

Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la Región San Martín

Reporte ejecutivo

Autores:

Grinia Avalos Roldán, Alan Llacza Rodríguez, Gerardo Jácome, Christian Barreto Schuler
Dirección General de Meteorología
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI

Año: 2013

La presente publicación forma parte del Proyecto “Proyecto PET 1194: Fortalecimiento de Capacidades Regionales en la Gestión del cambio climático”, implementado en el Perú por el Ministerio del Ambiente – MINAM, con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo - BID.

Ministerio del Ambiente – MINAM

Av. Javier Prado Oeste 1440, San Isidro, Lima.
Teléfono (51-1) 611600
<http://www.minam.gob.pe>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI

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

El contenido de este documento puede ser reproducido mencionando la fuente del SENAMHI.

Fotos: Laguna Azul y Cataratas de Ahuashiyacu (San Martín, Perú)

Diseño: SENAMHI

Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la Región San Martín

Reporte ejecutivo

Ministro del Ambiente
Manuel Pulgar-Vidal Otálora

Viceministro de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales
Gabriel Quijandría Acosta

Director General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos
Eduardo Durand López-Hurtado

Especialista Técnico Nacional PRAA/Perú
Josefa Rojas

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

Presidente Ejecutiva del SENAMHI
Amelia Díaz Pabló

Director Científico
Esequiel Villegas Paredes

Director General de Meteorología
Luis Alfaro Lozano

Directora de Meteorología Aplicada
Gabriela Rosas Benancio

Directora de Climatología
Grinia Avalos Roldán

Equipo Técnico del SENAMHI – Perú

Autores : Grinia Avalos Roldán
Alan Llacza Rodríguez
Gerardo Jácome Vergaray
Christian Barreto Schuler

Contribuciones : Clara Oria Rojas
Félix Cubas Saucedo
Cristina Dávila Arriaga

EspecialistaSIG : Silvia Guerra Gamarra

Computación de alto rendimiento : Otto Huiman Carrasco
Alan Llacza Rodríguez
Gerardo Jácome Vergaray

Revisión : Lic. Luis Alfaro Lozano

Contenido

<i>Agradecimientos</i>	5
<i>Siglas</i>	6
<i>Mensajes Claves</i>	7
Capítulo 1 Introducción.....	8
Capítulo 2 Región San Martín: Clima actual y tendencias recientes	9
Capítulo 3 Modelos climáticos y escenarios de emisiones.....	15
Capítulo 4 Proyecciones del clima en la Región San Martín.....	18
Capítulo 5 Cuantificación de la incertidumbre.....	20
Capítulo 6 Recomendaciones.....	22
Capítulo 7 Conclusiones.....	23
Referencias	24
Anexos	26

Agradecimientos

Los autores a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, expresan su agradecimiento al Ministerio del Ambiente como institución implementadora del “Proyecto PET 1194: Fortalecimiento de Capacidades Regionales en la Gestión del cambio climático” en el Perú. Asimismo, al Fondo Nacional del Ambiente como unidad administradora de los fondos del Banco Interamericano de Desarrollo.

Al Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por la disponibilidad de las salidas numéricas de los Modelos Globales del Proyecto CMIP5.

Siglas

CMIP5 – Coupled Model Inter Comparison Project Phase 5

ENOS – El Niño – Oscilación Sur

GEI– Gases de Efecto Invernadero

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

MINAM – Ministerio del Ambiente del Perú

MPIfM - Max Planck Institute for Meteorology

MCG – Modelo Climático Global

MCGAOA – Modelo de Circulación General Acoplados Atmósfera/Océano/Hielo marino

MCR – Modelo Climático Regional

NCAR –National Center for Atmospheric Research

NCEP –National Center for Environmental Prediction

PRAA – Proyecto de adaptación al impacto del retroceso acelerado de glaciares en los Andes tropicales

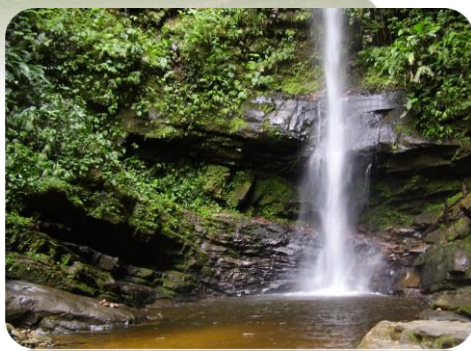
RCP – Representative Concentration Pathway

SENAMHI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

SCNCC – Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático

WRF – Weather Research and Forecasting Model

MENSAJES CLAVE



- En el presente estudio se ha considerado realizar una evaluación de los últimos modelos globales CMIP5 del IPCC para Perú, con miras a implementar técnicas combinadas de regionalización, en un futuro próximo, para generar escenarios regionales en la región San Martín. El horizonte de evaluación corresponde al time-slice 2030, bajo el contexto del nuevo escenario de emisiones RCP8.5, habiéndose considerado como periodo de referencia 1971-2000.
- Los modelos globales utilizados son: CCSM4, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR. Los principales **cambios proyectados** en la **Región San Martín**, considerando el promedio de los modelos globales son:

1,0 °C a 1,5 °C

Incremento de la temperatura del aire para el año 2030.

- El cambio climático es un hecho irrefutable calificado por el IPCC (2007a) como “inequívoco”, y sus impactos son ya importantes.
- Según los resultados del Grupo de Trabajo II del Cuarto informe Científico AR4 del IPCC para América Latina (IPCC, 2007b), el Perú, como parte de la región andina tropical, es uno de los países que se verán más afectados por las consecuencias del cambio climático.
- Para realizar estudios de impactos de los posibles cambios del clima en el futuro en la región San Martín, se requiere de modelos climáticos. Estos modelos requieren como entrada los escenarios futuros de emisiones de GEI los que a su vez se basan en modelos socio-económicos globales.

-5% a +5%

Sin cambios de la precipitación para el año 2030 (cambios dentro de la variabilidad).

Incertidumbre

Las proyecciones del clima futuro son inciertas. Es esencial reconocer y tratar de cuantificar estas incertidumbres, no ignorarlas. También hay una necesidad de planificar estrategias sólidas para prepararse para un futuro incierto, en vez de usar la incertidumbre como una razón para la inacción.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCION

Según el IPCC (2007) la temperatura del aire global de la Tierra está en tendencia creciente desde hace varias décadas. Desde comienzos de siglo XX la temperatura media global se ha incrementado en 0,74 °C, y los últimos doce años 2000-2011 son considerados como los más cálidos de los últimos 100 años, sin embargo, estos valores globales difícilmente explican los cambios del clima regional y local. Y es que diversas investigaciones hacen referencia de evidencias inequívocas de procesos de “cambios en el clima”, unos más acelerados y evidentes que otros, causando problemas críticos como escasez de agua, degradación de los suelos, pérdida de biodiversidad, etc.

En el marco de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático – SCNCC, el SENAMHI (2009) generó dos estudios importantes: “Caracterización del clima en el Perú: periodo 1971-2000” y “Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030”; ambos a una escala de 1/2'000, 000. Los resultados dan cuenta de tendencias distintas en el comportamiento de variables como la precipitación, y más bien una tendencia general de calentamiento del orden de 0,2 °C por década, en los últimos cuarenta años (SENAMHI, 2009). No obstante, los importantes alcances de estos estudios aún es poco lo que conocemos sobre los impactos que tendría el cambio climático en los patrones termoplumiométricos de escala nacional y particularmente sobre ámbitos más regionales.

Surge entonces la necesidad de fortalecer la capacidad de respuesta de la población de manera organizada frente a los impactos negativos del cambio climático, orientando sus acciones a nivel regional, para lo cual es necesario diseñar “estrategias” que se constituyan en instrumentos de gestión para enfrentar cambios del clima, expresados en una mayor variabilidad y e impactos diferenciados dada la gran diversidad topoclimática de nuestro territorio. Sin embargo, si en este proceso las regiones presentan dificultades para elaborar dichas estrategias, es poco lo que se puede avanzar, por lo que el MINAM a través del Proyecto “Fortalecimiento de capacidades regionales en la gestión del cambio climático” busca reforzar las capacidades de respuesta ante estos cambios a través del diseño y formulación de las estrategias y planes de acción en nueve regiones del país ⁽¹⁾

El SENAMHI ha sido identificado como la entidad ejecutora de las actividades relacionadas con el estudio de los escenarios climáticos a nivel regional para el año 2030 en el marco de dicho Proyecto, en razón de sus funciones inherentes como órgano adscrito del Ministerio del Ambiente, su experiencia y conocimiento en la generación y suministro de información científica relacionada a la línea de base climática, así como las estimaciones cuantitativas de los cambios esperados en el clima en todo el territorio nacional, las cuales sirven de referencia para elaborar estudios integrados de impacto y vulnerabilidad, así como para valorar las necesidades de adaptación planificada al cambio climático en diversos sectores y sistemas socioeconómicos.

