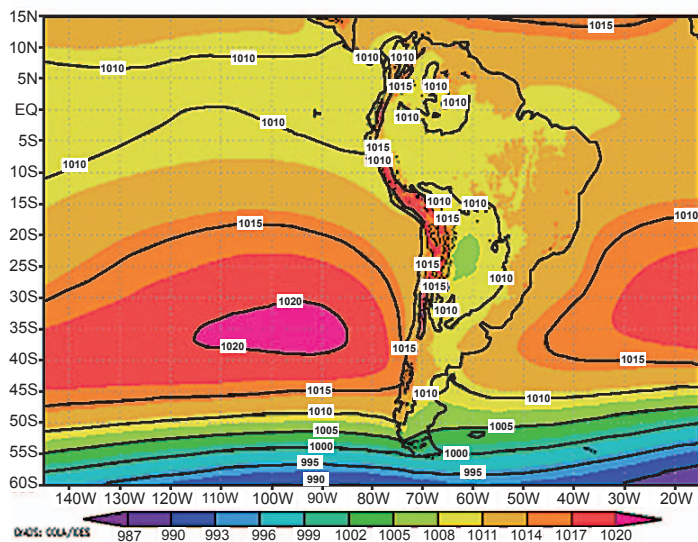
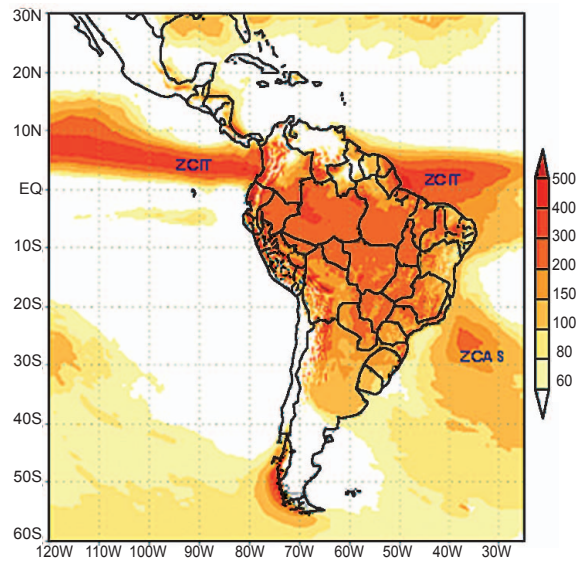
Uno de los mecanismos físicos más importantes de la precipitación en la región andina, según Gómez D. (1978), ocurre cuando las masas de aire caliente y húmedo, procedentes de la hoya amazónica, llegan a los Andes orientales y ascienden por efecto orográfico; esto lleva a un rápido enfriamiento de la masa

FIGURA 01



a. Campo de viento medio en 200 hPa en ms^{-1} durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo global T42CGCM/MRI. La AB se centra en promedio sobre los $19^{\circ}S$ y $21^{\circ}S$, mostrando vientos comparativamente más intensos sobre los subtropicos con una marcada curvatura anticiclónica ($30^{\circ}S-40^{\circ}S$).

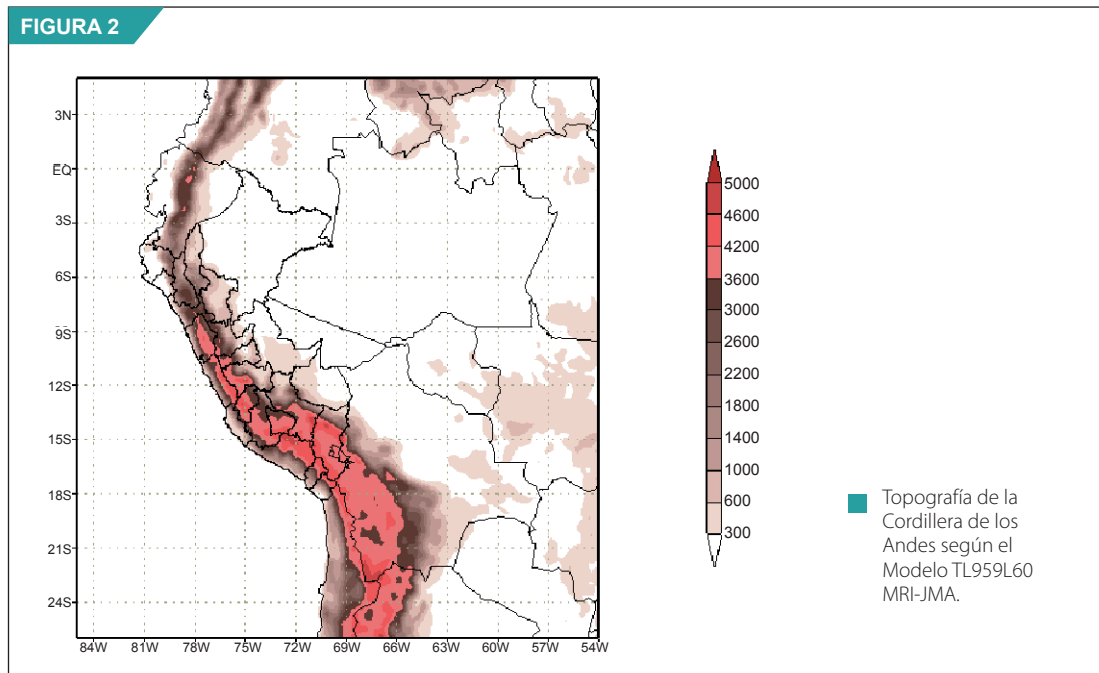
b. Campo de precipitación promedio en $mm\ mes^{-1}$ durante el verano del Hemisferio Sur, simulado por el Modelo Japonés de Alta Resolución TL959L60 MRI-JMA.



c. Campo de presión a nivel del mar durante el verano del Hemisferio Sur, simulado por el Modelo Japonés de Alta Resolución TL959L60 MRI-JMA.

de aire, con lo cual se reduce en gran parte su capacidad de sostener la humedad inicial, produciéndose precipitación. Tal acción tiene como resultado una región con altas cantidades de precipitación, que se extiende longitudinalmente por regiones adyacentes al este de los Andes (Selva Alta).

Considerando que las características topográficas juegan un rol importante en la determinación del clima local en función de la pendiente, aspecto y exposición de la superficie montañosa a los elementos del clima (Beniston, 2000), se evaluó la simulación de la topografía andina provista por el modelo TL959L60 MRI-JMA. Una correcta representación de la topografía en un modelo numérico asegura el éxito de la simulación de procesos físicos ligados a la precipitación orográfica (ver Figura N° 02).



Las precipitaciones en la Sierra de nuestro país tienen una relación directa con el componente zonal este del viento; es decir, el periodo lluvioso de la Sierra coincide con la intensificación de los vientos del este en todos los niveles de la atmósfera, los cuales favorecen la advección de humedad de la cuenca amazónica. Por otro lado, para que precipite en la Sierra es necesario que este aire húmedo y cálido advechado por los flujos del este, ascienda orográficamente por las laderas de la cordillera, o sea canalizado por los valles. En este contexto, el mecanismo de precipitación en las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba es el mismo, sólo que con connotaciones geográficas locales muy particulares (Avalos, 2005).

Las precipitaciones en la Cuenca del Río Mantaro (sector central oriental de los Andes del Perú) acontecen cuando la humedad advechada por los vientos del este es canalizada y confinada por las abruptas vertientes de la cuenca, que tiene una orientación NW-SE. En las partes altas, este ingreso de humedad es canalizado por la Cordillera de Huaytapallana (al este del valle), la que facilita el ingreso del flujo húmedo predominante del este (Cubas, 2005), generándose precipitaciones de regular intensidad lo cual se ve reflejado en los acumulados anuales de precipitación en localidades como Jauja (702,8 mm), Pilchaca (741,8 mm) entre otros.

3.3 Clasificación climática de la cuenca

La clasificación climática en la Cuenca del Río Mantaro se basa en el Mapa de Clasificación Climática del Perú (SENAMHI, 1988).

En el sector norte de la cuenca predomina el clima semifrío húmedo D'H3 entre los 3 200 m a 4 800 m de altitud, de régimen lluvioso en verano y seco en invierno. En este sector de la cuenca se emplazan

ciudades importantes como Cerro de Pasco, Junín y la Oroya. El sector central de la cuenca, sector que alberga a la subcuenca de interés de este estudio (Subcuenca del Río Shullcas), presenta variadas zonas de vida que van desde clima cálido muy húmedo A'H4 al este, pasando por clima frío húmedo C'H3 hasta clima semifrío húmedo D'H3. En este sector, las precipitaciones ocurren en verano y son fundamentalmente orográficas; es decir, resultantes de la condensación del vapor de agua de la masa de aire que al elevarse va descargando gran parte de esta humedad, especialmente en las vertientes orientales de la cadena de altas montañas y en los valles interandinos. Bajo estas condiciones climáticas se emplazan ciudades importantes como Jauja, Concepción, Chupaca, Huancayo y Pampas.

En tanto, en el sector sur de la cuenca la gama de climas va desde semifrío húmedo D'H3, al este, pasando por templado húmedo B'2H3 y frío húmedo C'H3 hasta clima semifrío húmedo D'H3 al oeste. Las ciudades más importantes que se desarrollan en esta parte de la cuenca son Huancavelica, Churcampa, Acobamba, Huanta, Lircay y Ayacucho.

3.4 Climatología de la cuenca

3.4.1 Precipitación

3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación

Las precipitaciones en la Cuenca del Mantaro comprenden dos periodos bien definidos en el año, un periodo húmedo o lluvioso que se inicia en septiembre y termina en abril del siguiente año y un periodo de estiaje o de ligeras precipitaciones, que comprende desde mayo hasta agosto. Dentro del periodo

Tabla N° 01: Climatología del acumulado anual (mm año⁻¹) y estacional (mm trimestre⁻¹) de la precipitación en la Cuenca del Río Mantaro

ESTACIONES	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON
Cerro de Pasco	1425,5	561	344,9	124,1	395,5
Carhuacayan	870,6	391,5	238,1	36,6	204,4
Yantac	734,4	308,1	224,7	43,3	158,3
Marcapomacocha	1205	538,8	339,8	57,7	268,7
Jauja	702,8	337,9	169,1	21,5	174,3
Huayao	763	345,8	195,7	37	184,5
San Juan de Jarpa	1016,9	449,7	281,1	56,2	229,9
Pilchaca	741,8	348,7	173,3	46,9	172,9
Huancalpi	860,8	355,5	205,6	82	217,7
Huancavelica	835,2	376,7	224	43	191,5
Acobamba	718,7	322,3	165,9	44,2	186,3
Lircay	809,9	365,1	215,6	51,2	178
La Quinua	787,7	396,9	197,3	35,4	158,1

Leyenda: DEF: Diciembre-Enero-Febrero (verano).
JJA: Junio-Julio-Agosto (invierno).

MAM: Marzo-Abril-Mayo (otoño).
SON: Septiembre-October-Noviembre (primavera).

lluvioso, en casi toda la cuenca, los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de verano, siendo febrero en unos y marzo en otros el mes en donde se registran las precipitaciones más altas (ver Figura N° 03). Los meses de menor precipitación, correspondientes al periodo de estiaje, coinciden con la estación de invierno, siendo el mes de julio donde se registran las precipitaciones más bajas.

En la Tabla N° 01 se presentan los valores climatológicos a nivel estacional y anual en las estaciones meteorológicas que cuentan con información de mayor récord (1971-2000).

En la Figura N° 03 se observa el ciclo anual de la precipitación en cada uno de los sectores de la cuenca, encontrando que todas presentan un comportamiento similar, aunque con pequeños incrementos, especialmente en las zonas altas del sector norte (Cerro de Pasco y Marcapomacocha). Además se observa en algunas zonas de la cuenca una dependencia directa entre las precipitaciones y la altitud; pero que "está condicionada a otros factores físicos, tales como el grado de exposición al Sol, la influencia de brisa montaña-valle y la dirección de los flujos de viento del este" (IGP, 2005).

La mayor concentración de las precipitaciones se da entre octubre y abril, representando el 85% del total anual, de los cuales el 61% está comprendido entre los meses de enero a marzo, que tienen valores muy similares.

3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación

De acuerdo con el estudio realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el año 2005, el promedio multianual de las precipitaciones presenta valores que superan los 1 000 mm año⁻¹ en el sector occidental que comprende las partes altas de las subcuencas de San Juan, Colorado, Conocancha y Santa Ana; así como en la parte sur de la Subcuenca del Huarpa. En la región centro-occidental de la cuenca las precipitaciones son del orden del 700-800 mm año⁻¹. En la misma figura se pueden observar tres núcleos de valores mínimos de precipitaciones (< 700 mm año⁻¹), las que abarcan algunas zonas desde el lago Junín hasta Jauja, en el departamento de Huancavelica, que comprende desde la provincia de Tayacaja hasta la provincia de Angarares y, finalmente, en el extremo sur oriental de la cuenca.

3.4.2 Temperatura máxima

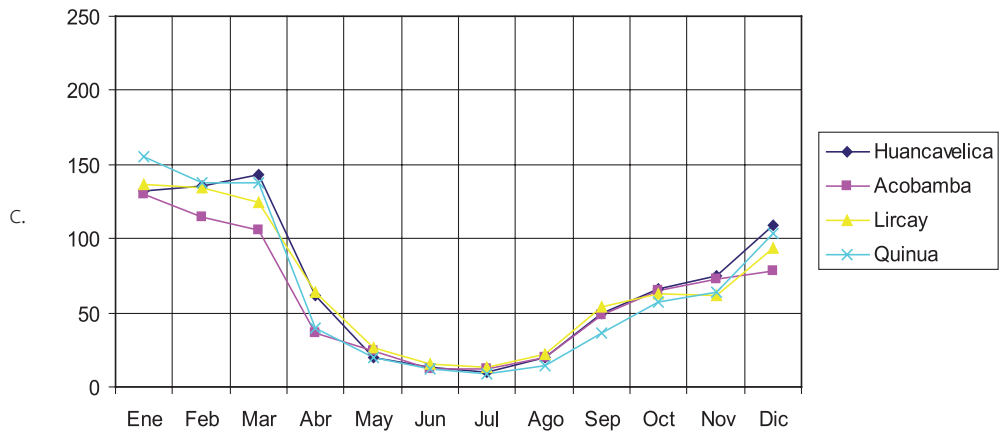
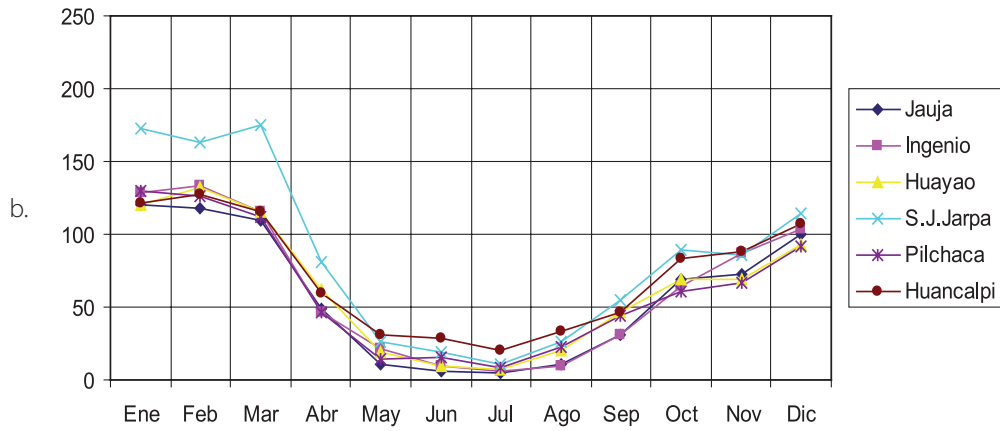
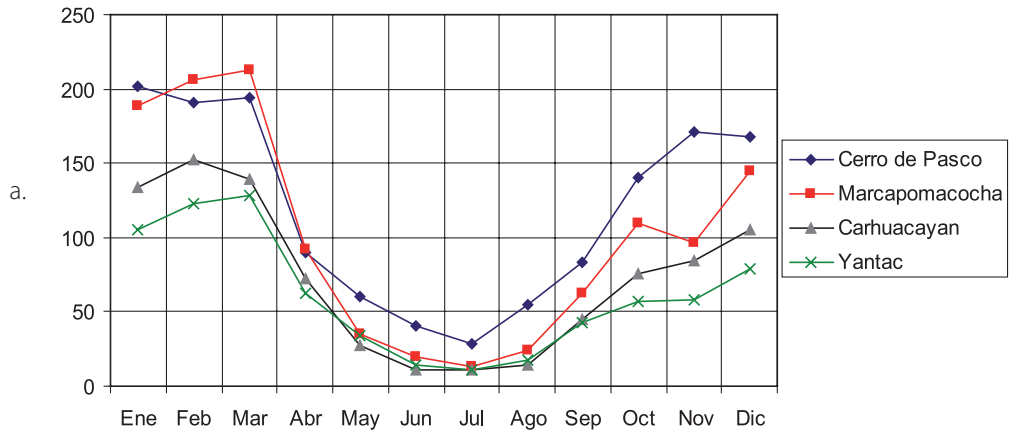
3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima

El comportamiento mensual de la temperatura máxima durante el año (ver Figura N° 04), varía entre 17-21 °C en gran parte de la cuenca; mientras en localidades ubicadas sobre los 4 000 msnm la temperatura máxima oscila entre 10-12 °C; esta diferencia se debe, principalmente, al factor altitud y a la exposición de la zona al movimiento solar diario.

