

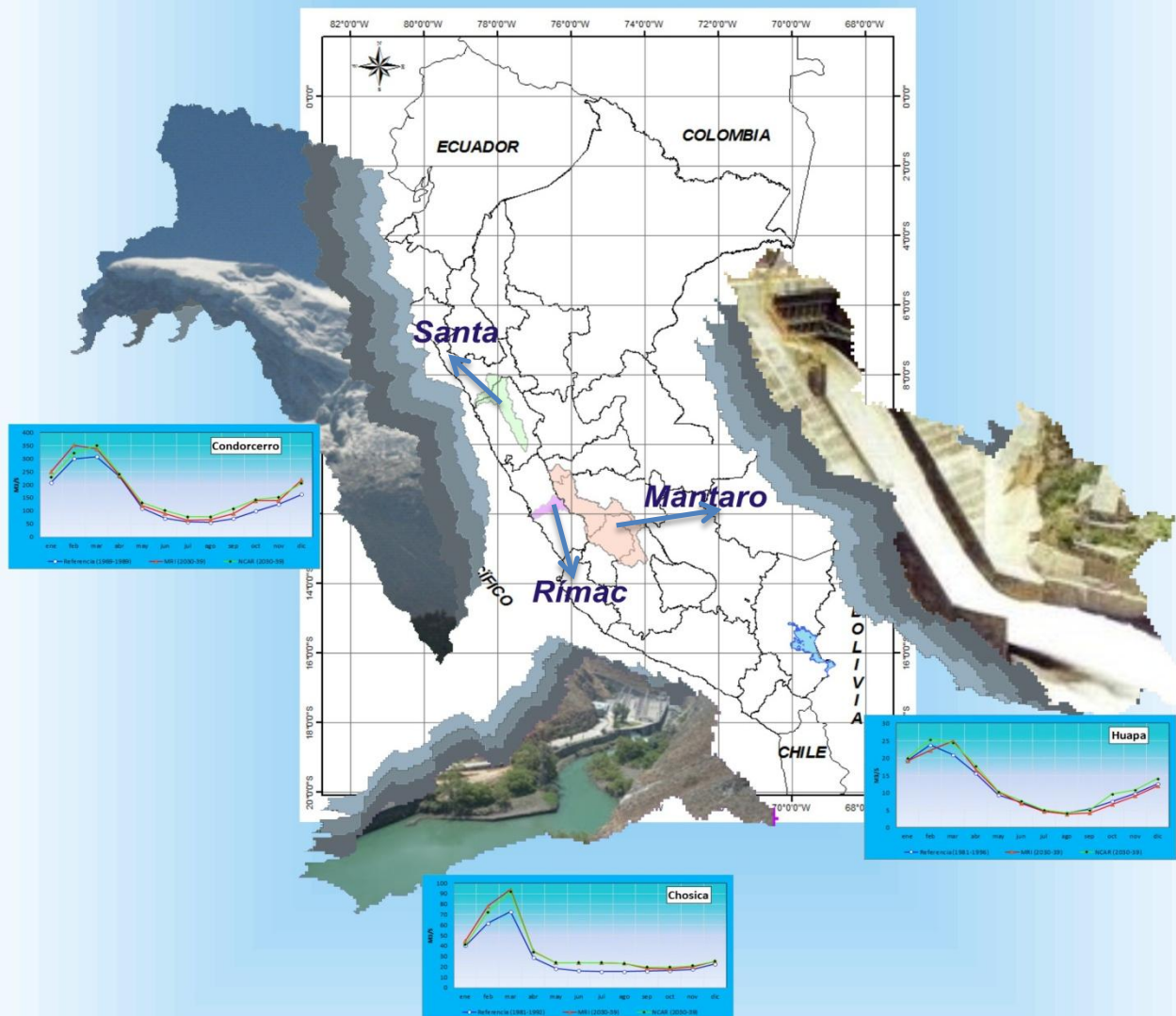


PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

# DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS SANTA, RÍMAC Y MANTARO BAJO UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL HORIZONTE 2030-2039



2012



PERÚ

Ministerio de Energía y Minas



Jr. Cahuide 785  
Jesús María  
Lima 11  
[www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe)



Servicio Nacional de Meteorología e  
Hidrología



PERÚ

Ministerio  
de Energía y Minas

Ministerio de Energía y Minas

**PRESIDENTA EJECUTIVA - SENAMHI**

*Ing. AMELIA DÍAZ PABLÓ*

**MINEM – DIRECCIÓN GENERAL DE ELECTRICIDAD**

**DIRECTOR DE ESTUDIOS Y PROMOCIÓN ELÉCTRICA**

*Ing. ALFREDO SAUSA CORNEJO*

**MINEM-DGE / COORDINADORA DEL PROYECTO**

*Ing. MARTHA VELÁSQUEZ MELGAREJO*

**DIRECTOR GENERAL DE HIDROLOGÍA Y  
RECURSOS HÍDRICOS**

*Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GÁLVEZ*

**LIMA – PERÚ  
2012**

**SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E  
HIDROLOGIA DEL PERU**

**Presidenta Ejecutiva del SENAMHI  
Ing. AMELIA DÍAZ PABLÓ**

**Director General de Hidrología y Recursos Hídricos  
Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GÁLVEZ**

**Director de Hidrología Aplicada  
Ing. OSCAR FELIPE OBANDO**

**Equipo de Trabajo:**

**Dr. WILSON SUAREZ ALAYZA  
Ing. OSCAR FELIPE OBANDO  
Dr. WALDO LAVADO CASIMIRO  
Ing. CLARA ORIA ROJAS  
Lic. ALAN LLACZA RODRIGUEZ**

**Personal de Apoyo:**

**Bach. MIRIAM CASAVARDE RIVEROS  
Srta. DULA CRUZATE GARCÍA**

**LIMA – PERÚ  
2012**

## INDICE

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>10</b>
<b>I. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
1.2 Objetivos Secundarios.....	12
<b>II. ANTECEDENTES .....</b>	<b>12</b>
<b>III. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>15</b>
3.1 Cuenca del río Santa.....	15
3.1.1 Sistema hidráulico e hidrológico .....	17
3.2 Cuenca del río Rímac y Mantaro.....	18
3.2.1 Sistema Hidráulico de las cuencas de los ríos Rímac y Mantaro .....	20
<b>IV. CONSTRUCCION DEL MODELO WEAP .....</b>	<b>24</b>
4.1 Análisis de la oferta de agua.....	24
4.2 Implementación de los modelo en la cuenca del río Santa.....	27
4.3 Implementación de los modelo en la cuenca del sistema Rímac – Mantaro.....	30
4.4 Optimización de los modelos .....	34
4.4.1 Criterio de Nash.....	34
4.4.2 Coeficiente de correlación ( $r^2$ ) .....	34
4.4.3 BIAS.....	35
4.4.4 RMSE.....	35
4.5 Calibración y Validación de los Modelos .....	35
4.5.1 Cuenca del río Santa .....	35
4.5.2 Cuenca del río Rímac y Mantaro .....	38
<b>V. CAMBIO CLIMATICO.....</b>	<b>42</b>
5.1 Modelos de Circulación General de la Atmósfera (AGCM).....	42
5.1.1 Modelo atmosférico MRI/JMA.....	42
5.1.2 Modelo Atmosférico NCAR .....	46
5.2 Escenarios de precipitación y Temperatura para las Cuencas de Estudio .....	47
<b>VI. RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
6.1 Cuenca del río Santa.....	51
6.2 Cuenca del río Rímac.....	55
6.3 Cuenca del río Mantaro.....	59
6.4 Retroceso Glaciar .....	64

<b>VII. DISCUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>VIII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## **FIGURAS**

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Cuenca del río Santa. En rojo estaciones hidrométricas	16
Figura 2. Diagrama topológico de generación eléctrica de la cuenca del río Santa .....	17
Figura 3. Mapa de Ubicación de las cuencas de los ríos Rímac y Mantaro. En rojo estaciones hidrométricas.....	19
Figura 4. Sistema de lagunas reguladas en la Cuenca del río Rímac. En rojo ubicación de centrales hidroeléctricas (fuente Edegel).....	21
Figura 5. Diagrama topológico de generación eléctrica de la Cuenca del río Rímac (fuente: COES).....	22
Figura 6. Diagrama topológico de la generación eléctrica de la Cuenca del río Mantaro .....	23
Figura 7. Diagrama de transferencia de flujos del programa informático WEAP .....	26
Figura 8. Representación grafica del modelo WEAP para la cuenca del río Santa.....	28
Figura 9. Representación grafica del sistema Rímac-Mantaro dentro de la plataforma WEAP. ....	31
Figura 10. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Quitaracsá. ....	37
Figura 11. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Chuquicara. ....	37
Figura 12. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de La Balsa. ....	37
Figura 13. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Condorcerro.....	38
Figura 14. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Huapa. ....	40
Figura 15. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Pongor. ....	40
Figura 16. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Mejorada .....	41
Figura 17. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Ichu (Chinchin). ....	41
Figura 18. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Chosica. ....	41

Figura 19. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Tamboraque. ....	42
Figura 20. Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de San Mateo (Surco).....	42
Figura 21. Esquema de las condiciones de contorno usados para la simulación del modelo atmosférico MRI/JMA 20 km .....	46
Figura 22. Escenarios de precipitación para las cuencas de estudio para los modelos MRI y NCAR respecto a los horizontes 2030 y 2039. ....	49
Figura 23. Escenarios de temperatura para las cuencas de estudio para los modelos MRI y NCAR respecto a los horizontes 2030 y 2039. ....	50
Figura 24. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de la Balsa. ....	53
Figura 25. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Condorcerro.....	54
Figura 26. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Quitaraca. ....	55
Figura 27. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Chuquicara. ....	55
Figura 28. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Chosica....	58
Figura 29. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Tamboraque. ....	58
Figura 30. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Surco. ....	59
Figura 31. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Huapa. ....	62
Figura 32. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Pongor. ....	62
Figura 33. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de la Mejorada .....	63

Figura 34. Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Chinchi (Ichu). .....63

Figura 35. Comparación de cobertura glaciaria según modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-2039 en la cuenca del río Santa. ....65

Figura 36. Comparación de cobertura glaciaria según modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-2039 en las cuencas de los ríos Rímac y Mantaro. ....65



## **TABLAS**

Tabla 1. Relación de lagunas y represas existentes en la Cuenca del río Rímac .....	20
Tabla 2. Relación de lagunas reguladas y represas de la Cuenca del río Mantaro. ....	23
Tabla 3. Lista de datos requeridos solicitados por el SEI para el funcionamiento del modelo WEAP .....	25
Tabla 4. Relación de puntos de control hidrológico modelados en el programa informático WEAP por el SEI – IRD para la cuenca del río Santa. ....	28
Tabla 5. Relación de datos usados en el modelo de la cuenca del río Santa por el SEI-IRD. ....	29
Tabla 6. Relación de puntos de control hidrológico modelados en el programa informático WEAP por el SEI – IRD para la cuenca del río Mantaro. ....	30
Tabla 7. Relación de puntos de control hidrológico modelados en el programa informático WEAP por el SEI – IRD para la cuenca del río Rímac. ....	30
Tabla 8. Relación de datos usados en el modelo de la cuenca del río Rímac por el SEI-IRD. ....	32
Tabla 9. Relación de datos usados en el modelo de la cuenca del río Rímac por el SEI-IRD. ....	33
Tabla 10. Calibración y validación del modelo WEAP para la cuenca del río Santa .....	36
Tabla 11. Calibración del modelo WEAP para la cuenca de los ríos Rímac y Mantaro para el periodo 1970-1981. ....	39
Tabla 12. Validación del modelo WEAP para la cuenca de los ríos Rímac y Mantaro para el periodo 1981-1996. ....	39
Tabla 13. Variables obtenidas del modelo NCAR .....	47
Tabla 14. Escenarios de precipitación para los modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-39 .....	48
Tabla 15. Escenarios de temperatura para los modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-39 .....	48
Tabla 16. Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Santa para el periodo de referencia (1969-1989) y horizonte 2030-39 con los Modelos MRI y NCAR .....	51
Tabla 17. Variación porcentual a nivel multi mensual de los caudales del horizonte 2030-2039 en comparación al periodo de referencia para la cuenca del río Santa. Modelos MRI y NCAR .....	52

Tabla 18. Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Rímac para el periodo de referencia (1969-1989) y horizonte 2030-39 con los Modelos MRI y NCAR.....	57
Tabla 19. Variación porcentual a nivel multi mensual de los caudales del horizonte 2030-2039 en comparación al periodo de referencia para la cuenca del río Rímac. Modelos MRI y NCAR. ....	57
Tabla 20. Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Mantaro para el periodo de referencia (1969-1989) y horizonte .....	61
Tabla 21. Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Mantaro para el periodo de referencia (1969-1989).....	61
Tabla 22. Evolución de la cobertura glaciaria para el escenario 2030-39 .....	64

## INTRODUCCION

Actualmente a nivel mundial se vienen observando perturbaciones en el clima los cuales son atribuidos a una variabilidad natural del planeta o cambios inducidos por la actividad antropogénica (actividad humana), estos cambios son atribuidos a las emisiones de CO<sub>2</sub> y de gases de efecto invernadero que son emitidos por las actividades productivas del hombre.

Estos cambios comenzaron a tener una fuerte relevancia a partir de los años 90' donde las Naciones Unidas organizó a un grupo de expertos en clima para estudiar este fenómeno, a este grupo de expertos se le conoce como el Panel Internacional de Expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en ingles), este grupo de expertos presenta un reporte cada 7 años, siendo el último el de 2007, donde ellos hacen pronósticos de la evolución del clima para el futuro en base a escenarios climáticos generados mediante modelos climáticos.

De acuerdo al IPCC, el Perú sería el tercer país a nivel mundial afectado por el cambio climático, siendo visible los cambios en eventos extremos, retroceso acelerado de los glaciares y variaciones en la disponibilidad hídrica.

El presente estudio, analiza el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica de las cuencas emblemáticas de los ríos Santa, Rímac y Mantaro; las cuales fueron seleccionadas por su importancia en la generación hidroeléctrica del Perú.

Los cuatro primeros capítulos hacen una descripción al trabajo realizado por el SEI (EEUU) e IRD (Francia), quienes comenzaron el proyecto por encargo del Banco Mundial llegando hasta la etapa de calibración y validación de los modelos.

En los capítulos posteriores se da una descripción general de los modelos de circulación general usados en el presente informe: MRI (Japón) y el NCAR (EEUU), los cuales mediante la técnica de downscaling dinámico fueron llevados a una resolución de cuenca que sea

compatible con la estructura espacial semidistribuida del modelo hidrológico utilizado (WEAP)

Por último, se presenta y discute los resultados de la disponibilidad hídrica superficial para el horizonte 2030-39 en los puntos de control hidrológico más importantes considerados de las tres cuencas para el escenario A1B de los modelos climáticos antes mencionados.

Un aspecto relevante de la simulación hidrológica realizada con el modelo WEAP es que éste ha permitido simular la evolución de las superficies glaciares de las cuencas para el horizonte temporal propuesto, gracias a la capacidad del módulo glaciar incorporado en el WEAP por grupo de expertos del Instituto Francés para el Desarrollo (IRD) y del Stockholm Environment Institut (SEI) para el estudio de estas cuencas glaciares del Perú.

## **I. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo principal**

Evaluación de la disponibilidad hídrica futura para las cuencas de los Rímac, Mantaro y Santa para un horizonte 2030-39, mediante el uso de diferentes modelos climáticos de circulación general (GCM) para el escenario A1B

### **1.2 Objetivos Secundarios**

- Simulación Hidrológica de la cuenca del río Santa respecto a los puntos de control de Tablachaca, Quitaraca, Condorcerro y Chuquicara mediante la utilización de variables climáticas generadas mediante downscaling dinámico de los GCM del MRI y NCAR.
- Simulación Hidrológica de la cuenca del río Rímac respecto a los puntos de control de Chosica, Tamboraque y Sheque mediante la utilización de variables climáticas generadas mediante downscaling dinámico de los GCM del MRI y NCAR.
- Simulación Hidrológica de la cuenca del río Mantaro respecto a los puntos de control de Chosica, Tamboraque y Sheque mediante la utilización de variables climáticas generadas mediante downscaling dinámico de los GCM del MRI y NCAR.
- Determinación del área glaciar para las cuencas en estudio para el horizonte 2030-39.

## **II. ANTECEDENTES**

En el 2008, por iniciativa del Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) se le encargó al Banco Mundial realizar un estudio referente a la disponibilidad hídrica futura en cuencas hidrológicas donde se tenga instalado importante infraestructura de generación hidroenergética, el Banco Mundial formó un equipo dividido en dos grupos, el primero correspondía

al Stockholm Environment Institut (SEI) de los Estados Unidos de América propietarios del programa informático WEAP (Water Evaluation And Planning System) y el segundo grupo liderado por el Institute de Recherche pour le Developpement (IRD) de Francia.

La responsabilidad del primer grupo, era la elaboración de los tres modelos hidrológicos mediante el programa WEAP, dichos modelos debían ser entregados calibrados, validados y listos para usar escenarios climáticos, siendo responsabilidad del segundo grupo escoger las cuencas de trabajo.

El segundo grupo, basado en su experiencia de trabajo en la región seleccionó las cuencas de los ríos Santa (C.H Cañón del Pato), Rímac (Red de C.H de la Ciudad de Lima: Huampaní, Pablo Bonner, etc.) y Mantaro (C.H Santiago Antúnez de Mayolo y Restitución), además de recopilar toda la información de campo requerida por el primer grupo; para implementación del modelo hidrológico, como también realizar el análisis hidrológico de las salidas de los modelos después de ser corridos con escenarios de cambio climático.

Un tercer grupo, fuera del equipo SEI-IRD fue considerado el SENAMHI, responsable de proveer los escenarios climáticos al primer grupo, dichos escenarios serian generados mediante el uso de downscaling dinámicos de los GCM proporcionados por el The Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Meteorological Research Institute of Japan (MRI) Y el National Center for Atmospheric Researchal (NCAR).

Las cuencas seleccionadas presentaban el inconveniente de tener glaciares, pero el modelo WEAP, en su versión inicial, no tenía la capacidad de poder simular la fusión glaciar y la evolución de la cobertura glaciar por lo que el SEI, consideró la construcción e implementación de un módulo de fusión glaciar para ser incorporado al modelo WEAP ya es que este no poseía esta función, siendo asignado al segundo grupo la elaboración (incluía la calibración) del módulo para ser incorporado al WEAP.

Según discusiones sostenidas entre el BM, el SEI y el IRD se decidió que los modelos

hidrológicos debían ser puestos a punto respecto a los puntos de control de Condorcero (Santa), Tablachaca y Pongor (Mantaro) y Chosica (Rímac), a la vez dejarlos listos para ingresar datos de escenarios climáticos.

El contrato consideró un periodo de 18 meses (inicialmente se consideró solo 12 meses) para la finalización del estudio, pero al vencer este no se contaba aun con los escenarios climáticos que debían ser proporcionados por el SENAMHI, por lo que la responsabilidad del equipo IRD-SEI se limitó a la entrega de los modelos calibrados respecto a los puntos de control considerados (se entregaron más puntos de control en las tres cuencas pero modelizados respecto a los parámetros más óptimos de los puntos de control más importantes).

El SENAMHI conjuntamente con el BM trato los datos del escenario proporcionado por el PNNL, los cuales no representaban (esto originó el retroceso) de manera correcta la climatología local; por lo que se consideró, sólo usar los datos proporcionados por el NCAR (los del MRI todavía no estaban disponibles) y llevados a nivel de cuenca mediante un downscaling estadístico para el escenario A1B, para los horizontes 2050-59 y 2090-99, de donde no se notó un cambio sustancial en los caudales comparados entre los dos horizontes, pero se observaron sobre estimaciones groseras para el caso de Chosica (posteriormente se vio que el problema estaba ligado a la validación a causa de la existencia de caudales regulados).

El SENAMHI con el auspicio del MINEM decidió continuar con los estudios planteándose realizar un downscaling dinámico a los modelos NCAR y MRI (como estuvo inicialmente previsto), para lo cual el MINEM proporcionó un servidor informático de gran capacidad para el almacenamiento de los datos climáticos y un procesador Workstation para las corridas de los modelos WEAP (por su tamaño en una PC simple dura más de 24 horas cada corrida).

De su parte el BM presento la publicación “Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology” a mediados de 2011 considerándose solamente el análisis climático

realizado con el modelo NCAR (downscaling estadístico) para el horizonte 2050-59, quedando pendiente las salidas hidrológicas para las tres cuencas mediante los downscaling dinámicos de los modelos MRI y NCAR como a la vez corregir los errores respecto a la modelización del río Rímac en el punto de Chosica.

## **II. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **3.1 Cuenca del río Santa**

La cuenca del río Santa se encuentra a 400 km al norte de Lima, en la costa del Pacífico en Perú, vierte sus aguas en el Océano Pacífico. Esta cuenca tiene una superficie total de 11721 km<sup>2</sup>. En el plano administrativo, se coloca en el centro del departamento de Ancash.

Geográficamente, se encuentra entre 10° 12' y 7° 58' de latitud sur y 78° 41' y 77° 13' de longitud oeste (Figura 1). Los límites hidrológicos son por el norte con las pequeñas cuencas hidrográficas de los pueblos costeros de Chao y Virú y por el sur con las cuencas de los ríos Pativilca y Fortaleza. Hacia el lado este limita con el río Marañón y el sur-oeste con las cuencas de los ríos: Lacramarca, Casma, Huarmey, Fortaleza y el Océano Pacífico.

A nivel altitudinal, esta cuenca se extiende desde el Océano Pacífico hasta el punto más alto en el Perú, el Nevado Huascarán, a 6768 msnm. En cuanto al clima, la cuenca se puede dividir en cuenca húmeda (aguas arriba) y seca (aguas abajo). La cuenca húmeda representa la superficie de la captación (área en la que está presente la precipitación) a más de 2000 metros. Esta área representa el 83% de la superficie total de toda la cuenca del río Santa.