Esta publicación brinda información relevante sobre el clima actual de la Región San Martín, para el periodo 1965-2012. Generar escenarios regionales implicaría un tiempo de cálculo computacional que se extendería más allá de los tiempos de ejecución del proyecto, por lo que en este estudio se presenta las primeras aproximaciones de los últimos modelos CMIP5 del IPCC para la generación de escenarios climáticos para el año 2030, en base a los escenarios de emisiones RCP8.5, siendo necesario complementar estos resultados con la implementación de metodologías de reducción de escala.

¹ Ica, Huancavelica, Puno, Moquegua, Tacna, Huánuco, Ucayali, San Martín y Ancash.

CAPÍTULO 2

LA REGIÓN SAN MARTÍN

Clima actual y tendencias recientes

El departamento de San Martín se ubica en la región nororiental del Perú, su territorio está emplazado en la vertiente oriental de la cordillera, formado por zonas de selva en su mayor parte. El relieve es variado presentando zonas de montaña muy accidentadas en el oeste con quebradas profundas; y las zonas de amplios valles recorridos por el río Huallaga y finalmente zonas de colinas bajas formadas por la prolongación de la Cordillera Azul hasta las regiones del Bajo Huallaga (SENAMHI, 2007). El territorio está cubierto por bosques húmedos tropicales de importancia para el turismo ecológico y de aventura. Limita por el norte con Loreto, por el *sur* con Huánuco, por *oeste* con La Libertad y por el *noroeste* con Amazonas. (**Mapas en Anexo 1**).

2.1 El clima en la región San Martín

Alrededor del 90% del territorio de la región San Martín es amazónico, y de éste, aproximadamente el 40% es selva alta, donde las temperaturas máximas y mínimas del aire alcanzan valores promedio de 33 °C y 22 °C respectivamente, con variaciones espaciales poco significativas. En ocasiones, se registran temperaturas de hasta 38 °C² entre los meses de octubre y noviembre, cuando los rayos solares caen con mayor perpendicularidad sobre la superficie y los movimientos verticales y horizontales del aire cercano a la superficie son limitados (alta estabilidad), favoreciendo la ocurrencia de las temperaturas más altas del año en localidades ubicadas por debajo de los 500 msnm, tales como Juanjuí, Bellavista, La Picota, Tarapoto, etc. Las temperaturas máximas del aire, en general, disminuyen con la altitud como puede verse en la **Figura 1** correspondiente a Tarapoto (333 msnm), Juanjuí (314 msnm), Moyobamba (874 msnm) y Rioja (1400 msnm), sin embargo, no presenta mayor variación en el ciclo anual, a diferencia de las temperaturas mínimas. (**Mapas en Anexo 2b y 2c**).

Las lluvias ocurren durante todo el año, pero con menor frecuencia y menor duración en la estación de invierno (junio a agosto). Alrededor del 80% de las precipitaciones ocurre en horas de la tarde y primeras horas de la noche. En la **Figura 1**, se observa dos picos de máximas lluvias bien definidos entre el verano y otoño (marzo y abril) así como en primavera (octubre y noviembre) y cuyos acumulados mensuales son aproximadamente del orden de 180 Lt/m². (**Mapas en Anexo 2a**).

En cualquier localidad del departamento, la cantidad anual de precipitación supera los 1000 Lt/m², además habría que mencionar el agua aportada por el rocío durante las noches en los bosques de neblinas ubicados en las laderas de selva alta y expuestos al flujo de los vientos húmedos del *este*, por lo que permanentemente están cubiertos por nubes, neblinas o nieblas durante todo el año, de allí el origen del nombre "Bosque de Neblina" (SENAMHI, 2007).

²Este es uno de los tres departamentos donde ocurren las temperaturas más altas a nivel nacional.

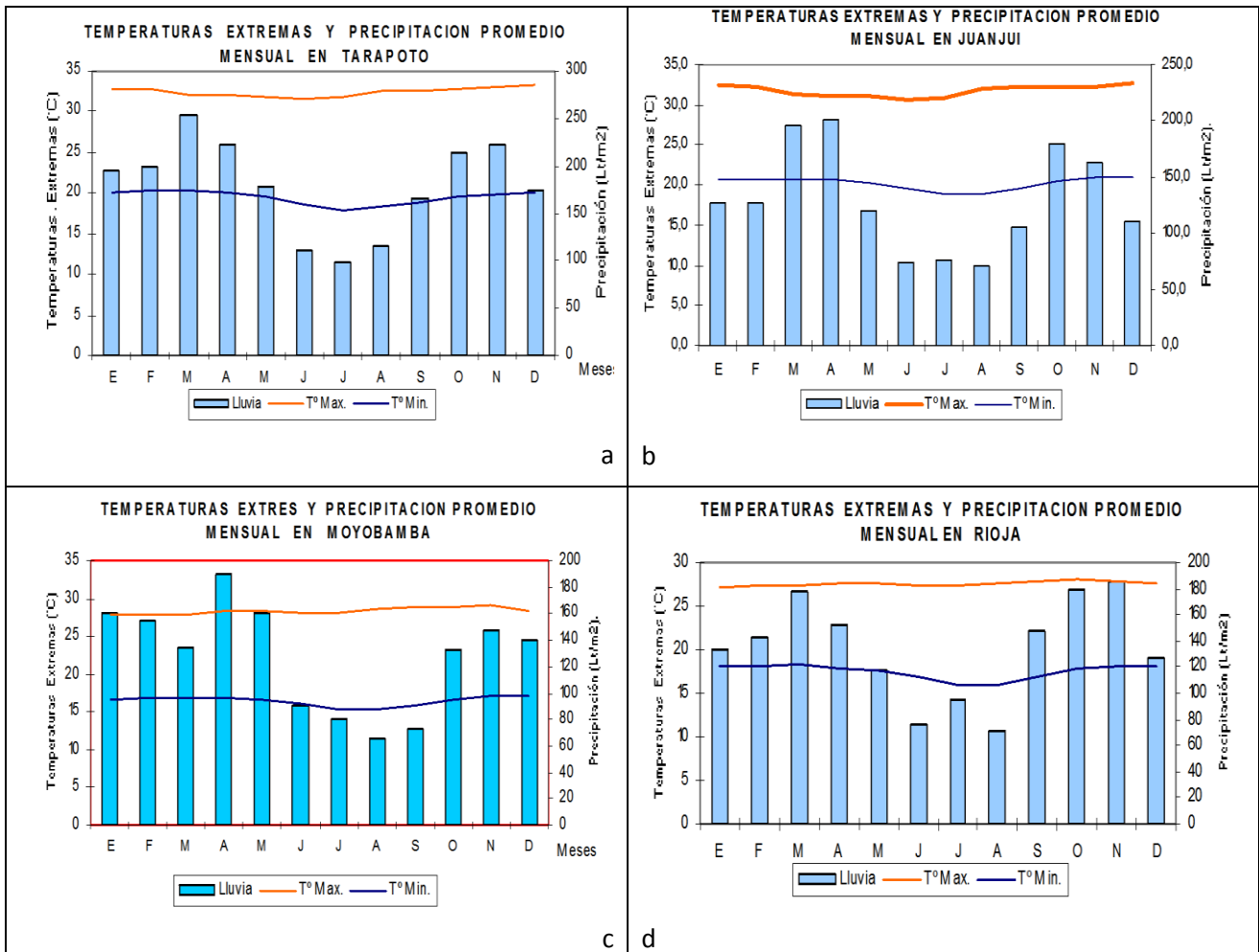


Figura 1. Ciclo anual de las temperaturas extremas del aire y la precipitación en la localidad: a. Tarapoto (333 msnm); b. Juanjuí, (314 msnm); c. Moyobamba (874 msnm) y d. Rioja (1400 msnm)

La humedad relativa media varía entre 92% en el periodo de lluvias y 65% en invierno. Los vientos por lo general son del *noroeste* en el verano y del *nor-noreste* en invierno; ocasionalmente ocurren vientos huracanados de hasta 60 Km/h cuando están asociados al desarrollo de nubes de tormenta.

Conocer el ciclo diario de la temperatura y humedad en la región amazónica es importante, dado que permite determinar umbrales de saturación, que aunado a factores locales como la topografía y vegetación, pueden desencadenar tormentas de intensidades considerables. En la **Figura 2** se muestra la variación horaria de la temperatura del aire y la humedad relativa para el mes de enero en Tocache (periodo 1970-2000).

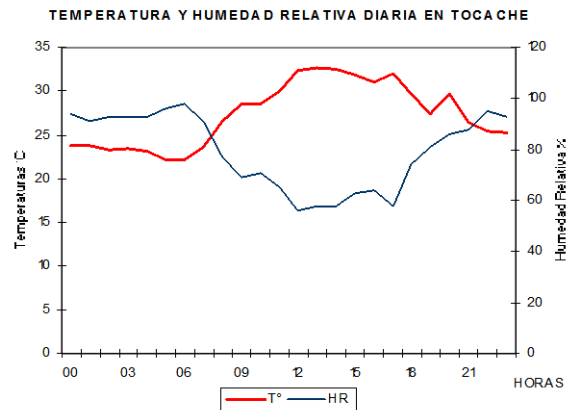


Figura 2. Ciclo diario de la temperatura del aire y la humedad relativa en la localidad de Tocache (504 msnm) durante el mes de enero. SENAMHI, 2007.