Durante el año, la temperatura máxima presenta dos máximos, uno en mayo y el más intenso en noviembre; mientras los valores mínimos se dan en los meses de verano. En localidades ubicadas sobre los 4 000 msnm estos máximos no son muy notorios, registrándose temperaturas máximas muy similares durante todo el año. La ocurrencia del segundo pico máximo (noviembre) se debe a que en esta temporada se recibe la máxima radiación incidente y no se tiene cobertura nubosa; mientras que en el verano la radiación es mínima debido a la cobertura nubosa, por ser temporada de lluvias.

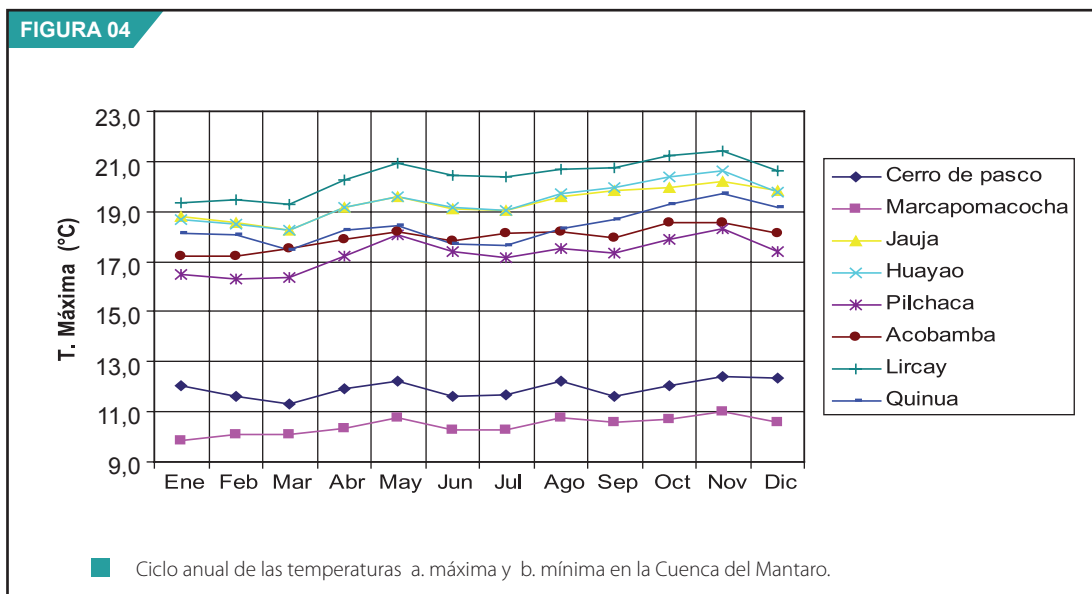
En localidades por debajo de los 4 000 msnm el rango de las temperaturas máximas durante el año es mayor, éste varía de acuerdo con la altura y es mayor a 1,4 °C; por el contrario, en localidades sobre los 4 000 msnm el rango de variación anual es muy pequeño (1,1 °C).

FIGURA 03



■ Ciclo anual de la precipitación en diferentes sectores de la Cuenca del Mantaro en mm mes⁻¹.
 a. sector norte, b. sector centro, y c. sector sur.

FIGURA 04



La Tabla N° 02 también muestra la temperatura máxima estacional o por trimestres, siendo la primavera la estación más cálida en toda la cuenca, asociado a la máxima insolación durante este periodo; mientras que los mínimos valores de temperatura máxima en gran parte de la cuenca ocurren en el verano (DEF), asociado a la mayor cobertura nubosa. Los valores de la temperatura máxima en los otros trimestres son muy similares.

Tabla N° 02: Temperaturas máximas estacionales (°C), promedio 1965-2006

Estaciones	Media anual	Rango anual	DEF	MAM	JJA	SON
Cerro de Pasco	12,0	1,1	12,0	11,9	11,8	12,0
Marcapomacocha	10,4	1,1	10,2	10,4	10,4	10,8
Jauja	19,3	1,9	19,1	19,0	19,3	20,0
Huayao	19,4	2,4	19,0	19,0	19,3	20,3
Pilchaca	17,3	2,0	16,7	17,2	17,3	17,9
Acobamba	18,0	1,4	17,5	17,8	18,0	18,3
Lircay	20,4	2,1	19,8	20,1	20,5	21,1
La Quinua	18,4	1,6	18,4	18,1	17,9	19,2

Fuente: Elaboración propia, SENAMHI 2007.

3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima

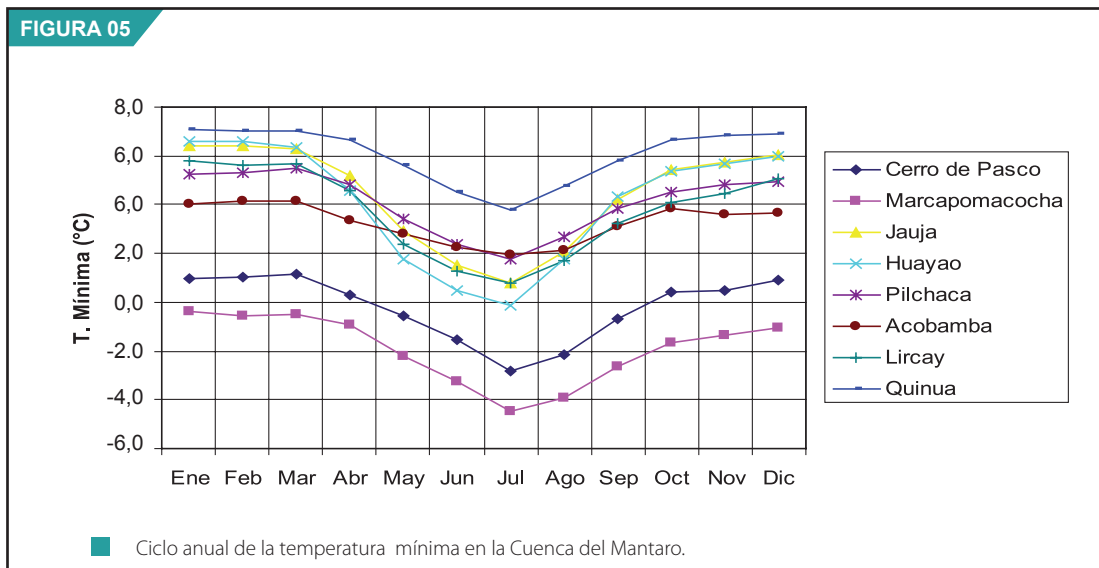
La temperatura máxima dentro de la cuenca presenta variaciones que están relacionadas con la altitud. Según la distribución de la temperatura máxima multianual, realizada por IGP (2005), ésta varía desde 12 °C en la parte norte y extremo occidental y va incrementando en las localidades ubicadas en el valle, presentando valores de 18 a 20 °C. Asimismo, en la zona sur oriental en la parte baja de la cuenca, las temperaturas llegan hasta los 28 °C.

3.4.3 Temperatura mínima

3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima

Las temperaturas mínimas oscilan entre 0 y 7,7 °C en localidades comprendidas entre los 3 000 a 4 000 msnm; mientras que en localidades sobre los 4 000 msnm varía entre -4,5 a 1,5 °C. En localidades menores de 3 000 msnm las temperaturas tienden a ser mayores llegando hasta los 19 °C.

La temperatura mínima durante el año presenta los valores más bajos en el mes de julio, lo cual está asociado al máximo enfriamiento debido a la escasez de nubosidad y baja humedad durante este periodo. El valor más alto durante el año ocurre entre enero y marzo y está asociado a la temporada de lluvias, época en la que el contenido de humedad en la atmósfera se incrementa y la mayor presencia de nubes impiden el enfriamiento nocturno.



Comparado con la temperatura máxima, la mínima presenta un rango anual de mayores valores, tal como puede observarse en el Tabla N° 03. Hay una similitud en los rangos en localidades sobre los 4 000 msnm donde el rango promedio es de 4 °C mientras que en localidades por debajo de este nivel, los rangos están asociados a la exposición de sus laderas con respecto al Sol, a los vientos de circulación regional y las brisas de montaña-valle, principalmente.

Tabla N° 03: Temperaturas mínimas estacionales (°C), promedio 1965-2006

Estaciones	Media anual	Rango anual	DEF	MAM	JJA	SON
Cerro de Pasco	-0,1	3,9	1,0	0,3	-2,3	0,1
Marcapomacocha	-2,0	4,0	-0,6	-1,2	-3,9	-2,0
Jauja 4,4	5,6	6,3	4,9	1,5	5,2	
Huayao 4,1	6,7	6,4	4,2	0,7	5,1	
Pilchaca 4,1	3,7	5,2	4,6	2,2	4,4	
Acobamba	3,2	2,3	4,0	3,4	2,1	3,5
Lircay 3,7	5,0	5,5	4,2	1,3	3,9	
La Quinua	6,0	3,3	7,0	6,4	4,3	6,4

Fuente: Elaboración propia, SENAMHI 2007.

En la misma Tabla N° 03 se observa que la temperatura mínima anual varía con valores positivos en localidades ubicadas por debajo de los 4 000 msnm; mientras que en localidades de mayor altitud el promedio anual es negativo, lo cual sugiere que en gran parte del año la temperatura mínima predominantemente se presenta por debajo o cercano a los 0 °C, tal es el caso de Marcapomacocha, localidad en la que todo el año se registran valores negativos. El trimestre más frío es JJA (invierno); mientras que el más cálido es DEF (verano), los otros dos trimestres tienen valores muy similares.

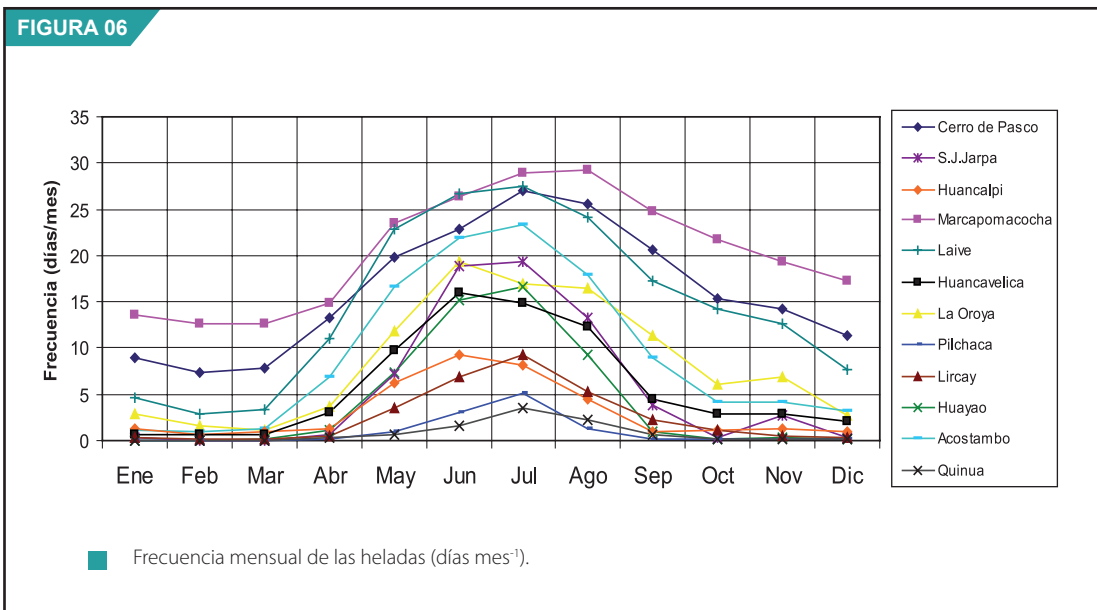
3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima

Las temperaturas más bajas se presentan en el extremo noroccidental con valores que alcanzan los -4 °C; mientras que el lado nororiental, influenciado por el efecto termoregulador del lago, presentan valores entre -2,0 y 0 °C. En la región del valle, entre Jauja y Pilchaca, la temperatura mínima en promedio es de 4 °C; mientras en la zona de Huanta (Ayacucho) la temperatura llega hasta los 8 °C. Por otro lado, en el extremo sur oriental de la cuenca, correspondiente a la parte baja, la temperatura mínima alcanza valores hasta los 16 °C.

3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas

3.5.1 Heladas

Los núcleos de mayores días con heladas en el año se dan particularmente en tres zonas: el principal sobre la parte noroccidental de la cuenca (zona de Marcapomacocha) hasta con 250 días con heladas, seguido del sector nororiental (Cerro de Pasco) y del sector central-occidental (Laive), ambos con 180 días. En el resto de la cuenca el número de días con helada disminuye y en la zona centro-sur oriental, que representa la parte baja de la cuenca, no se registran heladas.



El mayor periodo libre de heladas corresponde a la parte suroriental de la cuenca, asociado a la menor altitud; mientras que en la parte occidental y sector norte de la cuenca se ubican las zonas de menor periodo libre de heladas. Las heladas que se presentan en esta cuenca, se deben mayormente a procesos irradiativos (Atlas de Heladas, SENAMHI 2005).

La Figura N° 06 nos muestra que la mayor frecuencia de heladas en gran parte de la cuenca se presenta en el invierno, asociado a la ausencia de nubosidad y escasa humedad, con una frecuencia de 10-25 días por mes en los sectores central y sur de la cuenca, entre 22-30 días por mes en el sector norte (Marcapomacocha y Cerro de Pasco). En el verano, la frecuencia de heladas se reduce en gran parte de la cuenca, a excepción de Marcapomacocha y Cerro de Pasco (ubicadas por encima de los 4 200 msnm), donde se registran valores por debajo de los 0 °C, por lo menos en 15 días de cada mes de verano. Asimismo, gran parte del sector central sur, que comprende Pilchaca, Huancalpi, Lircay y La Quinua, presenta baja frecuencia de heladas durante el año, no superando los 10 días de heladas por mes.

3.5.2 Periodos secos

Para la caracterización de los periodos secos se utilizó la metodología de los percentiles⁴ (Valiente, 2001), en el periodo septiembre - agosto entre 1965 - 2006.

En la Tabla N° 04 se muestran de manera esquemática los periodos secos (deficiencias y sequías) en localidades representativas de la cuenca en los últimos cuarenta años. Se observa que hasta antes de la década de los ochenta, se presentaron deficiencias y sequías moderadas pero en forma localizada, a excepción del año 1968/69, periodo en el cual los sectores central y sur de la cuenca fueron afectados por sequías de moderadas a extremas; así como en el año 1965/66 donde el sector central soportó una sequía moderada. Posteriormente, la cuenca estuvo afectada por deficiencias y sequías moderadas en manera más recurrente, como ocurrió en el año 1982/83, periodo considerado lluvioso en la parte norte de la cuenca; pero deficiente en la parte sur, presentándose inclusive una sequía severa en Huancalpi y moderada en Lircay. En el año 1989/90 gran parte de la cuenca presentó deficiencias, siendo afectado el sector sur de la cuenca (Acobamba y Lircay) con sequías severas.

Es la década del noventa, donde se presentaron con mayor recurrencia los periodos secos, alternándose periodos de deficiencia con periodos de sequías moderadas y extremas, excepto el año 1993/94 que fue lluvioso. El año más crítico fue 1991/92 con predominancia de sequías extremas en los sectores centro y sur principalmente, situación que continuó al año siguiente pero en forma localizada. En el año 1994/95 predominaron las deficiencias y sequías de moderadas a severas en toda la cuenca y los dos años siguientes continuaron las sequías en forma localizada; especialmente en el valle y en la parte noroccidental (Marcapomacocha).