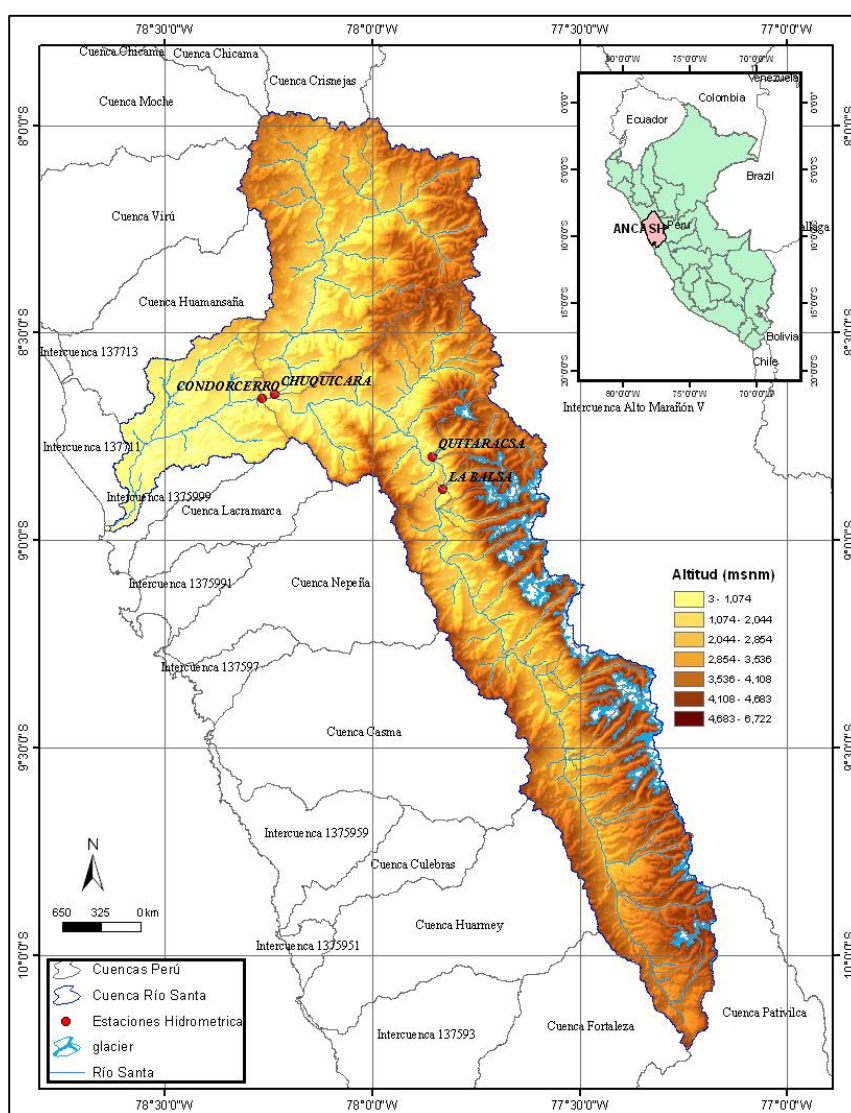
El río Santa tiene una longitud máxima aproximada de 315 kilómetros desde su nacimiento en laguna de Conococha (4020 metros) hasta el océano Pacífico. De esta distancia 146 kilómetros se encuentran en la cuenca húmeda. Esta cuenca, aguas arriba, se encuentra entre dos cordilleras: La Blanca y la Negra. La Cordillera Blanca está formada por 631 km<sup>2</sup> de capa de hielo, de las cuales 381 km<sup>2</sup> pertenecen al río que fluye al Océano Pacífico



(Santa) y 250 km<sup>2</sup> que pertenece a la cuenca del Amazonas. La Cordillera tiene 260 lagos, de los cuales 192 pertenecen a la cuenca del río Santa (Acuña, 2003). Es en esta cordillera, donde se encuentra la montaña más alta de Perú (Huascarán, 6768 msnm).

La Cordillera Negra, ubicado al oeste de la Cordillera Blanca, pegada a la Costa del Pacífico, tiene una altitud máxima de 5178 msnm (la montaña Cancahua). En la cordillera no hay glaciares, pero las partes más altas pueden estar esporádicamente cubiertas de nieve.

En la **Figura 1**, se muestra el mapa de ubicación de la cuenca del río Santa, en el cual se ha incluido los puntos de control hidrométrico evaluados.

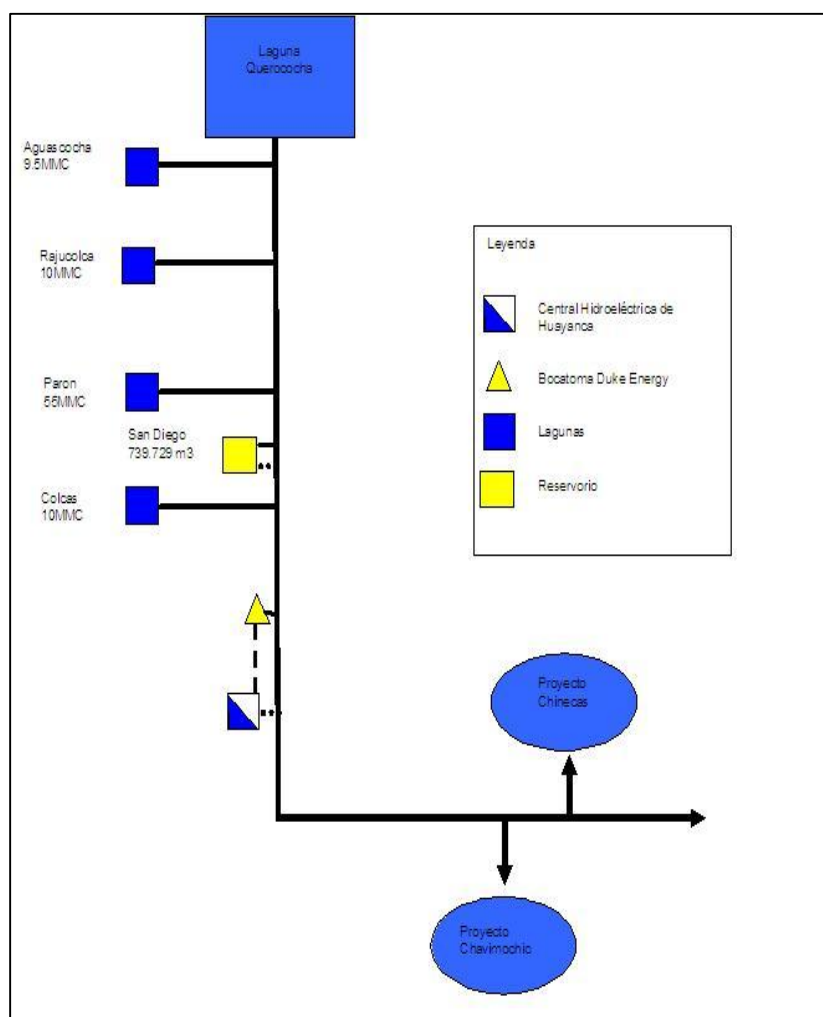


**Figura 1.** Mapa de Ubicación de la Cuenca del río Santa. En rojo estaciones hidrométricas

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1 Sistema hidráulico e hidrológico

La cuenca del río Santa es monitoreada a nivel de información glaciaria e hidrológica principalmente por la Unidad de Glaciología de Huaraz (UGRH) perteneciente a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) dicha información se utilizó conjuntamente con la autorización del IRD (convenio de investigación ANA-IRD), esta información tiene una serie de datos desde el 2000 hasta la actualidad. Las aguas de este río son utilizadas para la agricultura y generación eléctrica donde esta última es gestionado por Duke Energy a través de un sistema de 4 lagunas reguladas, en la **Figura 2** se puede ver el diagrama topológico de este sistema de lagunas. Duke Energy proporciono la información referente de las lagunas y de 6 estaciones meteorológicas de su propiedad.



**Figura 2.** Diagrama topológico de generación eléctrica de la cuenca del río Santa

Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Cuenca del río Rímac y Mantaro

La zona de estudio se encuentra conformada por el sistema de las cuencas Rímac y Mantaro, donde la cuenca del río **Rímac** se encuentra situada en el centro del Perú y vierte sus aguas hacia el Océano Pacífico, esta cuenca tiene un área aproximado de 3398 km<sup>2</sup> de área de captación. Tiene una altitud máxima de 5508 metros sobre el nivel del mar en el nevado Paca además de poseer 191 lagunas aproximadamente.

En su parte alta, la cuenca del río Mantaro y Rímac, están divididas por la Cordillera Central, que actúa como límite de las cuencas. Dicha zona cuenta con un sistema de lagunas para la generación eléctrica y agua potable del valle.

Lo más característico de esta cuenca, es la presencia de la Ciudad de Lima con más de 8 millones de habitantes y su red de 6 centrales hidroeléctricas gestionadas por EDEGEL S.A, que producen de manera combinada hasta 323 MW en sus turbinas.

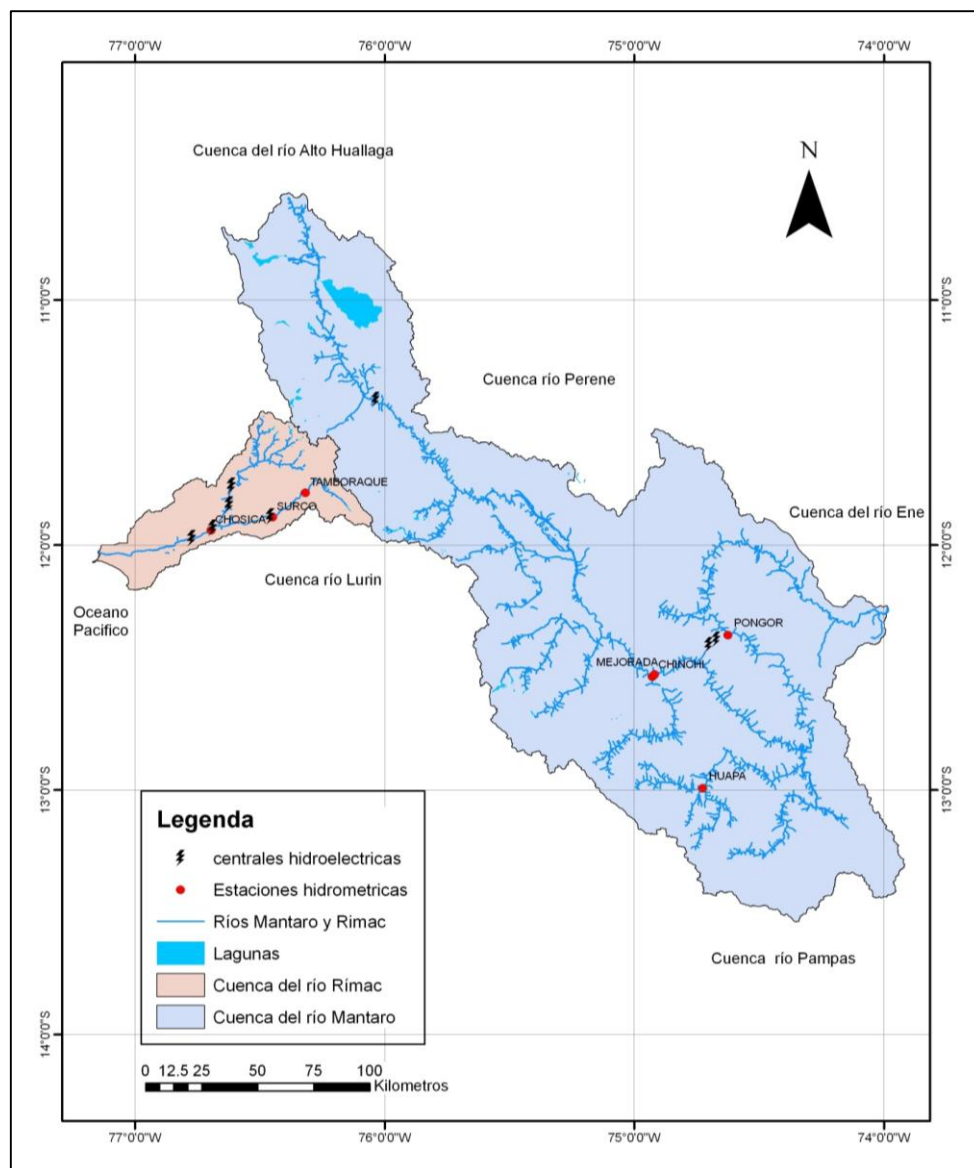
La cuenca del río **Mantaro**, se encuentra al centro del Perú y vierte sus aguas hacia el Océano Atlántico, tiene un área total de 34350 km<sup>2</sup>, con una altitud máxima de 5650 metros aproximadamente sobre el nevado de Collquepucro.

Esta cuenca es recorrida por el río Mantaro que tiene sus nacientes en el lago Junín a 4080 metros y hasta su desembocadura en el río Apurímac tiene un recorrido de 830 kilómetros aproximadamente. La población aproximada de toda la cuenca es de 1 300 000 habitantes, de donde el 38% aproximado es rural.

Su importancia de esta cuenca radica desde el punto de vista agrícola-económico y energético. La fertilidad de sus valles permite una agricultura extensiva de 25110,85 hectáreas aproximadamente, la cual tiene como mercado principal la ciudad de Lima. Desde el punto de vista energético es el centro de operaciones de Electroperú y Electroandes, la primera ópera la central hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo” que viene a ser la más importante del país con una producción de turbinas de 650 MW además de operar la central

de “Restitución” con una producción de turbinas de 215 MW. Electroandes opera la central “Mal Paso” 48 MW dedicada exclusivamente para uso regional. Este sistema eléctrico es operado por una serie de 3 represas y 16 lagunas ubicadas dentro de esta cuenca, parte de las aguas de esta cuenca son trasvasadas hacia la cuenca del río Rímac para el uso doméstico y generación eléctrica.

En la Figura 3, se puede apreciar la ubicación de estas 2 cuencas respecto al Perú, donde se ha incluido también los puntos de control hidrométrico.



**Figura 3.** Mapa de Ubicación de las cuencas de los ríos Rímac y Mantaro. En rojo estaciones hidrométricas

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1 Sistema Hidráulico de las cuencas de los ríos Rímac y Mantaro

La cuenca del río Rímac, tiene la característica de tener un sistema de 15 lagunas, las cuales son regulas y toda esta operación es administrada por EDEGEL, y se registra continuamente desde el 1996 hasta la actualidad, además de una represa (Yuracmayo).

El Rímac utiliza también las aguas trasvasadas (proyecto Marca III, operativo desde el 2003) por intermedio de un túnel de 4 kilómetros que atraviesa la Cordillera Central. Este involucra 5 lagunas y tiene por prioridad satisfacer las demandas de consumo humano de la ciudad de Lima.

En la **Tabla 1** y **Figura 4**, se pueden ver los datos básicos de estas lagunas y su disposición física respectivamente.

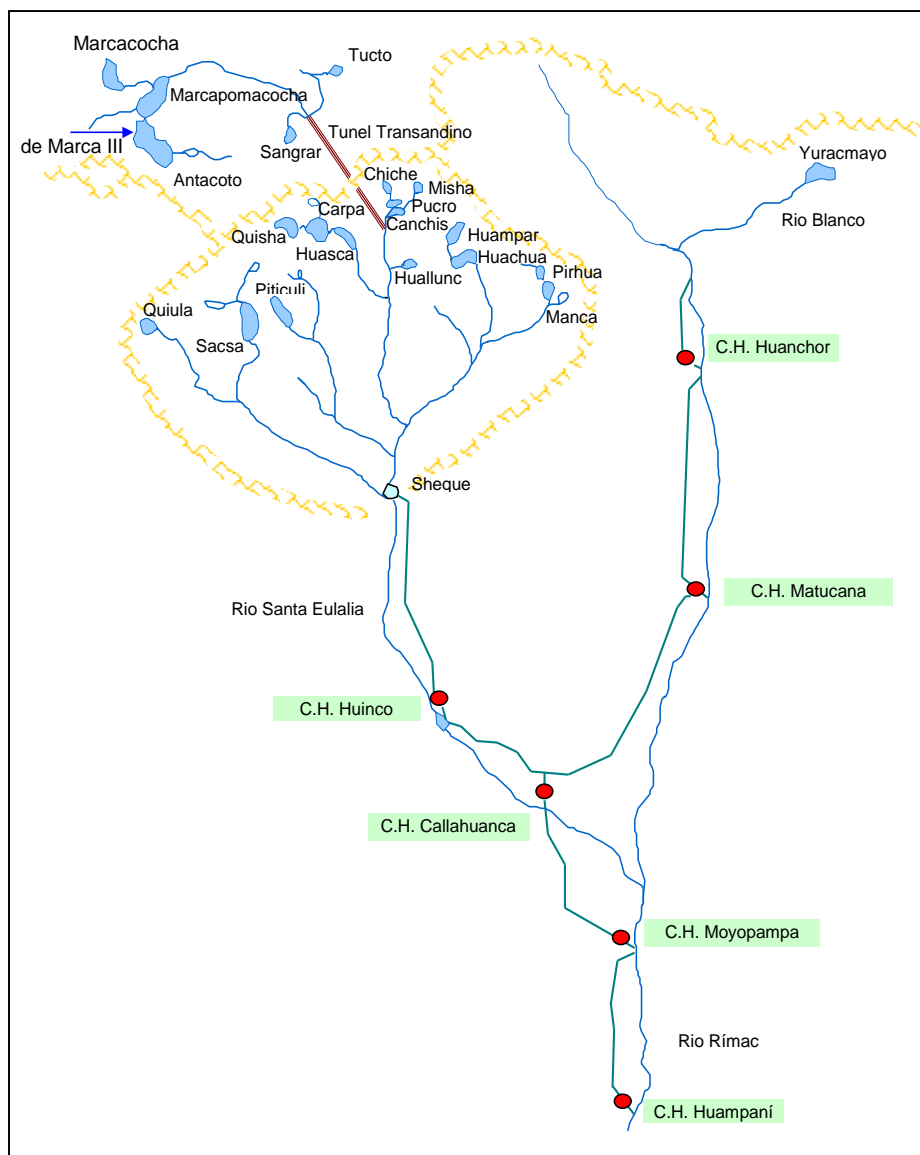
**Tabla 1.** Relación de lagunas y represas existentes en la Cuenca del río Rímac

Laguna	Cuenca	Altitud m.s.n.m	Volumen Útil MMC	Área de Cuenca (km <sup>2</sup> )
Marcacocha	Mantaro (Marca)	4512	7.40	13.00
Marcapomacocha	Mantaro (Marca)	4326	16.78	23.00
Sangrar	Mantaro (Marca)	4461	10.62	21.00
Tucto	Mantaro (Marca)	4460	*	9.10
Antacoto	Mantaro (Marca)	4600	61.00	105
Carpa	Rímac	4544	18.97	18.50
Quisha	Rímac	4650	9.30	7.80
Huasca	Rímac	4361	7.37	27.20
Sacsa	Rímac	4430	14.20	32.50
Quiula	Rímac	4534	1.78	5.20
Piticuli	Rímac	4678	6.50	7.10
Huachua	Rímac	4570	4.98	16.80
Huampar	Rímac	4628	3.33	8.90
Manca	Rímac	4550	1.57	7.10
Pirhua	Rímac	4765	0.95	2.30
Chiche	Rímac	4530	2.30	7.90
Canchis	Rímac	4421	2.10	26.50
Huallunca	Rímac	4510	1.60	6.30
Misha	Rímac	4670	0.65	3.10
Pucro	Rímac	4470	2.00	9.40
Yuracmayo	Rímac	4270	48.30**	99.00

\*Laguna no regulada

fuelle:EDEGEL-Neyra Ingenieros

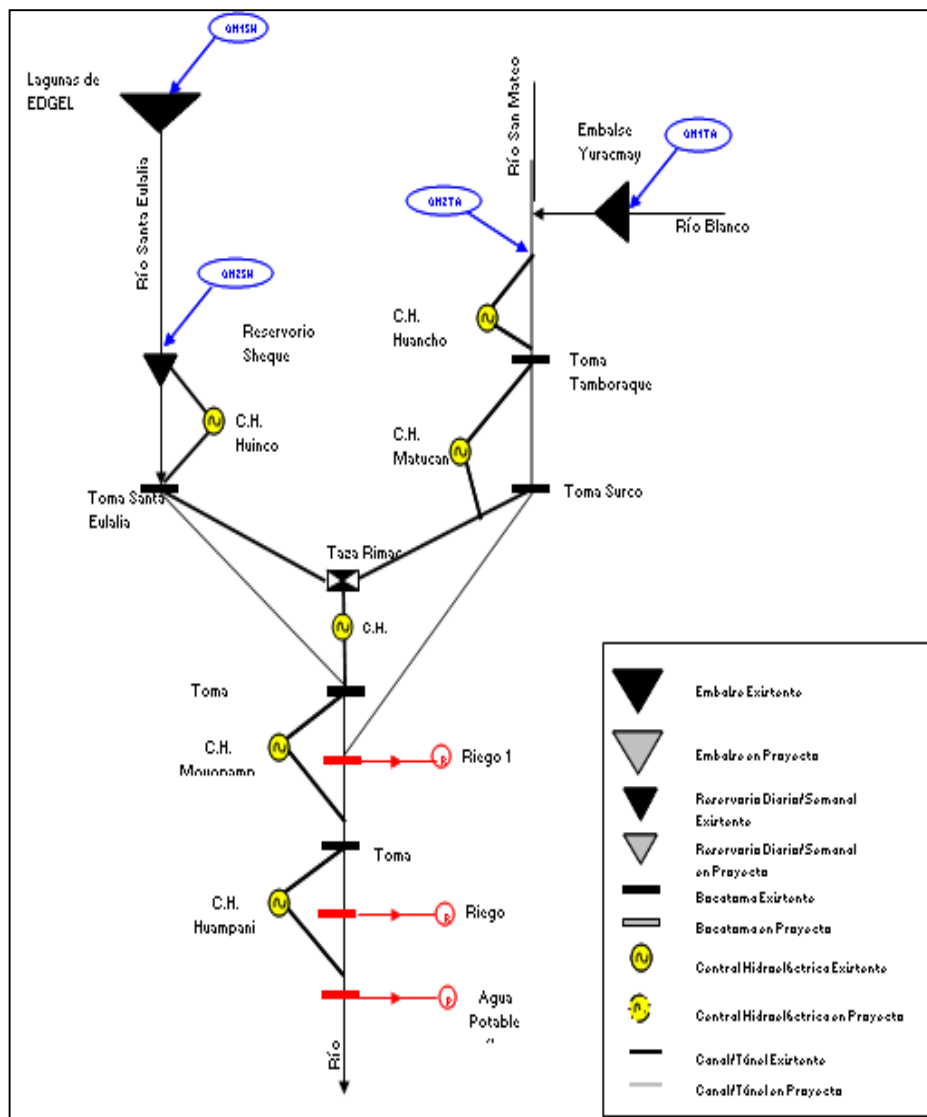
\*\* Volumen Total



**Figura 4.** Sistema de lagunas reguladas en la Cuenca del río Rímac.  
En rojo ubicación de centrales hidroeléctricas (fuente Edegel).  
Fuente: Elaboración propia

Respecto al sistema eléctrico, EDEGEL opera cinco centrales: Santa Eulalia, Huinco, Huanchor, Matucana y Huampani, las cuales trabajan en forma interconectada logrando sacar el mayor provecho del recurso hídrico desde un punto de vista energético.