2.2 Tendencias e índices de eventos extremos

2.2.1 Tendencias lineales de temperatura del aire y precipitación

Los antecedentes de observación a lo largo del periodo instrumental, dan cuenta que el clima de la región San Martín, está experimentando cambios. Según un estudio desarrollado por el SENAMHI (2009) en el marco de la SCNCC, las temperaturas extremas del aire en la localidad de El Porvenir ubicada en la parte baja de la cuenca del río Mayo (Bajo Mayo), presentan tendencias de incrementos del orden $+0,4\text{ }^{\circ}\text{C/década}$, para el periodo 1965-2006; mientras que en la parte alta de la localidad de Moyobamba (Alto Mayo) se registran tendencias opuestas; es decir, disminuciones de la temperatura máxima del orden de $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C/década}$, e incrementos en la temperatura mínima de hasta $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C/década}$, con un efecto significativo en el rango térmico diario. Las tendencias de incremento de las temperaturas máximas son más intensas en primavera ($+0,52\text{ }^{\circ}\text{C/década}$) y verano ($+0,47\text{ }^{\circ}\text{C/década}$) en el Bajo Mayo, mientras que las temperaturas mínimas son más intensas en el verano ($+0,57\text{ }^{\circ}\text{C/década}$) y otoño ($+0,53\text{ }^{\circ}\text{C/década}$) en el Alto Mayo.

Este estudio revela que el clima del Bajo Mayo y del Alto Mayo presenta comportamientos diferentes (señales locales), y que las tendencias presentan altas variabilidades interanuales asociadas generalmente a los ciclos cálido y frío del ENOS, principalmente por los más intensos (Figura 3).

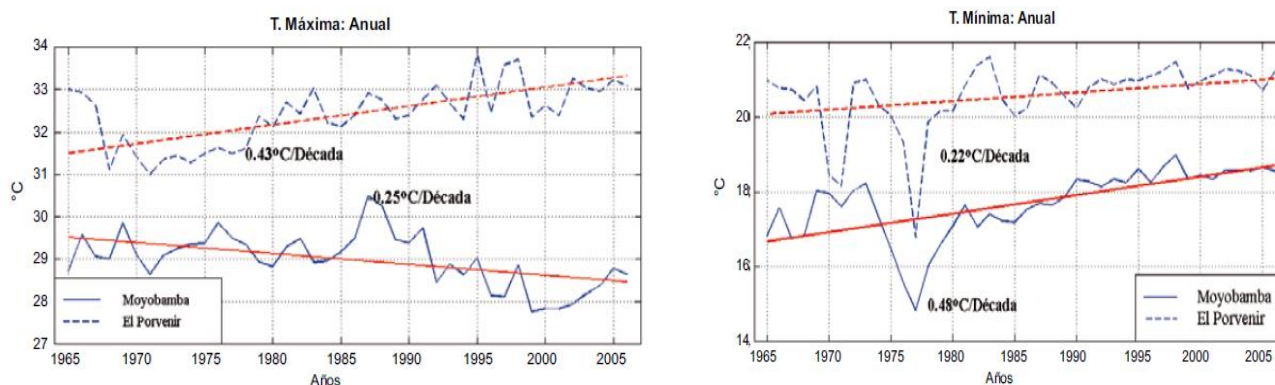


Figura 3. Distribución temporal de las temperaturas del aire máxima (izquierda) y mínima (derecha) anual (1965-2006) en las estaciones Moyobamba – Alto Mayo (línea sólida) y El Porvenir – Bajo Mayo (línea discontinua). El mejor ajuste de las tendencias lineales es indicado por las líneas rojas. Fuente: SENAMHI (2011).

La información anterior ha sido ajustada para fines del presente estudio, considerando un periodo de análisis más actual: 1965-2012. En Moyobamba, la dirección opuesta de las tendencias anuales se mantiene, sin embargo la magnitud ha cambiado; la tendencia actual de la temperatura máxima es de $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C/década}$ (antes: $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C/década}$) y de la temperatura mínima es $+0,35\text{ }^{\circ}\text{C/década}$ (antes: $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C/década}$). En tanto, en la localidad del Sauce, ubicada a 600 msnm en el alto Huallaga, la tendencia de la temperatura máxima no está muy definida ($+0,01\text{ }^{\circ}\text{C/década}$), pero en el caso de la mínima la tendencia de incremento es más marcada ($+0,3\text{ }^{\circ}\text{C/década}$).

De otro lado, las tendencias de las precipitaciones anuales para el periodo 1965-2006 fueron positivas (incremento) en gran parte de la cuenca, especialmente en localidades como Tabalosos (Bajo Mayo) con $+40\%$ y $+50\%$ y Pacaysapa (Alto Mayo) con $+90\%$ y $+110\%$ respecto a su normal. El Porvenir y Moyobamba presentan tendencias de disminución (-10%) e

incremento (+35%), respectivamente. Las tendencias actuales dan cuenta de disminuciones de -75 mm/década en El Sauce, en tanto en Moyobamba se mantiene la tendencia de incremento, pero de menor magnitud (16 mm/década).

2.2.2 Tendencias de índices de eventos extremos

En la localidad de Moyobamba, la tendencia media de las lluvias (PRCPTOT) y su intensidad (SDII) es positiva, es decir, las lluvias acumuladas anuales vienen aumentando, a la par de una mayor intensidad y mayor frecuencia de días muy húmedos (R95p) y extremadamente húmedos (R99p). Sin embargo, la tendencia del número de días secos consecutivos (CDD) va en aumento, mientras que el número de días húmedos consecutivos (CWD) viene disminuyendo. En otras palabras, lluvias más intensas y frecuentes se vienen presentando en periodo lluvioso, aparentemente más corto (Figura 4).

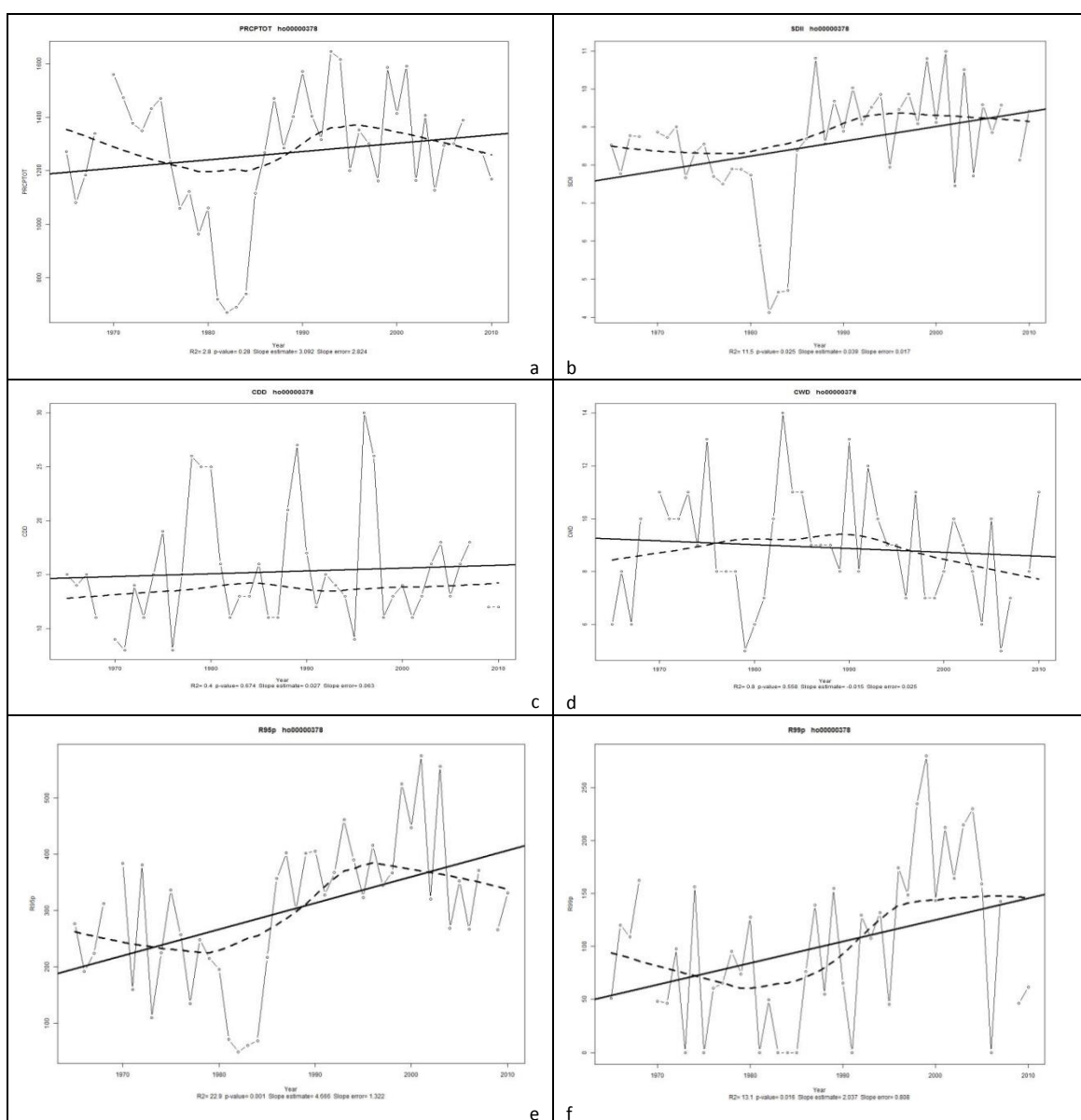


Figura 4. Tendencia de índices de eventos extremos de la precipitación en la estación Moyobamba, para el periodo 1965-2012. (a) Días húmedos; (b) Intensidad de lluvias; (c) Días secos consecutivos; (d) Días húmedos consecutivos; (e) Días muy húmedos; (f) Días extremadamente húmedos.