Otro periodo de sequías ocurrió entre el 2003 y 2006, siendo el más intenso el del 2003/04 en toda la cuenca; mientras que en los años posteriores las sequías fueron localizadas. Durante estos años, las precipitaciones no se presentaron dentro de su variabilidad normal. En la misma tabla se observa que hasta antes de la década de los noventa el sector norte de la cuenca (Marcapomacocha y Cerro de Pasco) no presentaba deficiencias y sequías tan frecuentes, como las que vienen ocurriendo desde el año 1991. En Marcapomacocha, por ejemplo, se han presentado seis periodos de sequía sólo entre 1990 y el 2006.

En la zona de Huancalpi, la década de los ochenta fue la más crítica, ya que se presentaron tres periodos de sequía entre los años 1982 - 1989.

4 A través de los percentiles se caracterizó el periodo de lluvias por medio de umbrales y que son obtenidos al dividir los datos de lluvias ordenados en forma ascendente de un periodo temporal suficientemente largo en intervalos de 1%. Hay diferentes umbrales para determinar las sequías en términos de percentiles, como en el proyecto FRIEND/amigo (2002) que utiliza el percentil 30 para sequía; mientras el percentil 5 y 10 son utilizados en Australia para definir la sequía (Australian Bureau of Meteorology, 1992).

Tabla N° 04: Periodos de sequía y deficiencias en la Cuenca del Mantaro para el periodo 1965-2006

AÑOS	CPCO	MPCHA	JJA	HYAO	PLCHCA	HNLPI	ABMBA	LRCAY
1965/66								
1966/67								
1967/68								
1968/69								
1969/70								
1970/71								
1971/72								
1972/73								
1973/74								
1974/75								
1975/76								
1976/77								
1977/78								
1978/79								
1979/80								
1980/81								
1981/82								
1982/83								
1983/84								
1984/85								
1985/86								
1986/87								
1987/88								
1988/89								
1989/90								
1990/91								
1991/92								
1992/93								
1993/94								
1994/95								
1995/96								
1996/97								
1997/98								
1998/99								
1999/00								
2000/01								
2001/02								
2002/03								
2003/04								
2004/05								
2005/06								

CPCO	=	Cerro de Pasco
MPCHA	=	Marcapomacocha
JJA	=	Jauja
HYAO	=	Huayao
PLCHCA	=	Pichaca
HNCLPI	=	Huancalpi
ACBMBA	=	Acobamba
LRCY	=	Lircay

Percentil	Tipo de sequía
5	S. extrema
10	S. severa
15	S. moderada
30	Deficiencia

Tabla N° 08: Periodos de sequía y deficiencias en la Cuenca del Mantaro para el periodo 1965-2006

AÑOS	CPCO	MPCHA	JJA	HYAO	PLCHCA	HNLPI	ABMBA	LRCAY
1965/66								
1966/67								
1967/68								
1968/69								
1969/70								
1970/71								
1971/72								
1972/73								
1973/74								
1974/75								
1975/76								
1976/77								
1977/78								
1978/79								
1979/80								
1980/81								
1981/82								
1982/83								
1983/84								
1984/85								
1985/86								
1986/87								
1987/88								
1988/89								
1989/90								
1990/91								
1991/92								
1992/93								
1993/94								
1994/95								
1995/96								
1996/97								
1997/98								
1998/99								
1999/00								
2000/01								
2001/02								
2002/03								
2003/04								
2004/05								
2005/06								

CPCO	=	Cerro de Pasco
MPCHA	=	Marcapomacocha
JJA	=	Jauja
HYAO	=	Huayao
PLCHCA	=	Pichaca
HNCLPI	=	Huancalpi
ACBMBA	=	Acobamba
LRCY	=	Lircay

Percentil	Excesos
80	Moderado
90	Fuerte

3.5.3 Periodos húmedos

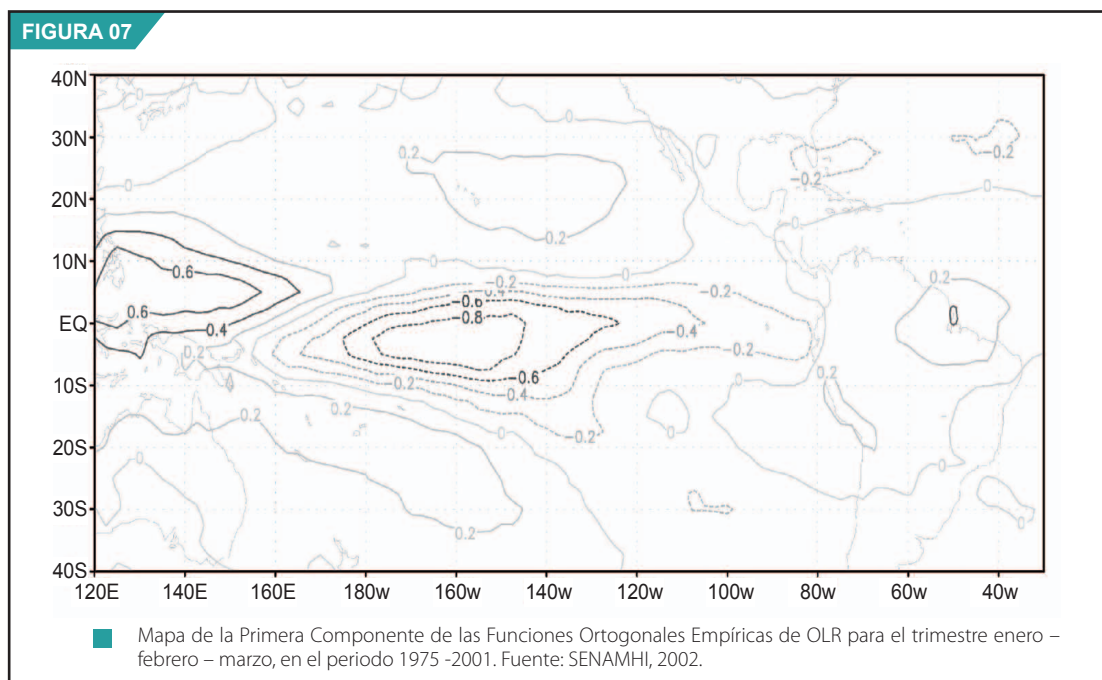
Similar a los periodos secos, las lluvias han sido totalizadas en un año desde septiembre a agosto, en el periodo 1965-2006, siguiendo la metodología de Valiente (2001).

En la Tabla N° 05 se observa que entre los años 1969 a 1988 se presentaron con más frecuencia eventos lluviosos superiores a sus normales y que constituyeron periodos húmedos con excesos moderados a extremos en gran parte de la cuenca, sobresaliendo el año 1973/74, considerado como un periodo húmedo extremo; mientras que el año 1981/82 se le considera periodo húmedo moderado. A partir de los años noventa, la frecuencia de periodos húmedos con excesos decrece y solamente se presentaron en forma localizada, especialmente en la parte del valle y sur de la cuenca. El año con exceso extremo 1993/94 afectó toda la cuenca; mientras que en el año 2002/03 los excesos fueron mucho más localizados. En la misma tabla se observa que en el sector norte de la cuenca no se presentan periodos húmedos desde el año 1984, excepto en Cerro de Pasco en 1993/94.

En resumen, los años 1968/1969 y 1991/1992 son considerados como años de sequía extrema en toda la cuenca; mientras que los 1973/74 y 1993/94 fueron los más lluviosos o húmedos.

3.5.4 ENOS

En la Figura N° 07, se muestra la teleconexión entre el Pacífico y la Cuenca del Mantaro y Urubamba mediante la primera componente de las funciones ortogonales empíricas de la radiación en onda larga (OLR⁵, siglas en inglés) sobre el Pacífico Tropical, variable utilizada como indicador de nubosidad/convectividad. La figura indica que la primera componente o campo más dominante ha capturado la variabilidad de El Niño con un 35% de la varianza explicada obtenida en el trimestre de mayores lluvias (enero-marzo). Esto muestra un dipolo en el Pacífico occidental y la zona central y sur del Perú, dicho en otras palabras, si en el Pacífico occidental (Niño-4) hay anomalías negativas de OLR (mayor nubosidad), en la zona de nuestro territorio, sierra central y sur, hay anomalías positivas de OLR (menor nubosidad). Una investigación similar con fines de predicción fue realizada por Montecinos et al. (2000), que analizó



5 Outgoing Longwave Radiation.

los campos de la TSM en el Pacífico Tropical y estableció que la primera componente de esta variable sobre la región 20°N - 40°S captura la mayor parte de la variabilidad interanual relacionada al ENOS y que la variancia explicada también tiene una fuerte estacionalidad.

Por otro lado, Díaz A. (2005) encontró que existe una relación entre la TSM y la OLR en el Pacífico Ecuatorial (especialmente en el Pacífico Central y Occidental) y las precipitaciones en la Sierra del Perú; ambas variables pueden explicar su variabilidad. La Tabla N° 06 muestra los valores de las correlaciones entre la OLR de la región Niño-4 y las precipitaciones en la Cuenca del Mantaro, para la temporada lluviosa, trimestre de enero a marzo, época en que se presentaron los valores más altos de correlación. Se aprecia en el mismo cuadro que en el sector norte de la cuenca, la relación con El Niño es menor respecto a los sectores centro y sur, donde las correlaciones son mayores y más homogéneas, no obstante, estos valores son comparativamente inferiores a las correlaciones encontradas con la región del Altiplano, que son del orden de 0,6-0,7.

Tabla N° 06: Valores de las correlaciones entre TSM El Niño-4 y las precipitaciones en la Cuenca del Río Mantaro durante EFM

Sector	Estaciones	Región Niño-4 con OLR (Senamhi, 2006)	Región Niño-4 con TSM (IGP, 2005)
Norte	Marcapomacocha	0,18	
	Carhuacayan	0,47	
	Yantac	0,51	
Centro	Jauja	0,59	-0,45
	Huayao	0,35	
	San Juan de Jarpa	0,50	-0,52
	Pilchaca	0,50	
	Pampas	0,52	-0,47
	Huancalpi	0,42	
Sur	Acobamba	0,46	
	San Pedro de Cachi	0,45	

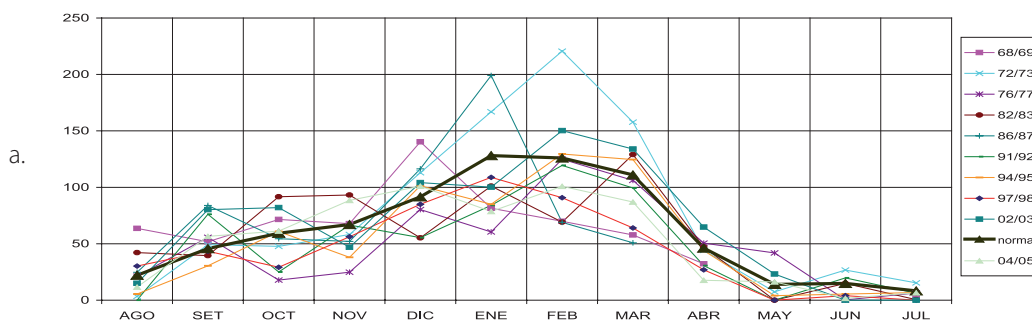
La teleconexión sobre la Cuenca del Mantaro durante los años Niño, físicamente se explica de la siguiente manera: la posición de la Zona de Convergencia del Pacífico Sur (ZCPS) es desviada hacia el Este por ondas Rossby atmosféricas, teniendo efectos con la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) (Lenters y Cook, 1999), la cual a su vez juega un papel crucial en la posición de la Alta de Bolivia sobre Sudamérica (Lenters y Cook, 1997). La ZCAS y AB son sistemas que intervienen en la generación de las lluvias, principalmente en la parte sur de la cuenca; mientras en la parte norte de la cuenca se suma la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la que está modulada por el gradiente de la TSM en el Atlántico Ecuatorial, por lo que la correlación en esta zona es menor.

Se ha graficado la distribución temporal de la precipitación en dos estaciones ubicadas en los sectores central y sur de la cuenca (Pilchaca y Acobamba) para años catalogados como Niño y Niña, según Trenberth (1997). La Figura N° 08 a, c muestra que en los años Niño las precipitaciones tienden a presentarse por debajo de su normal, a excepción del año Niño 1972/73 que fue anteriormente tipificado como lluvioso, en ambas localidades.

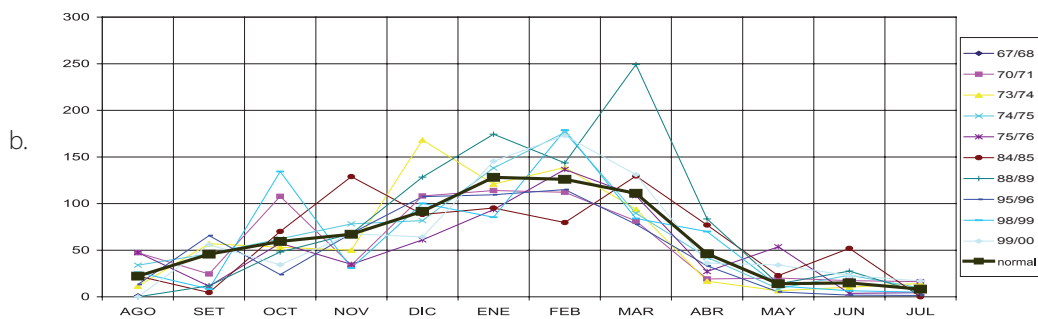
En años Niña (Figura N° 08 b, d) las precipitaciones tienden a ser menos deficientes y más cercanas a sus valores normales, observándose algunos años Niña con lluvias por encima de su normal, especialmente en las estaciones ubicadas en el sector sur de la cuenca (sólo se presenta Acobamba) como ocurrió en los años 74/75, 95/96, 98/99 y 99/00.

FIGURA 08

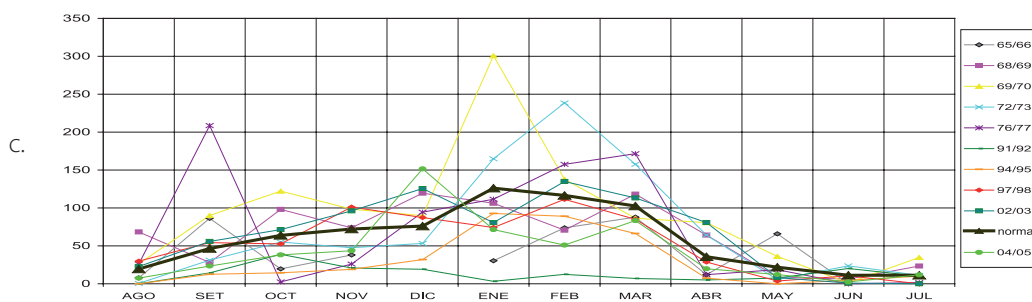
**Distribución de las lluvias en años El Niño
Estación Pilchaca**



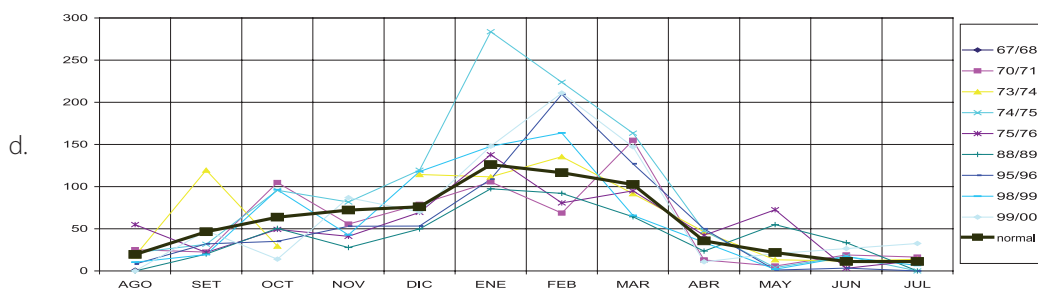
**Distribución de las lluvias en años La Niña
Estación Pilchaca**



**Distribución de las lluvias en años El Niño
Estación Acobamba**



**Distribución de las lluvias en años La Niña
Estación Acobamba**



■ Distribución temporal de las lluvias en años Niño (a, c) y Niña (b, d), en los sectores central y sur de la cuenca.

3.6 Tendencias climáticas observadas

3.6.1 Tendencias promedio de las precipitaciones observadas

Para determinar las tendencias lineales de la precipitación se ha utilizado el test de Mann-Kendall (1976); así como la metodología desarrollada por Sen (1968) para obtener la pendiente o la magnitud de la inclinación (tasa de cambio de la variable por unidad de tiempo).

3.6.1.1 Tendencia anual

La tendencia de la precipitación en diferentes puntos de la cuenca viene siendo negativa, a excepción de Huancalpi y Huancavelica que presentan una tendencia ascendente del orden de 5-8 mm año⁻¹, con un nivel de significancia del 85%. Por otro lado, las mayores tasas de decrecimiento se vienen dando en el sector norte con 28 mm año⁻¹ en Cerro de Pasco y 14 mm año⁻¹ en Marcapomacocha. En el resto de la cuenca las tasas son variables e inferiores de 6 mm año⁻¹.