En la **Figura 5**, se aprecia el diagrama topológico de generación eléctrica de la cuenca del río Rímac.



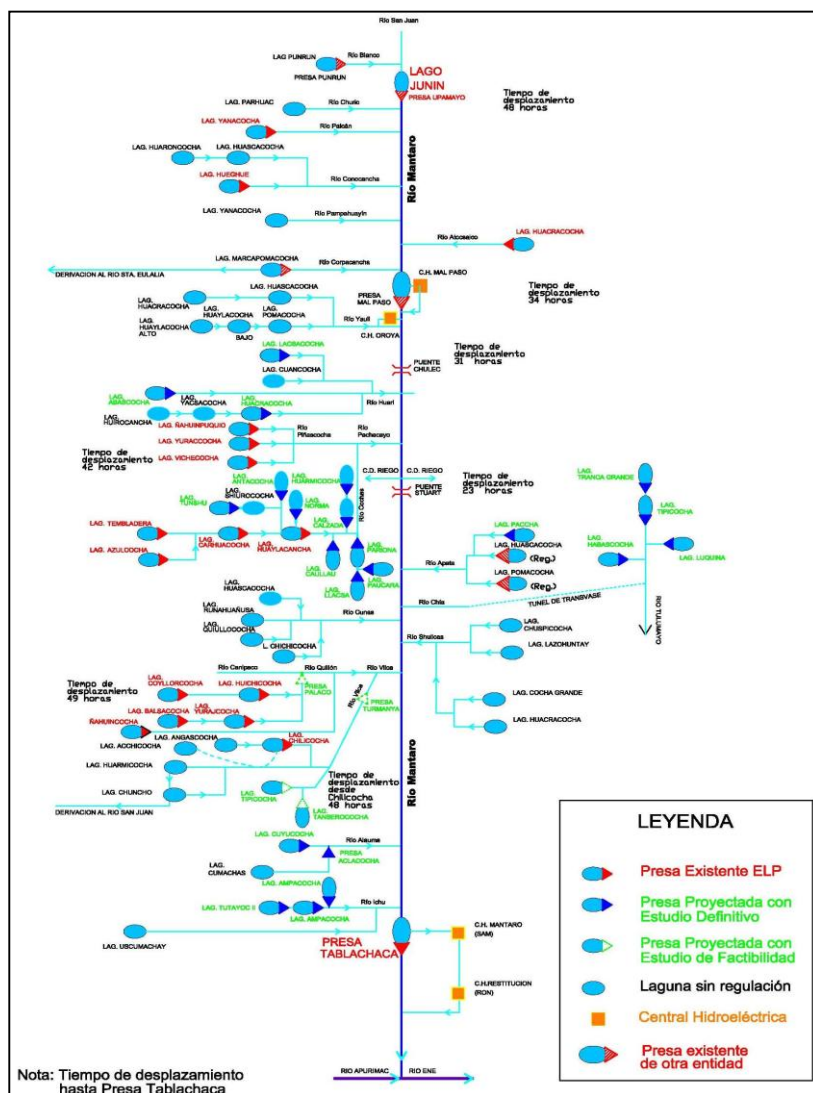
**Figura 5.** Diagrama topológico de generación eléctrica de la Cuenca del río Rímac  
Fuente: COES

La cuenca del río Mantaro es operada principalmente por Electroperú (también hay presencia de Electro Andes) que utiliza una represa (Tablachaca) y 16 lagunas reguladas con las cuales produce la electricidad y tiene en proyecto construir una veintena más, EDEGEL utiliza aguas de esta cuenca que son trasvasadas (5 lagunas) hacia la cuenca del río Rímac para la generación eléctrica y el uso de agua potable (gestionada por SEDAPAL que es la empresa de agua potable), en la **Tabla 2** se puede ver la relación de las lagunas y represas, y sobre la **Figura 6** se muestra el diagrama topológico de esta cuenca.

**Tabla 2.** Relación de lagunas reguladas y represas de la cuenca del río Mantaro.

NOMBRE	LONGITUD	LATITUD	CUENCA	GESTIONARIO	DEBUT
Azulcocha	-75.996	-11.945	Mantaro	Electroperu	1997
Balsacocha	-75.481	-12.590	Mantaro	Electroperu	1999
Carhuacocha	-75.941	-11.935	Mantaro	Electroperu	1995
Chilicocha	-75.401	-12.698	Mantaro	Electroperu	1999
Coyllorcocha	-75.540	-12.580	Mantaro	Electroperu	1999
Huacracochoa	-76.037	-11.275	Mantaro	Electroperu	2000
Huaylacancha	-75.909	-11.960	Mantaro	Electroperu	1995
Hueghue	-76.280	-11.242	Mantaro	Electroperu	2000
Hulchicocha	-75.534	-12.562	Mantaro	Electroperu	1999
Nahuincocha	-75.879	-11.867	Mantaro	Electroperu	1995
Nahuincocha	-75.435	-12.592	Mantaro	Electroperu	1999
Tembladera	-75.966	-11.964	Mantaro	Electroperu	1997
Vichicocha	-75.869	-11.881	Mantaro	Electroperu	1995
Yanacochoa-Palcon	-76.289	-11.122	Mantaro	Electroperu	2000
Yuracocha	-75.844	-11.887	Mantaro	Electroperu	1995
Yurajcocha	-75.496	-12.532	Mantaro	Electroperu	1999
<b>Malpaso</b>	<b>-76.050</b>	<b>-11.242</b>	<b>Mantaro</b>	<b>ElectroAndes</b>	<b>1937</b>
<b>Upamayo (Lago Junin)</b>	<b>-76.11</b>	<b>-11.130</b>	<b>Mantaro</b>	<b>ElectroAndes</b>	<b>1937</b>
<b>Tablachaca</b>	<b>-76.276</b>	<b>-10.922</b>	<b>Mantaro</b>	<b>Electroperu</b>	<b>1973</b>

Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.** Diagrama topológico de la generación eléctrica de la Cuenca del río Mantaro  
Fuente: Electroperú



#### IV. CONSTRUCCION DEL MODELO WEAP

##### 4.1 Análisis de la oferta de agua

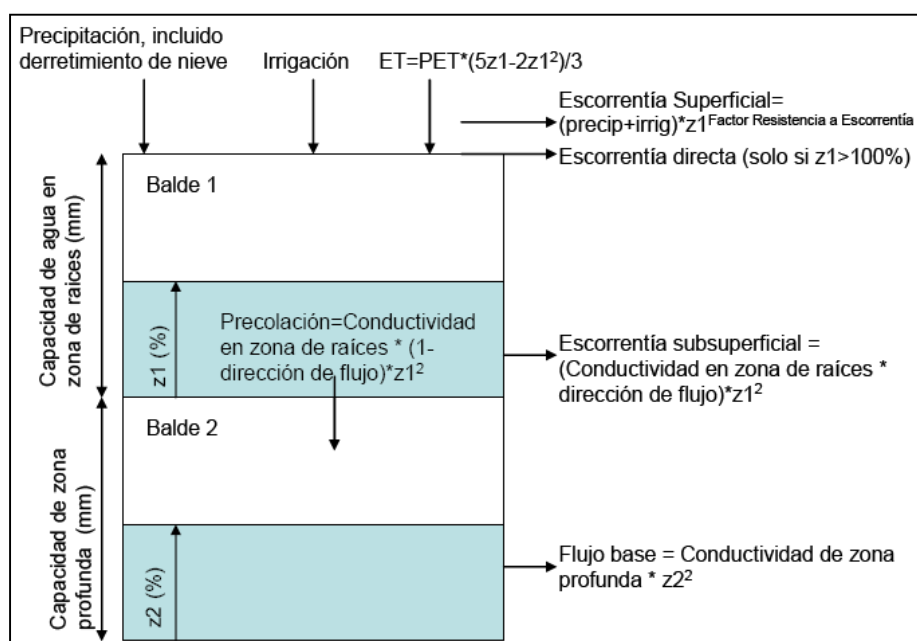
Los componentes del Balance Hidrológico Modelados, usando el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial (i.e. interflow), y flujo base (**Figura 7**). WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del Balance Hidrológico, para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificadas en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como *catchments*. Los *catchments* tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas o puntos representativos. Para este proceso se requiere la caracterización de cobertura vegetal necesaria, incluyendo el estimado de las áreas y la distribución de cobertura vegetal dentro de cada zona de captación. Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud, y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante). Adicionalmente, datos de caudales en estaciones de medición son necesarios para poder comparar los resultados del modelo y realizar calibraciones. Finalmente, en el análisis de oferta de agua es necesario incorporar la información relativa a la infraestructura física de control y aprovechamiento existente al interior de la cuenca, si es que se proyecta incluirla dentro de la modelización, en la **Tabla 3** se presenta un resumen de los datos requeridos para armar los modelos.

**Tabla 3.** Lista de datos requeridos solicitados por el SEI para el funcionamiento del modelo WEAP

Datos Requeridos para Alimentar el Modelo y Durante el Proceso de Calibración	Prioridad	Formato preferido	Notas
<b>Datos de Entrada - Demandas</b>			
- Uso de suelo			Estos datos son necesarios para caracterizar la cuenca
o Cobertura de vegetación	1	GIS	
o Tipo de suelo	2	GIS	
o Geología	2	GIS	
o Áreas de agricultura irrigada	1	GIS, Excel, texto o csv	
o Tecnologías de irrigación	2	GIS, Excel, texto o csv	
- Clima			Estos datos son necesarios para alimentar el modelo con condiciones climáticas. Precipitación y Temperatura deben ser promedios mensuales de cada mes durante el periodo de modelación, mientras humedad relativa y viento pueden ser un promedio mensual aproximado.
o Precipitación (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Temperatura (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Cobertura de nubes	2	Excel, texto, o csv	
o Latitud	1	Excel, texto, o csv, o capas de GIS para extraer datos	
- Sitios de Demanda (ciudades, industrias, zonas agrícolas)			
o Número de usuarios	1	No hay formato preferido	
o Consumo per capita	1	No hay formato preferido	
o Variación Mensual	1	No hay formato preferido	
o Porcentaje de retorno	1	No hay formato preferido	
<b>Datos de Entrada – Suministro y Recursos</b>			
- Reservorios/represas	1	No hay formato preferido. Los datos pueden venir en diversos formatos o hacer parte de un texto. La curva de volumen/elevación puede venir en Excel.	Si existen reservorios, es importante tener información sobre su localización y sus características físicas y de operación
<u>Datos físicos:</u>			
o Capacidad de almacenamiento			
o Volumen inicial			
o Curva de volumen/elevación			
o Evaporación			
o Perdidas a agua subterránea			
<u>Datos de operación</u>			
o Máximo nivel de conservación			
o Máximo nivel de seguridad			
o Máximo nivel inactivo			

Datos Requeridos para Alimentar el Modelo y Durante el Proceso de Calibración	Prioridad	Formato preferido	Notas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidad hidroeléctrica</li> <li>o Mínimo caudal de turbina</li> <li>o Máximo caudal de turbina</li> <li>o Cabeza hidráulica</li> <li>o Factor de Planta</li> <li>o Eficiencia</li> </ul>	1	No hay formato preferido	El modelo requiere estos datos para poder calcular producción hidroeléctrica
- Requerimientos de caudales mínimos	2	No hay formato preferido	
- Canales para divertir agua	1	No hay formato preferido	Es importante saber la localización de los canales y acuíferos
- Agua subterránea	2		
<b>Datos para Calibración del Modelo</b>			
- Ríos			Estos datos son importantes para chequear el comportamiento del modelo, y realizar la calibración
o Series de tiempo de caudales	1	Excel, texto, o csv	
- Nieve			
o Series de tiempo de profundidad de nieve o de equivalente de agua	1	Excel, texto, o csv	
o Estimados de volumen de nieve	1	Excel, texto, o csv	

Fuente: www.sei.org



**Figura 7.** Diagrama de transferencia de flujos del programa informático WEAP  
Fuente: SEI - 2009

De la Figura 7:

- Kc: coeficiente de cultivo
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Sw
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF

- Conductividad de zona de raíces,  $K_s$
- Conductividad de zona profunda,  $K_d$
- Dirección preferencial de flujo,  $f$

Observando la ecuación del Balance de Masa del modelo hidrológico, para el balde superior y en el balde inferior del módulo hidrológico se observa cómo cada término de la ecuación que corresponde a un elemento del balance hidrológico es afectado de forma diferente por los parámetros indicados:

#### Balde superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_e(t)\frac{RRF_j}{z_{1,j}^2} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$$

Donde:

- 1er término: Cambio en humedad del suelo
- 2do factor: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)
- 3er término: Evapotranspiración
- 4to factor: Escorrentía superficial
- 5to término: Flujo intermedio
- 6to factor: Percolación

#### Balde inferior:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$$

Donde:

- 1er término: Flujo base
- 2do término: Percolación

## 4.2 Implementación de los modelo en la cuenca del río Santa

El modelo de la cuenca de río Santa, considera 181 catchements además de tener 17 puntos de control hidrológico (operados en su mayoría por Electroperú antes de su privatización) mostrados en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Relación de puntos de control hidrológico modelados en el programa informático WEAP por el SEI – IRD para la cuenca del río Santa

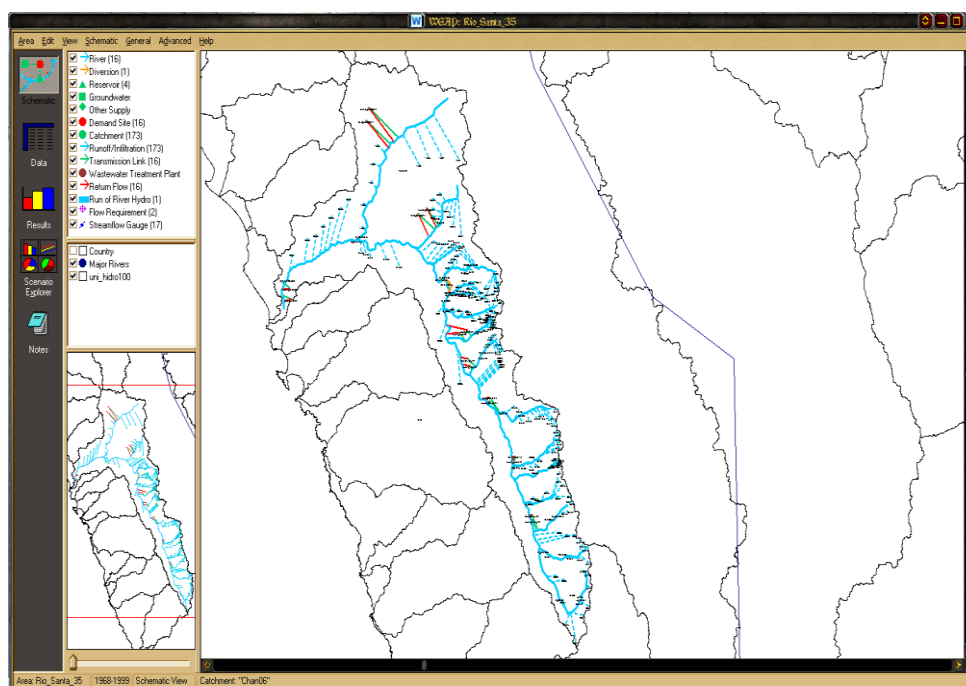
Nombre	Rio	Latitud (°sur)	Longitud (°oeste)	Altitud
Artesoncocha	Artesoncocha	8:58:38	77:38:41	4300
Chancos	Quebrada Honda	9:19:15	77:34:47	2872
Chuquicara	Chuquicara	8:38:51	78:13:55	532
Colcas	Colcas	8:55:24	77:50:33	2048
Condocerro	Santa	8:39:30	78:15:43	477
La Balsa	Santa	8:52:39	77:49:38	1861
Llanganuco	Llanganuco	9:04:43	77:39:05	3916
Los cedros	Los cedros	8:52:18	77:49:43	1878
Manta	Manta	8:36:31	77:53:03	1920
Olleros	Olleros	9:40:01	77:27:49	3456
Pachacoto	Pachacoto	9:51:09	77:24:08	3745
Paron	Paron	9:00:14	77:41:20	4112
Puente Carretera	Santa	8:58:12	78:37:48	18
Querococha	Querococha	9:43:35	77:19:57	4037
Quillcay	Quillcay	9:31:24	77:31:39	3091
Quitaracsa	Quitaracsa	8:47:52	77:51:08	1480
Recreta	Santa	10:02:27	77:19:33	4018

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 8**, se muestra el esquema del sistema hidrológico desarrollado dentro de la aplicación del modelo WEAP, para la cuenca del río Santa.

Los datos utilizados en la implementación del modelo, por el SEI-IRD son descritos en la

**Tabla 5.**



**Figura 8.** Representación gráfica del modelo WEAP para la cuenca del río Santa  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.** Relación de datos usados en el modelo de la cuenca del río Santa por el SEI-IRD.

Datos Requeridos para Alimentar el Modelo	Prioridad	Santa	Fuente
<b>Datos de Entrada – Demandas</b>			
o Cobertura de vegetación	1		UNALM
o Precipitación (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	32 estaciones	IRD, INRENA, DUKE
o Temperatura (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	7 estaciones	IRD, INRENA, DUKE
o Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	6 estaciones	IRD, INRENA, DUKE
o Viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	5 estaciones	IRD, INRENA, DUKE
o Número de usuarios	1	Población Urb./rural	INEI (página WEB)
<b>Datos de Entrada – Suministro y Recursos</b>			
- Reservorios/represas	1	4 lagunas	DUKE
<b>Datos físicos:</b>			
o Capacidad de almacenamiento		4 lagunas	DUKE
o Volumen inicial		4 lagunas	DUKE
o Curva de volumen/elevación		4 lagunas	DUKE
<b>Datos de operación</b>			
o Máximo nivel de conservación		Huallanca	COES
o Máximo nivel de seguridad		Huallanca	COES
o Máximo nivel inactivo		Huallanca	COES
- Capacidad hidroeléctrica	1	Huallanca	COES
o Mínimo caudal de turbina		Huallanca	COES
o Máximo cauda de turbina		Huallanca	COES
o Cabeza hidráulica		Huallanca	COES
o Factor de Planta		Huallanca	COES
o Eficiencia		Huallanca	COES
- Requerimientos de caudales mínimos	2	Huallanca	COES
<b>Datos para Calibración del Modelo</b>			
- Ríos			
o Series de tiempo de caudales	1	25 estaciones	IRD, INRENA, DUKE
<b>SIG</b>			IRD
o Imágenes glaciares		2006-Aster	SENAMHI
		2003-SPOT5	IRD
		2000-Landsat5	SENAMHI
		1987-Landsat5	SENAMHI
		1970-Carta Nacional	SENAMHI

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Implementación de los modelo en la cuenca del sistema Rímac – Mantaro

Para el caso del Rímac y Mantaro, el modelo fue implementado de manera conjunta, debido a la dependencia hídrica que se tiene del sistema de trasvase de Marcapomacocha y cuenta con 279 catchements además de tener 26 puntos de control hidrológico, tal como se muestra en las **Tablas 6 y 7** y en la **Figura 9**. En las **Tablas 8 y 9**, se muestra un resumen de los datos usados por el IRD-SEI en la implementación del modelo.

**Tabla 6.** Relación de puntos de control hidrológico modelados en el programa informático WEAP por el SEI – IRD para la cuenca del río Mantaro.

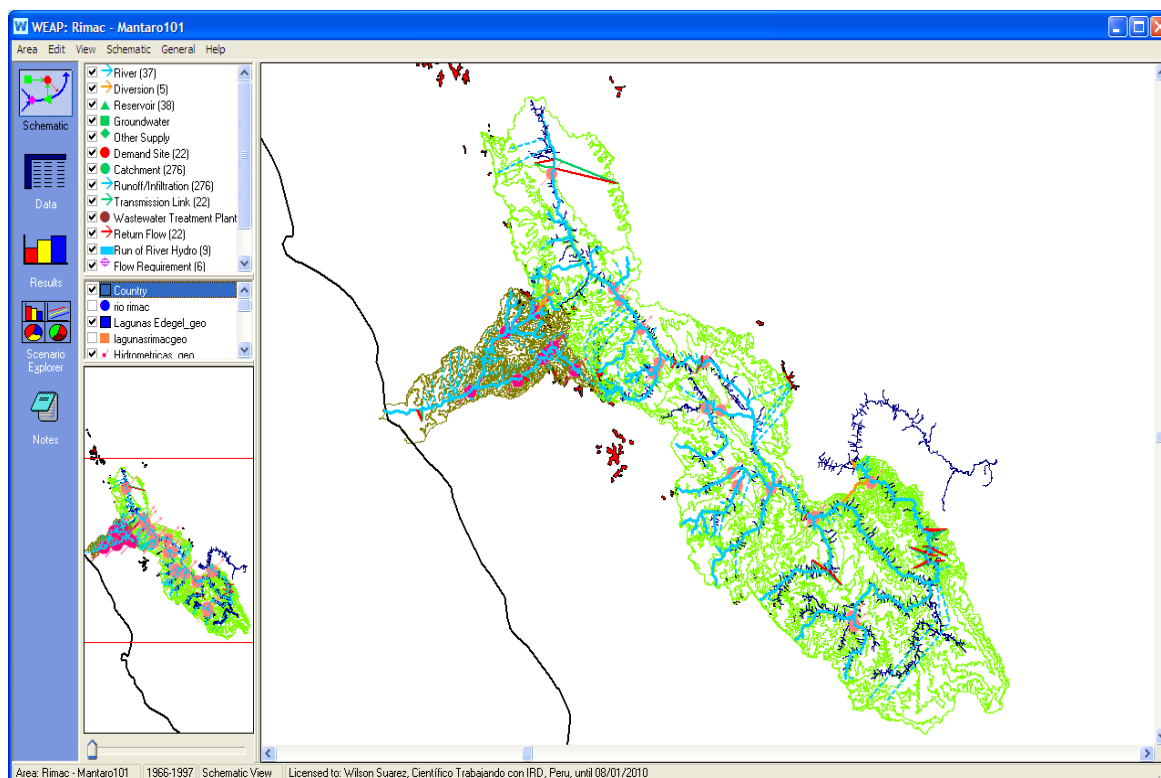
Nombre	Administrador	Latitud	Longitud	Altitud
SANTA ELENA	Electro Perú	-13.033	-74.712	3600
HUAPA	Electro Perú	-12.993	-74.728	3600
CHINCHI	Electro Perú	-12.535	-74.924	2830
MEJORADA	Electro Perú	-12.528	-74.921	2799
MOYA	Electro Perú	-12.394	-75.144	3180
QUILLON	Electro Perú	-12.392	-75.144	3190
YULAPUQUIO	Electro Perú	-12.381	-75.314	3580
PONGOR	Electro Perú	-12.366	-74.623	1680
CANIPACO	Electro Perú	-12.317	-75.350	3700
ANGASMAYO	Electro Perú	-12.025	-75.398	3280
YANACOCKA	Electro Perú	-12.021	-75.472	3500
PIÑASCOCHA	Electro Perú	-11.851	-75.762	3750
COCHAS TUNEL	Electro Perú	-11.855	-75.741	3750
PACHACAYO	Electro Perú	-11.809	-75.722	3650
PUENTE STUART	Electro Perú	-11.800	-75.487	3350
HUARI	Electro Perú	-11.645	-75.815	3650
PUENTE CHULEC	Electro Perú	-11.513	-75.923	3710
CASARACRA	Electro Perú	-11.462	-75.956	3820
UPAMAYO	Electro Perú	-10.922	-76.276	4080

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7.** Relación de puntos de control hidrológico modelados en el programa informático WEAP por el SEI – IRD para la cuenca del río Rímac.