En relación a los días cálidos (TX90p), éstos vienen en aumento particularmente desde la década del 90. Estas tendencias se corresponden con el incremento de noches cálidas (TN90p) y la disminución de días y noches fríos (TX10p y TN10p). La evolución de éstos índices térmicos (en intensidad y frecuencia) está modulada considerablemente por la variabilidad interanual asociada a la fase cálida del ENOS (década de los 80 y 90), y se advierte un acople con la tendencia de la última década 2001-2010, considerada la década más caliente (**Figura 5**). Debido entonces a la variabilidad natural, **las tendencias sobre la base de registros relativamente cortos (desde 1965) son muy sensibles a las fechas de inicio y fin de eventos fuertes (ENSO 1982/83 y ENSO 1997/98), y en general, no reflejan tendencias de largo plazo del clima.**

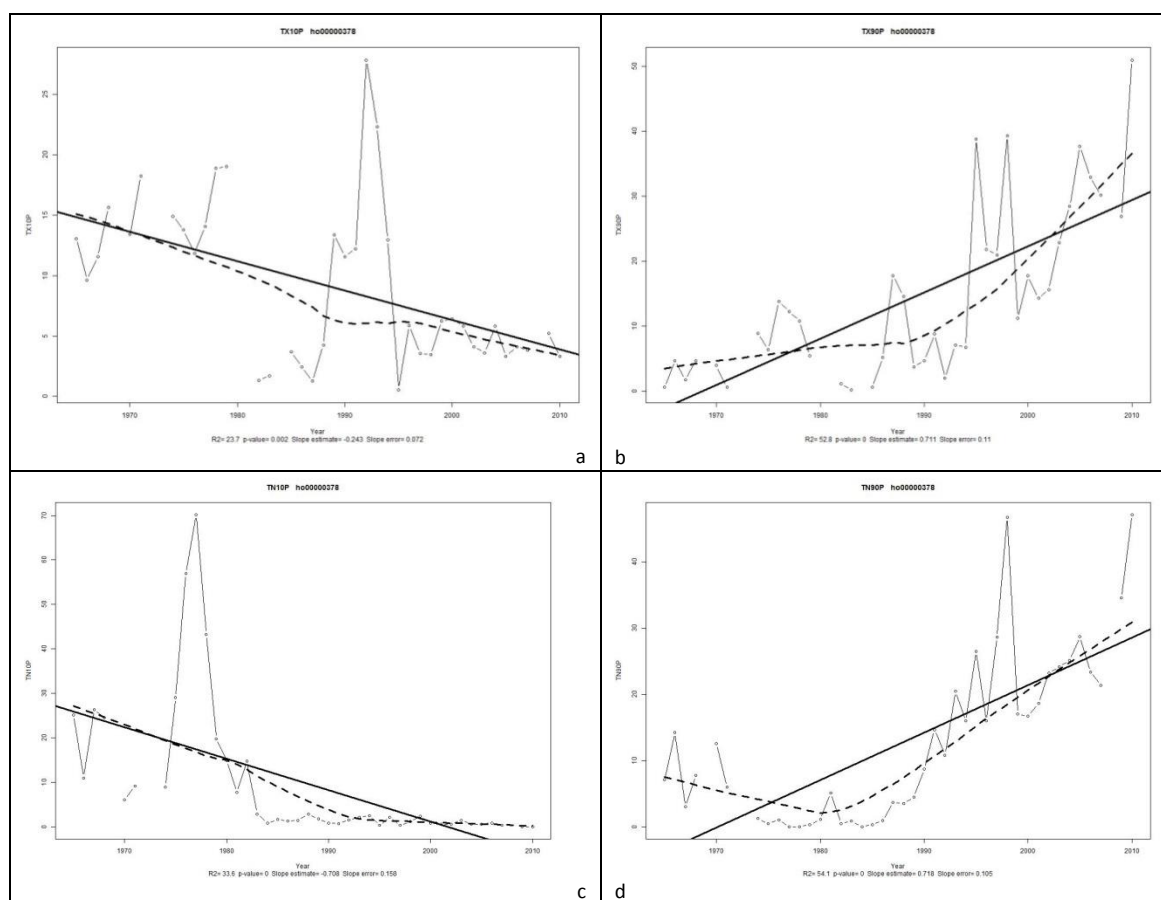


Figura 5. Tendencia de índices de eventos extremos de la temperatura del aire en la estación Moyobamba, para el periodo 1965-2012. (a) Días fríos; (b) Días calientes; (c) Noches frías; (d) Noches calientes.

En la localidad el Sauce, las lluvias vienen disminuyendo en intensidad y frecuencia, no obstante la aparente disminución del número de días secos consecutivos. Los días húmedos y muy húmedos, también vienen disminuyendo (**Figura 6**).

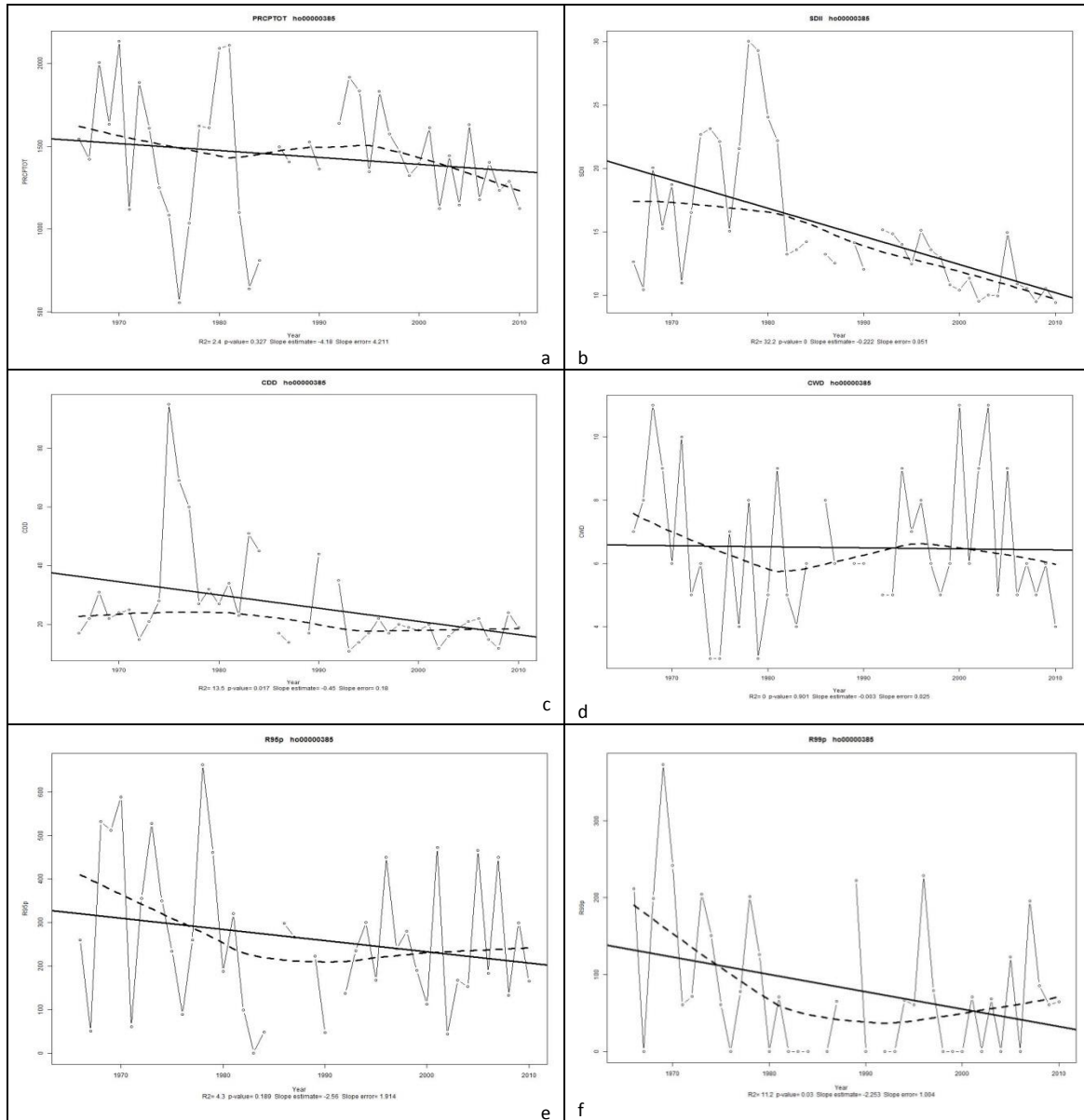


Figura 6. Tendencia de índices de eventos extremos de la precipitación en la estación Saucedo, para el periodo 1965-2012. (a) Días húmedos; (b) Intensidad de lluvias; (c) Días secos consecutivos; (d) Días húmedos consecutivos; (e) Días muy húmedos; (f) Días extremadamente húmedos.