Tabla N° 07: Tendencia anual de la precipitación (mm) y significancia (%) en la Cuenca del Mantaro

LUGAR	PERIODO	TENDENCIA (mm año ⁻¹)	SIGNIFICANCIA (%)
CERRO DE PASCO	1965-2006	-28,52	99,94
CARHUACAYAN	1969-2006	-0,76	57,78
YANTAC	1965-2006	-0,78	58,80
MARCAPOMACOCHA	1969-2006	-14,87	99,92
JAUJA	1965-2006	-2,41	92,43
HUAYAO	1965-2006	-2,53	94,62
S.JUAN DE JARPA	1968-2006	-3,43	87,37
PILCHACA	1965-2006	-3,08	93,64
HUANCALPI	1965-2006	8,47	96,61
HUANCAVELICA	1965-2006	5,06	96,63
ACOBAMBA	1965-2006	-3,87	89,53
LIRCAY	1966-2006	-1,65	76,00
QUINUA	1965-2006	-4,33	93,16

3.6.1.2 Tendencias estacionales

En la Tabla N° 08 se indica las tendencias y su significancia. En el verano, en gran parte de la cuenca la tendencia de las precipitaciones tiende a ser decreciente, a excepción de Huancalpi (Huancavelica) que presenta una tendencia creciente con un 93% de significancia. En esta temporada, los mayores valores de decrecimiento se vienen dando en la parte alta del sector norte (4,5-7,0 mm año⁻¹); mientras en el resto de la cuenca la tendencia decreciente varía entre 1,4-3,7 mm año⁻¹. La tendencia positiva de la parte suroccidental ha sido 3,9 mm año⁻¹ (ver Tabla N° 08). En otoño, las tendencias de las precipitaciones son decrecientes en toda la cuenca con valores de hasta 2,5 mm año⁻¹ en la parte nororiental y suroriental de la cuenca. Sólo en la vecindad de Carhuacayan (sector norte) la tendencia ascendente ha sido significativa con 1,2 mm año⁻¹. En invierno, época de mínimas precipitaciones, la tendencia continúa siendo decreciente en los sectores norte y central de la cuenca, siendo la tasa de decrecimiento de 0,3-0,8 mm año⁻¹ a excepción de la parte nororiental que presenta mayores valores hasta de 2,9 mm año⁻¹. La parte

Tabla N° 08: Tendencias estacionales de la precipitación (mm) y significancia (%) en la Cuenca del Mantaro

LUGAR	DEF		MAM		JJA		SON	
	TP	Sig	TP	Sig	TP	Sig	TP	Sig
CERRO DE PASCO	-4,9	96	-2,6	97	-2,9	99	-3,3	79
CARHUACAYAN	-0,5	60	1,23	88	-0,5	86	-0,1	57
YANTAC	-0,8	61	-1,2	89	0,28	79	0,39	58
MARCAPOMACOCHA	-6,9	99	-1,9	92	-0,1	56	-0,2	56
JAUJA	-2,4	96	0,07	54	-0,3	94	-0,2	63
HUAYAO	0,05	53	-1,2	95	-0,1	70	-0,1	55
SAN JUAN DE JARPA	-0,4	58	-1,8	91	-0,5	84	0,0	52
PILCHACA	-1,4	89	-1,0	89	0,0	52	-0,2	65
HUANCALPI	3,9	93	0,14	57	0,77	86	1,64	95
HUANCAVELICA	1,53	77	1,06	84	0,84	95	0,4	83
ACOBAMBA	-0,6	63	-2,5	99	-0,1	57	-1,5	93
LIRCAY	-0,5	71	-0,3	62	0,12	61	-1,7	98
QUINUA	-2,3	94	-0,7	74	0,29	78	0,23	57

Leyenda: TP: Tendencia de la precipitación.

Sig.: Significancia.

suroccidental de la cuenca presenta tendencia positiva con incrementos de 0,8 mm año⁻¹.

Finalmente en primavera, época de inicio del periodo lluvioso, se incrementa la incertidumbre, presentando sólo en forma localizada tendencias significativas. La tendencia significativa decreciente se localiza en el sector nororiental con valores que han llegado hasta 3,3 mm año⁻¹. En la parte suroccidental, en la que se venía observando tendencia de incrementos en los trimestres anteriores, en este trimestre la tendencia ha sido a decrecer con valores entre 1,5-1,7 mm año⁻¹. Sólo en forma puntual, en Huancalpi, la tendencia continúa siendo ascendente y con valores de 1,6 mm año⁻¹.

3.6.2 Tendencias promedio de la temperatura máxima

La tendencia anual y estacional de la temperatura máxima en la cuenca, se observa en las Tablas N° 09 y 10 respectivamente, para el periodo 1965 – 2006.

3.6.2.1 Tendencia anual

En la Tabla N° 09, se observa que la tendencia de la temperatura máxima en la cuenca es ascendente (valores positivos), a excepción de Cerro de Pasco (Pasco) con -0,06 °C año⁻¹, Jauja (Junín) y Lircay (Huancavelica) con -0,02 °C año⁻¹. La tendencia positiva varía entre 0,03-0,07 °C año⁻¹.

3.6.2.2 Tendencias estacionales

La tendencia estacional es muy similar a la tendencia anual, es decir, mayormente ascendente. En el verano la tendencia es positiva en gran parte de la cuenca, con valores entre 0,02-0,04 °C año⁻¹ en promedio; pero con valores más altos en Pilchaca con 0,08 °C año⁻¹. La tendencia decreciente de la temperatura máxima durante esta estación se viene dando en Cerro de Pasco con 0,07 °C año⁻¹, Jauja con 0,04 °C año⁻¹ y Lircay con 0,02 °C año⁻¹. En otoño se sigue presentando la misma configuración anual, pero acentúan-

Tabla N° 09: Tendencia anual de las temperaturas máxima y mínima (°C) y las significancias (%) en la Cuenca del Mantaro

LUGAR	PERIODO	TMAX (°C/año)	SIGNIFI. (%)	TMIN (°C/año)	SIGNIFI. (%)
CERRO DE PASCO	1965-2005	-0,06	100	0,01	71
MARCAPOMACOCHA	1967-2005	0,03	99	0,01	89
JAUJA	1965-2005	-0,02	98	-0,03	99
HUAYAO	1965-2006	0,03	100	0,01	77
PILCHACA	1964-2006	0,07	100	0,02	98
ACOBAMBA	1965-2005	0,04	99	0,08	100
LIRCAY	1965-2005	-0,02	99	0,01	71
QUINUA	1965-2005	0,002	56	-0,04	100

dose la tendencia decreciente en Cerro de Pasco, Jauja y Lircay y creciente en Pilchaca. También se observa que la parte noroccidental de la cuenca, así como el valle, vienen presentando una tendencia ascendente del orden de 0,03-0,08 °C año⁻¹. Finalmente, en el invierno y primavera la tendencia continúa con el mismo patrón del periodo anual y de los trimestres anteriores; las tendencias negativas son del orden 0,01-0,04 °C año⁻¹ y las positivas varían entre 0,01-0,06 °C año⁻¹ en invierno; mientras que en primavera la tendencia negativa oscilan entre 0,02-0,06 °C año⁻¹, y la positiva entre 0,01-0,05 °C año⁻¹ (ver Tabla N° 14).

Tabla N° 10: Tendencia estacional de las temperaturas máxima y mínima (°C) y significancias (%) en la Cuenca del Mantaro

LUGAR	Unidades	DEF (verano)		MAM (otoño)		JJA (invierno)		SON (primavera)	
		TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN
Marcapomacocha	°C/año	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
	%	97	95,4	97,4	85,7	86,8	68	98	83
Cerro de Pasco	°C/año	-0,07	0,02	-0,05	0,02	-0,04	0,02	-0,06	-0,0002
	%	100	98	99,4	87	97	92	100	53
Huayao	°C/año	0,04	0,01	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	-0,01
	%	99	88,9	99,8	95,2	99,9	75,4	99,5	71,9
Pilchaca	°C/año	0,08	0,02	0,08	0,02	0,06	0,01	0,05	0,01
	%	100	100	100	98,8	100	78,2	100	95,9
Acobamba	°C/año	0,04	0,11	0,03	0,07	0,01	0,02	0,05	0,07
	%	98	100	96,9	100	76,1	94,9	99,9	100
Lircay	°C/año	-0,02	0,02	-0,01	0,003	-0,01	-0,002	-0,02	-0,003
	%	96	91,1	90,6	58,2	87,4	58,3	99,9	58,8
La Quinua	°C/año	0,01	-0,04	-0,003	-0,03	-0,01	-0,05	0,01	-0,03
	%	80	99,5	58,1	99,7	80,3	100,0	87,6	99,4
Jauja	°C/año	-0,04	-0,04	-0,02	-0,03	-0,01	-0,07	-0,03	-0,03
	%	99	100,0	97,0	99,7	71,2	100,0	99,1	99,5

3.6.3 Tendencias promedio de la temperatura mínima

Los valores y significancias de la tendencia anual y estacional de la temperatura mínima en la Cuenca del Mantaro se presentan en las Tablas N° 09 y 10.

3.6.3.1 Tendencia anual

La tendencia anual de la temperatura mínima (Tabla N° 09) es positiva en gran parte de la cuenca, a excepción de la parte oriental de los sectores central y sur, donde predomina la tendencia negativa. Los valores positivos oscilan entre 0,01-0,08 °C año⁻¹, siendo más acentuados en Acobamba. Los valores negativos oscilan entre 0,03-0,04 °C año⁻¹.

3.6.3.2 Tendencias estacionales

Las tendencias estacionales de la temperatura mínima presentan el mismo patrón que la tendencia anual. En verano, la tendencia positiva varía entre 0,02-0,1 °C año⁻¹ y la negativa (Jauja y La Quinua) varía entre 0,02-0,04 °C año⁻¹. La tendencia negativa de mayor valor se presenta en Acobamba con 0,11 °C año⁻¹ (ver Tabla N° 10). En otoño, la tendencia positiva continúa en gran parte de la cuenca con valor promedio de 0,02 °C año⁻¹ y Acobamba sigue presentando la mayor tasa de incremento (0,07 °C año⁻¹); mientras que la tendencia negativa en Jauja y La Quinua presenta valores entre 0,02-0,03 °C año⁻¹ durante esta estación. Considerando sólo las zonas con tendencia significativa, la tendencia positiva se acentúa en Acobamba durante la primavera con 0,07 °C año⁻¹; mientras que la tendencia negativa en Jauja y La Quinua toma mayores valores comparativamente a los trimestres anteriores (0,03 y 0,07 °C año⁻¹).

3.7 Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático

El análisis de extremos de la data observada diaria de temperaturas y precipitaciones en la Cuenca del Río Mantaro se ha realizado haciendo uso del RCLimDex (recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para el Climate Change Detection, Monitoring and Indices - ETCCDMI), el cual se basa en el diagnóstico de eventos extremos propuesto por Frich et al. (2002), el cual es usado en estudios a nivel mundial, siendo además adoptado como salida estándar de datos para el reciente 4to Reporte de Evaluación del IPCC (Kamiguchi et al., 2006). Se ha utilizado información del periodo 1965-2006, considerando las tendencias significantes a un $p < 0,1$.

3.7.1 Precipitación

Los índices climáticos para evaluar el comportamiento de las precipitaciones son definidos en la Tabla N° 11 y los resultados se muestran en la Tabla N° 12 y Figura N° 09.

Los sectores norte (Cerro de Pasco, Carhuacayan, Marcapomacocha) y sur de la cuenca (Acobamba, Lircay, La Quinua) presentan una alta coherencia espacial en las señales de tendencia negativa entre todos los índices analizados (ver Figura N° 25) ya que en todas las estaciones se observa disminución de las precipitaciones y muchas de estas tendencias son significativas, tal como el índice PRCPTOT que es negativo en todas las estaciones analizadas de ambos sectores; así como los índices de intensidad diaria (SDII) y de días húmedos consecutivos (CWD), cuyas tendencias concuerdan mucho con el índice PRCPTOT, aunque el nivel de significancia es diferente para algunas estaciones.

Los patrones de tendencia para los índices de frecuencia de extremos R10mm y R20mm son similares a PRCPTOT, muchas estaciones muestran niveles de significancia mayores en estos índices extremos que en el índice de precipitación total. Los dos índices de intensidad de precipitaciones máximas en 1 y 5 días, RX1day y RX5day, respectivamente, muestran también tendencias negativas, pero con mayor significancia estadística en la región norte de la cuenca.

Tabla N° 11: Índices de precipitación con su definición y unidades. RR es la tasa de lluvia diaria. Todos los índices son calculados anualmente de enero a diciembre

Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
PRCPTOT	Precipitación en días húmedos	Precipitación total anual en los días húmedos (RR>=1mm)	mm
SDII	Índice simple de intensidad de lluvia	Precipitación total anual dividida por el número de días húmedos en un año	mm día ⁻¹
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR<1mm	días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR>=1mm	días
R10mm	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que PRCP>=10mm	días
R20mm	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que PRCP>=20mm	días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación total anual en que RR>95 percentil	mm
R99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación total anual en que RR>99 percentil	mm
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
RX5day	Cantidad máxima de precipitación en cinco días	Máximo mensual de precipitación en cinco días consecutivos	mm

Tabla N° 12: Tendencia y niveles de significancia de los índices extremos de precipitación en la Cuenca del Mantaro

Índices / Estaciones	PRCPTOT	SDII	CDD	CWD	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RX1day	RX5day
Cerro de Pasco	O	O	+	O	O	O	O	O	O	O
Carhuacayan	O	O	+	+	O	O	O	O	O	O
Marcapomacocha	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Jauja	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Huayao	O	O	+	+	O	O	O	O	O	+
Laive	+	O	O	+	O	O	O	O	+	+
Pilchaca	O	+	+	O	+	+	+	+	+	O
Huancalpi	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Acobamba	O	O	+	O	O	O	O	O	O	O
Lircay	O	O	+	O	O	O	O	+	+	O
La Quinua	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Legenda: Tendencia positiva sin significancia (+), Tendencia positiva con significancia (+), Tendencia negativa sin significancia (O), Tendencia negativa con significancia (O).

En relación con los índices de excedencia de percentiles R95p y R99p, éstos también guardan una relación directa con el índice de PRCPTOT. Caso contrario, pero en concordancia con todo lo anteriormente analizado, se observa en el índice máximo consecutivo de días secos (CDD), el cual es positivo, indicando mayor cantidad de días secos en estas regiones de la cuenca.

3.7.2 Temperatura

Los diez índices que explican las tendencias de la temperatura son definidos en la Tabla N° 13. Los valores y niveles de significancia de estos índices se presentan en la Tabla N° 14 y su distribución espacial en la Figura N° 10.