Nombre	Cuenca	Administrador	Latitud	Longitud	Altitud (metros)
CHOSICA	RIMAC	SENAMHI	-11.933	-76.7	850
SURCO	RIMAC	EDEGEL	-11.883	-76.45	1990
TAMBORAQUE	RIMAC	EDEGEL	-11.783	-76.317	2950
SHEQUE	RIMAC	EDEGEL	-11.667	-76.5	3170
SAN MATEO	RIMAC	SENAMHI	-11.75	-76.317	3213
YURACMAYO	RIMAC	EDEGEL	-11.85	-76.167	4300
RIO BLANCO	RIMAC	EDEGEL	-11.733	-76.267	3600
MILLOC	RIMAC	EDEGEL	-11.567	-76.35	4350

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9.** Representación gráfica del sistema Rímac-Mantaro dentro de la plataforma WEAP.  
Fuente: Elaboración propia



**Tabla 8.** Relación de datos usados en el modelo de la cuenca del río Rímac por el SEI-IRD.

Datos Requeridos para Alimentar el Modelo	Prioridad	Rímac	Fuente
<b>Datos de Entrada – Demandas</b>			
o Cobertura de vegetación	1	1 carta	INADE
o Precipitación (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	24 estaciones	SENAMHI, EDEGEL
o Temperatura (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	5 estaciones	SENAMHI, EDEGEL
o Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	5 estaciones	
o Viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	por determinar	SENAMHI, EDEGEL
o Número de usuarios	1	Población Urb./rural	Censo nacional.
<b>Datos de Entrada – Suministro y Recursos</b>			
- Reservorios/represas	1	15 lagunas y presas	EDEGEL
<b>Datos físicos:</b>			
o Capacidad de almacenamiento		15 lagunas	EDEGEL
o Volumen inicial		15 lagunas	EDEGEL
o Curva de volumen/elevación			EDEGEL
o Evaporación		1 laguna	EDEGEL
o Perdidas a agua subterránea		1 laguna	EDEGEL
<b>Datos de operación</b>			
o Máximo nivel de conservación		6 centrales	COES
o Máximo nivel de seguridad		6 centrales	COES
o Máximo nivel inactivo		6 centrales	COES
- Capacidad hidroeléctrica	1	6 centrales	COES
o Mínimo caudal de turbina		6 centrales	COES
o Máximo cauda de turbina		6 centrales	COES
o Cabeza hidráulica		6 centrales	COES
o Factor de Planta		6 centrales	COES
o Eficiencia		6 centrales	COES
- Requerimientos de caudales mínimos	2	6 centrales	COES
<b>Datos para Calibración del Modelo</b>			
- Ríos			
o Series de tiempo de caudales	1	8 estac.	
<b>SIG</b>			
Imágenes glaciares		2008-Landsat5	INPE
		1998-Landsat5	INPE
		1988-Landsat5	INPE-Maryland
		1980-Landsat2	INPE
		1970-Carta Nacional	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9.** Relación de datos usados en el modelo de la cuenca del río Rímac por el SEI-IRD.

Datos Requeridos para Alimentar el Modelo	Prioridad	Mantaro	Fuente
<b>Datos de Entrada – Demandas</b>			
o Cobertura de vegetación	1		
o Precipitación (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	172 estaciones	SENAMHI, ELECTROPERU
o Temperatura (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Evaluación	SENAMHI, ELECTROPERU
o Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Evaluación	SENAMHI, ELECTROPERU
o Viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Evaluación	SENAMHI, ELECTROPERU
o Número de usuarios	1	Población Urb./rural	Censo nacional
<b>Datos de Entrada – Suministro y Recursos</b>			
- Reservorios/represas	1	21 constr.- 28 proyecto	Electroperu COES
<b>Datos físicos:</b>			
o Capacidad de almacenamiento		19 lagunas y presas	Electroperu COES
o Volumen inicial		19 lagunas y presas	Electroperu COES
o Curva de volumen/elevación		19 lagunas y presas	Electroperu COES
o Evaporación			
o Perdidas a agua subterránea			
<b>Datos de operación</b>			
o Máximo nivel de conservación		3 centrales	COES
o Máximo nivel de seguridad		3 centrales	COES
o Máximo nivel inactivo		3 centrales	COES
- Capacidad hidroeléctrica	1	3 centrales	COES
o Mínimo caudal de turbina		3 centrales	COES
o Máximo cauda de turbina		3 centrales	COES
o Cabeza hidráulica		3 centrales	COES
o Factor de Planta		3 centrales	COES
o Eficiencia		3 centrales	COES
- Requerimientos de caudales mínimos	2	3 centrales	COES
<b>Datos para Calibración del Modelo</b>			
o Series de tiempo de caudales	1	20 estaciones	
<b>SIG</b>			
			IRD
Imágenes glaciares		2008- Landsat5	INPE
		1998- Landsat5	INPE
		1988- Landsat5	INPE-Marilland
		1980- Landsat2	INPE
		1970- Carta Nacional	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Optimización de los modelos

Busca a través de algoritmos matemáticos y estadísticos encontrar cuales son los parámetros más óptimos que representan los caudales observados.

##### 4.4.1 Criterio de Nash

Este método fue desarrollado por Nash y Sutcliffe (1970). Este permite saber si los resultados simulados están en acuerdo con los valores observados, a la vez en términos de fase e intensidad. A partir de acá se la llamara solamente por "Nash". Cuando su valor es más próximo a 1 (o 100 en porcentaje) el modelo es más satisfaciente. Este está definido por la ecuación:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n \left( \overline{Q_{obs,t}} - Q_{obs,t} \right)^2}$$

Donde  $Q_{obs,t}$  es el caudal observado;  $Q_{sim,t}$  es el caudal calculado para el mes  $t$ ;  $\overline{Q_{obs,t}}$  es la media de los caudales observados durante el período de calibración;  $n$ , el número de observaciones durante el período.

##### 4.4.2 Coeficiente de correlación ( $r^2$ )

Este coeficiente estadístico es similar al coeficiente de determinación. Este coeficiente es utilizado muy a menudo para medir la eficiencia de un modelo, en nuestro caso será utilizado para medir la relación entre las variables simuladas y medidas, esta se define por:

$$R^2 = \left( \frac{\sum (y - y_m)(x - x_m)}{\sqrt{\sum (y - y_m)^2 \sum (x - x_m)^2}} \right)^2$$

Donde,  $X_m$  es el promedio de las variables « X » et  $Y_m$  es el valor de la variable « Y » en comparación. Esta cifra varía entre 0 y 1. El valor 0 indica que no existe relación entre los caudales y una sería todo lo contrario. Este método no evalúa las intensidades

#### 4.4.3 BIAS

Este elemento es importante para nuestra evaluación del balance volumétrico entre el volumen total medido y el volumen total simulado. Este método es una herramienta importante en el análisis de los recursos hídricos ya que este permite de medir la cuantificación de estos recursos

$$BIAS = 100 * \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o}$$

Donde  $Q_s$  es el promedio del caudal observado;  $Q_o$  es el promedio del caudal simulado

#### 4.4.4 RMSE

$$RMSE = \frac{100}{Q_o} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{n}}$$

Donde  $Q_s$  es el caudal simulado en el mes  $i$ ,  $Q_o$  es el caudal observado en el mes  $i$  y “ $n$ ” el número de meses simulados.

### 4.5 Calibración y Validación de los Modelos

Los trabajos de calibración y validación fueron realizados por el SEI e IRD, la descripción presente corresponde al trabajo presentado por ellos:

#### 4.5.1 Cuenca del río Santa

Desarrollado conjuntamente por el IRD y el SEI, cuenca donde se probó el módulo de fusión glaciár, la calibración fue realizada desde 1969 a 1979 y la validación desde 1979 a 1989. De acuerdo al criterio de Nash los resultados no fueron tan óptimos en todos los puntos de

control ya que el modelo considera los mismos parámetros para todos estos puntos de control hidrológico, pero se priorizo la optimación en Tablachaca (Nash: 0,67 y 0,61) y La Balsa (Nash: 0,7 y 0,72), en esta cuenca no fue evaluada por el coeficiente de determinación ( $r^2$ ). El trabajo en esta cuenca condujo posteriormente a una publicación científica en una revista especializada: Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the river Santa watershed (Perú) publicado en el Hydrol. Earth System.

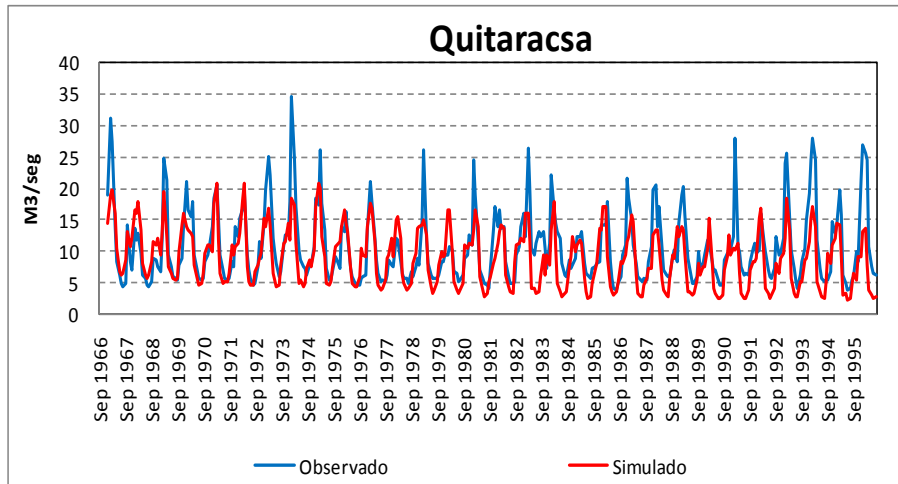
Sobre la **Tabla 10**, se presenta los resultados de la calibración y validación de la cuenca del Santa, tomados del trabajo de Condom y all (2011).

**Tabla 10.** Calibración y validación del modelo WEAP para la cuenca del río Santa

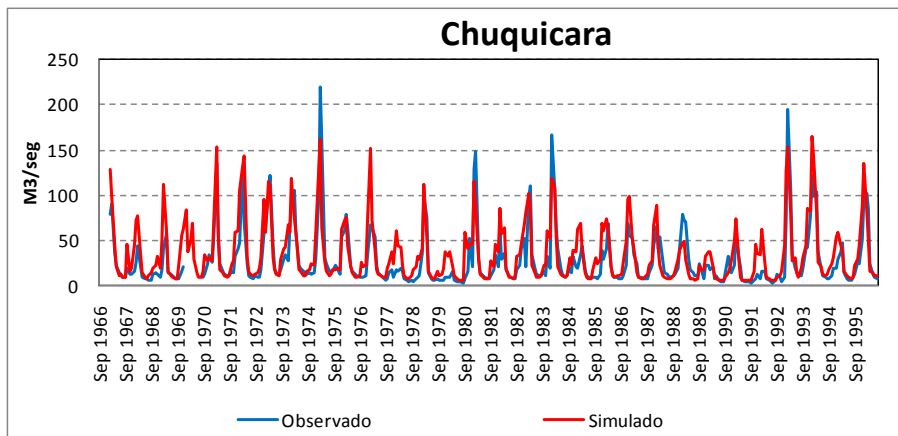
Sub-watershed	Calibration					Validation				
	Period	n	RMSE	BIAS	Ef	Period	n	RMSE	BIAS	Ef
1 - La Recreta	1969-1979	120	0.43	39%	0.63	1979-1989	120	0.43	44%	0.50
2 - Pachacoto	1969-1979	120	0.51	9%	0.64	1979-1989	120	0.53	13%	0.55
3 - Querococha	1969-1979	120	1.37	1%	0.72	1979-1989	120	1.50	20%	0.73
4 - Olleros	1969-1979	120	0.54	7%	0.73	1979-1989	120	0.55	-4%	0.63
5 - Quillcay	1969-1979	120	0.43	9%	0.65	1979-1989	120	0.45	-2%	0.63
6 - Chancos	1969-1979	120	0.26	20%	0.30	1979-1989	120	0.36	-4%	0.63
7 - Llanganuco	1969-1979	120	0.73	35%	-0.60	1979-1989	120	0.92	-15%	0.13
8 - Paron	1969-1979	120	1.70	6%	0.25	1979-1989	120	0.74	-44%	-1.60
9 - Artesoncocha	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10 - Colcas	1969-1979	120	0.34	24%	0.34	1979-1989	120	0.38	4%	0.24
11 - Los Cedros	1969-1979	120	0.98	3%	0.34	1979-1989	120	0.79	-17%	0.20
12 - Quitaracsa	1969-1979	120	0.29	-7%	0.64	1979-1989	120	0.23	-23%	0.20
13 - La Balsa	1969-1979	120	0.03	3%	0.70	1979-1989	120	0.03	1%	0.72
14 - Corongo (Manta)	1969-1979	120	0.19	-12%	0.54	1979-1989	120	0.20	-9%	0.40
15 Chuquicara	1969-1979	120	0.01	4%	0.69	1979-1989	120	0.02	1%	0.77
16 - Tablachaca (Condorcerro)	1969-1979	120	0.05	17%	0.67	1979-1989	120	0.05	16%	0.61
17 - Puente Carretera	1969-1979	120	0.01	290%	-165.00	1979-1989	120	0.01	360%	-190.00

Fuente: Condom (2011)

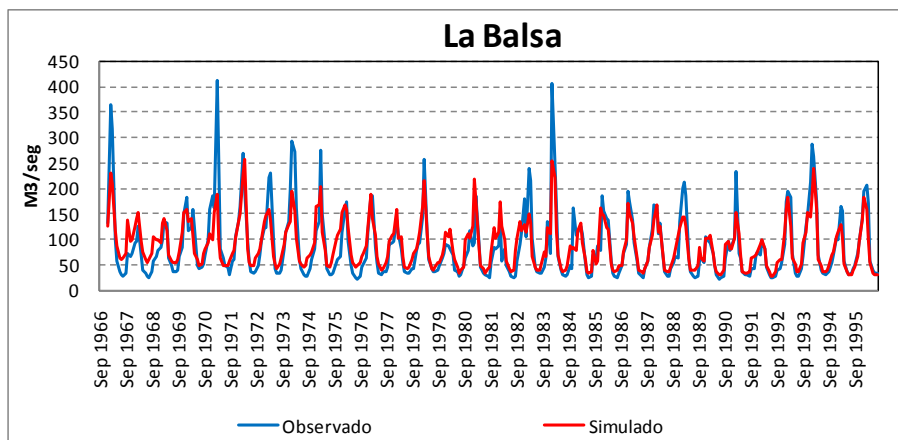
Entre las **Figuras 10** y **13**, se muestran las salidas de comparación de los caudales simulados y observados para las subcuencas de Tablachaca, La Balsa, Quitaracsa y Chuquicara, debido a que solamente estas serán usadas para el análisis del impacto del cambio climático en sus caudales.



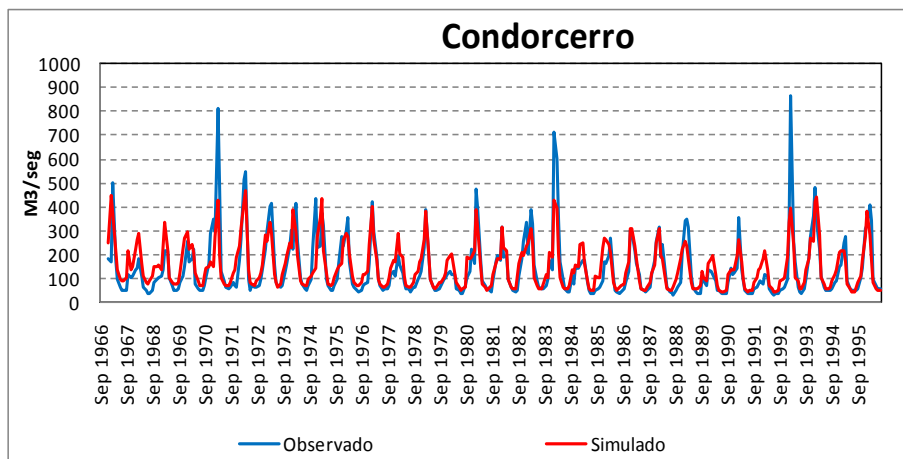
**Figura 10.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Quitaracsa.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 11.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Chuquicara.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 12.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de La Balsa.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 13.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Condorcerro.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.2 Cuenca del río Rímac y Mantaro

Los trabajos de calibración y validación fueron realizados por el IRD con el visto bueno del SEI, se tomaron 26 puntos de control de donde 7 pertenecen al Rímac y 19 al Mantaro, la calibración en general fue buena para las dos cuencas con excepción (según criterio de Nash) de cuatro puntos en el Mantaro y un punto en el Rímac, los criterios de  $r^2$  y el BIAS también son aceptables, en el caso de la validación los resultados no fueron tan óptimos siendo muy limitado el número de puntos de control con criterios de optimización aceptables, esto posiblemente a que a partir de la década del 90' las dos cuencas comenzaron a operar lagunas reguladas que hacían que el caudal ya no fuera natural.

El trabajo realizado para estas cuencas es descrito de una manera más completa en la publicación: “**Determinación del cambio climático sobre la hidrología de las cuencas Rímac y Mantaro (Perú)**”, realizado por Suarez en el 2010.

**Tabla 11.** Calibración del modelo WEAP para la cuenca de los ríos Rímac y Mantaro para el periodo 1970-1981.

Estación	Cuenca	Nash	r <sup>2</sup> (1)	BIAS	RMSE
Piñascocha	Mantaro	-0.03	0.61	72.01	105.31
Yulapuquio	Mantaro	0.54	0.63	-8.11	76.93
Canipaco	Mantaro	0.55	0.79	-13.21	59.21
Casaracra	Mantaro	-0.02	0.59	48.17	83.97
Cochas Tunel	Mantaro	0.45	0.52	11.67	68.78
Pachacayo	Mantaro	0.63	0.63	1.10	59.19
Yanacocha	Mantaro	-0.83	0.74	136.83	161.48
Angasmayo	Mantaro	0.77	0.82	15.01	52.11
Huapa	Mantaro	0.71	0.74	7.35	55.75
Huari	Mantaro	0.70	0.77	-11.94	53.28
Chinchi	Mantaro	0.72	0.77	-4.41	55.58
Upamayo	Mantaro	0.53	0.65	19.30	53.60
Puente Chulec	Mantaro	0.70	0.72	8.47	36.18
Puente Stuart	Mantaro	0.75	0.79	44.17	39.89
Mejorada	Mantaro	0.81	0.85	15.90	38.04
Pongor	Mantaro	0.75	0.82	-7.32	51.50
Santa Elena	Mantaro	0.61	0.79	-19.50	76.54
Quillón	Mantaro	0.19	0.68	61.44	84.17
Moya	Mantaro	0.60	0.65	19.09	56.28
Sheque	Rímac	0.65	0.62	-32.54	38.63
Chosica	Rímac	0.82	0.79	-1.95	30.98
Yuracmayo	Rímac	0.91	0.68	-8.84	29.25
Rio Blanco	Rímac	0.68	0.69	20.06	56.73
San Mateo	Rímac	0.44	0.75	-39.46	43.61
Tamboraque	Rímac	0.55	0.76	-30.74	45.47
Surco	Rímac	0.83	0.79	-21.83	32.80

Fuente: Suarez (2010)

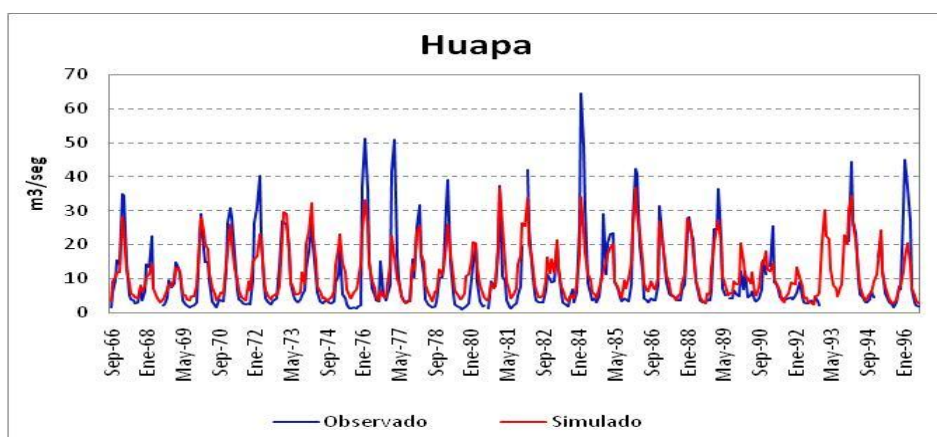
**Tabla 12.** Validación del modelo WEAP para la cuenca de los ríos Rímac y Mantaro para el periodo 1981-1996.