Los índices térmicos en el Saucedo, indican que los valores extremos de la temperatura máxima y mínima, se vienen incrementando (**Figura 7**).

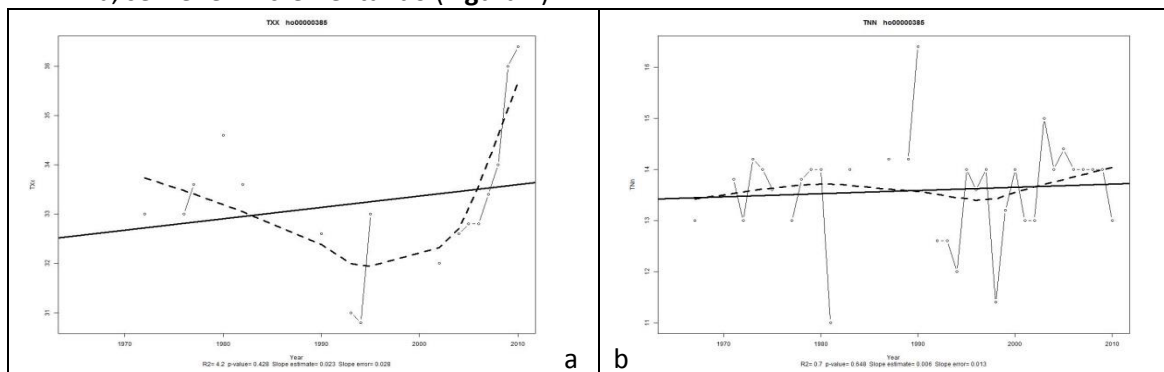


Figura 7. Tendencia de índices de eventos extremos de la temperatura del aire en la estación Saucedo, para el periodo 1965-2012. (a) Temperatura máxima; (b) Temperatura mínima.

CAPÍTULO 3 MODELOS CLIMÁTICOS Y ESCENARIOS DE EMISIONES

Construcción de escenarios en la Región San Martín

3.1 Modelos y escenarios de emisiones

El IPCC distingue tres tipos de escenarios climáticos: escenarios incrementales o sintéticos, escenarios análogos y escenarios basados en los Modelos Climáticos Globales (MCG), cada uno de ellos con ventajas y limitaciones (TGICA-IPCC, 2007); sin embargo, son los escenarios basados en los modelos climáticos los que en la actualidad están experimentando un mayor desarrollo debido a que incorporan los forzamientos de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sistema climático.

Los modelos climáticos vienen a ser representaciones numéricas que explican la evolución del sistema climático³ en el tiempo y se basan en ecuaciones fundamentales para simular sus características físicas, químicas y biológicas, pero además las interacciones y feedbacks de sus componentes, en una grilla geográfica global (IPCC, 2007a). Con el tiempo, estos modelos se han ido perfeccionando y complejizando, habiendo evolucionado en los últimos años hasta los Modelos de Circulación General Acoplados Atmósfera/Océano/Hielo-marino (MCGAOA), que proporcionan una de las más completas representaciones del sistema climático actualmente disponibles (**Figura 8**).

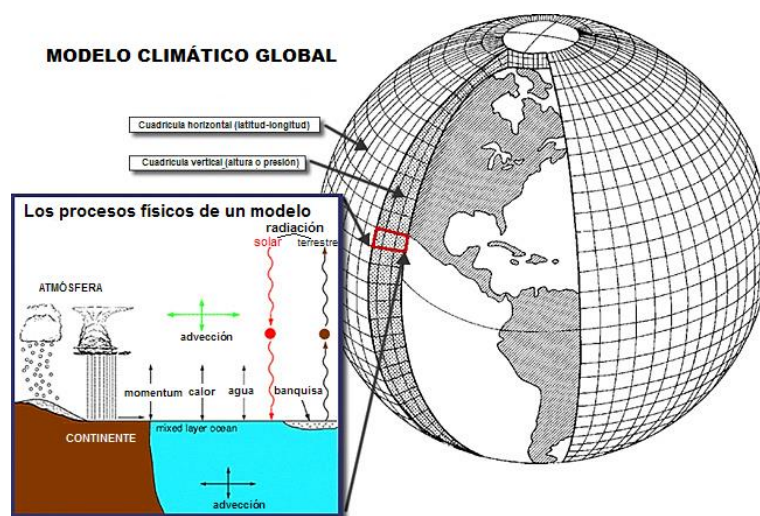


Figura 8. Esquema de un modelo climático global. Fuente NOAA

Para la proyección del clima de largo plazo, los MCG requieren información de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y aerosoles futuros, información que es generada por modelos socio-económicos para explorar la posible evolución de las emisiones de GEI y aerosoles en el mundo. El marco general de estos escenarios de emisiones lo proporciona el Informe Especial

³Sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales (*atmósfera, hidrósfera, criósfera, superficie terrestre y biosfera*) y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de *forzamientos externos*, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de *forzamientos antropogénicos*, como el cambio de composición de la atmósfera o el *cambio de uso de la tierra* (IPCC, 2007a).

sobre los Escenarios de Emisiones - IE-EE (SRES, *por sus siglas en inglés*) del IPCC (Nakicenoviket *al.*, 2000).

En el año 2010 el IPCC ha definido una nueva familia de escenarios: las Rutas de Concentraciones Representativas o Representative Concentration Pathways (RCP, *por sus siglas en inglés*) (Moss *et al.*, 2010). Estos RCP comprenden escenarios de mitigación y no-mitigación, y constituyen la base del nuevo trabajo de modelización que se está llevando a cabo para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

Los escenarios climáticos para la Región San Martín se basan en el escenario de emisiones RCP8.5, desarrollado por el IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) de Austria (**Figura 9**), el cual supone la combinación de un alto crecimiento poblacional, un bajo crecimiento de PBI, modestas tasas de cambios tecnológicos y poca eficiencia energética, llevando a grandes demandas energéticas y el incremento de gases de efecto invernadero (Riahi *et al.*, 2011).

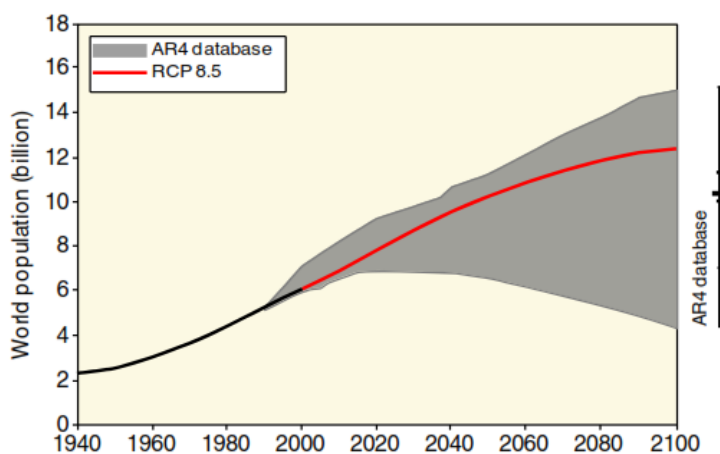


Figura 9. Escenario de emisión RCP8.5. Fuente IPCC

Si bien los MCG han sido mejorados en los últimos años, aun existen deficiencias que es necesario diagnosticar, para lo cual resulta importante y necesario hacer una evaluar tan exhaustiva como sea posible antes de su utilización en la estimación de la evolución del clima futuro. Aunque la validación del clima futuro no es posible, siempre se puede aumentar la confianza en un determinado modelo cuando éste ha sido evaluado en determinados periodos históricos de registro instrumental. Los modelos climáticos serán fidedignos sólo en la medida en que sean capaces de proporcionar simulaciones realistas de los patrones de circulación a gran escala y de las variables climáticas (ciclo diario, ciclo anual, ciclo estacional, etc.). Un “skill” pobre en la simulación del clima actual indicará que ciertos procesos físicos o dinámicos del modelo son deficientes y es, en teoría, un modelo potencialmente limitado para representar plausiblemente el clima futuro.

En el presente estudio la construcción de escenarios se inicia con la evaluación de los MCG del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (Taylor *et al.*, 2012); y corresponden a los modelos que mejor representan los sistemas sinópticos que modulan el clima de Sudamérica (SENAMHI, 2012). Ver **Tabla 1**. La metodología implementada se basa en dos time slice: HISTORICAL, para el periodo histórico (1971 – 2000) y escenario RCP8.5, para el periodo futuro (2016 – 2045).