**Tabla N° 13: Índices de temperatura con su definición y unidades.
Todos los índices son calculados anualmente de enero a diciembre**

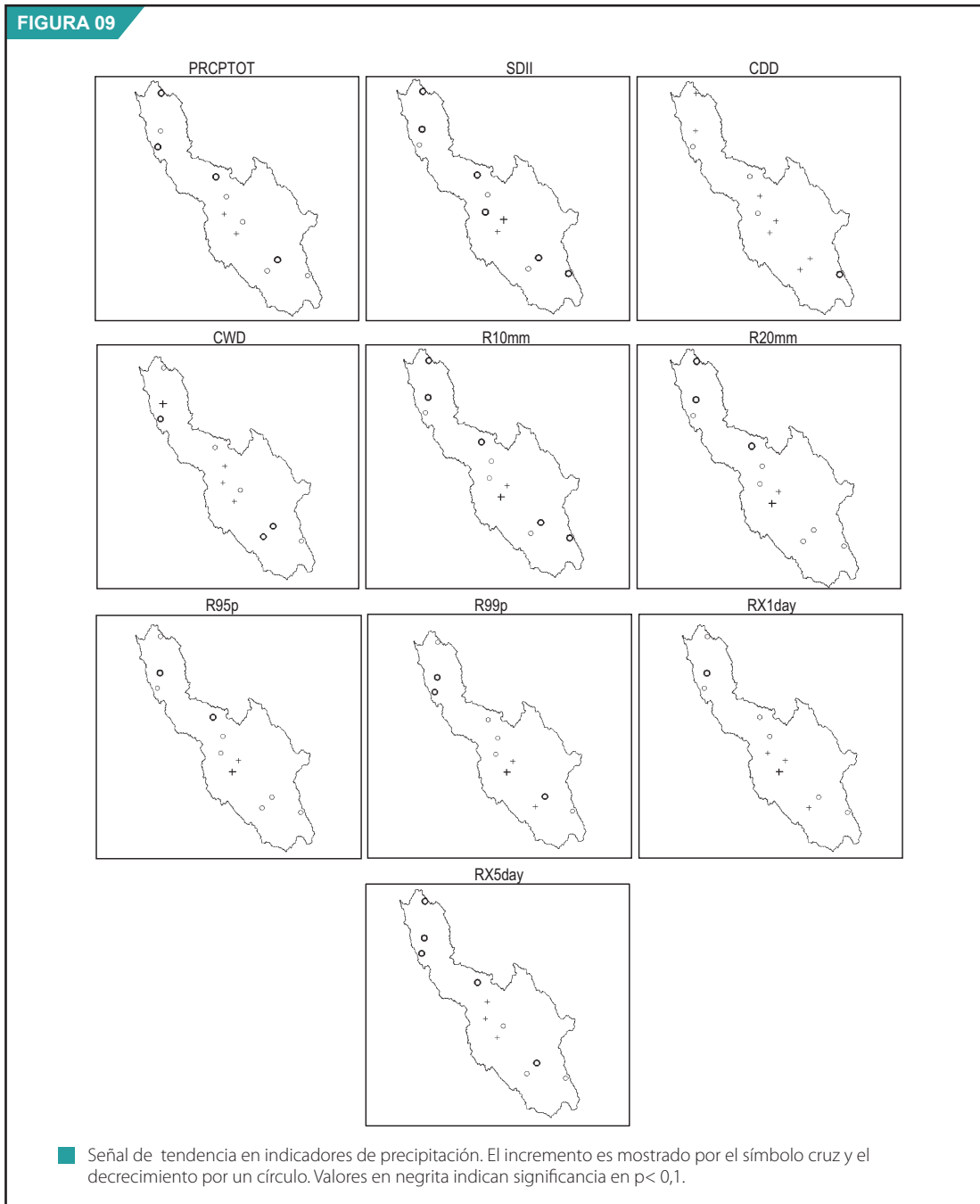
Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
FDO	Días de heladas	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) < 0 °C	días
Txx	Temperatura máxima máxima	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
Txn	Temperatura máxima mínima	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
Tnx	Temperatura mínima máxima	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
Tnn	Temperatura mínima mínima	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
DTR	Rango diario de temperatura	Diferencia media mensual entre Tx y Tn	°C
Tx10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando Tx < 10th percentil	días
Tx90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando Tx > 90th percentil	días
Tn10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando Tn < 10th percentil	días
Tn90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando Tn > 90th percentil	días

Tabla N° 14: Valores de tendencia y niveles de significancia

Índices / Estaciones	fdo	Txx	Txn	Tnx	Tnn	dtr	Tx10p	Tx90p	Tn10p	Tn90p
Cerro de Pasco	O	O	O	O	+	O				
Marcapomacocha	O	+	O	+	+	O	O	+	O	+
Jauja	+	O	O	O	O	+	+	O	+	O
Huayao	O	+	+	+	+	+	O	+	O	+
Laive	O	+	O	+	+	+				
Pilchaca	O	+	+	+	+	+	O	+	O	+
Acobamba	O	+	O	+	+	O				
Lircay	+	O	O	+	O	O	+	+	+	+
La Quinua	O	+	O	O	O	+				

Legenda: Tendencia positiva sin significancia (+), Tendencia positiva con significancia (+), Tendencia negativa sin significancia (O), Tendencia negativa con significancia (O).

FIGURA 09



En la Tabla N° 14 y en la Figura N° 09 se muestran los índices de tendencias en las localidades analizadas. Se aprecia que algunas estaciones no muestran concordancia con estaciones cercanas; pero en términos generales, existe una tendencia negativa en el número de días de heladas, en casi todas las estaciones, excepto en las estaciones de Jauja y Lircay, donde se tienen índices positivos. Los índices de días y noches calientes son positivos (basados en percentiles por encima de 90th) y con niveles de significancia representativos, esto principalmente se presenta en las estaciones de Huayao y Pilchaca (zona centro de la cuenca), donde también se aprecia la tendencia negativa (índices basados en percentiles por debajo de 10th) de noches y días fríos, con alta significancia estadística, principalmente en la estación de Pilchaca.

El índice DTR se ve incrementado en la zona central de la cuenca (estaciones de Jauja, Huayao, Laive y Pilchaca) con elevada significancia estadística en Huayao y Pilchaca.

FIGURA 10



■ Señal de tendencia en indicadores de temperatura. El incremento es mostrado por el símbolo cruz y el decrecimiento por un círculo. Valores en negrita indican significancia en $p < 0,1$.

CAPÍTULO 4

ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA

“Para fines del Siglo XXI, las temperaturas máxima y mínima en la Cuenca del Mantaro se habrán incrementado, en promedio, 2,7 °C y 2,3 °C respectivamente; la reducción de las precipitaciones se acentuará en verano e invierno y en los sectores norte y centro principalmente”.

4.1 El modelo y el experimento del Time-Slice

4.1.1 El modelo

Con la finalidad de mejorar los procesos físicos del AGCM original desarrollado por la JMA con fines de previsión, se introdujeron mejoras en los esquemas de convección (Arakawa-Schubert) y condensación a gran escala. Así mismo, se introdujo un esquema de radiación incluyendo los efectos de los aerosoles y gases de efecto invernadero (GEI) en la estratopausa; así como un esquema de biosfera simple desarrollado por el MRI. Se introdujo además un nuevo esquema Semi-Lagrangiano cuasi conservativo, el cual resulta ser más eficaz que el esquema convencional Euleriano, en los cálculos a mayores tiempos de integración (ver Tabla N° 15).

Las simulaciones se realizaron en el Earth Simulator (ES), el supercomputador más poderoso del mundo para cuando se hizo el experimento.

Tabla N° 15: Outline del Modelo Japonés TL959L60 de Alta Resolución.

Características	Referencias
Resolución	TL959 (20 km) y 60 niveles en la vertical
Tiempo de integración	Esquema semilagrangiano (Yoshimua, 2004) 4 horas/mes con $\Delta T = 60$ minutos y 30 nodos del ES (640 nodos)
Radiación en onda corta	Shibata y Uchiyama (1992)
Radiación en onda larga	Shibata y Aoki (1989)
Cúmulos (convección)	Arakawa-Schubert (Randall y Pan, 1993)
Nubes	Condensación de gran escala, cúmulos y estratocúmulos
Capa Límite Planetaria	Mellor-Yamada (1974), segundo orden de cierre
Arrastre por Ondas de Gravedad	Iwasaki et al. (1989) y Fricción de Rayleigh
Coordenada vertical	Híbrida sigma – presión

4.1.2 El experimento del Time-Slice

El método del Time-Slice consiste en forzar un modelo atmosférico de alta resolución con concentraciones de GEI correspondiente a un determinado intervalo de tiempo en el futuro (normalmente se considera la concentración del CO₂ duplicado); tomando como condiciones iniciales la temperatura superficial del mar (TSM) y distribución de hielo de un Modelo Acoplado Océano-Atmosférico de Circulación General (AOGCM) de baja resolución (Cubash et al., 1995; Bengtsson et al. 1996; IPCC 2001). El experimento desarrollado por el MRI/JMA de Japón, consistió en generar 5 corridas (AJ, AK, AS, AM y AN) con el modelo atmosférico TL959L60 del JMA, forzado con diferentes campos de TSM como condición de frontera, proveniente del modelo acoplado AOGCM2.3.2 del MRI.

La primera corrida AJ, correspondiente al primer time-slice, o clima actual, fue generada con la climatología observada (1982-1993) de TSM. Las corridas AK y AS fueron generados con la climatología observada de TSM más el cambio de la TSM entre el presente (1979-1998; promedio de 20 años) y el futuro (2080-2099; promedio de 20 años) obtenido de simulaciones del modelo MRI-AOGCM2.3 basado en el escenario de emisión A1B del IPCC y el modelo MIROC (hires), respectivamente. Las corridas AM y AN fueron generados con TSM proveniente del modelo MRI-CGCM2.3.2, para el clima presente y futuro respectivamente. El AGCM ha sido integrado por 10 años para las corridas AJ, AK y AS y por 20 años para las corridas AM y AN (Noda et al., 2006).

4.2 Escenarios climáticos en la Cuenca del Río Mantaro

Una manera de construir escenarios futuros del clima es incorporando la variabilidad (interanual) a dichos escenarios (Wilks, 1992; Woo, 1992; Mearns et al., 1992; Barrow, 1995; citados por Hulme y Lu, 2000), siendo precisamente el cambio de la variabilidad el aspecto más importante en la frecuencia de los eventos extremos del tiempo en el futuro.

En el presente estudio, la construcción de los escenarios futuros de temperaturas máxima y mínima en la Cuenca del Mantaro se basa en la incorporación de la variabilidad climática interanual observada a las salidas del Modelo Japonés de alta resolución MRI/JMA-TL959L60 en sus dos time-slice (AJ y AK). Esta aproximación (Hulme y Lu, 2000), toma las salidas de dicho modelo y los combina con la climatología observada de 30 años (1971-2000). En otras palabras, a las salidas del segundo time-slice (AK) del modelo correspondiente al periodo 2090-2099 se le resta el promedio del primer time-slice correspondiente al periodo 1982-1991, para un mes determinado. En este caso, la variabilidad climática interanual de las salidas del modelo es incorporada a los escenarios y combinada con la variabilidad climática observada.

Para el caso de la precipitación se ha utilizado el ajuste de medias propuesto por Lenderink et al. (2007) para la generación de escenarios.

El cambio proyectado se ha estimado de manera puntual (a nivel de punto de estación) y a nivel espacial. Finalmente, se construyeron mapas estacionales de escenarios de precipitación y temperaturas extremas para finales del Siglo XXI (ver sectorización de los cambios a nivel de estaciones⁵). Es necesario tener presente que estos mapas son representativos de las estaciones utilizadas y su interpolación a menor escala no refleja las verdaderas condiciones de lugares donde no hay información.

Considerando que las proyecciones climáticas no son perfectas, es necesario incluir alguna medida de incertidumbre en los resultados finales, pues en la medida que el usuario incorpore correctamente estas incertidumbres a los escenarios climáticos, planteará mejor sus estrategias de adaptación frente al cam-

5 SNCM: Sector Norte de la Cuenca del Mantaro; SCCM: Sector Norte de la Cuenca del Mantaro; SSCM: Sector Norte de la Cuenca del Mantaro

bio climático (Trancton, 2001). En ese sentido, la inferencia estadística aplicada en el análisis de cambio del clima para finales de siglo se ha realizado a través de la estimación del intervalo de confianza con un nivel de confianza de 95% (Cubasch, 2003).

4.2.1 Escenarios proyectados

Las proyecciones de los modelos para fines de Siglo XXI en los Andes Tropicales indican un calentamiento sostenido de la tropopausa tropical (Vuille, 2007). Según el escenario de emisiones A2, los Andes podrían experimentar un masivo calentamiento del orden de 4,5-5,0 °C para finales de siglo. El escenario de emisiones A1B proyecta un 80-90% del rango proyectado por el escenario A2; mientras que el escenario B1 proyecta la mitad del calentamiento del escenario A2. Tanto escenarios optimistas como pesimistas proyectan un mismo patrón de calentamiento, sólo difiere la amplitud del rango.

4.2.1.1 Temperatura máxima

El ciclo anual de la temperatura máxima sobre los sectores norte, centro y sur de la cuenca se muestra en la Figura N° 11 (izquierda). El comportamiento anual de la temperatura máxima en las estaciones analizadas es muy bien simulado por el modelo en su primer time-slice, asegurando su buena performance en la simulación del clima actual en la región. En la misma figura (entre líneas en rojo), se aprecia las proyecciones del modelo para la última década del presente siglo (segundo time-slice), siendo apreciable la simulación del ciclo anual; pero con un incremento sostenido a lo largo del año que oscila alrededor de 3,0-3,5 °C en el sector norte y de 2,3 °C a 3,4 °C en los sectores centro y sur de la cuenca.

En la Figura N° 11 (derecha) se observa el cambio de la temperatura máxima entre los dos time-slice, el cual varía entre las bandas de 95% de confianza estimados, dicho de otro modo, el cambio esperado de la temperatura máxima fluctuaría entre esos dos límites con una probabilidad de 95%. No se espera variaciones estacionales importantes, a pesar de ello no se puede pasar por alto el ligero incremento que se observa entre invierno y primavera en la mayoría de las estaciones. Así mismo, el límite superior del cambio podría eventualmente sobrepasar el umbral de los 5 °C en algún mes del año, particularmente en el sector norte, Jauja (SCCM) y La Quinua (SSCM).

El análisis anterior se complementa con la Tabla N° 16 y la Figura N° 12 en donde se presenta los valores estacionales de la temperatura máxima para el periodo 2090-2100 y la distribución espacial de los centros de cambio reducidos o incrementados para la cuenca, respectivamente. En verano se aprecia un mayor incremento en SNCM respecto a SSCM; mientras que en el norte de la cuenca el cambio o incremento es hasta de 3,0 °C, en el sur el cambio varía entre 2,4 - 2,9 °C. En el sector centro el cambio en verano no es uniforme, en estaciones cercanas al sector norte el cambio esperado es de 3,0 °C y en estaciones cercanas al sector sur el cambio es de 2,5 °C. Un mayor cambio sin embargo puede observarse en invierno, época en que la mayoría de las estaciones experimenta un cambio superior a los 3,0 °C, situación que se prolonga, pero en menor intensidad, hasta la primavera.

FIGURA 11

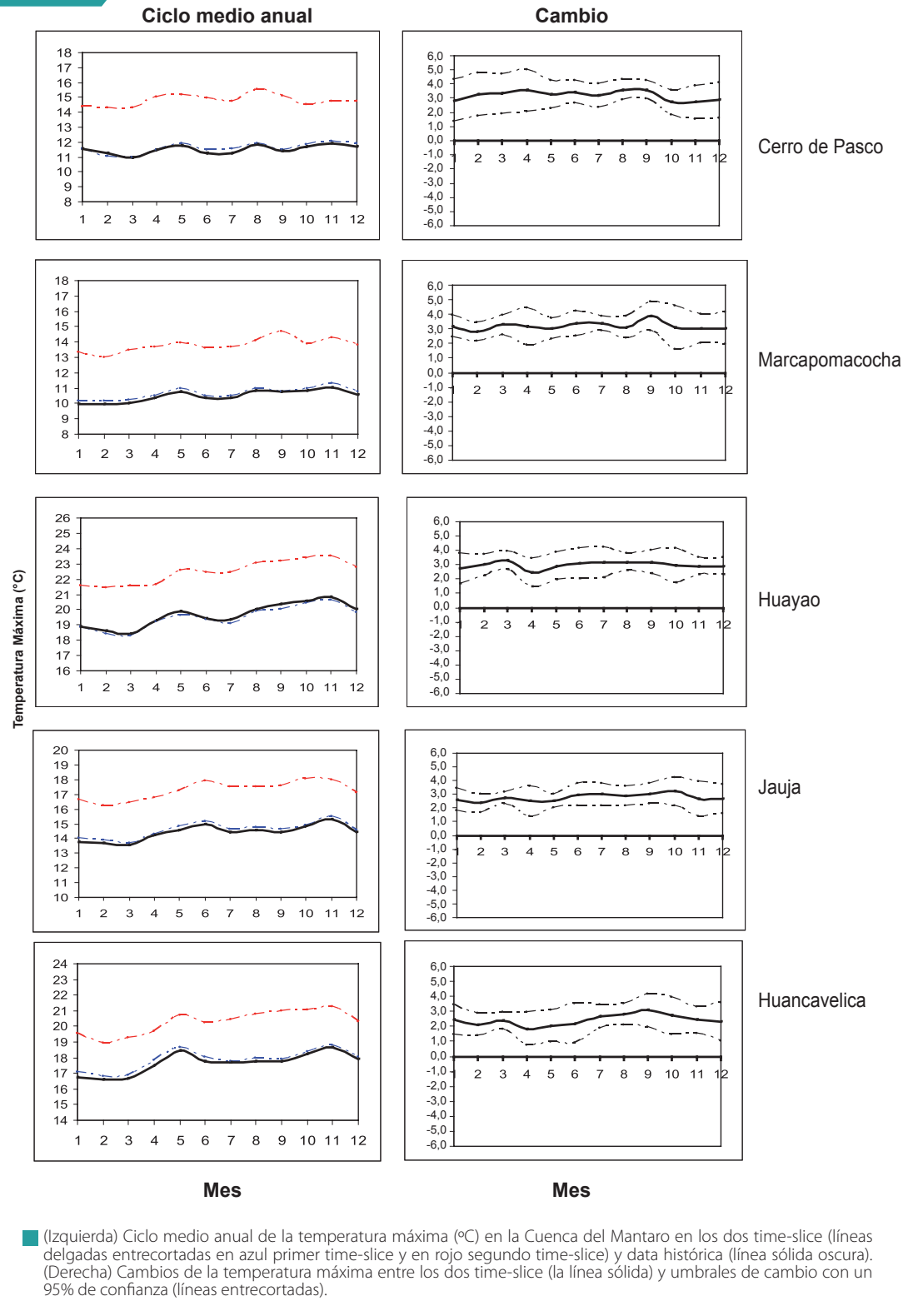


Tabla N° 16: Cambio estacional de la temperatura máxima en algunos puntos de la Cuenca del Mantaro (+/-: intervalo de variación con un 95% de confianza)