Estación	Cuenca	Nash	r <sup>2</sup> (1)	BIAS	RMSE
Piñascocha	Mantaro	-2.93	0.65	175.03	228.70
Yulapuquio	Mantaro	0.47	0.46	18.97	82.77
Canipaco	Mantaro	0.44	0.46	-11.23	71.63
Casaracra	Mantaro	0.52	0.62	31.82	83.34
Cochas Tunel	Mantaro	-0.67	0.58	92.78	133.83
Pachacayo	Mantaro	-0.24	0.70	76.93	109.15
Yanacocha	Mantaro	-1.16	0.55	171.72	211.49
Angasmayo	Mantaro	0.46	0.70	59.74	84.94
Huapa	Mantaro	0.72	0.66	-1.46	54.53
Huari	Mantaro	0.23	0.76	48.15	77.43
Chinchi	Mantaro	0.57	0.65	-12.79	85.63
Upamayo	Mantaro	-0.05	0.44	43.67	91.91
Puente Chulec	Mantaro	-0.05	0.67	27.74	53.10
Puente Stuart	Mantaro	-0.24	0.74	85.93	73.41
Mejorada	Mantaro	0.65	0.84	32.64	49.09
Pongor	Mantaro	0.70	0.72	7.27	46.29
Santa Elena	Mantaro	0.33	0.61	-41.61	115.92
Quillón	Mantaro	-0.54	0.44	84.00	128.65
Moya	Mantaro	0.32	0.54	31.27	66.21
Sheque	Mantaro	-0.52	0.41	-15.36	51.77
Chosica	Mantaro	-0.14	0.66	15.86	61.30
Yuracmayo	Mantaro				
Rio Blanco	Mantaro	0.10	0.71	61.24	91.54
San Mateo	Mantaro	0.05	0.69	-37.07	45.98
Tamboraque	Mantaro	0.46	0.61	-15.07	50.67
Surco	Mantaro	0.64	0.70	-14.74	39.75

Fuente: Suarez (2010)

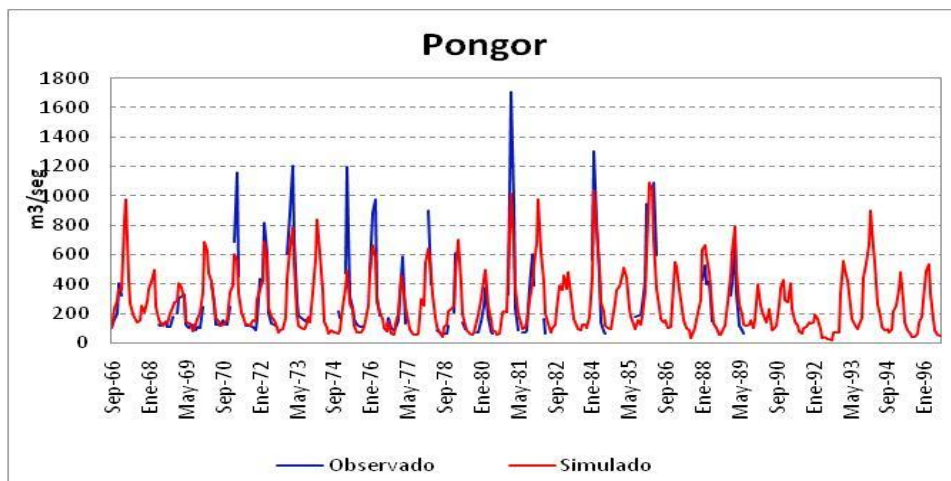


En las **Figuras 14 y 20**, se muestran las salidas de comparación de los caudales simulados y observados para las micro cuencas de Chosica, Tamboraque y Surco para la cuenca del río Rímac y en el caso del Mantaro las micro cuencas de Huapa, Pongor, Mejorada y Chinchi (Ichu), solamente estas micro cuencas serán utilizadas en el estudio del impacto del cambio climático en sus caudales.



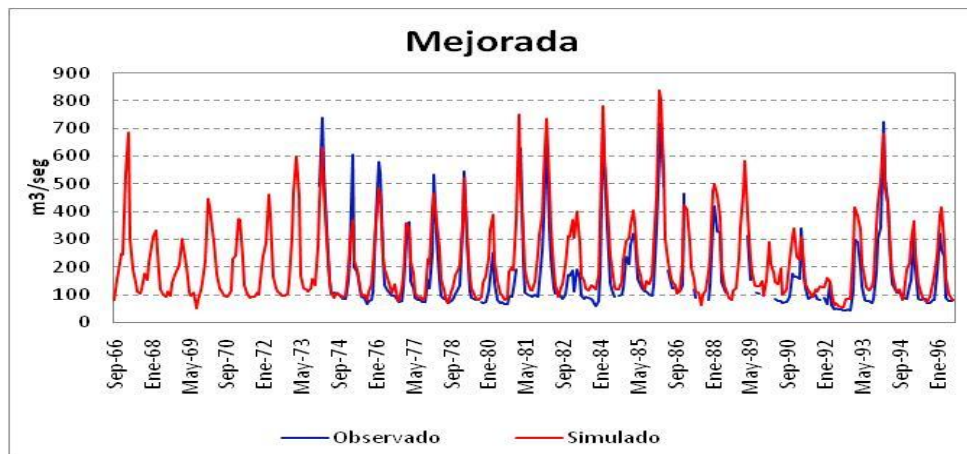
**Figura 14.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Huapa.

Fuente: Elaboración propia

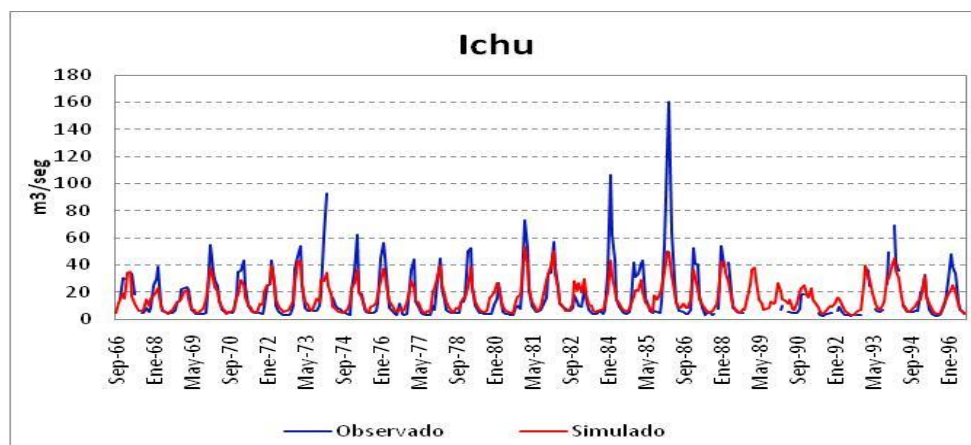


**Figura 15.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Pongor.

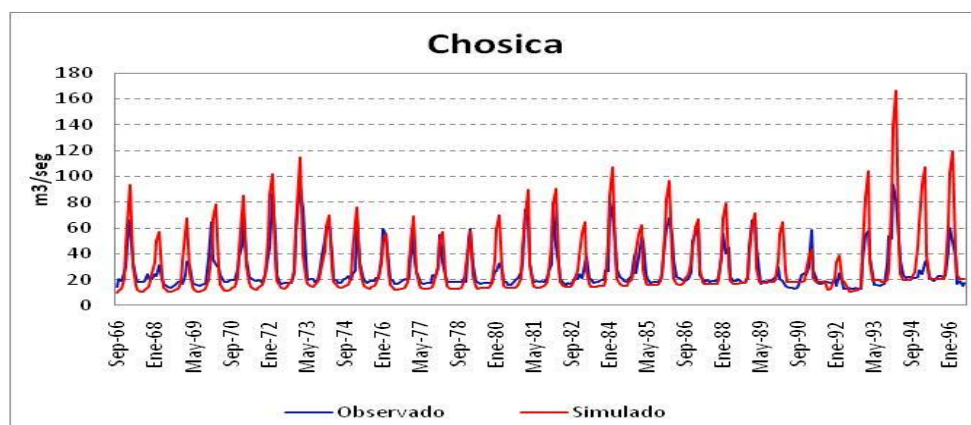
Fuente: Elaboración propia



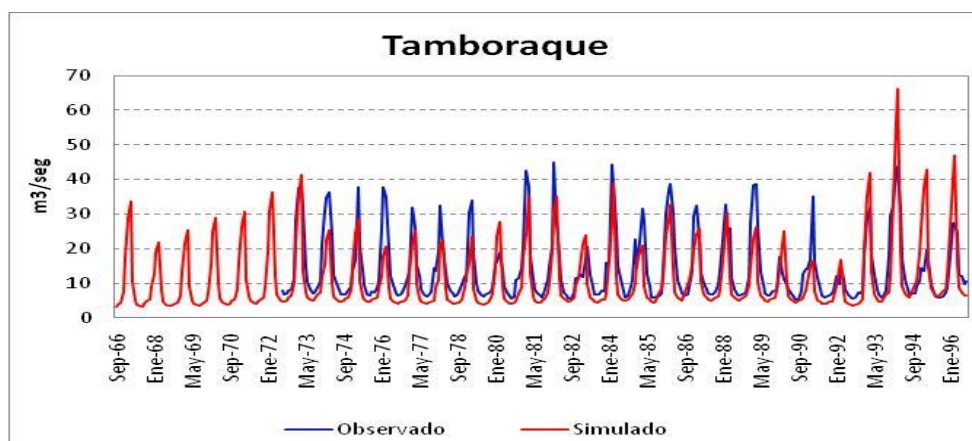
**Figura 16.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Mejorada  
Fuente: Elaboración propia



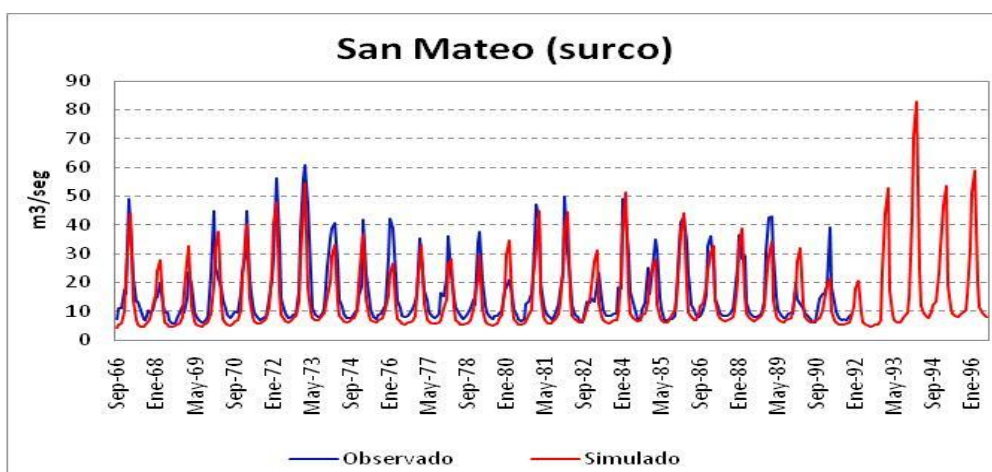
**Figura 17.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Ichu (Chinchin).  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 18.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Chosica.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 19.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de Tamboraque.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 20.** Comparación del caudal simulado con el observado para la estación de San Mateo (Surco).  
Fuente: Elaboración propia

## V. CAMBIO CLIMATICO

### 5.1 Modelos de Circulación General de la Atmósfera (AGCM)

#### 5.1.1 Modelo atmosférico MRI/JMA

El Instituto de Investigación Meteorológica (MRI), La Agencia Meteorológica de Japón y la Organización Tecnológica de Ciencias Avanzadas de la Tierra (AESTO), condujeron un proyecto de investigación denominado “Desarrollo de modelos globales climáticos de alta

resolución y modelos regionales de clima”, proyecto financiado por el ministerio de educación, cultura, deportes, ciencias y tecnología de Japón. El propósito de este proyecto fue desarrollar un modelo atmosférico global de la circulación general (AGCM), con una resolución horizontal de 20 km. con la finalidad de estudiar los efectos del calentamiento global y eventos meteorológicos de meso escala tales como nevadas, precipitaciones intensas, vientos fuertes, heladas intensas, etc.

La simulación del modelo de circulación general de la atmosfera, fue realizado mediante el uso del Earth Simulator (ES). El ES es un sistema de supercomputador en vector-paralelo que consiste de 512 procesadores, el cual estuvo posicionado como el computador más rápido del mundo en 2004 para realizar cálculos. El modelo como tal fue desarrollado para simular el clima real con alta exactitud a través de mejoras en los esquemas de parametrización y procesos físicos. Esta tecnología trabaja con un sistema de memoria distribuida en paralelo, el cual consiste de 640 nodos de procesadores, cada nodo es un sistema de memoria compartida que contiene 8 microprocesadores. La librería MPI fue usada para la paralelización entre nodos y microprocesadores tareas las cuales están programadas en memoria compartida en paralelo. La eficiencia de cálculo es más del 30% del pico de rendimiento. El supercomputador toma 4 horas para ejecutar un mes de integración de TL959L60 (grillas horizontales de 20 kilómetros y 60 niveles en la vertical) usando 30 nodos (240 CPU's) (Mizuta et al., 2006).

El sistema dinámico, es un sistema de ecuaciones primitivas originalmente diseñado por Kanamitsu. Este usa un método de transformada espectral de armónicos esféricos y coordenada vertical híbrida (sigma – presión). El esquema de parametrización de cúmulos implementado fue el de Ararakawa – Schubert. El perfil vertical de masa ascendente era función lineal con la altura. El flujo másico en la base de la nube fue calculado para resolver la ecuación de pronóstico. Para las nubes pronosticadas utilizaron un método similar al de Smith y para calcular la cantidad de nube y su contenido de agua utilizaron una aproximación estadística propuesta por Sommeria y Deardorff. La parametrización de

Sundqvist se usó para determinar la tasa de cambio, de contenido de agua a precipitación. Un esquema cerrado de turbulencia de nivel 2 de Mellor y Yamada fue implementado para representar la difusión vertical de momento, calor y humedad. El arrastre por ondas de gravedad esta particionado en ondas largas (longitudes de ondas mayor a 100 kilómetros) y ondas cortas (longitudes de ondas ~ 10 kilómetros). Las ondas largas se propagan hacia arriba y depositan momento en niveles medios de la atmósfera, mientras que las ondas cortas son atrapadas en la troposfera y arrastrada ahí (*Mizuta et al.*, 2006). Modificaciones al modelo descrito anteriormente fueron implementadas para construir el modelo de alta resolución de la siguiente manera:

Primero, se desarrolló un nuevo esquema semi-lagrangiano cuasi-conservativo y se introdujo para integraciones de tiempo rápidas y estables, en reemplazo del esquema Euleriano. Las advecciones horizontales y verticales son calculadas por separado en este esquema. La advección horizontal fue calculada con esquema semi-lagrangiano estándar, pero la masa, el vapor de agua y el agua en la nube son conservadas usando una corrección similar al método de Priestley, Gravel y Staniforth. Las variables pronosticadas han sido cambiadas desde la vorticidad y divergencia a componentes zonales y meridionales del viento con la introducción del esquema semi-lagrangiano. Además, un esquema semi – lagrangiano de doble nivel ha sido introducido en vez de un esquema de tercer nivel, lo cual suministra una doble eficiencia en principio. Esas mejoras de eficiencias disponibles permiten ejecutar integraciones de alta resolución en el corto plazo.

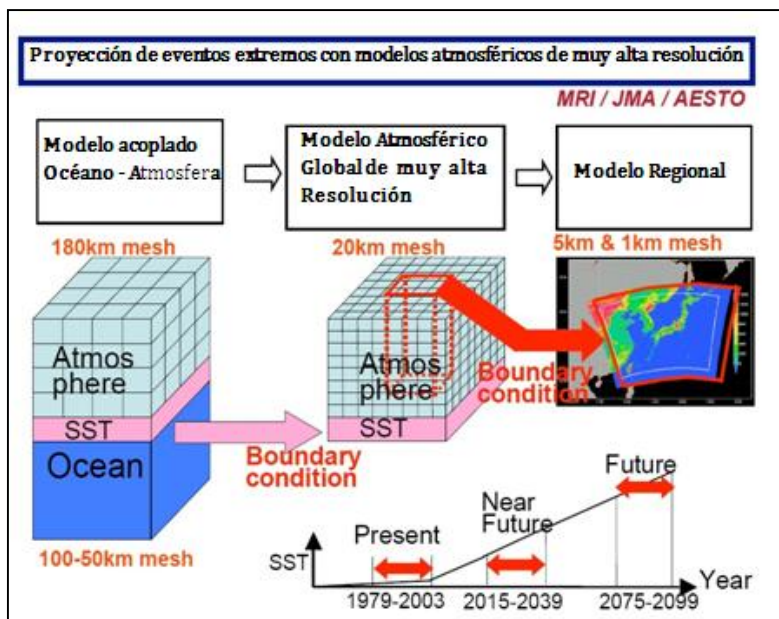
Segundo, algunos esquemas de procesos físicos fueron mejorados. El esquema de parametrización de cúmulos incluye efectos de intercambio (enrainment/detrainment) de masa entre el tope y la base de la nube; esto reduce el remanente de enfriamiento en la baja troposfera tropical y reduce el enfriamiento por reevaporación. El esquema de caída de hielo desde las nubes fue basado sobre una solución analítica integrada por Rotstayn en vez de una simple parametrización en la cual el hielo cae hacia el siguiente estrato o al suelo. El esquema de pronóstico de nubes se modificó para reducir la dependencia de la lluvia sobre

los pasos de integración. Con el fin de representar estratocúmulos marinos subtropicales fuera de las costas oeste de los continentes, una nueva parametrización de estratocúmulos fue introducida siguiendo el modelo propuesto por Singo. La nube es formada por el modelo cuando hay inversión al tope del estrato alto y la razón de mezcla se forma cerca de la superficie del mar.

Los esquemas de radiación y suelo desarrollados en el modelo JMA-GSM98 GCM fueron introducidos al modelo de alta resolución con modificaciones. En la construcción del modelo de alta resolución usaron estos esquemas detallados en vez de simplificarlos. Un modelo aleatorio multiparámetro de Shibata y Aoki fue usado para radiación terrestre. Absorción debido a CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O fue tratada en esta versión además del H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. El modelo calcula la radiación solar formulada por Shibata y Uchiyama. Un tratamiento del efecto directo de aerosoles sulfatados es considerado en dicho esquema.

El tratamiento del suelo ha sido mejorado del SiB (Modelo Simple de Biosfera), especialmente en esquemas de suelo y nieve. En el esquema de suelo, tres espesores para la ecuación de agua contenida en él, esta compartida con la ecuación de cantidad de calor donde los cambios de fase del agua son incluidos de manera que la energía y el agua puedan ser conservadas en los espesores del suelo. En el esquema de hielo, el número de espesores de hielo varía hasta en tres, dependiendo de la cantidad de hielo; además son calculados el contenido de calor y los flujos de agua. El albedo del hielo depende de la edad del mismo (*Mizuta et al.*, 2006).

La **Figura 21**, muestra un esquema de las condiciones de contorno usados para la simulación del modelo atmosférico MRI/JMA 20 km a la izquierda se ve el modelo acoplado océano – atmosfera, la parte atmosférica tiene una resolución de 180 km de grilla, mientras que la parte oceánica está entre 100 – 50 km de grilla, una de las forzantes usadas para el modelo de alta resolución es la temperatura en la superficie del mar (SST), a la vez las salidas del modelo MRI/JMA de 20 km se adecuan como las condiciones de entrada para un modelo regional de una resolución espacial de 5 km y 1 km de grilla horizontal.



**Figura 21.** Esquema de las condiciones de contorno usados para la simulación del modelo atmosférico MRI/JMA 20 km  
Fuente: SENAMHI

### 5.1.2 Modelo Atmosférico NCAR

El esquema de parametrización de subgrilla orográfica (Leung and Ghan 1998) ha sido aplicado al Modelo CAM3 (Community Atmosphere Model) y al Modelo CLM3 (Common Land Model) del NCAR, quienes son los dos componentes del modelo CCSM3. En este estudio CAM3 y CLM3 son corridos en modo fuera de línea, es decir, conducido por condiciones superficiales oceánicas tomadas desde la simulación climática del CCSM3 del escenario de emisión A1B del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). Este esquema se aplica a toda la columna física del modelo para cada una de las once clases de elevación dentro de cada celda. La distribución del número de clases de elevación en cada grilla es altamente heterogénea. Los pasos en la aplicación del esquema de subgrilla consisten en tener un conjunto de elevaciones de superficie, los cuales son usados para determinar la distribución de frecuencias y la elevación media del conjunto de clases de elevación dentro de una celda. Un modelo de flujo de montaña es usado para diagnosticar el desplazamiento de las parcelas de aire con respecto a la elevación media. La conservación de energía y humedad son usados para determinar los perfiles de humedad y temperatura

para cada clase de elevación. Toda la física del modelo es aplicada a estos perfiles y escritos para la climatología del modelo. La climatología por cada clase de elevación es interpolada de acuerdo al conjunto de superficies de elevación de alta resolución, generando una distribución de alta resolución (5 km) del clima.

Las variables obtenidas del modelo usando este esquema de parametrización es presentado en la **Tabla 13**.

**Tabla 13.** Variables obtenidas del modelo NCAR

Variables	Resolución (grados)	Dominio
RAIN atmospheric rain [mm/s] SNOW atmospheric snow [mm/s]	0.041664	X=480
TBOT atmospheric air temperature [K] QBOT atmospheric specific humidity [kg/kg] WIND atmospheric wind velocity magnitude [m/s] FSDS atmospheric incident solar radiation [watt/m <sup>2</sup> ]	0.041666	Y=480

Fuente: SENAMHI

## 5.2 Escenarios de precipitación y Temperatura para las Cuencas de Estudio

Para el análisis de los datos de precipitación y temperatura de los modelos se consideró el promedio de todos los catchements planteando la hipótesis que sus áreas son similares (simplifica los cálculos). Sobre la **Tabla 14**, se muestran los resultados de precipitación para las tres cuencas de donde se observa que para la cuenca del Santa (**Figura 22a**) el escenario a nivel multianual MRI tendrá 16,1% de incremento y el NCAR de 3,2%, para el caso del Rímac (**Figura 22b**) el modelo MRI muestra un incremento anual de 10,4% y para el NCAR de 11%, en el caso del Mantaro (**Figura 22c**) para el modelo MRI se espera un incremento de 5,7% y sobre el NCAR se espera 8,8%.

Respecto a la Temperatura sobre la Tabla 15 se muestran la variación de los dos modelos para el escenario 2030-39; en la cuenca del Santa (**Figura 23a**) el modelo MRI muestra un incremento multianual de 1,4°C en promedio y para el NCAR de 1,2 °C, respecto al Rímac (**Figura 23b**) el incremento multianual es de 1,6°C para el modelo MRI y para el NCAR de 1,2 °C, para el Mantaro (**Figura 23c**) el modelo MRI tiene un incremento multianual de 1,4 °C y el de NCAR de 0,9°C.