Tabla 1. Modelos climáticos globales del proyecto CMIP5

MODELOS	INSTITUCIÓN	RESOLUCIÓN ATMOSFÉRICA (°longitud x °latitud)
CCSM4	National center for Atmospheric Research (NCAR-USA)	1.25 x 0.942408
HadGem2-AO	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration (COREA)	1.875 x 1.25
HadGem2-ES	Met Office Hadley Centre (REINO UNIDO)	1.875 x 1.25
MPI-ESM-LR	Max Plank Institute for Meteorology (ALEMANIA)	1.875 x 1.8496 /N48

3.2. Cálculo de Proyecciones Climáticas

Para realizar los mapas de cambios de la precipitación y temperaturas al 2030, se utilizó el promedio de los modelos que se indican en la **Tabla 1**. Considerando que estos modelos tienen diferente resolución espacial, se realizó el “regirillado”, construyéndose una malla de datos a una misma resolución horizontal de 0.5x0.5°, mediante interpolación bilineal (SENAMHI, 2012).

La estimación del “cambio” (Δ) de las series de tiempo de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación a nivel estacional y anual, se determinó áreas o subregiones, debido a que las regiones de estudio presentan zonas con diferentes condiciones orográficas.

En la **Tabla 2** se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de cambios estacionales y anuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación al 2030 (Lenderink *et al.* 2006).

Tabla 2. Cálculo de los cambios de precipitación y temperaturas extremas

$\text{PREC. camb} = \left(\frac{\text{PREC. fut} - \text{PREC. hist}}{\text{PREC. hist}} \right) \times 100\%$	$\text{T. camb} = \text{Tfut} - \text{Thist}$
<ul style="list-style-type: none"> - PREC. camb: Cambio de precipitación [%]. - PREC. fut: Promedio multianual de la precipitación acumulada [2016 - 2045], anual y estacional (mapas); promedio anual (series de tiempo). - PREC. hist: Promedio multianual de la precipitación acumulada estacional o anual [1971 - 2000]. 	<ul style="list-style-type: none"> - T. camb: Cambio de temperatura [°C]. - Tfut : Promedio multianual de la temperatura [2016 – 2045], anual y estacional (mapas); promedio anual (series de tiempo). - Thist : Promedio multianual de la temperatura estacional o anual [1971 - 2000].

CAPÍTULO 4

PROYECCIONES DE CAMBIOS DEL CLIMA EN LA REGIÓN SAN MARTÍN

Temperatura del aire y precipitación al año 2030

En esta sección se presentan los resultados de los cambios estacionales y anuales de laprecipitación y las temperaturas máxima y mínima del aire en la región San Martín, proyectados para el time-slice 2016-2045 con promedios centrados en el año 2030, con referencia al periodo 1971-2000. Las proyecciones del clima futuro se basan en “cambios” del promedio de cuatro modelos climáticos de escala global, regrillados a una escala regional, para el escenario de emisiones RCP8.5. Estos resultados se complementan con análisis en subregiones, con la finalidad de ilustrar la incertidumbre asociada.

4.1 Proyecciones de la precipitación

En general, la precipitación es una variable no muy bien simulada como la temperatura debido a que involucra procesos locales muy complejos, en consecuencia, las proyecciones de la precipitación son menos robustas que las de la temperatura del aire (Christensen *et al.*, 2011). En esta línea, la información proveniente de los modelos climáticos globales, no muestran el comportamiento local de esta variable, por lo que los resultados que a continuación se presentan deben ser tomados en el marco de estas consideraciones.

La discusión se restringe al cambio relativo promedio de la precipitación estacional para el año 2030, expresado en términos porcentuales (%). Se ha considerado que los cambios dentro del intervalo +/- 15% están dentro de la variabilidad de la precipitación en la región andina tropical (SENAMHI, 2011). La tonalidad verde de la escala indica incrementos, mientras que la escala en naranja indica reducciones (ver mapas en Anexo 3).

En el **Anexo 3a**, se presenta los cambios de la precipitación en la Región San Martín. Los patrones de cambio son de incremento en los totales estacionales, aunque de muy poca magnitud (entre +3% a +12%), excepto en invierno donde podría esperarse cambios más significativos, de hasta +25%, principalmente en el lado occidental (por encima de los 2000 m de altitud).

En la **Figura 10** se muestra las sub-regiones donde se ha analizado la línea de tiempo o tendencia de cambio hasta el año 2030.

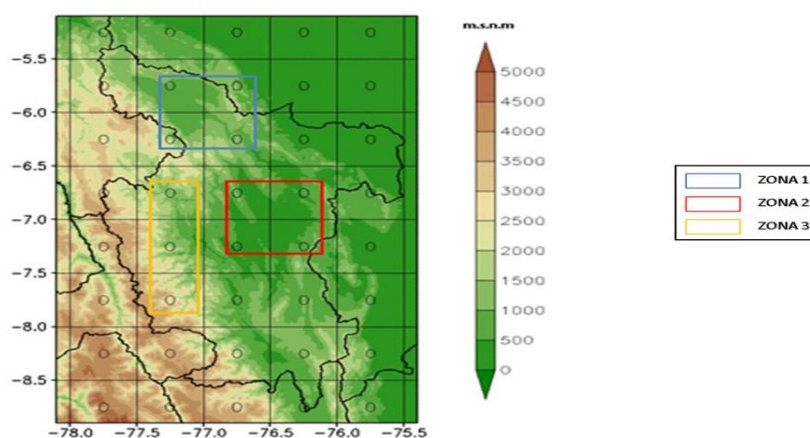


Figura 10. Subregiones analizadas para determinar la tendencia de cambio. Zona 1 (norte); Zona 2 (centro-oriental); Zona 3 (occidental, parte alta). Fuente SENAMHI.

En la **Figura 11** se observa el cambio medio de la precipitación en las tres sub-regiones, expresado en porcentajes (%). Debe entenderse que la capacidad de cada modelo de representar bien algunas características del clima actual está en función de sus características internas o estado de desarrollo, de modo que es esperable que las respectivas simulaciones de un clima modificado por una nueva composición de la atmósfera, difieran. Los modelos indican incrementos bastante discretos de la precipitación (dentro de su variabilidad).

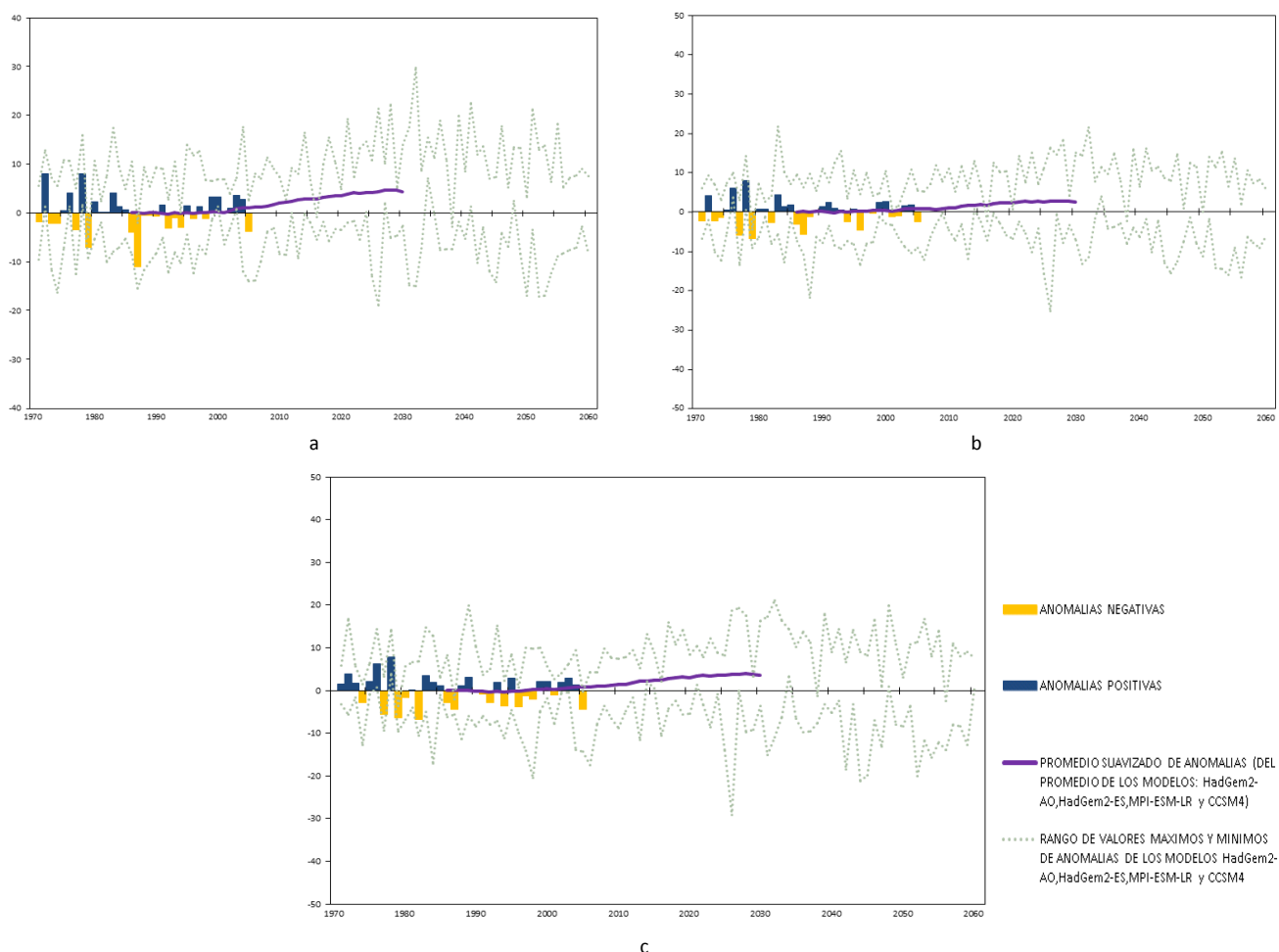


Figura 11. Evolución del cambio de la precipitación en las sub-regiones (regrilladas o ajustadas con datos observados del CRU⁴). (a) zona 1, (b) zona 2 y (c) zona 3. Cambio expresado en porcentaje (%).