N°	Sector	Estación	Provincia	Región	DEF (°C)	+/- (°C)	MAM (°C)	+/- (°C)	JJA (°C)	+/- (°C)	SON (°C)	+/- (°C)
1	SNCM	Cerro de Pasco	Pasco	Pasco	3,0	1,4	3,4	1,3	3,3	0,8	2,9	0,9
2		Marcapomacocha	Yauli	Junín	3,0	0,8	3,2	0,9	3,3	0,7	3,3	1,2
3	SCCM	Huayao	Huancayo	Junín	3,0	0,8	2,9	0,9	3,3	0,9	3,2	0,9
4		Jauja	Jauja	Junín	3,1	1,2	3,3	0,9	3,3	0,9	3,0	1,2
5		Laive	Huancayo	Junín	2,5	0,9	2,6	0,7	3,4	0,9	3,4	1,5
6		Pilchaca	Huancavelica	Huancavelica	2,3	1,0	2,0	0,9	2,6	0,9	2,7	1,1
7	SSCM	La Quinua	Huamanga	Ayacucho	2,9	1,2	2,9	0,9	3,4	0,9	3,2	1,2
8		Lircay	Angaraes	Huancavelica	2,6	1,1	2,5	0,7	2,5	1,0	2,8	1,1
9		Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	2,4	1,1	2,6	0,8	3,0	0,6	2,8	1,0
10		Acobamba	Acobamba	Huancavelica	2,3	1,4	2,5	1,1	3,3	0,8	3,0	1,1

Según la misma tabla y la Figura N° 12, todo indica que el mayor cambio (>3,0 °C) se producirá en SNCM, en pisos altitudinales por encima de los 4 200 msnm de las provincias de Yauli (Marcapomacocha) y Pasco (Cerro de Pasco), calentamiento que será sostenido a lo largo del año. Un patrón similar lo encontramos en parte del SCCM, correspondientes a valles interandinos de Huancayo y Jauja, (≈ 3 300 msnm), provincias importantes en el tema de seguridad alimentaria por su alto rendimiento de papa a nivel nacional, en donde notamos una mayor estacionalidad; es decir, este cambio se acentúa durante el invierno y primavera. En SSCM y parte del sector centro, el área de cambio corresponde a un incremento de menor rango; pero no menos importante, (<3 °C), advirtiéndose, además, una tendencia hacia un mayor incremento en el lado occidental (partes altas de Huancavelica, límite con la región Ica), principalmente en invierno y primavera.

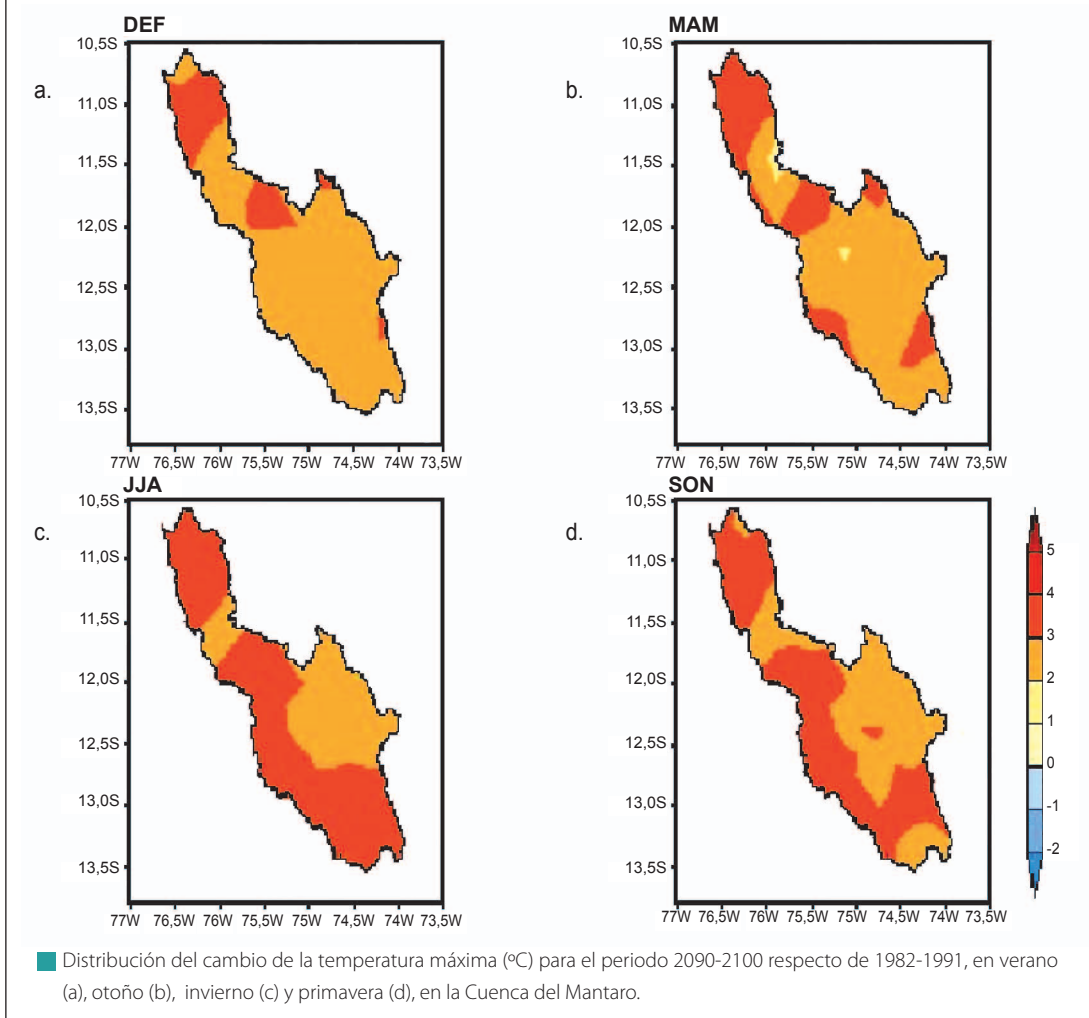
Por todo lo anterior, podemos inferir que la tasa incremental de la temperatura máxima en la Cuenca del Mantaro tendría, en promedio, un rango de 0,2 °C a 0,28 °C por década.

El escenario proyectado para finales de siglo es coherente con la tendencia actual de la temperatura máxima anual (1965-2005), la misma que da cuenta de un incremento entre 0,02 y 0,04 °C año⁻¹; sin embargo, parte de los sectores norte (Cerro de Pasco) y sur (Lircay) de la cuenca actualmente experimentan una tendencia negativa entre -0,02 y -0,06 °C año⁻¹, inclusive. Considerando los cambios proyectados a nivel mundial para el presente siglo por el IPCC (2007), los cuales exceden largamente la variabilidad climática registrada en los últimos 10 000 años (incremento máximo de 6,1 °C para finales de siglo), la tendencia negativa de estas dos localidades, consistente con la tendencia positiva de algunos índices climáticos como el Tx10p (número de días fríos en el percentil 10), podría eventualmente invertirse, o acentuarse, toda vez que los cambios del clima a nivel regional están modulados en buena parte por la dinámica local.

4.2.1.2 Temperatura mínima

Al igual que en la temperatura máxima, las proyecciones a largo plazo de la temperatura mínima presentarán incrementos relativamente uniformes a lo largo del año. En la Figura N° 13 se aprecia el ciclo anual de la temperatura mínima (izquierda) y el cambio de ésta para finales del presente siglo (derecha). El cambio para finales de siglo (Figura N° 13, derecha) no muestra estacionalidad, a excepción de Cerro de Pasco en SNCM en donde el cambio es menor en el invierno. En el sector norte de la cuenca el rango del cambio varía entre 2-3 °C; mientras que en SCCM y SSCM los rangos del cambio varían entre 1,6-2,8 °C y 1,5-3,2 °C respectivamente; en relación a esto último, un menor rango de variación se advierte en Huancavelica (< 1,7 °C) principalmente entre el otoño y primavera.

FIGURA 12

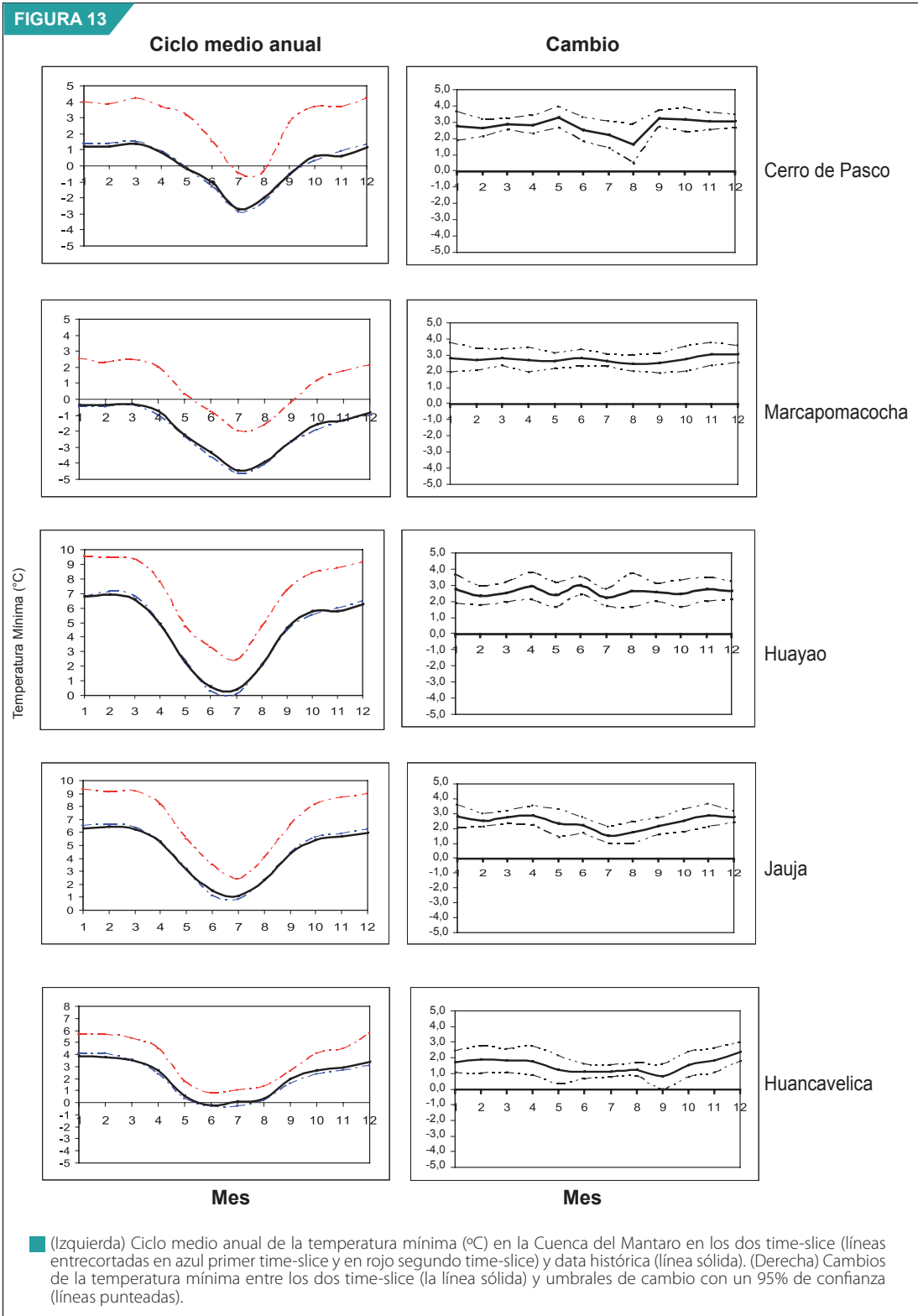


En la variación estacional puntual y areal del cambio de la temperatura mínima para fines de siglo (Tabla N° 17 y Figura N° 14 respectivamente), el rango de cambio predominante es de 2-3 °C, observándose un mayor cambio en el sector sur de la cuenca durante la primavera. Asimismo, un centro de incremento se ubica en el sector centro/norte de la cuenca, correspondiente a las provincias de Yauli y Jauja, situación que se acentúa durante el otoño y primavera.

Los incrementos proyectados de la temperatura mínima guardan preocupante relación con lo actualmente observado. En la Tabla N° 09 (Capítulo 3) se aprecia que la tendencia media anual es de 0,01 °C año⁻¹, acentuándose en el verano (Tabla N° 10), con un valor medio de 0,02 °C año⁻¹, lo cual extrapolado a finales de siglo, coincide con el incremento proyectado por el modelo. Investigaciones recientes en base a los escenarios de emisión extremos A2, B1 y B2 y otros AOGCM dan cuenta de un incremento promedio de 1,3 °C de la temperatura media en el verano sobre la Cuenca del Mantaro para el 2050 (IGP, 2005) y un rango de variación de 3-7 °C en sectores ubicado por encima de los 4 000 msnm en la región Arequipa, para el 2100 (Marengo et al., 2007). En el presente estudio, el rango del cambio de la temperatura mínima (Figura N° 13, derecha) oscila entre 1,0-4,2 °C.

En el contexto anterior, los cambios en la temperatura máxima y mínima en la Cuenca del Mantaro, proyectados para finales de siglo, vislumbran un panorama de calentamiento que podría afectar a la población en diversas formas y la principal concierne a la seguridad alimentaria, tanto de la región como de aquellas que se abastecen de ella. No debe perderse de vista el hecho de que más de un tercio de la po-

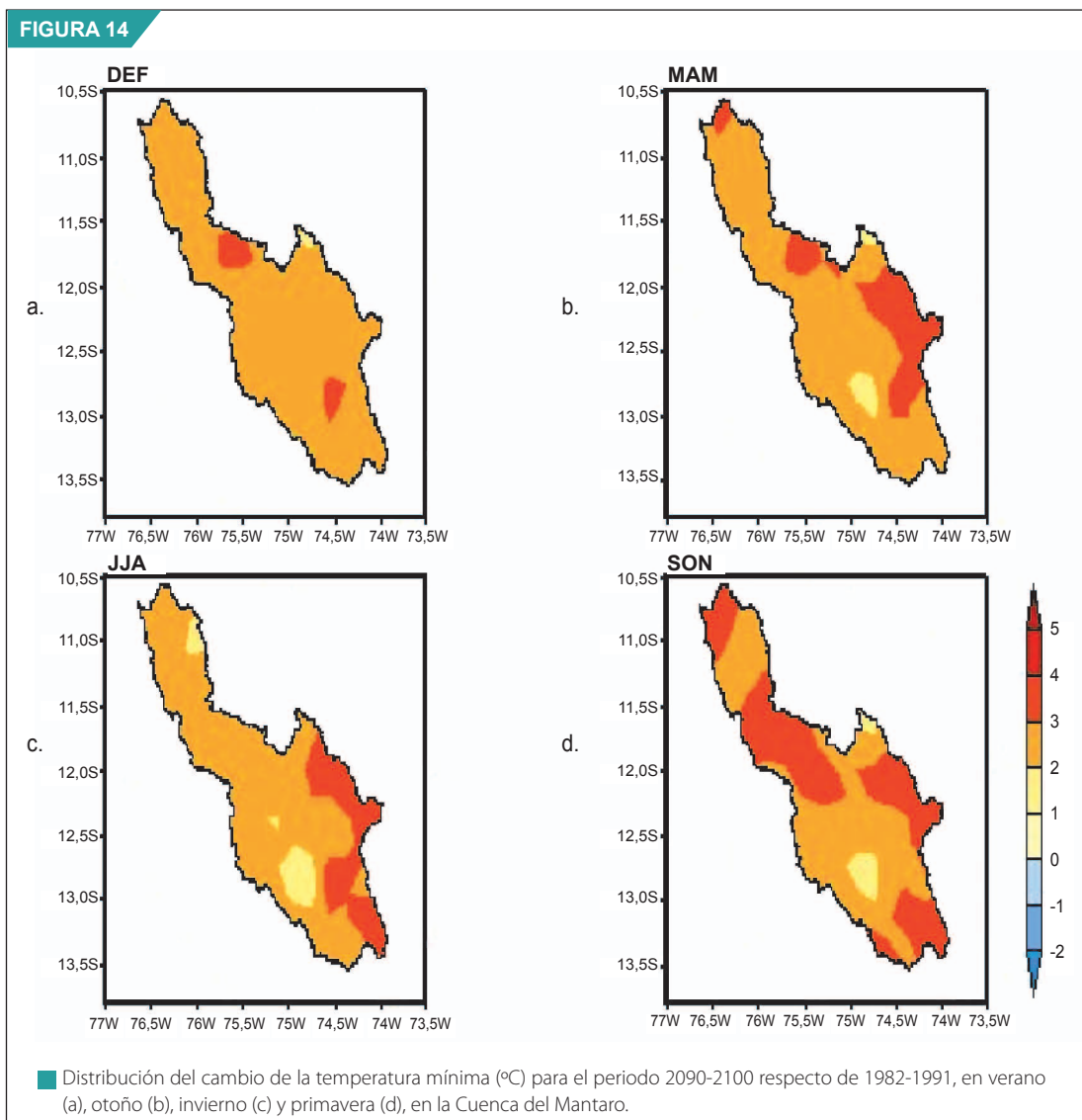
FIGURA 13



blación mayor de 15 años se dedica a la agricultura en los departamentos de Junín, Pasco y Huancavelica (ver Tabla N° 02). Además, cultivos como la alcachofa y maíz choclo han incursionado exitosamente en años recientes sobre la margen izquierda del río, siendo las temperaturas actuales de la región propicias para su óptimo desarrollo.