**Tabla 14.** Escenarios de precipitación para los modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-39

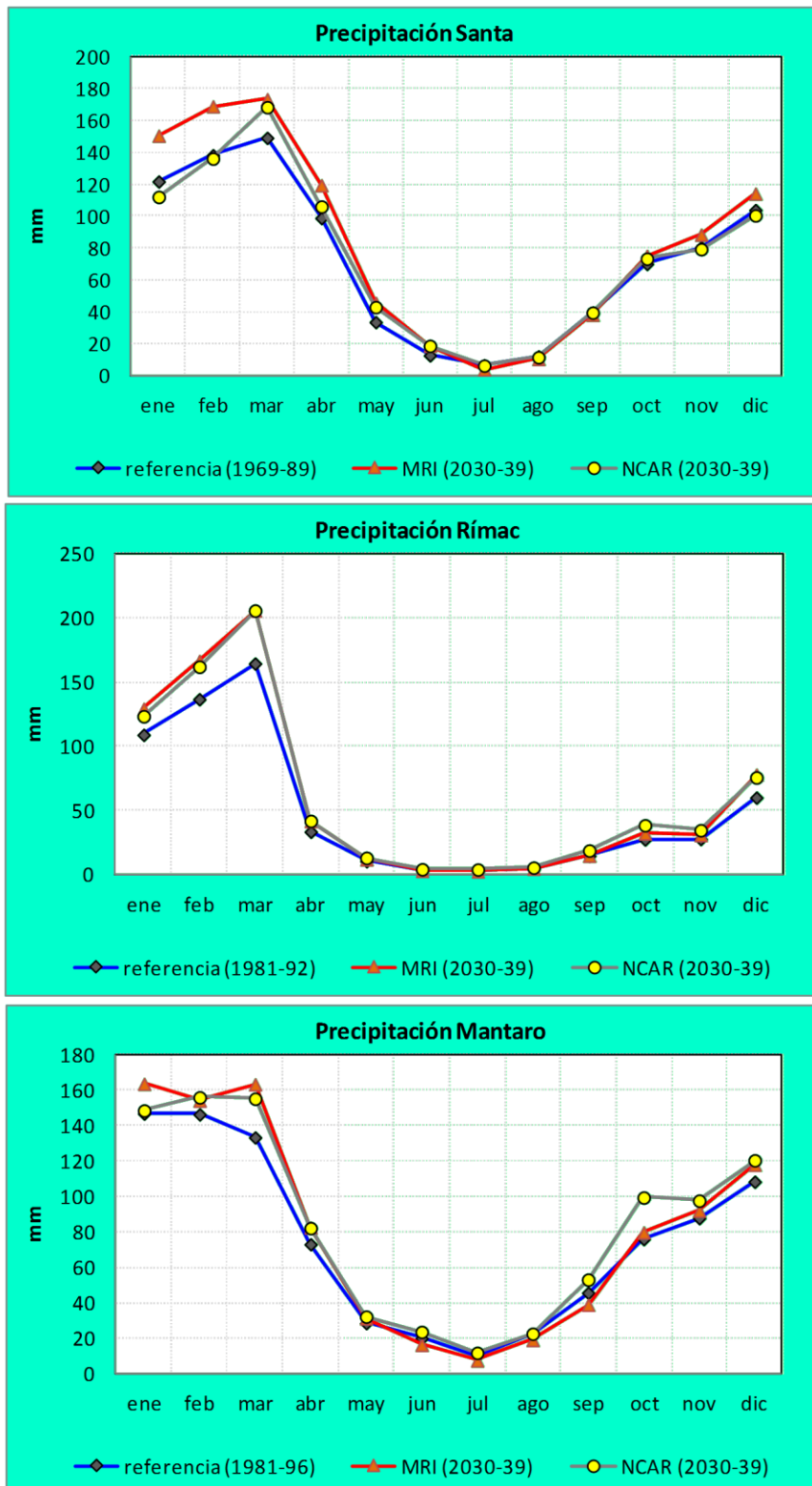
	Santa					Rimac					Mantaro				
	referencia (1969-89)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR	referencia (1981-92)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR	referencia (1981-96)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR
	mm	mm	mm	Δ %	Δ %	mm	mm	mm	Δ %	Δ %	mm	mm	mm	Δ %	Δ %
ene	121.9	150.6	112.2	23.6	-7.9	108.9	129.1	123.4	20.2	14.5	146.8	163.6	148.6	16.8	1.8
feb	138.4	169.0	136.2	22.2	-1.5	136.6	166.5	162.0	29.9	25.3	146.4	154.2	156.0	7.8	9.6
mar	149.2	173.5	168.5	16.2	12.9	164.4	205.8	205.7	41.4	41.3	133.4	163.4	155.3	30.0	21.9
abr	98.9	119.5	106.1	20.8	7.3	33.3	41.6	41.7	8.3	8.4	73.1	82.5	82.2	9.5	9.1
may	33.6	45.7	43.0	35.9	28.1	10.4	11.8	12.9	1.4	2.6	28.5	31.2	32.2	2.7	3.7
jun	12.7	18.8	18.7	47.8	46.8	3.2	2.8	4.1	-0.4	0.9	20.0	16.3	23.6	-3.7	3.6
jul	6.6	3.9	6.3	-40.3	-3.8	3.4	2.4	3.8	-1.0	0.5	9.9	7.4	11.8	-2.5	1.8
ago	12.2	10.5	11.6	-13.5	-4.9	4.8	4.5	5.3	-0.3	0.5	22.0	19.0	22.6	-3.0	0.6
sep	39.7	38.2	39.6	-3.8	-0.3	14.5	14.6	18.6	0.1	4.2	45.6	38.9	53.1	-6.8	7.5
oct	70.1	75.2	73.4	7.3	4.7	27.3	32.0	38.3	4.7	11.1	76.0	79.8	99.5	3.8	23.5
nov	80.6	88.5	79.4	9.7	-1.5	27.6	30.7	34.5	3.1	6.9	87.8	92.0	97.7	4.2	9.9
dic	104.0	114.2	100.6	9.9	-3.3	59.9	77.8	75.6	17.9	15.7	108.4	118.0	120.5	9.6	12.1
Total	867.8	1007.6	895.6	16.1	3.2	594.2	719.6	726.1	10.4	11.0	897.9	966.3	1003.0	5.7	8.8

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15.** Escenarios de temperatura para los modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-39

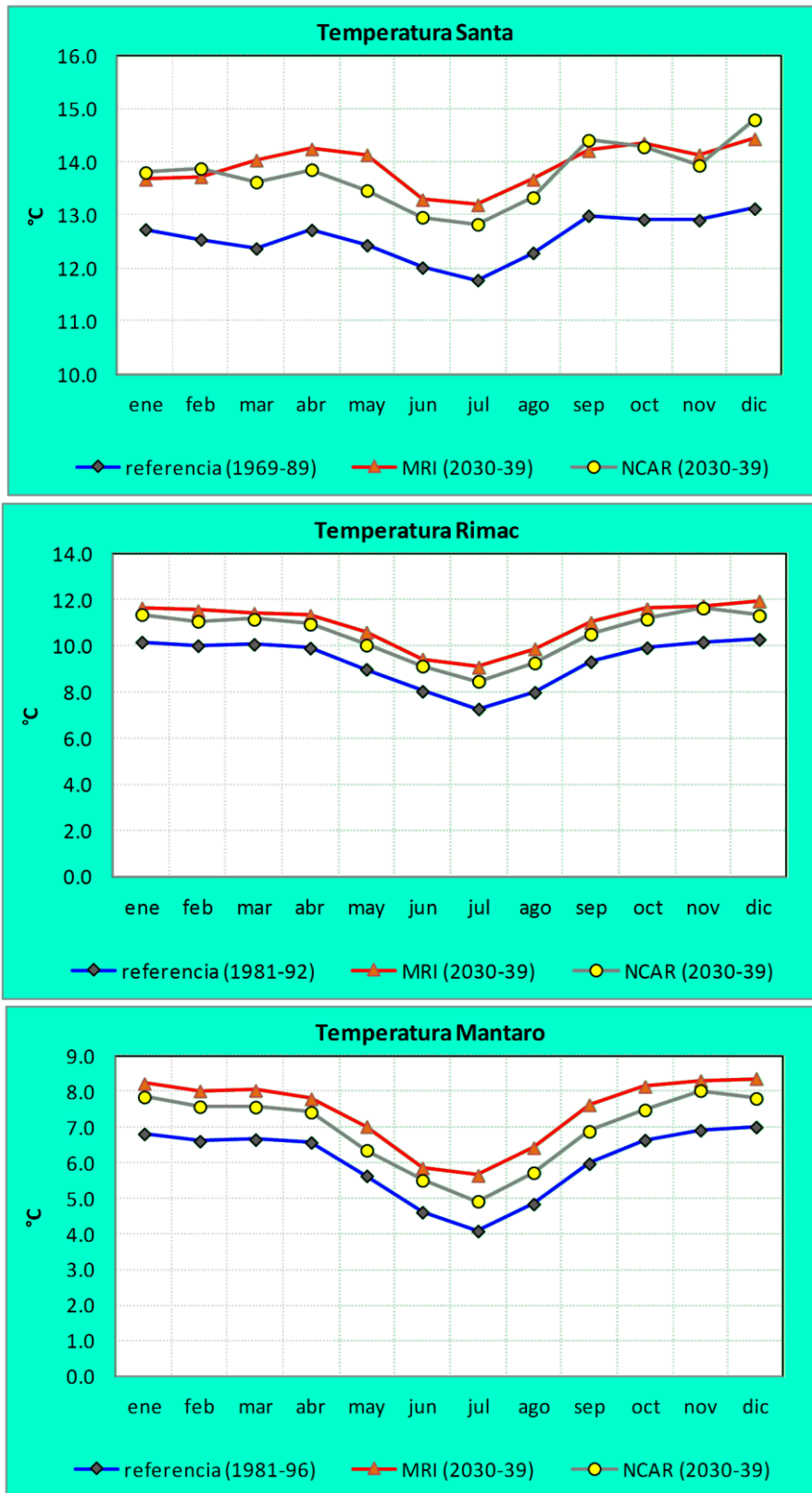
	Santa					Rimac					Mantaro				
	referencia (1969-89)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR	referencia (1981-92)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR	referencia (1981-96)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI	NCAR
	°C	°C	°C	Δ °C	Δ °C	°C	°C	°C	Δ °C	Δ °C	°C	°C	°C	Δ °C	Δ °C
ene	12.7	13.7	13.8	0.9	1.1	10.2	11.7	11.4	1.5	1.2	6.8	8.2	7.9	1.4	1.0
feb	12.5	13.7	13.9	1.2	1.3	10.0	11.5	11.1	1.5	1.1	6.6	8.0	7.6	1.4	1.0
mar	12.4	14.0	13.6	1.7	1.2	10.1	11.4	11.2	1.3	1.1	6.7	8.0	7.6	1.4	0.9
abr	12.7	14.2	13.9	1.5	1.1	9.9	11.3	11.0	1.4	1.0	6.6	7.8	7.4	1.2	0.9
may	12.4	14.1	13.5	1.7	1.0	9.0	10.6	10.0	1.6	1.1	5.6	7.0	6.4	1.4	0.7
jun	12.0	13.3	13.0	1.3	0.9	8.0	9.4	9.1	1.4	1.1	4.6	5.9	5.5	1.2	0.9
jul	11.8	13.2	12.8	1.4	1.1	7.3	9.1	8.5	1.8	1.2	4.1	5.6	4.9	1.6	0.8
ago	12.3	13.7	13.3	1.4	1.0	8.0	9.9	9.3	1.9	1.3	4.8	6.4	5.7	1.6	0.9
sep	13.0	14.2	14.4	1.2	1.4	9.3	11.0	10.5	1.7	1.2	6.0	7.6	6.9	1.7	0.9
oct	12.9	14.4	14.3	1.4	1.4	9.9	11.6	11.2	1.7	1.2	6.6	8.1	7.5	1.5	0.8
nov	12.9	14.1	13.9	1.2	1.0	10.2	11.8	11.6	1.6	1.5	6.9	8.3	8.0	1.4	1.1
dic	13.1	14.4	14.8	1.3	1.7	10.3	11.9	11.3	1.7	1.0	7.0	8.4	7.8	1.4	0.8
Total	12.6	13.9	13.8	1.4	1.2	9.4	10.9	10.5	1.6	1.2	6.0	7.5	6.9	1.4	0.9

Fuente: Elaboración propia



**Figura 22.** Escenarios de precipitación para las cuencas de estudio para los modelos MRI y NCAR respecto a los horizontes 2030 y 2039.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 23.** Escenarios de temperatura para las cuencas de estudio para los modelos MRI y NCAR respecto a los horizontes 2030 y 2039.

Fuente: Elaboración propia

## VI. RESULTADOS

### 6.1 Cuenca del río Santa

Se evaluaron los puntos de control de Condorcero (Antes de la bocatoma del proyecto Chavimochic), La Balsa (en la bocatoma de derivación del túnel de la C.H), Quitaracsca (actualmente existe proyecto hidroenergético) y Chuquicara (micro cuenca de gran producción hídrica), utilizándose como serie de referencia el periodo comprendido entre 1969 y 1989 que corresponden a toda la serie usada para calibración y validación.

Los resultados son presentados en la **Tabla 16** y a nivel porcentual en la **Tabla 17**.

**Tabla 16.** Variación porcentual a nivel multi mensual de los caudales del horizonte 2030-2039 en comparación al periodo de referencia para la cuenca del río Santa. Modelos MRI y NCAR

	La Balsa (Variación%)		Condorcero (Variación%)		Quitaracsca (Variación%)		Chuquicara (Variación%)	
	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)
ene	14.1	10.7	19.8	9.6	-8.0	-11.8	49.2	17.1
feb	16.1	11.5	17.2	6.9	-5.8	-5.4	43.3	17.0
mar	12.9	21.2	9.6	14.0	5.6	12.0	16.4	12.4
abr	12.7	17.9	1.3	3.6	5.0	2.7	-11.5	-14.3
may	30.8	46.1	9.0	19.8	-26.9	-11.6	-15.5	-17.5
jun	45.3	67.2	25.3	41.2	-39.2	-31.1	2.3	-1.6
jul	21.3	51.4	13.0	33.6	-38.7	-24.2	4.1	-4.5
ago	21.7	50.6	16.9	37.5	-36.0	-20.0	10.9	0.3
sep	28.0	60.0	26.9	52.6	-17.6	9.5	8.2	-0.7
oct	39.1	52.1	39.3	43.1	-9.6	6.4	55.5	24.2
nov	17.3	24.9	11.9	21.7	-13.5	-2.8	8.7	23.9
dic	24.8	27.9	34.2	26.5	3.1	10.0	79.1	34.0

Fuente: Elaboración propia

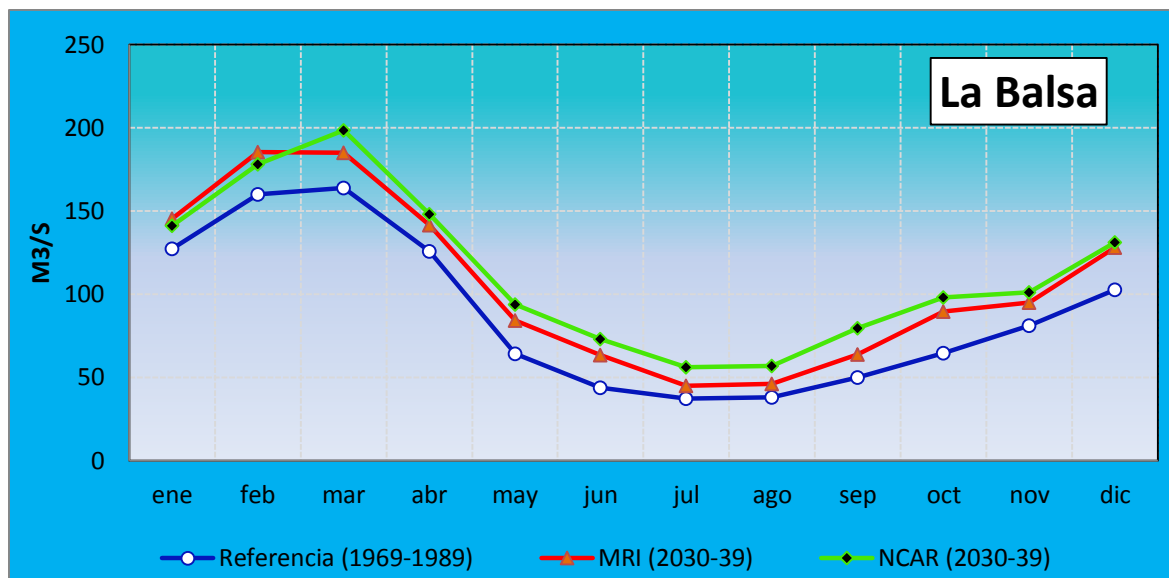
En el caso de La Balsa (**Figura 24**) se observa que los dos modelos muestran que se van a tener mayores caudales en promedio para el horizonte 2030-39. El modelo MRI, muestra que sólo durante Enero y Febrero se tendrán mayores caudales que los del modelo NCAR, en comparación a la serie de referencia el mayor incremento porcentual se tendrá en Junio con un 67,2% más de caudal que viene a ser 19,8 m<sup>3</sup>/s, el incremento más débil porcentualmente hablando corresponde a Abril con 12,7% que viene a ser un incremento de 15,9 m<sup>3</sup>/s respecto a la referencia respecto al mes más húmedo (Marzo) el incremento porcentual es de 12,9% que se traduce

**Tabla 17.** Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Santa para el periodo de referencia (1969-1989) y horizonte 2030-39 con los Modelos MRI y NCAR

	La Balsa (m3/s)		Condorcerro (m3/s)		Quitarcasa (m3/s)		Chuquicara (m3/s)	
	Referencia (1969-1989)	MRI (2030-39)	Referencia (1969-1989)	MRI (2030-39)	Referencia (1969-1989)	MRI (2030-39)	Referencia (1969-1989)	MRI (2030-39)
ene	127.3	145.2	140.9	227.7	13.1	12.0	42.1	62.8
feb	159.9	185.5	178.2	320.0	16.2	15.3	70.6	101.2
mar	163.7	184.8	198.4	350.6	17.0	18.0	82.4	95.8
abr	125.6	141.5	148.0	240.2	13.7	14.4	60.8	53.8
may	64.2	84.1	93.9	131.2	8.0	5.8	22.4	18.9
jun	43.7	63.5	73.0	100.6	6.2	3.7	12.8	13.1
jul	37.1	45.0	56.1	76.6	5.3	3.2	9.8	10.2
ago	37.8	46.0	56.9	77.0	5.3	3.4	8.6	9.5
sep	49.7	63.7	79.6	107.4	6.4	5.3	10.9	11.8
oct	64.4	89.6	97.9	142.5	9.0	8.1	16.8	26.2
nov	80.9	94.9	101.1	151.9	9.9	8.5	20.0	21.7
dic	102.5	127.8	131.0	205.6	10.9	11.3	30.9	55.4

Fuente: Elaboración propia

en 21,1 m<sup>3</sup>/s, el mes más seco (Junio) tendrá un aumento de 21,3% de agua respecto a su caudal de referencia. Para el modelo NCAR el máximo incremento se tiene en Junio con 67,2% (29,3 m<sup>3</sup>/s) respecto al periodo de referencia, Enero tiene el incremento más débil con solo 10,7% (13,6 m<sup>3</sup>/s).

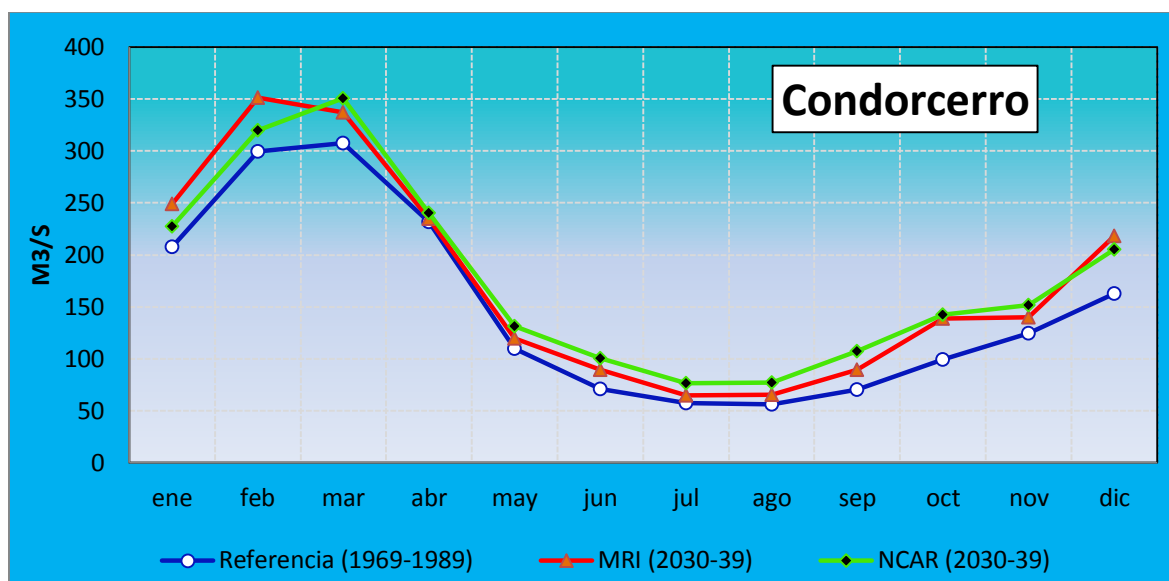


**Figura 24.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de la Balsa.  
 Fuente: Elaboración propia

Respecto a Condorcero (**Figura 25**) el modelo NCAR es más optimista que el MRI, pero los dos modelos presentan caudales mayores al de referencia, el modelo MRI considera a Febrero donde se va a dar los máximos caudales en re comparación con los otros meses, el incremento de este mes representa un 17,2% respecto al periodo de referencia y para su mes más seco (Agosto) el modelo MRI considera un incremento de 16,9% (9,5 m<sup>3</sup>/s).

Respecto al modelo NCAR considera que en Marzo de darán los mayores caudales (la referencia considera a Febrero) con un incremento de 6,9% (20,6 m<sup>3</sup>/s), para Agosto el incremento sería de 37,5% (21,0m<sup>3</sup>/s), pero el mes más representativo (incremento) sería Setiembre con 52,6%.