4.2 Proyecciones de temperaturas del aire

Los resultados muestran un patrón de calentamiento en toda la Región de alrededor $+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio, respecto al periodo de referencia 1971-2000 (ver Mapas en **Anexo 3b y 3c**).

No toda la Región San Martín experimentaría el mismo grado de calentamiento. Para la temperatura máxima (**Anexo 3b**), el cambio sería más notable en invierno en gran parte de la Región y en primavera en la franja oriental ($+1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que el resto de la región experimentaría incrementos entre $+1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cuanto a la temperatura mínima (**Anexo 3c**), el mayor incremento se daría en invierno y del orden de $+1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, principalmente en la región suroccidental de la Región.

En toda la Región, la temperatura máxima tiende a incrementarse algo más que la temperatura mínima, aproximadamente $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ más.

⁴ CRU: Climate Ressearch Unit (CRU) de la Universidad de East Anglia – Reino Unido (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/>)

CAPÍTULO 5 CUANTIFICACION DE LA INCERTIDUMBRE

Preparándonos para un futuro incierto

El clima es el resultado de interacciones dentro del sistema climático, sistema que es inherentemente complejo e impredecible, aún insuficientemente entendido y con un alto grado de “incertidumbre”.

Los modelos climáticos son las mejores herramientas que tienen los meteorólogos para predecir cambios futuros del clima en el mediano plazo (escala estacional); éstos se basan en principios sólidos de la ciencia física y están rápidamente mejorando en sofisticación. Sin embargo, la atmósfera es muy sensible a pequeños cambios, por lo que si en las condiciones iniciales se efectúan mínimas perturbaciones, la subsecuente evolución podría tener resultados completamente diferentes. Entonces no importa que tan bueno sea el modelo, siempre habrá un grado de incertidumbre en los pronósticos climáticos.

El uso del *ensamble de modelos*⁵ es particularmente importante para el pronóstico estacional, donde los efectos del error de un modelo en particular son significativos. Para proyecciones de más largo plazo y bajo el supuesto de una atmósfera modificada por una nueva composición debido a forzantes antrópicas, los ensambles multi-modelo pueden traer ventajas substanciales. Para la construcción de escenarios de cambio climático, un ensamble hecho de la combinación de varias proyecciones con diversos experimentos, usando varios modelos y errores sistemáticos, que con frecuencia son flujo-dependientes, debe dar una representación mucho mejor del espectro completo de estados futuros del clima, que si se usa sólo uno o dos experimentos.

Las fuentes de “incertidumbre asociadas” son principalmente debido: **a.** *evolución de las emisiones de GEI y aerosoles*, es decir, cada escenario de emisiones tiene diferente composición atmosférica e implica diferente forzamiento radiativo; **b.** *la estructura interna del modelo* o grado de complejidad para simular el clima futuro, y **c.** *interacciones internas del sistema climático*, debido a su dinámica no-lineal. El IPCC (2007) recomienda representar la incertidumbre cuantitativamente mediante intervalo de valores calculados por diferentes modelos, diferentes escenarios de emisiones, diferentes técnicas de regionalización o diferentes miembros “ensamble”.

En la **Figura 12**, cada punto es el valor del cambio proyectado por cada modelo a nivel estacional y anual, en la grilla común sobre la Región San Martín. La dispersión de cambios de la temperatura del aire no es alta, y todos los modelos coinciden en la misma dirección de cambio (calentamiento). En la temperatura máxima los cambios anuales van de +1,3 °C a +1,7 °C (**Figuras 12a**) y de +1,2 °C a +1,6 °C en la mínima (**Figuras 12b**), aunque se observa una mayor dispersión en primavera – SON (de +1,3 °C a +2,1 °C). En lo que respecta a precipitación (**Figuras 12c**), la dispersión es mayor y aunque los cuatro modelos indican cambios muy discretos en el acumulado anual (+/- 5%), en invierno la dispersión es un tanto mayor con cambios de hasta +23% según el modelo MPI-ESM-LR, mientras que en primavera el modelo HadGEM2-AO proyecta disminuciones del orden de -8%.

⁵ Conjunto de salidas de varios modelos

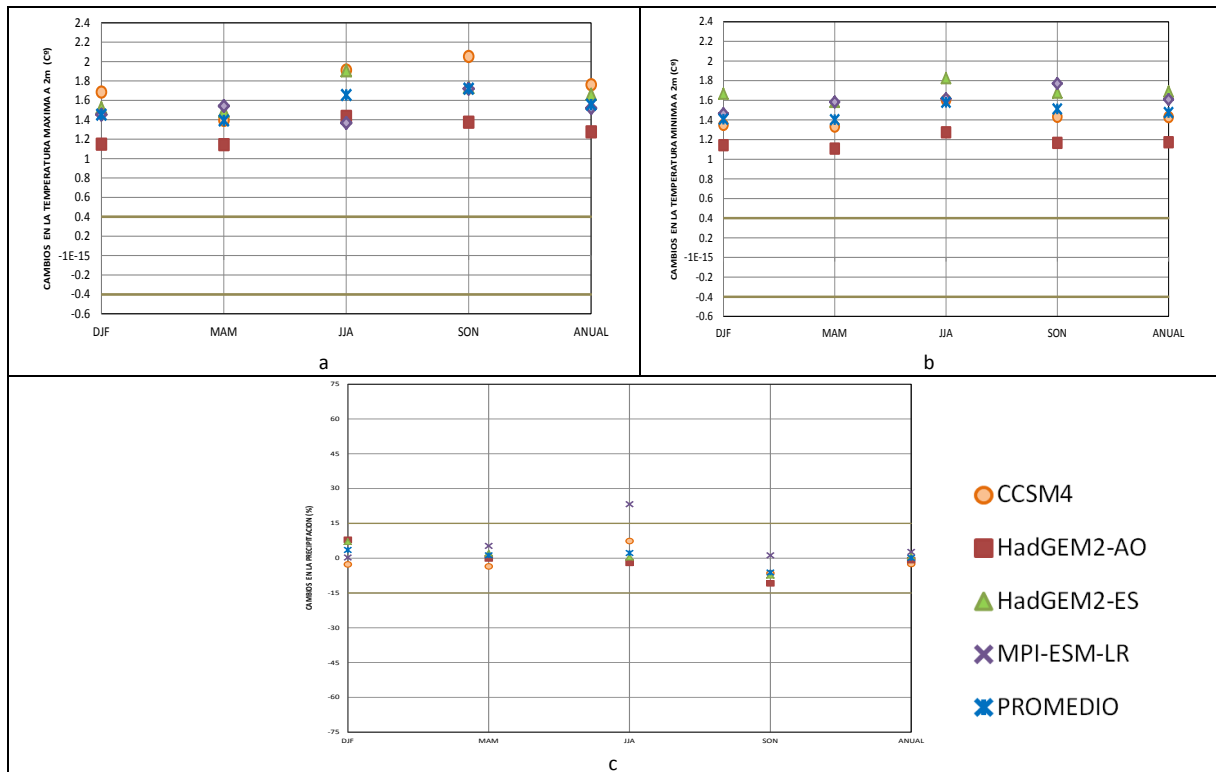


Figura 12. Cambios proyectados a nivel anual y estacional de la temperatura del aire máxima (a), mínima (b) en °C, y de la precipitación (c) en porcentajes en la Región San Martín para el time-slice centrado en el año 2030, relativo al periodo de referencia 1971-2000. Los modelos son: CCSM4, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR, para el escenario de emisiones RCP8.5. Se muestra el promedio de los modelos (X azul) y los rangos de la variabilidad actual (líneas verdes horizontales).

El análisis de incertidumbre nos indica, en general, un escenario más cálido y con precipitaciones similares al periodo actual, algo cálido entre invierno y primavera.