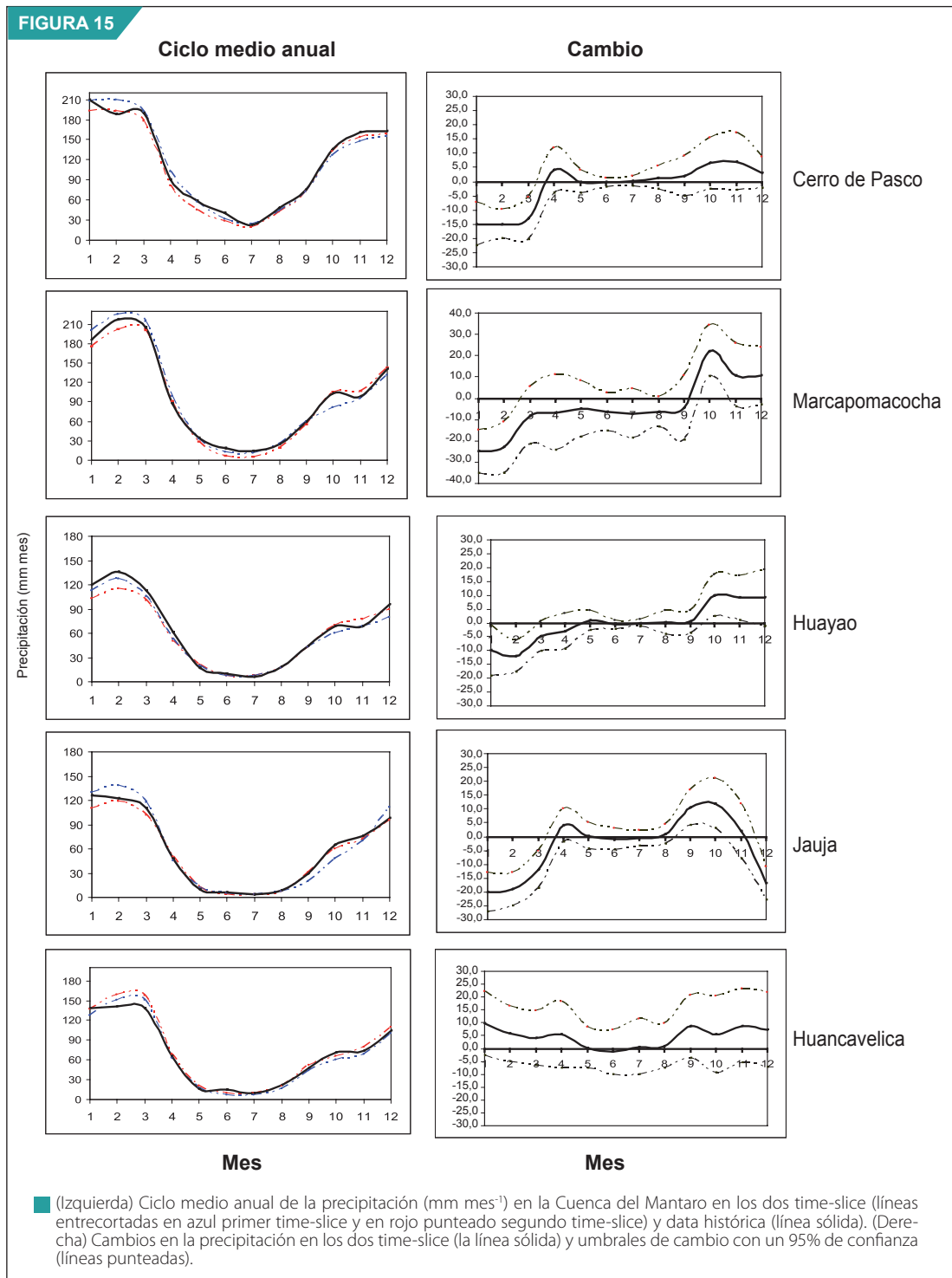
Tabla N° 17: Cambio estacional de la temperatura mínima en algunos puntos de la Cuenca del Mantaro (+/-: intervalo de variación con un 95% de confianza)

N°	Sector	Estación	Provincia	Región	DEF (°C)	+/- (°C)	MAM (°C)	+/- (°C)	JJA (°C)	+/- (°C)	SON (°C)	+/- (°C)
1	SNCM	Cerro de Pasco	Pasco	Pasco	2,8	0,6	3,0	0,5	2,0	0,6	3,0	0,6
2		Marcapomacocha	Yauli	Junín	2,8	0,8	2,7	0,6	2,4	0,5	2,7	0,7
3	SCCM	Huayao	Huancayo	Junín	2,7	0,6	2,7	0,7	2,5	0,7	2,7	0,7
4		Jauja	Jauja	Junín	2,9	0,5	2,7	0,7	1,6	0,6	2,6	0,7
5		Laive	Huancayo	Junín	2,9	0,6	2,8	0,5	2,3	0,5	2,9	0,7
6		Pilchaca	Huancavelica	Huancavelica	2,8	0,8	2,6	0,8	1,8	0,5	2,5	1,0
7	SSCM	La Quinua	Huamanga	Ayacucho	2,6	0,4	2,8	0,4	2,7	0,9	2,8	0,6
8		Lircay	Angaraes	Huancavelica	2,7	0,8	3,2	0,9	3,0	1,0	3,0	0,9
9		Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	2,2	0,7	1,7	0,8	1,3	0,5	1,5	0,8
10		Acobamba	Acobamba	Huancavelica	2,7	1,5	2,5	1,3	3,2	1,0	2,4	1,7



4.2.1.3 Precipitación

El modelo presenta un buen skill en la representación del clima actual, al simular correctamente el ciclo anual de la precipitación (Figura N° 15, izquierda), sobrestimando ligeramente los montos acumulados, situación que es más evidente durante el verano y en localidades ubicadas por encima de los 3 600 msnm, como Huancavelica, Cerro de Pasco y Marcapomacocha; asimismo, se aprecia también una leve subestimación durante la primavera en algunas localidades.



La simulación del ciclo anual de la precipitación en el clima futuro o segundo time-slice (línea entrecortada en rojo) es coherente con el comportamiento observado, no obstante se espera una ligera reducción de las lluvias en verano e incrementos en primavera en los sectores norte y central; mientras que en el sector sur las lluvias se incrementarán en el verano y resto del año.

Como se aprecia en la Figura N° 15, los cambios proyectados por el modelo para el periodo 2090-2100 son bastante conservadores, en otras palabras, los cambios estarían dentro de su variabilidad normal, aunque con un sesgo al incremento. A diferencia de las temperaturas extremas, el cambio de la precipitación (derecha) si presenta estacionalidad, observándose un incremento de lluvias en el sector sur de la cuenca entre 5% y 10% en el verano, 8% en otoño, de 6% a 14% en primavera y sin cambios significativos en el invierno, excepto en Acobamba (Región Huancavelica a 3 236 msnm) donde se espera una reducción del 13%.

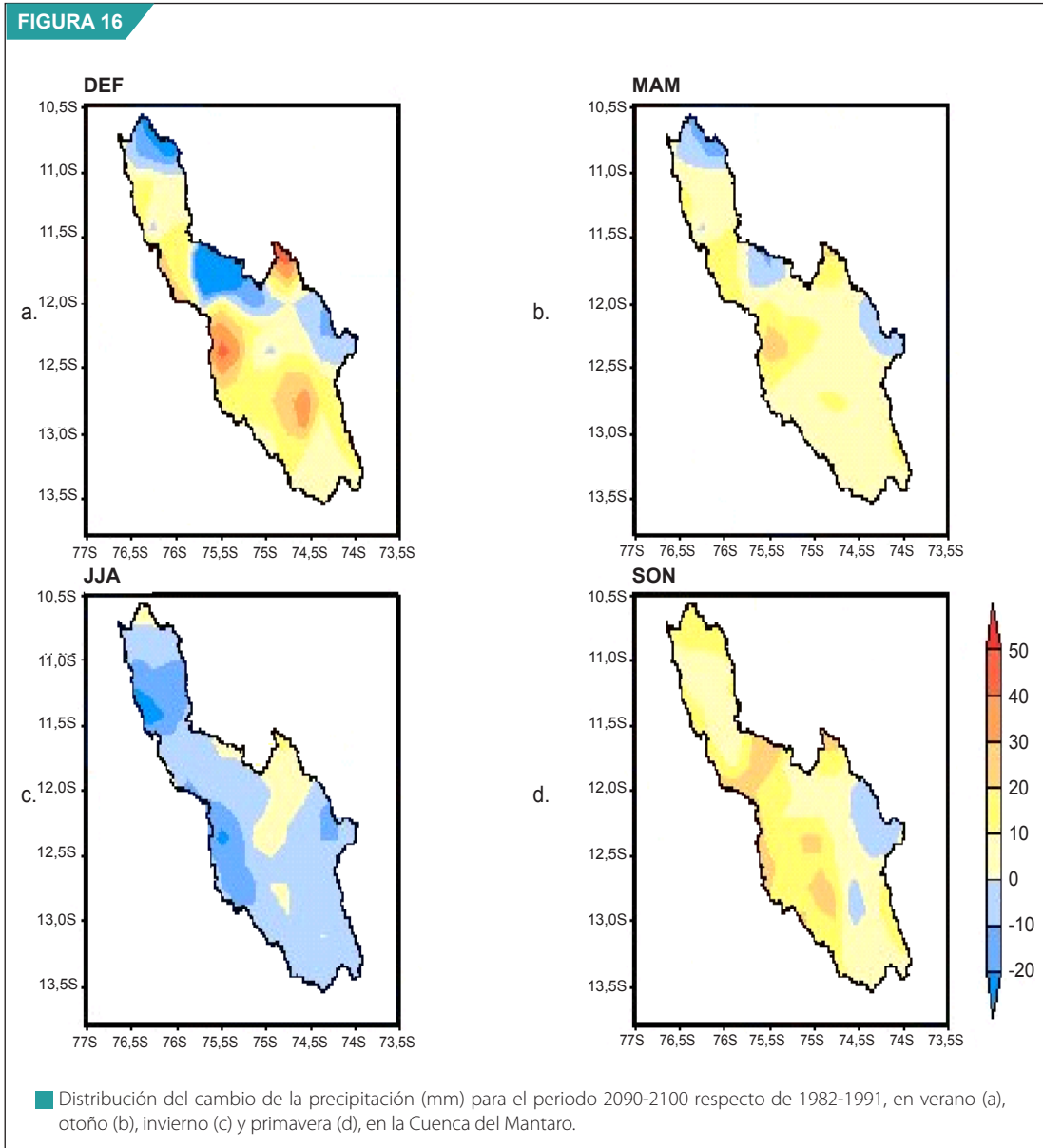
En el sector centro de la cuenca, sector donde se ubica la Subcuenca del Shullcas que se alimenta de los deshielos del nevado Lasuntay a 5 720 msnm (Cordillera de Huaytapallana), se proyecta una reducción de lluvias en el verano de aproximadamente 5% (Huancayo) y 16% (Jauja), tendencia que se mantiene en parte del otoño; no se esperan cambios importantes en invierno y en primavera se espera un incremento del orden de 3 a 14%.

En Pilchaca (3 570 msnm), localidad cercana al sector sur de la cuenca, pero dentro del dominio del sector central, los cambios esperados indican un incremento de lluvias a lo largo de todo el año (excepto en invierno: -14%), comportamiento acorde con lo proyectado precisamente para el sector sur de la cuenca.

En el sector norte de la cuenca, en localidades ubicadas por encima de los 4 200 msnm como Marcapomacocha (Junín) y Cerro de Pasco (Pasco), la disminución de lluvias en el verano será de alrededor de 6%, situación que se prolongará hasta el otoño (5%). En invierno no se esperan cambios importantes en Cerro de Pasco; sin embargo, en Marcapomacocha se estima que la reducción de lluvias será del orden de 35%, si a ello superponemos un escenario más cálido en el que las temperaturas extremas se incrementarán entre 2,5 °C y 3,3 °C para finales de siglo sobre este sector, estaríamos frente a una zona altamente vulnerable a los cambios del clima en el mediano o largo plazo. Estos resultados se tornan más consistentes al ser contrastados con los resultados encontrados por Marengo et al. (2007) en un estudio de escenarios climáticos sobre Arequipa, ellos encontraron que para fines de siglo, los pisos altitudinales por encima de los 4 000 msnm experimentarán un aumento significativo de la temperatura por encima de los 5 °C inclusive; además de una reducción de las lluvias del orden de 2-3 mm día⁻¹ (en un escenario pesimista de emisión), previéndose el crecimiento de los denominados "desiertos altoandinos" con la consecuente afectación sobre la ganadería de la puna y la agricultura en los valles interandinos.

Tabla N° 18. Cambio estacional de la precipitación (porcentual y en mm) en algunos puntos de la Cuenca del Río Mantaro

N°	Sector	Estación	Provincia	Región	DEF		MAM		JJA		SON	
					(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)
1	SNCM	Cerro de Pasco	Pasco	Pasco	-5	-27,0	-3	-9,0	1	2,0	4	15,0
2		Marcapomacocha	Yauli	Junín	-7	-38,0	-6	-20,0	-35	-20,0	11	29,0
3	SCCM	Huayao	Huancayo	Junín	-4	-13,0	-4	-7,0	-1	-0,5	11	19,0
4		Jauja	Jauja	Junín	-16	-56,0	-5	-8,0	-3	-0,5	14	24,0
5		Ingenio	Huancayo	Junín	-6	-21,0	2	4,0	-7	-2,0	3	5,0
6		Pilchaca	Huancavelica	Huancavelica	4	14,0	9	15,0	-14	-6,0	5	8,0
7	SSCM	La Quinua	Huamanga	Ayacucho	5	20,0	8	14,0	-3	-1,0	14	19,0
8		Lircay	Angaraes	Huancavelica	5	18,0	7	14,0	-2	-1,0	6	9,0
9		Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	6	23,0	5	10,0	2	1,0	12	23,0
10		Acobamba	Acobamba	Huancavelica	10	23,0	2	3,0	-13	-5,0	-1	-2,0



En relación a lo anterior, la proyectada reducción de lluvias en el largo plazo en los sectores norte y centro de la cuenca son particularmente consistentes con el incremento del número de días secos consecutivos y la disminución de días de precipitación máxima que se viene observando actualmente en ese sector. Específicamente en el caso del sector norte, los datos históricos revelan una tasa de decrecimiento altamente significativa de hasta 28 mm año^{-1} ($4,5$ a 7 mm año^{-1}); mientras que en el sector central la tasa de decrecimiento es de $2,5 \text{ mm año}^{-1}$. En el sector sur, la tendencia observada indica una reducción de lluvias, principalmente entre Acobamba, Lircay y La Quinua (no se muestran figuras en este resumen), situación que es opuesta a lo proyectado para fines de siglo; mientras que en Huancavelica y sector suroccidental la tasa de incremento de 5 mm año^{-1} , es consistente con lo proyectado para finales de siglo.