Para el caso de Quitaracsa (**Figura 26**) se espera un comportamiento diferente a La Balsa y Condorcero, teniendo en algunos meses aumento de caudal y en otros una disminución de

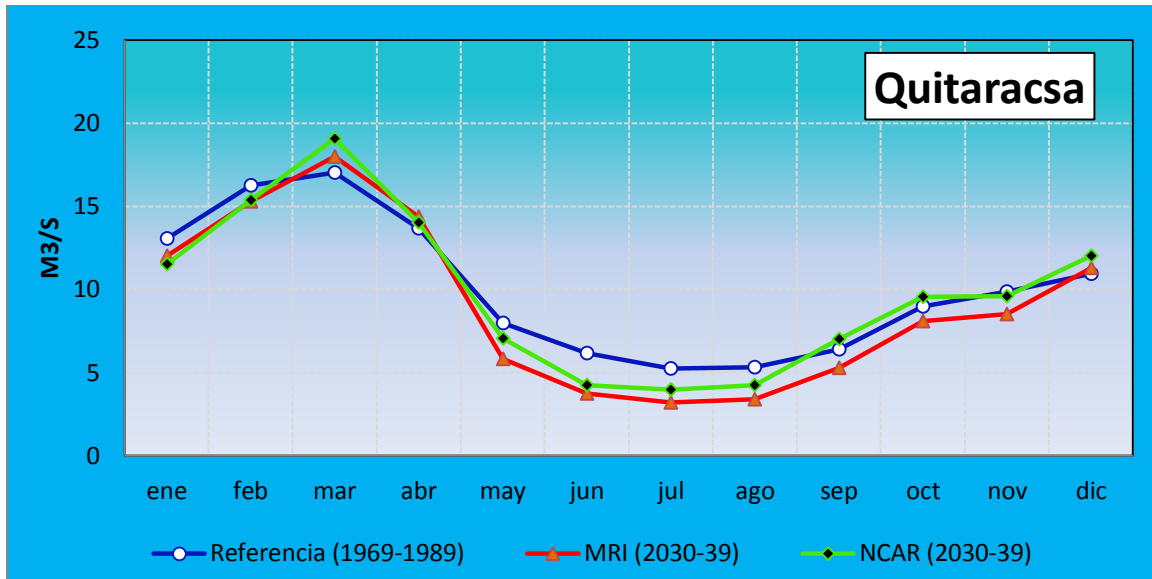


**Figura 25.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Condorcerro.

Fuente: Elaboración propia

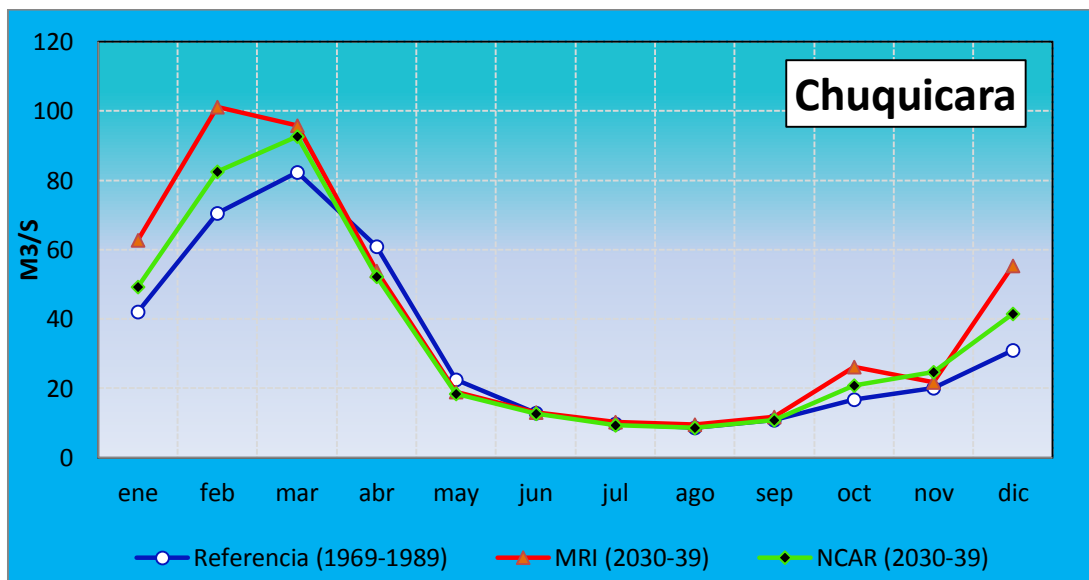
estos. Para el caso del modelo MRI, se tienen mayores caudales con respecto a la referencia: para Marzo (5,6%), Abril (5,0%) y Diciembre (3,1%), los otros meses los caudales esperados son menores siendo Junio porcentualmente la pérdida más importante con -39,2% (-2,5m<sup>3</sup>/s). respecto al modelo NCAR sólo se tendrá incremento de caudales Durante Marzo (12%; 2,1m<sup>3</sup>/s ), Abril (2,7%), Setiembre (9,5%), Octubre (6,4%) y Diciembre (10%); en los otros meses, los caudales tendrán una disminución respecto al periodo de referencia, siendo Junio donde será más importante la pérdida con -31,1% (-2,0m<sup>3</sup>/s).

Respecto a Chuquicara (**Figura 27**) el modelo del MRI presenta una disminución de los caudales para Abril (-11,5%; -7 m<sup>3</sup>/s) y Mayo (-15,5%; -3,5 m<sup>3</sup>/s) y el incremento más importante en términos porcentuales corresponde a Diciembre con 79,1% (24,4 m<sup>3</sup>/s). El modelo NCAR, presenta disminución de caudales para los periodos de Abril (-14,3%), Mayo (-17,5%; 3,9 m<sup>3</sup>/s), Junio (-1,6%), Julio (-4,5%) y Septiembre (-0,7%); el incremento más importante se va a presentar en Diciembre con 34% (10,5 m<sup>3</sup>/s).



**Figura 26.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al Período de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Quitaracsa.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 27.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al Período de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Chuquicara.

## 6.2 Cuenca del río Rímac

Se tomaron 3 puntos de control siendo estos Chosica (punto antes de la bocatoma de agua de Lima), Tamboraque (agua abajo de la confluencia del río Blanco con el Rímac) y Surco (punto intermedio entre Chosica y Tamboraque), el periodo de referencia utilizado



corresponde a 1981-1992, no se consideró entre 1992-1996 debido a que los caudales en gran parte no son naturales. Los resultados puntuales de los modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-2039 son presentados en la **Tabla 18** y a nivel porcentual en la **Tabla 19**.

Respecto a Chosica (**Figura 28**), el modelo MRI muestra un incremento de caudales para todos los meses, siendo Julio donde se tendrán el incremento más elevado porcentualmente con 53,9% (8,4 m<sup>3</sup>/s), el incremento más bajo (porcentualmente) se da en el mes de diciembre con 10,9% (2,5 m<sup>3</sup>/s). El modelo NCAR, la primera parte del año es más optimista que el MRI y la segunda parte es más pesimista, a pesar de existen pocas diferencias con las salidas del MRI, NCAR considera que el mayor incremento porcentual se dará en Julio con 53,9% (igual que MRI), pero el menor incremento seria en Enero con 3,3% (1,3 m<sup>3</sup>/s).

Respecto a Tamboraque (**Figura 29**), los caudales son mayores al periodo de referencia para los dos escenarios siendo el MRI más optimista la primera parte del año y más pesimista la segunda parte cuando se le compara con el NCAR. El MRI porcentualmente presenta el mayor incremento en Julio con 43,7% (2,1 m<sup>3</sup>/s) y el menor aumento en Noviembre con 3,6% (0,3 m<sup>3</sup>/s) pero si vemos volúmenes en Marzo tendrá un incremento de 10,9 m<sup>3</sup>/s. Respecto al modelo NCAR el mayor incremento se tendrá en Julio con 43,3% (2 m<sup>3</sup>/s) y el más bajo en Enero con 0,2% (0,1 m<sup>3</sup>/s), al igual que el modelo MRI presenta el mayor incremento de caudal (no porcentual) en Marzo con 8,4 m<sup>3</sup>/s.

En el caso de Surco (**Figura 30**), los dos modelos (MRI y NCAR) tienen un comportamiento casi similar al de Tamboraque (especialmente se encuentran muy próximos), los dos modelos presentan un incremento para todos los meses respecto al caudal de referencia, siendo el MRI más optimista la primera parte del año y el NCAR la segunda parte. El modelo MRI presenta el mayor incremento porcentual en Julio con 53,9% (8,4 m<sup>3</sup>/s) y el incremento más bajo se da en Diciembre con 10,9% (2,7 m<sup>3</sup>/s). Respecto al modelo NCAR, su mayor incremento se presenta de manera similar para Julio con 53,9% (similar al modelo MRI) y el incremento más bajo se presenta para Enero con 3,3% que viene a ser 1,3 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 18.** Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Rímac para el periodo de referencia (1969-1989) y horizonte 2030-39 con los Modelos MRI y NCAR.

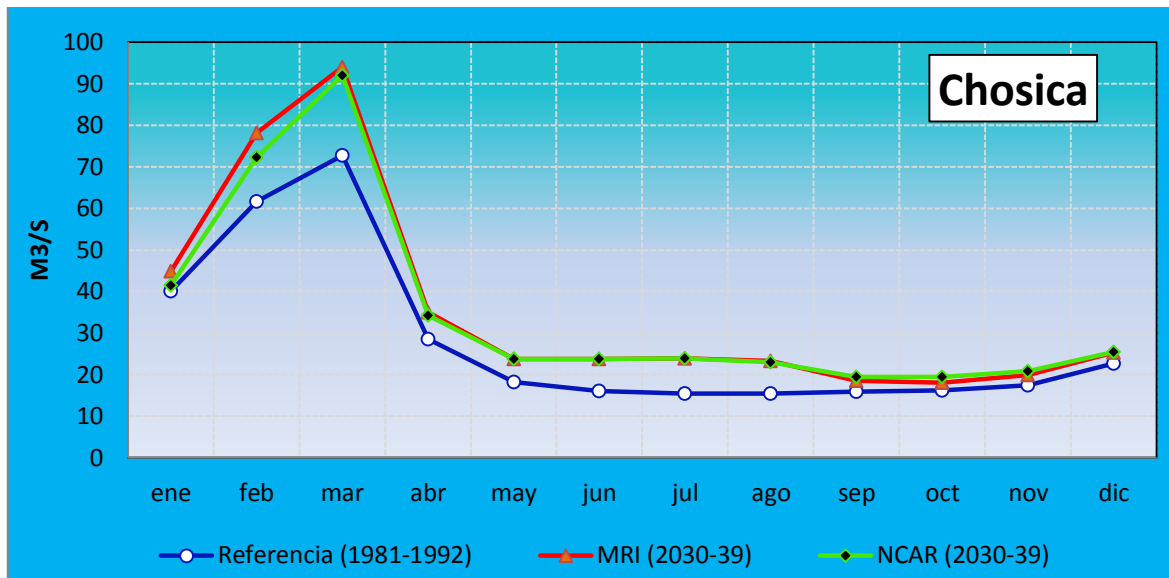
	Chosica (m3/s)			Tamboraque(m3/s)			Surco(m3/s)		
	Referencia (1981-1992)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	Referencia (1981-1992)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	Referencia (1981-1992)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)
ene	40.1	44.9	41.4	16.0	17.4	16.1	20.2	22.6	21.0
feb	61.6	78.0	72.2	23.0	30.1	29.1	29.7	38.8	37.2
mar	72.7	93.9	91.9	27.4	38.3	35.8	35.3	48.5	45.8
abr	28.6	34.9	34.3	10.4	13.3	12.8	13.7	17.2	16.6
may	18.2	23.8	23.8	6.2	8.1	8.0	8.2	10.4	10.3
jun	16.1	23.8	23.8	5.2	7.3	7.2	6.9	9.2	9.1
jul	15.5	23.9	23.9	4.7	6.8	6.7	6.2	8.4	8.4
ago	15.5	23.2	23.1	4.5	6.1	6.0	6.0	7.7	7.6
sep	16.0	18.5	19.4	5.1	5.9	6.1	6.6	7.6	7.9
oct	16.3	18.1	19.5	5.9	6.4	6.9	7.5	8.3	8.9
nov	17.5	19.9	20.9	6.8	7.1	7.3	8.6	9.1	9.4
dic	22.7	25.2	25.4	9.2	9.6	9.7	11.6	12.7	12.7

Fuente: Elaboración propia

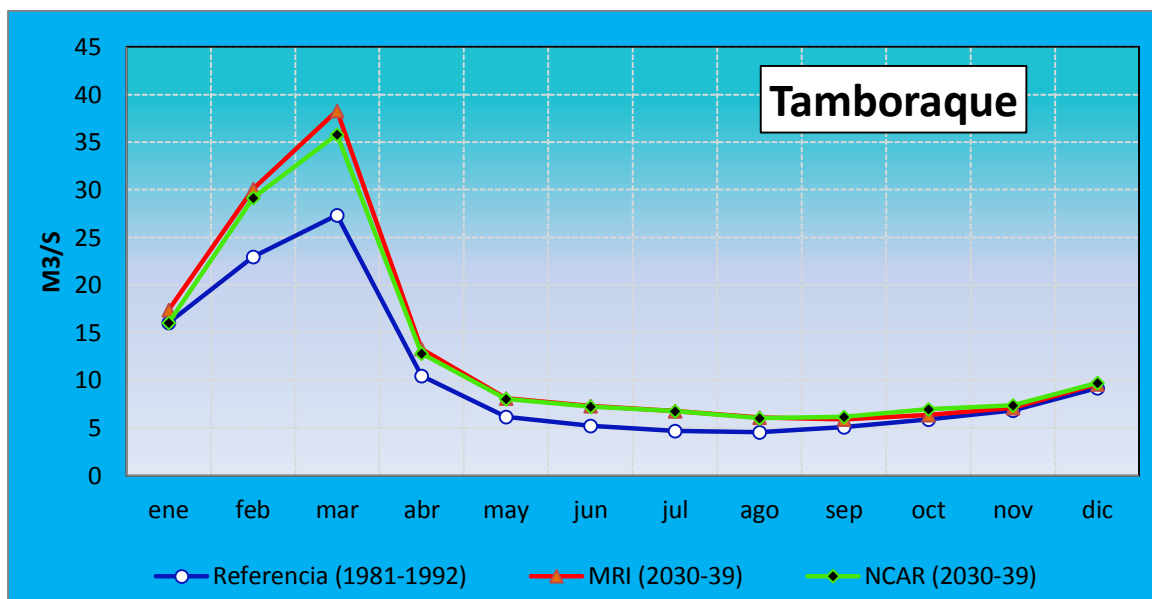
**Tabla 19.** Variación porcentual a nivel multi mensual de los caudales del horizonte 2030-2039 en comparación al periodo de referencia para la cuenca del río Rímac. Modelos MRI y NCAR.

	Chosica (variación %)		Tamboraque(variación %)		Surco(variación %)	
	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)
ene	11.9	3.3	8.5	0.2	11.9	3.8
feb	26.6	17.2	31.0	26.8	30.7	25.2
mar	29.2	26.5	40.0	30.9	37.5	29.8
abr	22.2	19.8	27.2	22.9	26.0	21.8
may	30.5	30.5	31.5	29.7	27.5	25.8
jun	48.0	48.1	39.3	38.3	32.8	31.8
jul	53.9	53.9	43.7	43.3	36.0	35.5
ago	50.0	48.8	33.6	32.3	28.4	27.2
sep	16.1	21.6	15.4	20.7	14.5	18.9
oct	11.3	19.5	8.4	18.1	9.7	18.2
nov	13.7	19.7	3.6	7.5	5.8	9.6
dic	10.9	11.6	4.7	5.6	10.0	9.4

Fuente: Elaboración propia

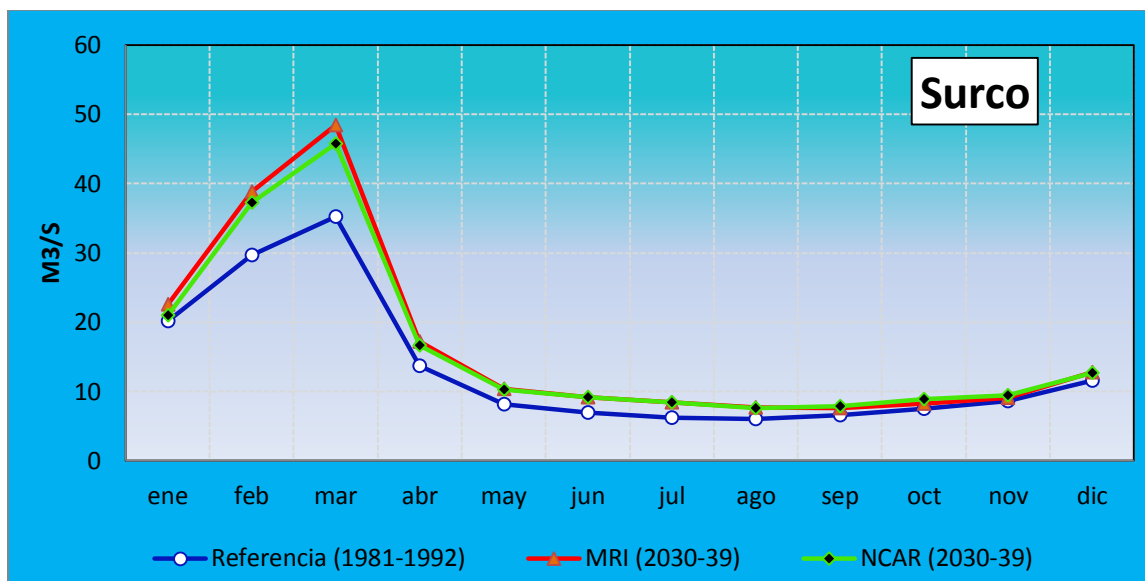


**Figura 28.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Chosica  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 29.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030 - 2039 de la estación hidrológica de Tamboraque.  
 Fuente: Elaboración propia

En general, para los 3 puntos se esperan incrementos de caudal y Marzo será el que tenga más volumen de agua, y los menores incrementos porcentuales de darán durante el periodo de primavera y comienzos del verano.



**Figura 30.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Surco.  
 Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Cuenca del río Mantaro

Los puntos de control considerados corresponden a Huapa (punto de control ubicado posterior a la presa de Tablachaca y antes de Pongor), Pongor (punto ubicado posterior a la C.H de restitución y antes del proyecto La Guitarra, toma en cuenta el agua del Mantaro y lo vertido por las C.H), Mejorada (punto de control antes de la presa de Tablachaca, controla el agua aguas arriba de la C.H Santiago Antúnez de Mayolo) y Chicnchi (punto ubicado en uno de los afluentes más próximos a la presa de Tablachaca). El periodo de referencia utilizado corresponde a 1981 hasta 1996.

Los resultados puntuales de los modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-2039 son presentados en la **Tabla 20** y a nivel porcentual en la **Tabla 21**.

En el punto de control de Huapa (**Figura 31**) el modelo MRI presenta casi en todo el año una disminución de caudales excepto en el período Marzo a Mayo. Setiembre a nivel porcentual, tiene el descenso más importante con una pérdida de -21,1% (1,1 m<sup>3</sup>/s) y el incremento más importante se tiene para Marzo con un incremento porcentual de 19,3% (3,5 m<sup>3</sup>/s), respecto al modelo NCAR se observa que para casi todo el horizonte se tiene

incremento del caudal excepto durante Agosto y Septiembre, el período con el mayor incremento porcentual corresponde a Octubre con 28% y la pérdida de caudal más importante corresponde a Septiembre con -5,1%.

En el punto de Pongor (**Figura 32**), respecto al modelo MRI muestra que para los meses de la segunda parte de los años del horizonte se tendrá una disminución de los caudales (excepto Diciembre); el incremento porcentual más importante se presenta en Marzo con 19,7% (107,9 m<sup>3</sup>/s), respecto a la pérdida de caudales el más importante se presenta en Septiembre con -43,8% (-44,2 m<sup>3</sup>/s), respecto al modelo NCAR se tiene que solamente en Agosto (-20,6%) y Septiembre (-19,5%), respecto a los otros meses del horizonte se tiene que el mayor incremento se tendrá en Diciembre con 14,5% que representa un incremento de 41,0 m<sup>3</sup>/s respecto al periodo de referencia.

En el caso de La Mejorada (**Figura 33**), se tiene en los dos modelos un comportamiento casi similar a los observados en Huapa (geográficamente están muy cercanos), con la diferencia que el modelo MRI en La Mejorada presenta un incremento del caudal para Junio y en Huapa no. Un análisis más detallado del modelo MRI nos muestra que entre Julio y Noviembre se tiene menos caudales que el periodo de referencia siendo lo más crítico Septiembre con una pérdida porcentual de -31,5% que viene a ser -36,4 m<sup>3</sup>/s, respecto a los aumentos de caudal, para Marzo el caudal tendrá un aumento de 19% que vienen a ser 81 m<sup>3</sup>/s, otro punto a resaltar que los máximos caudales en el periodo de referencia son para Febrero pero el modelo MRI los muestra para Marzo. Respecto al modelo NCAR sólo se tiene pérdida de caudales en Agosto y Setiembre siendo este último el más importante con -16% (-18,5 m<sup>3</sup>/s), respecto a los otros meses se observa que el mayor incremento se presenta en Octubre con 18,2% que vienen a hacer 25,2 m<sup>3</sup>/s, al igual que el modelo MRI se tiene que los máximos caudales se darán el Marzo y no en Febrero.

Respecto a Chinchí o Ichu (**Figura 34**) el modelo MRI muestra que sólo de Marzo a Mayo el caudal estará por encima del periodo de referencia y los otros meses el caudal disminuirá, el

**Tabla 20.** Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Mantaro para el periodo de referencia (1969-1989) y horizonte 2030-39 con los Modelos MRI NCAR.