Es importante tomar en cuenta el hecho de que las incertidumbres difieren en relación al espacio (regiones de mayor o menor predictabilidad) y a las variables climáticas (cambios de la temperatura son más robustos que la precipitación). Comparar los modelos es una de las maneras de manejar este tipo de incertidumbres y constituye una buena base para la evaluación del riesgo.

Finalmente, el reconocimiento de la existencia de las incertidumbres en las proyecciones climáticas no elimina su utilidad. La incertidumbre no es lo mismo que ignorancia, y los tomadores de decisiones deberán aprender a valorar la “incertidumbre” para planificar estrategias sólidas ante un futuro incierto, en vez de usar la incertidumbre como una razón para la inacción (Kropp y Schoize, 2011).

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES

La ciencia no ofrece pronósticos exactos del clima futuro y nunca podrá hacerlo. Los modelos continúan teniendo limitaciones significativas en la representación de los detalles regionales del clima actual; sin embargo, en el transcurso de varias décadas de desarrollo, los modelos han brindado sistemáticamente una idea clara e inequívoca del calentamiento significativo del clima como respuesta al incremento de los gases de efecto invernadero y han sido capaces de simular climas y cambios del clima observados.

Aunque el cambio climático es de carácter global, no se puede esperar que los cambios potenciales sean globalmente uniformes; más bien, puede haber diferencias regionales dramáticas. En tal sentido, los Modelos Climáticos Globales (MCG) no pueden representar explícitamente detalles regionales que caracterizan el clima de una región, a una escala que sea de utilidad para estudios de impactos y evaluación de vulnerabilidad, debido a su aún baja resolución horizontal (aprox. 100 –300 km); de allí la **necesidad de regionalizar**. Los Modelos Regionales de Clima (RCM), el downscaling estadístico o modelos globales de alta resolución, son útiles para generar escenarios climáticos con una resolución espacial más alta para estudios de impactos, siendo importante considerar los modelos globales que mejor representen el clima actual de gran escala. La recomendación útil es: combinación de downscaling dinámico y estadístico para llegar a resoluciones aún mayores.

En el Capítulo 5 se han descrito algunas de las incertidumbres que afectan al proceso de generación de escenarios de cambio climático. Tal y como allí se ha escrito, algunas de ellas pueden explorarse mediante la utilización de varios escenarios de emisiones, varios modelos globales, varias técnicas de regionalización o un solo modelo global forzando varios modelos regionales. Este informe no presenta un análisis riguroso basado en multi-ensembles de proyecciones por la limitación de recursos y tiempo. Sin embargo, se ha intentado mostrar los resultados de una variedad de modelos globales, para mostrar al tomador de decisiones por lo menos un “rango de variación” de las proyecciones del clima en la Región San Martín, según los nuevos modelos del IPCC y bajo un nuevo escenario de emisiones.

En el marco de la SCNCC el SENAMHI (2009) hizo hincapié en la necesidad de más y mejor información climática en importantes zonas del país, como por ejemplo, en la Región San Martín (cuena del río Mayo), por ello es necesario recopilar mayor cantidad de información, incluyendo la red de observación privada, verificar la calidad de ésta red con la finalidad de complementar los resultados de este trabajo. En ese sentido, es importante fomentar la implementación de un mayor número de estaciones o fortalecer las existentes para mejorar el entendimiento de los factores físicos que modulan el clima local, identificar los procesos de retroalimentación y, principalmente, para determinar la proporción de la variabilidad del clima de largo plazo atribuida a los efectos antropogénicos.

Finalmente, considerando las limitaciones de la información histórica disponible, la representación limitada y simplificada del clima regional por los modelos globales y conociendo además que existen incertidumbres asociadas, los resultados del presente estudio deben ser considerados como una primera evaluación de los nuevos modelos CMIP5 del IPCC en algunas regiones del país, haciéndose énfasis en las “señales de cambios potenciales” identificados más que en los valores absolutos, debiéndose complementar el presente estudio, con técnicas de regionalización dinámica y estadística. Asimismo, utilizar resultados tangibles de estudios sobre el clima actual local influenciado por la variabilidad interanual o interdecadal (variabilidad natural) ya que ésta seguirá siendo una gran influencia sobre el clima, sobre todo en el corto plazo (décadas cercanas) y a escala regional (IPCC-AR5, 2013).

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Las conclusiones principales de este informe se refieren a dos aspectos, por un lado al aspecto metodológico, y por el otro, al aspecto netamente climático.

➤ **En cuanto al aspecto metodológico: incertidumbres**

- En este informe se presentan los resultados de cuatro modelos globales CMIP5 del IPCC. Como ya se ha mencionado en este documento, no se han implementado técnicas de reducción de escala, sin embargo, los rangos de variación de los cambios proyectados por los cuatro modelos son promediados y constituyen en una primera aproximación para determinar la dirección de cambio del clima en la Región San Martín. La “relativa robustez” de estas proyecciones se basa en una menor dispersión de los resultados, es decir, independientemente del modelo, hay un claro patrón de calentamiento, y no se proyecta cambios significativos en la precipitación.

➤ **En cuanto al aspecto climático: señales de cambio**

- Los días cálidos y noches cálidas vienen incrementándose, tomando como referencia las estaciones ubicadas en las localidades de Moyobamba y Sauce.
- En Moyobamba, la intensidad y frecuencia de días lluviosos y muy lluviosos va incrementándose, no obstante una aparente disminución del periodo de lluvias. Mientras que en la localidad del Sauce, las lluvias vienen disminuyendo, en intensidad y frecuencia.
- La media de los modelos indica **cambios ligeros de la precipitación** dentro de su variabilidad (**+/- 5%**). En otras palabras, no habría cambios importantes de la precipitación.
- La media de los modelos indica aumentos de la **temperatura del aire** de **+1,0 °C (temperatura mínima)** a **+1,5 °C (temperatura máxima)**. Sin embargo, el grado de calentamiento medio, sería mayor durante el invierno (+1,8 °C).
- **Las temperaturas máximas** tienden a **incrementarse** algo más que las **mínimas (0,3 °C)**.

Referencias

- Acuña *et al.*, 2011. Escenarios de cambio climático en las regiones de Cusco y Apurímac al 2030 y 2050. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del Programa de Adaptación al Cambio climático – PACC. 124 pp.
- Christensen OB, Goodess CM, Harris I, Watkiss P. (2011) European and Global Climate Change Projections: Discussion of Climate Change Model Outputs, Scenarios and Uncertainty in the EC RTD ClimateCost Project. In Watkiss, P (Editor), 2011. The ClimateCostProject.Final Report. Volume 1: Europe. Published by the Stockholm Environment Institute, Sweden, 2011. ISBN 978-91-86125-35-6.
- Christensen, J. et al., (2007) Regional Climate Projections. In: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [S. Solomon, et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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, 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers, Working Group 1 IPCC, Geneva, 2007.
- IPCC, 2007b. Climate Change 2007: Impacts and Vulnerability, Summary for Policy Makers, Working Group 2 IPCC, Geneva, 2007.
- IPCC, 2013. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, Estocolmo, 2013. 36 pp.
- Kropp J. y M. Schoize (2011). Cambio climático: información para una adaptación eficaz. Giacomotti Comunicaciones graficas. Berlin-Alemania.
- Moss, R.,H., Edmonds, J.,A., Hibbard, K.,A., Manning, M.,R., Rose, S.,K., van Vuuren, D.,P., Carter, T.,R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.,A., Mitchell, J.,F., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.,J., Stouffer, R.,J., Thomson, A.,M., Weyant, J.,P., Wilbanks, T.,J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463(7282):747-56.
- Nakicenovic N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E. Lebre La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Z. Dadi. (2000). Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Nakicenovic, N., y R. Swart, (eds.), 2000. Special Report on Emission Scenarios, pp. 1-599. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- SENAMHI, 1988. Mapa de clasificación climática del Perú. Método de Thornthwaite. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. 14 pp.

SENAMHI. 2007. Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro para el año 2100. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del proyecto PRAA. 124 pp.

SENAMHI. 2009. Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030. Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Ministerio del Ambiente. 136 pp.

SENAMHI, 2011 [Avalos G., Cubas F., Oria C., Díaz A., Quispe N., Rosas G., Solís O.]. Atlas de precipitación y temperatura del aire en la cuenca del río Mantaro. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del proyecto PRAA. 157 pp.

Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(D7): 7183–7192.

TGICA – IPCC, 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 2. Preparado por Carter T. R. IPCC. 66 pp.

Anexos

Anexo 1:

- Mapa 1: Relieve
- Mapa 2: Eco-regiones

Anexo 2:

- Anexo 2a: Mapas estacionales y anual de precipitación
- Anexo 2b: Mapas estacionales y anual de temperatura máxima
- Anexo 2c: Mapas estacionales y anual de temperatura mínima

Anexo 3:

- Anexo 3a: Proyecciones de cambio de la precipitación estacional y anual
- Anexo 2b: Proyecciones de cambio de la temperatura máxima estacional y anual
- Anexo 2c: Proyecciones de cambio de la temperatura máxima estacional y anual

(Ver mapas de anexos en CD adjunto)