En la Tabla N° 18 y Figura N° 16 se aprecian con mayor claridad las áreas de mayor y menor cambio de la precipitación que se discuten líneas arriba.

4.3 Proyecciones del caudal del río Mantaro al año 2035

Considerando que la alteración de la oferta y demanda del recurso hídrico en la región andina como consecuencia del calentamiento global podría desencadenar conflictos sociales en el corto y mediano plazo (mucho antes del 2100), se ha analizado el caudal histórico del río Mantaro en la estación de control La Mejorada (en sector sur de la cuenca) y su proyección al año 2035 se basa en un análisis estocástico de dicha información (con el modelo SAMS).

Los caudales generados para el periodo 2008-2035, a partir de la estación hidrológica de control La Mejorada, se presentarían dentro de sus valores normales, no obstante el periodo 2029-2035, serían mayormente años secos para el tramo central-sur del río Mantaro. Por otro lado, existe la posibilidad que se presente entre 1 a 3 años normales pero en ningún caso años húmedos.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente estudio se desarrolló para apoyar los esfuerzos regionales (Ecuador, Bolivia y Perú) en el propósito de definir medidas de adaptación y alternativas de políticas que enfrenen los impactos previstos del cambio climático; así como implementar actividades de adaptación piloto de alta prioridad en cuencas prioritarias, en el marco del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales. En el caso del Perú, el área de interés corresponde a las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba. En el primer caso, específicamente en la Subcuenca Glaciar del Shullcas (vertiente izquierda del río Mantaro, en las proximidades de la Cordillera de Huaytapallana), que involucra los distritos de Huancayo y El Tambo; anexos Uñas, Vilcacoto, Cullpa Alta, Cullpa Baja, Cochás Chico, Cochás Grande, Incho Aza y Acopalca, que en conjunto representan una población de 700 000 habitantes en un área de aproximadamente 232,52 km².

La construcción de los escenarios de precipitación y temperaturas máxima y mínima se basaron en las salidas del modelo japonés de alta resolución en el contexto del escenario de emisión A1B del IPCC. Previamente, se determinaron índices climáticos y tendencias actuales con datos climáticos observados en 14 estaciones meteorológicas, con un récord promedio de 40 años; así como una aproximación del caudal en un sector del río Mantaro (La Mejorada) para el año 2035. Cuenta además con la experiencia del equipo de trabajo del Centro de Predicción Numérica del SENAMHI en la generación de escenarios climáticos en las cuencas de los ríos Piura y Santa (PROCLIM, 2005) y la permanente participación del Servicio en estudios relacionados con el tema de cambio climático. Las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

1. En relación al diagnóstico del clima actual

- La información histórica observada revela un incremento sostenido de las temperaturas extremas (máxima y mínima) anuales desde 1965, del orden de 0,01 a 0,02 °C año⁻¹ en promedio, lo cual es consistente con la tendencia positiva del índice de días y noches calientes, observado principalmente en las regiones altoandinas de los sectores norte (Marpomacocha) y central (Pilchaca) de la cuenca. No obstante algunas localidades como Jauja, Lircay y Cerro de Pasco, actualmente presentan una tendencia de decrecimiento de la temperatura máxima del orden de 0,02-0,06 °C año⁻¹; además de un incremento del índice de rango diurno e incremento del número de días fríos para el caso de Jauja y Lircay, respectivamente.
- La tendencia de las precipitaciones en los últimos 40 años no es uniforme, el sector norte presenta tendencias decrecientes entre 14-28 mm año⁻¹. La señal de esta aparente disminución de las precipitaciones en los últimos 40 años es más evidente en verano y tiene consistente coherencia con la significativa reducción del número de días húmedos consecutivos y la disminución de la intensidad de las lluvias. También es decreciente la tendencia en el sector central; pero menos acentuada que el norte y una mezcla de ambos en el sector sur de la cuenca, siendo el lado suroccidental de este sector (Huancavelica y Huancalpi) el que experimenta en los últimos años un incremento entre 5-8 mm año⁻¹. Este aparente incremento de las precipitaciones en los últimos 40 años, en este sector de la cuenca, es más evidente en verano y es consistente con el incremento de las precipitaciones extremas (muy intensas).

- El comportamiento anual de las heladas en los últimos 30 años presenta una tendencia decreciente en gran parte de la cuenca, es decir, hay una reducción del número de días con helada lo cual es más significativo en el sector norte de la cuenca (Marcapomacocha y Acobamba); opuestamente Jauja presenta una tendencia de incremento del número de días con heladas. La mayor frecuencia de temperaturas menores de 0 °C (heladas) se presenta en invierno con una frecuencia de 10-25 días por mes en el sector central y sur de la cuenca; mientras en el sector norte la frecuencia es de 22-30 días por mes. En el verano la frecuencia es menor a excepción de Marcapomacocha y Cerro de Pasco, que presentan una frecuencia de 15 días por mes. Las localidades de Pilchaca, Huancalpi, Lircay y La Quinua presentan una menor frecuencia de heladas durante el año, no superando los 10 días por mes durante el invierno.
- Desde la década de los ochenta, las lluvias presentan un comportamiento irregular con situaciones de sequías y deficiencias moderadas en la cuenca, que incluso se han presentado consecutivamente por cuatro años (Acobamba). Las sequías y deficiencias moderadas significativas a nivel de toda la cuenca se han presentado en los periodos lluviosos que corresponden a los años 1965/66, 1968/69, 1991/92 y 1994/95, siendo la más intensa la de 1991/92, la cual tuvo una duración de dos años consecutivos a nivel de cuenca; le sigue la sequía de 1994/95, que también tuvo una duración de dos años pero su segundo año presentó sequías en forma localizada. Los periodos húmedos intensos y frecuentes se han presentado en toda la cuenca entre 1969 y 1990, a partir de los noventa la frecuencia de periodos húmedos ha disminuido en gran parte de la cuenca.
- Las correlaciones obtenidas nos indican que gran parte de la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca está asociada a la variabilidad interanual (Niño) y que esta zona está complementada con la intraestacional. Durante un año Niño, los sectores centro y sur de la cuenca presentan precipitaciones menores a sus valores normales; mientras que en el sector norte las precipitaciones tienden a ser normales.

2. En relación al clima para el 2090-2100

Las proyecciones del clima en la Cuenca del Mantaro al 2100 se resumen de la siguiente manera: Un progresivo incremento de las temperaturas máxima y mínima en toda la cuenca, con valores promedio de 2,7 °C y 2,3 °C, respectivamente, en relación con el clima actual; reducción de las precipitaciones durante el verano e invierno en los sectores norte y centro principalmente, así como un incremento generalizado en primavera, aunque con mayor incidencia en el sector sur de la cuenca.

Del análisis estacional, arribamos a las conclusiones siguientes:

- En el caso de la temperatura máxima, el cambio fluctúa entre 2,5-3,1 °C en verano; en otoño el incremento varía entre 2,0-3,3 °C; en invierno el cambio es mayor y generalmente es por encima de los 3,0 °C y en primavera el cambio fluctúa entre 2,7-3,4 °C. Se estima además que estos cambios serán más acentuados durante el invierno y primavera y en regiones ubicadas por encima de los 4 000 msnm del sector norte de la cuenca, no obstante una actual tendencia de decrecimiento como el que presenta Cerro de Pasco; asimismo, en las proximidades de la Subcuenca Glacial del Shullcas (sector central de la cuenca) en pisos altitudinales por encima de los 3 300 msnm.
- El rango de variación proyectado de la temperatura mínima es de 2,2-2,9 °C en verano y de 1,7-3,0 °C en otoño. Dicho cambio será más acentuado sobre los sectores centro y norte; en el invierno el incremento varía en un rango mayor a los anteriores, éste fluctúa entre 1,3-3,0 °C, siendo el sector sur el que experimentará un mayor cambio; en primavera el cambio es del orden de 1,5-3,0 °C y es más acentuado en el sector norte y sur. Es necesario puntualizar que en medio de un panorama de incremento sostenido de la temperatura mínima, es la ciudad Huancavelica la que presenta un menor cambio en relación a lo proyectado en el resto de la cuenca (1,3-2,2 °C), en contraposición con Lircay y Cerro de Pasco que presentan el máximo cambio (2,8-3,0 °C).

- En lo que respecta a las precipitaciones, los cambios en el largo plazo no son uniformes en toda la cuenca. En verano se esperan leves incrementos en el sector sur del orden de 5-10% en relación al clima actual y de leves a moderadas reducciones en los sectores norte y centro de la cuenca del orden de 5-16%, siendo éstas más acentuadas en el sector centro, próximo a la Subcuenca del Shullcas. En otoño se espera un cambio similar al descrito en verano, pero en menor proporción. En invierno no hay variaciones importantes, excepto en pisos altitudinales encima de los 4 000 msnm del sector norte, donde se espera una reducción de las lluvias de hasta un 35%. En primavera se proyecta un incremento generalizado en toda la cuenca del orden de 3-14%, aunque algo superiores en el sector suroccidental y central (12-14%).
- Superponiendo los escenarios antes mencionados, se prevé que las zonas más vulnerables de la cuenca corresponden a los sectores próximos a la Subcuenca del Shullcas y a las partes altas del sector norte de la cuenca; en otras palabras, el calentamiento y reducción de lluvias se manifestarán más explícitamente en estos dos sectores, ubicados encima de los 4 000 msnm. En contraposición a ello, el sector sur y suroccidental podría eventualmente presentar problemas de exceso de lluvias.

RECOMENDACIONES

Considerando que las series históricas son relativamente cortas para estudios de cambio climático, y que además existen incertidumbres inherentes al modelo y a las proyecciones climáticas de muy largo plazo, los resultados del presente estudio deben ser tomados como una aproximación del clima futuro. Es importante tener en cuenta que éste es el primer trabajo realizado sobre cuencas alto andinas en Sudamérica con un modelo global de altísima resolución que ha demostrado una habilidad sin precedentes en la simulación del clima actual de las cuencas estudiadas. Sugerimos al lector tomar en cuenta los intervalos de confianza del cambio proyectado para fines del siglo; asimismo, considerar que estos escenarios climáticos se contextualizan sólo en el escenario de emisión A1B, escenario en el que todas las opciones energéticas se utilizan sin que ninguna predomine sobre las otras, siendo la principal asunción la duplicación de las emisiones de CO₂ al año 2100.

BIBLIOGRAFÍA

Avalos, G. (2005). Validación del pronóstico de precipitación del modelo regional Eta/SENAMHI durante periodos secos y lluviosos. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. 98 pp., UNALM.

Avalos, G. (2007). Projected Climate over the central Andes Countries caused by Global Warming. En Vergara, W.; Perez, E.; Méndez, J.; Magaña, V.; Martínez, M.; Ruiz, F.; Avalos, G.; Palacios. Visualizing Future Climate in Latin America: Results from the Application of the Earth Simulator. Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 30, The World Bank, Washington DC. Pp. 61-81.

Australian Bureau of Meteorology (1992). Drought Review, Number 249.

Bengtsson, L.; M. Botzet and M. Esch. (1996). Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? *Tellus*, 48A, 57-73.

Beniston, M. (2000). Environmental change in mountains and uplands. Eds. Oxford University Press, USA, 172 pp.

Cholaw, B.; Cubash, U. y Hagemann, S. (2003). Impacts of global warming on changes in the East Asian monsoon and the related river discharges in a global time-slice experiment. *Clim. Res.* 24: 47-57 pp.

Cubash, U.; Waskewitz, J.; Hegerl, G. y Perlwitz, J. (1995). Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Clim Change* 31: 273-304.

Frich, P.; Alexander, L.; Della-Marta, P.; Gleason, B.; Haylock, M.; Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climate extremes during the second half of the twentieth century. *Clim Res.* 19: 193-212.

Garreaud, R. D.; Aceituno, P. (2007). Atmospheric circulation over South America: Mean features and variability. Chapter 2 in *The Physical Geography of South America*. Eds. Oxford University Press.

Hulme, M. and Lu, X. (2000). How to factor interannual climate variability into Climate Scenarios. A note prepared for the DETR Fast-Track Impacts Group.

IGP (2005). Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro. Vol. I, II y III.

IPCC (2001). Tercer Informe de Evaluación. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J. T. Houghton et al. Eds., Cambridge University Press, UK, 881 pp.

IPCC (2007). Cuarto Informe de Evaluación. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Alley, R. et al. Eds., Cambridge University Press, UK.

Kamiguchi, K. et al. (2005). Changes in precipitation-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model. SOLA, submitted.

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. 4th Ed., Charles Griffin, London.

Kousky, V.; Higgins, R. (2007). An Alert classification System for Monitoring and Assessing the ENSO Cycle. *Weather and Forecasting*. 22, 353 -371.

- Kusunoki, S. et al. (2005) "Change of Baiu in global warming projection by an atmospheric general circulation model with 20-km grid size". *J. Meteor. Soc. Japan*. Submitted.
- Lenderink, G.; Buishand, A. y Deursen, W. (2007). "Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(3), 1145-1159.
- Lenters, J.; Cook, K. (1997). "On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 656-677.
- Lenters, J.; Cook, K. (1999). "Summertime Precipitation Variability over South America: Role of the Large-Scale Circulation". *Monthly Weather Review*, 127, 409 – 431.
- Mann, H. B. (1945) "Non-parametric test against trend". *Econometrica*, 13: 245-249.
- Marengo, J.; Obregón, G. y Valverde, M. (2007). Elaboración de escenarios climáticos para la Región Arequipa. "Medidas Piloto de Adaptación al Cambio Climático en el Perú". GTZ.
- Mizuta, R. et al. (2006). "20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model –mean climate states-". *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 165-185.
- Montecinos, A.; Díaz, A.; Aceituno, P. (2000). "Seasonal Diagnostic and Predictability of Rainfall in Subtropical South America based on Tropical Pacific SST". *Journal Climate*, 13,746 -758.
- Nobre, P.; Marengo, J.; Cavalcanti, I.; Obregón, G.; Barros, V.; Camilloni, I.; Campos, N.; Ferreira, G. (2006) "Seasonal to Decadal Predictability and Prediction of South American Climate". *J Climate*, 19, 5988 – 6004.
- Noda, A.; Kusunoki, S. y Yoshizaki, M. (2006). "Development of Super High Resolution Global and Regional Climate Models". *Atmospheric and Oceanic Simulation*, Cap. I.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. (1999). "South America". *Meteorological Monograph*. Vol. 27, 49. 119-139.
- SENAMHI (1988). Mapa de Clasificación Climática del Perú. Método de Thornthwaite. Eds. Senamhi Perú, 50 pp.
- SENAMHI (2004). Tendencia de la precipitación en la cuenca hidrológica del Lago Titicaca. Díaz, P. A., 20 pp.
- SENAMHI (2005) Climate change scenarios in Peru to 2050: Piura river basin. Autores: Rosas, G.; Díaz, A.; Avalos, G.; Oria, C.; Acuña, D.; Cornejo, A.; Metzger, L.; Fano, G.; Carrillo, M.; Miguel, R. Eds. SENAMHI Perú, 170 pp.
- SENAMHI – MINAG (2005). Atlas de Heladas. Autor: Huamaní, J. C., 37 pp.
- SET y L.T. Asociado (2005). Estudio Definitivo de Suministro de Energía Eléctrica en 60 kV para Huancayo Este.
- SENAMHI (2007). Escenarios de cambio climático en la Cuenca del Río Urubamba para el año 2100. Autores: Rosas, G.; Avalos, G.; Díaz, A.; Oria, C.; Acuña, D.; Metzger, L. y Miguel, R. Eds. SENAMHI Perú, 124 pp.
- Takahashi, K. (2005). Downscaling estadístico de la precipitación en la Cuenca del Mantaro. 17 pp.
- Valiente, O. M. (2001). "Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación". *Invest. Geog.*, 26: 59-80.
- Vuille, M. (2007). Climate change in the Tropical Andes – Impacts and consequences for glaciation and water resources. Part I, II and III. A report for CONAM and the World Bank.

Uchiyama, T. et al. (2005). Changes in temperature-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model. SOLA, submitted.

Walter International, Vol.10: 111-120.

Whilhite, D. A y Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions.

Páginas Web consultadas

<http://www.met.inf.cu/sequia/amigo.asp>

Proyecto Friend Amigo Eventos hidrológicos mínimos (Sequías):

http://sepiensa.org.mx/contenidos/2005/l_calenta/calentamiento_1.htm

http://www.distriluz.com.pe/electrocentro/01_empresa/resena.html

<http://www.sumaqueru.com.pe>

<http://www.lenntech.com/greenhouse-effect.html>

<http://www.ipcc.ch>



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Ministerio del Ambiente - MINAM
Av. Javier Prado Oeste 1440 - San Isidro - Lima - Perú
Telf.: (511) 6116000
www.minam.gob.pe