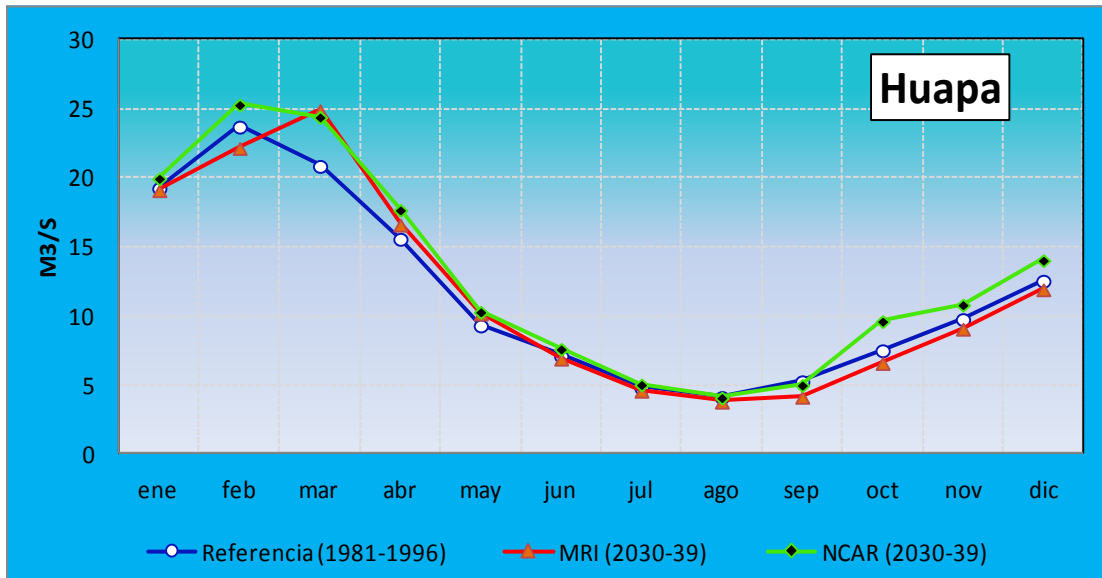
	Huapa(m3/s)			Pongor(m3/s)			Mejorada(m3/s)			Chinchi(m3/s)		
	Referencia (1981-1996)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	Referencia (1981-1996)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	Referencia (1981-1996)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	Referencia (1981-1996)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)
ene	19.3	19.1	20.0	441.9	496.0	458.0	345.1	399.9	356.82	26.8	25.8	27.12
feb	23.7	22.2	25.3	611.7	631.4	629.3	468.9	491.4	474.52	32.8	30.0	35.51
mar	20.9	24.9	24.4	546.6	654.5	622.6	426.1	507.1	473.51	30.1	33.1	34.56
abr	15.6	16.6	17.7	378.6	439.1	418.5	310.5	352.3	335.53	21.4	22.2	24.32
may	9.3	10.2	10.3	201.1	229.6	223.6	185.0	203.5	201.65	13.1	13.7	14.55
jun	7.1	6.9	7.6	149.1	153.6	162.4	147.9	152.3	158.67	9.7	9.3	10.42
jul	4.8	4.6	5.1	95.8	90.9	98.4	112.9	108.3	114.35	6.6	6.2	6.93
ago	4.2	3.8	4.1	82.2	58.0	65.2	104.1	81.6	88.08	5.6	5.3	5.84
sep	5.3	4.2	5.0	100.9	56.7	81.2	115.3	78.9	96.78	7.6	5.9	7.29
oct	7.5	6.6	9.7	139.8	122.3	178.7	138.4	125.9	163.59	10.3	9.2	12.93
nov	9.8	9.1	10.8	204.6	192.0	228.2	181.1	174.1	200.71	14.5	12.7	15.68
dic	12.6	12.0	14.1	283.6	285.9	324.6	237.3	250.6	270.19	17.5	17.0	20.20

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 21.** Caudales promedio multi mensuales en la cuenca del río Mantaro para el periodo de referencia (1969-1989) horizonte 2030-39 con los Modelos y MRI NCAR.

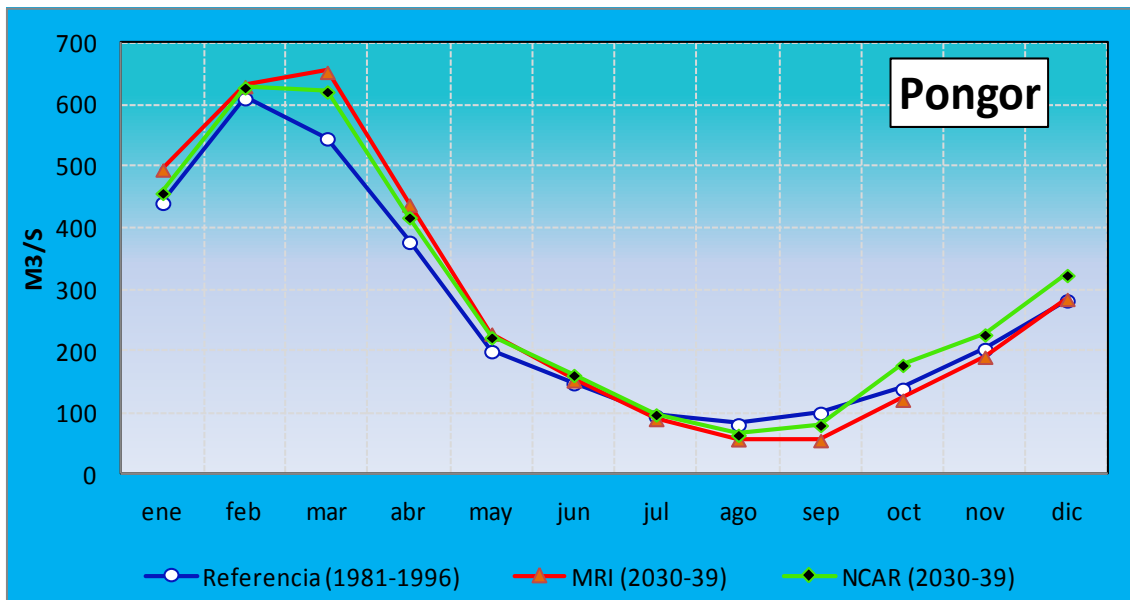
	Huapa(variación %)		Pongor(variación %)		Mejorada(variación %)		Chinchi(variación %)	
	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)	MRI (2030-39)	NCAR (2030-39)
ene	-0.8	3.7	12.2	3.6	15.9	3.4	-3.5	1.3
feb	-6.5	6.7	3.2	2.9	4.8	1.2	-8.8	8.1
mar	19.3	16.9	19.7	13.9	19.0	11.1	10.0	14.9
abr	6.6	13.4	16.0	10.5	13.5	8.1	3.9	13.7
may	9.2	10.5	14.2	11.2	10.0	9.0	4.9	11.4
jun	-3.0	6.8	3.1	8.9	2.9	7.3	-4.2	7.2
jul	-4.5	4.9	-5.1	2.7	-4.1	1.2	-6.2	4.4
ago	-8.1	-0.9	-29.5	-20.6	-21.6	-15.4	-6.4	3.6
sep	-21.1	-5.1	-43.8	-19.5	-31.5	-16.0	-21.9	-3.7
oct	-12.1	28.0	-12.6	27.8	-9.0	18.2	-11.0	25.4
nov	-7.1	10.7	-6.2	11.5	-3.9	10.8	-12.3	8.2
dic	-4.9	11.8	0.8	14.5	5.6	13.9	-3.0	15.3

Fuente: Elaboración propia



**Figura 31.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Huapa.

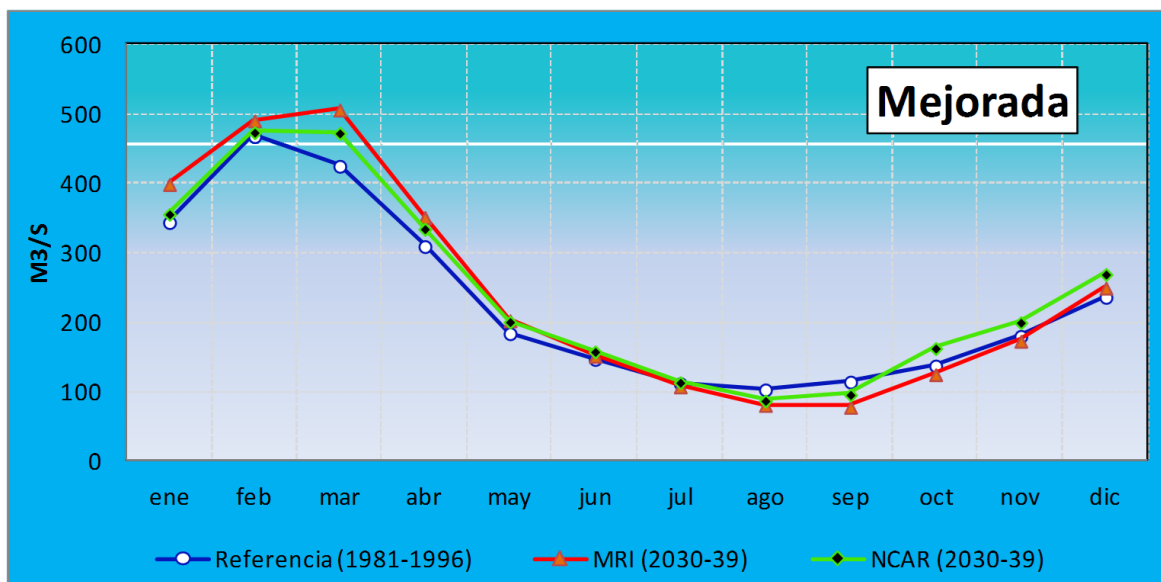
Fuente: Elaboración propia



**Figura 32.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Pongor.

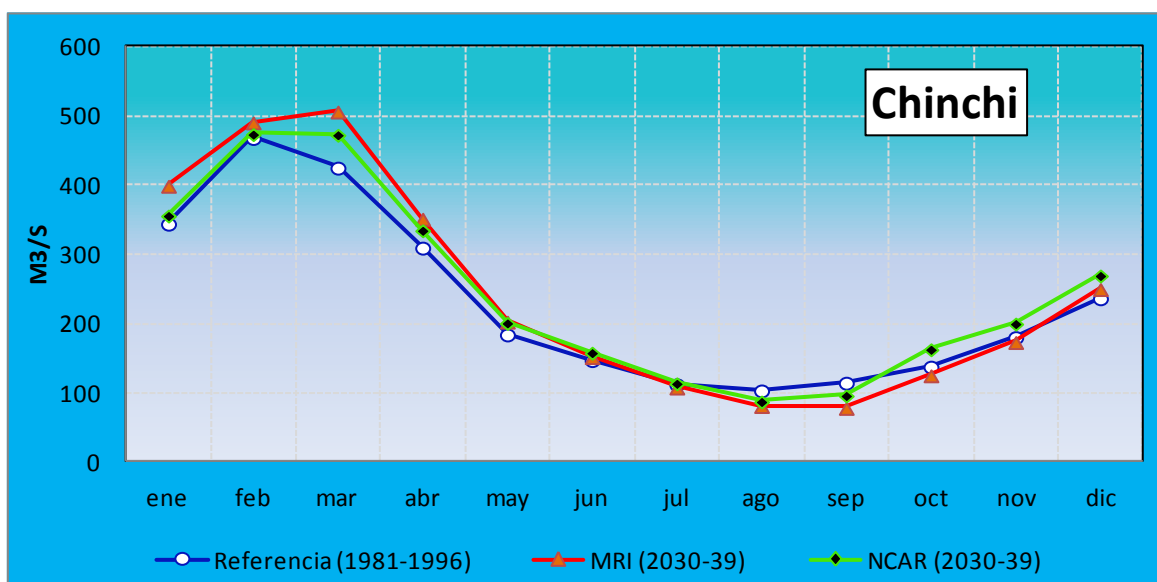
Fuente: Elaboración propia

incremento más importante corresponde a Marzo con 10% y la disminución más importante con -12.3% para Noviembre. Para el modelo NCAR, sólo se observa pérdida de caudales en Septiembre con solamente -3,7% y en los otros meses el caudal aumenta siendo Diciembre el más importante con 15,3%.



**Figura 33.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de la Mejorada

Fuente: Elaboración propia



**Figura 34.** Comparación de los caudales simulados de los modelos MRI y NCAR respecto al periodo de referencia para el horizonte 2030-2039 de la estación hidrológica de Chinchi (Ichu).

Fuente: Elaboración propia



## 6.4 Retroceso Glaciar

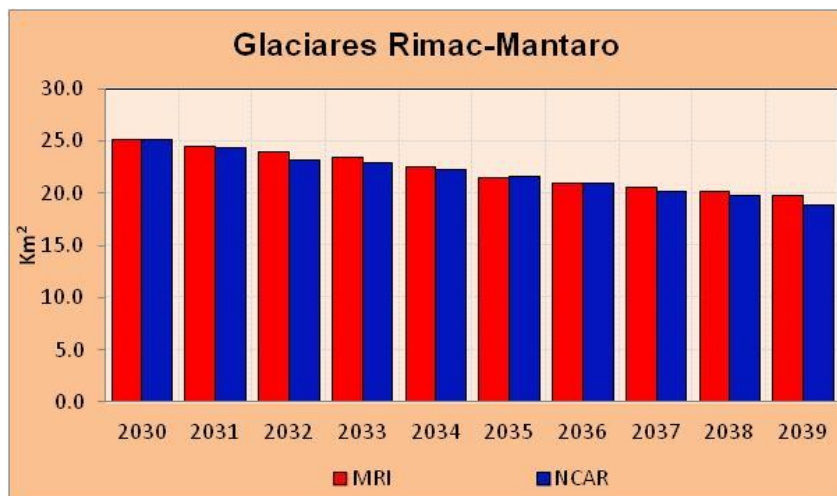
Una de las capacidades incorporadas al modelo WEAP no solo es poder simular la fusión si no también simular la evolución de la cobertura glaciar, En la Tabla 22, se muestra las áreas glaciares esperadas según cada modelo (MRI y NCAR) para las cuencas Rímac y Mantaro (como un sólo sistema hidrológico) y Santa. De esta Tabla se observa que en el caso del Rímac y Mantaro, el modelo NCAR es más pesimista que el MRI; debido a que en 1970, estas dos cuencas en conjunto tenían 204,5 km<sup>2</sup> (Suarez y otros, 2010) y para el 2039 se tendría entre 19,8 km<sup>2</sup> (MRI) y 18,9 km<sup>2</sup> (NCAR).

Respecto a la cuenca del Santa, de la Tabla 20, se observa que el modelo MRI es más pesimista, debido a que en 1967 se tenía 510,2 km<sup>2</sup> (Condom y all, 2011) y para el 2039 según el modelo MRI se tendría 284,9 km<sup>2</sup> y según el NCAR 337,2 km<sup>2</sup>. En comparación al 2006, que se tenía en el Santa 343,6 km<sup>2</sup> ; se entendería que los nevados no retrocederían mucho, bajo el escenario NCAR.

**Tabla 22.** Evolución de la cobertura glaciar para el escenario 2030-39

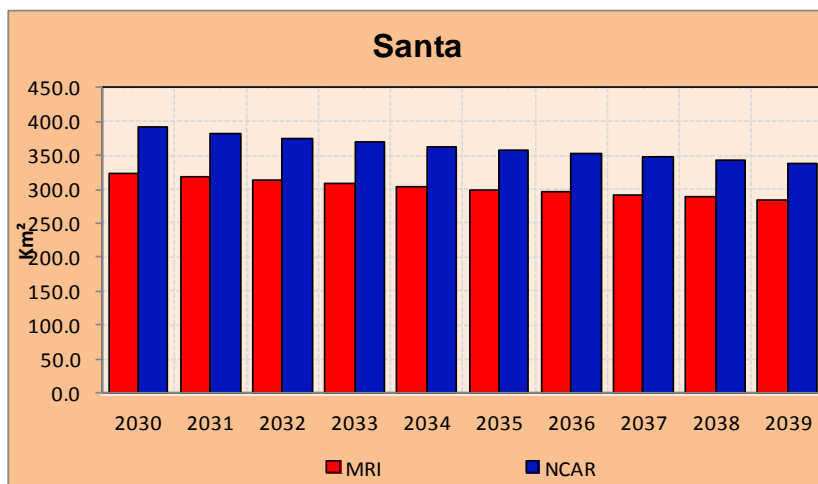
		Area Glaciar (Km <sup>2</sup> )										
		Referencia	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Rímac y Mantaro	Referencia (1970)	204.5										
	MRI		25.1	24.5	23.9	23.5	22.6	21.5	21.0	20.6	20.2	19.8
	NCAR		25.2	24.4	23.2	22.9	22.3	21.6	21.0	20.1	19.8	18.9
Santa	Referencia (1967)	510.2										
	MRI		324.2	319.4	314.5	309.7	304.4	299.0	295.8	292.6	289.3	284.8
	NCAR		391.3	382.8	375.9	369.2	362.6	357.4	352.3	346.9	341.9	337.2

Fuente: Elaboración propia



**Figura 35.** Comparación de cobertura glaciar según modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-2039 en la cuenca del río Santa.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 36.** Comparación de cobertura glaciar según modelos MRI y NCAR para el horizonte 2030-2039 en las cuencas de los ríos Rímac y Mantaro.

Fuente: Elaboración propia

## VII. DISCUSIONES

- El modelo WEAP considera como variables climáticas de entrada la precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento; los modelos climáticos MRI y NCAR sólo representan la precipitación y la temperatura, por lo que se asumió constante en el tiempo las otras dos variables (determinantes en el cálculo de la evapotranspiración potencial).
- El modelo NCAR sólo tiene datos para el periodo comprendido entre 2030-39 (el MRI entre 2015-39), quedando un vacío entre el período 2010 hasta 2030 donde se completaron los datos de temperatura con un tiraje aleatorio de las series observadas, pero este no representa las condiciones existentes para esa época causando problemas al momento de calcular el área glaciar en el horizonte de referencia (sub estima el proceso real) pero no tanto en los caudales que dependen en gran parte de la precipitación, es por eso que se tiene un retroceso muy leve en el Santa (fuerte cobertura glaciar).
- Existe mucha incertidumbre en la cuenca del río Rímac, respecto a los caudales naturales, especialmente en la zona de la micro cuenca de Sheque (Cabecera del río Santa Eulalia) donde es dominado por un número importante de lagunas reguladas (impidió tomar las corridas hechas por el IRD-SEI realizadas en esta zona).

## VIII. CONCLUSIONES

### a) Río Santa

- En la cuenca del río Santa, a nivel de la estación de Condorcerro, se espera que los caudales aumente para el horizonte 2030-39; esto debido al incremento de las precipitaciones, así como también por el proceso de derretimiento de los glaciares, especialmente durante el periodo húmedo donde se espera un incremento máximo de 19,8% en Enero (modelo MRI) y 14% (modelo NCAR) para Marzo.
- Respecto al punto de la Balsa, situado antes de la C.H, se espere también que aumenten los caudales para el horizonte 2030-39 en los dos modelos, dicho aumento estará entre un máximo de 45,3% para Junio (modelo MRI) y un aumento mínimo de 10,7% para Enero (modelo NCAR).
- La cuenca de Quitaracasa, según los dos modelos presentara varios meses donde los caudales serán menor que los de referencia siendo Junio el más grave con una pérdida que estaría entre un rango de -39,2% a -31,1%.
- La cuenca de Chuquicara, que viene es un área de captación, la segunda más importante después de la Balsa presentaría disminución de caudales para el periodo de Mayo y Junio según el modelo MRI y para el periodo comprendido entre Abril hasta Junio según el modelo NCAR, pero estas disminuciones serán en el peor de los casos de -7,5%, el resto de los meses se tendrían aumento en los caudales siendo el más importante en Diciembre con 79,1% (modelo MRI) y el menos importante Agosto con 0,3% (modelo NCAR).
- Se espera perdidas de glaciares importantes según el modelo MRI, este podría tener 284,8 km<sup>2</sup> para el 2039.

### b) Ríos Rímac y Mantaro

- En el punto de Chosica, los dos modelos muestran que los caudales aumentarían para el horizonte 2030-39 siendo el aumento más importante

durante Junio con 53,9% (los dos modelos arrojan el mismo resultado) y el aumento menos importante se daría en Enero con 3,3% según el modelo NCAR.

- Respecto a Surco se tiene un comportamiento similar a Chosica, con un aumento de caudal para todos los meses, siendo los más importantes en Julio con 36% (modelo MRI) y el menor aumento en Enero con 3,3% (modelo NCAR).
- En el caso del Mantaro, en el punto de Pongor, se espera que los caudales aumenten en los primeros seis meses del año (según los dos modelos) siendo el más importante en Marzo con 19,7% (modelo MRI) y en la segunda parte el modelo MRI muestra que los caudales disminuirían entre Julio y Noviembre siendo el más importante en Septiembre con -31,5%, en el caso del modelo NCAR sólo disminuiría en Agosto y Septiembre con -16%.
- Respecto a La Mejorada, su comportamiento es similar a Pongor, donde la primera mitad del año referencia (horizonte) se espera que se incrementen los caudales (según los dos modelos) siendo el aumento más importante en Marzo con 19% (modelo MRI) y el menos importante en Junio con 2,9% (modelo MRI); mientras que en la segunda mitad el modelo MRI muestra una disminución desde Julio hasta Noviembre según el modelo MRI siendo la pérdida más importante en Septiembre de -31,5%. El modelo NCAR, presenta disminuciones en Agosto y Septiembre siendo este último el más importante con -16%.
- Respecto a los glaciares, se espera una pérdida importante de glaciares, teniendo como referencia 204,5 km<sup>2</sup> de glaciares en 1970 y esperando tener entre 18,9 y 19,8 km<sup>2</sup> de glaciares para el escenario de 2039; siendo esto posible, debido a que los glaciares de esta cuenca, no presentan grandes alturas, como lo sucedido en el 2008 donde el glaciar tenía 54 km<sup>2</sup> (según imágenes Landsat 5).

## **IX. RECOMENDACIONES**

- Evaluar la disponibilidad hídrica superficial, en las cuencas con potencial hidroenergético, a fin de conocer su distribución y variabilidad espacial y temporal.
- Realizar las actualizaciones periódicas de estudio en base a nuevos escenarios hidroclimáticos que se generen.
- Desarrollar nuevas mejoras a los procesos estadísticos y matemáticos, para la adecuación e interpolación de los escenarios climáticos a nivel de cuencas.
- Es importante que el estudio se complemente, con el comportamiento y tendencia de la generación de energía hidroeléctrica y su valoración económica.
- Mantener operativo el desarrollo de este estudio, para ser replicados en otras cuencas de interés nacional.

## X. BIBLIOGRAFIA

- **Acuña, J.** (2004). Atlas Hidrológico del Perú: Cuenca del Santa. Lima, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú: 30.
- **Condom, T; Escobar, M; Purkey, D; Pouget, J; Suarez, w; Ramos, C; Apaestegui, J; Zapata, M; Gomez, J and Vergara, W.** (2011) . Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Perú). *Hydrol. Earth Syst.* 8, 869–916 pp.
- **IPCC,** (2007): Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- **Leung, L. R., and S. J. Ghan,** (1998): Parameterizing subgrid orographic precipitation and surface cover in climate models. *Mon. Wea. Rev.,* **126,** 3271–3291.
- **Mizuta,R; Oouchi, K; Yoshimura, H; Noda,A; Katayama,K; Yukimoto,S; Hosaka, M; Kusunoki, S; Kawai, H; and Nakagawa, M;** (2006): “20-km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model —Mean Climate States—”. *J.Meteor.Soc.Japan,* Vol. **84,** 165-185.
- **Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe** (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." *journal of hydrology* 10: 282-290.
- **SEI-Centro Global de Cambio Global** (2009); Guía metodológica modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo Weap, Boston y Santiago de Chile. 83 Pp.
- **Suarez, W; Condom, T and Apaestegui, J.** (2010). Determinación del cambio climático sobre la hidrología de las cuencas Rímac y Mantaro (Perú). Cambio climático en la cuenca del rio Mantaro-Instituto Geofísico del Perú. 68-78pp.

- **Vergara, W; Deeb,A; Leino, I; Kitoh,A; Escobar;M.**, (2011), Assessment of the Impactsof Climate Change on Mountain Hydrology *Development of a Methodology through a Case Study in the Andes of Peru* The World Bank.