

Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 Y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el altiplano peruano

Projected changes under water resources emissions scenarios RCP4.5 and 8.5 of global climate models in the altiplano of Peru CMIP5

Efrain Lujano Laura¹, Liz S. Hidalgo Sanchez², Renny D. Diaz Aguilar³, Bernardino Tapia Aguilar⁴, Apolinario Lujano Laura⁵

¹Ingeniero Agrícola, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, ^{2,3}Ingeniero Ambiental, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología,

⁴Ingeniero Agrónomo, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, ⁵Ingeniero Agrícola, Autoridad Nacional del Agua

¹elujano28@gmail.com, ²lstepfanny@gmail.com, ³rennydaniel@gmail.com, ⁴btapia@gmail.com, ⁵apolex23@gmail.com

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido 30-03-2016
Artículo aceptado 17-06-2016
Online: 25-06-2016

PALABRAS CLAVES:

Altiplano Peruano
cambio climático
escenarios climáticos
disponibilidad hídrica

ARTICLE INFO

Article received 30-03-2016
Article accepted 17-06-2016
Online: 25-06-2016

KEY WORDS:

Peruvian altiplano,
climate change,
climate scenarios,
water availability.

RESUMEN

La investigación, se realizó en el ámbito del altiplano Peruano, con el objetivo de evaluar los cambios en la disponibilidad del recurso hídrico bajo escenarios de emisiones de Modelos Climáticos Globales (MCG) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5). La distribución espacio-temporal de la precipitación, se tomó como referencia la climatología 1971 – 2000 y sus proyecciones para el horizonte 2071 – 2100, así mismo para la simulación de caudales se utilizó el modelo hidrológico conceptual de Ingeniería Rural de 2 parámetros, cuyas evaluaciones estadísticas se midieron a través de la eficiencia de Nash y Sutcliffe. El Simulador del Sistema Terrestre y el Clima de la Comunidad Australiana versiones 1.0 y 1.3 (ACCESS1.0 y 1.3) y el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima versión 5 (MIROC5), simularon adecuadamente el ciclo estacional de la precipitación y en base a los resultados, los cambios de precipitaciones para los caminos de concentración representativas (RCP4.5 y 8.5) a finales del siglo XXI, indican un ligero incremento de la precipitación anual en la cuenca Ramis y una disminución para la cuenca Ilave. Es así que las variaciones de las precipitaciones son también reflejadas en los caudales, concluyéndose que las mayores disminuciones del recurso hídrico se darían para la cuenca Ilave, con incrementos ligeros en promedio anual para la cuenca Ramis..

ABSTRACT

The research was conducted in the area of the Peruvian altiplano with the aim to assess changes in the availability of water resources under emission scenarios Global Climate Models (GCMs) of the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (CMIP5). The spatio-temporal precipitation distribution was taken as reference climatology 1971 - 2000 and its projections for the horizon 2071 - 2100, also for simulating flows conceptual hydrological model of Rural Engineering 2 parameters are used, whose evaluations statistics were measured through efficiency Nash and Sutcliffe. The Australian Community Climate and Earth System Simulator versions 1.0 and 1.3 (ACCESS1.0 and 1.3) and Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5 (MIROC5), adequately simulated the seasonal cycle of precipitation and based results, changes in rainfall for Representative Concentration Pathways (RCP4.5 and 8.5) at the end of the XXI century, indicate a slight increase of annual rainfall of the basin Ramis and a decrease for the Ilave basin. Is thus that variations in rainfall are also reflected in the flows, concluding that the largest decreases of water resources would be given for the Ilave basin, with slight increases in annual average for the basin Ramis.

INTRODUCCIÓN

Las proyecciones mundiales sobre el clima según el cuarto informe, elaborado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) ha llegado a la conclusión de que la temperatura global media de la atmósfera probablemente aumentará entre 1.8 °C y 4.0°C para finales de este siglo, dependiendo de los escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El quinto informe indica una confianza muy alta del aumento de las temperaturas superficiales medias globales para 2081-2100 con respecto a 1986-2005 en el cual se prevé que sea probable que en los rangos derivados de las simulaciones de concentración impulsada por el CMIP5, se tendrían incrementos de 1.1°C a 2.6°C en el escenario RCP4.5 y de 2.6°C a 4.8°C en el escenario de emisiones altas RCP8.5. En relación con la variabilidad interna natural, se espera que los aumentos a corto plazo en media temporada y las temperaturas medias anuales serán mayores en zonas tropicales y subtropicales que en las latitudes medias (IPCC, 2013). Así mismo se prevé aumentos de precipitación media anual en altas latitudes y el Océano Pacífico ecuatorial, mientras que en muchas latitudes medias y regiones subtropicales secas, las precipitaciones probablemente disminuirán significativamente, también indican que en regiones húmedas de latitud media, la precipitación media es probable que aumente a finales del siglo XXI en el escenario de altas emisiones RCP8.5, por tanto los eventos extremos de precipitación en mayor parte de las masas terrestres de latitudes medias y más de las regiones tropicales húmedas es muy probable que sean más intensos y más frecuentes a finales de este siglo (IPCC, 2013).

Las simulaciones archivadas de modelos climáticos globales por el proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) han sido una de las fuentes más importantes para la proyección cuantitativa del clima para el siglo XXI (Baker y Huang, 2014). Los modelos globales son capaces de reproducir las características básicas del ciclo estacional de la precipitación del presente, sin embargo hay algunas discrepancias en los modelos en reproducir cuantitativamente la exactitud estacional de la precipitación sobre las principales cuencas del continente (Vera et al., 2006). Es, por lo tanto, deseable evaluar los cambios en la disponibilidad de

agua dulce con un gran número de modelos (Milly et al., 2008) y evaluar el modelo en cuanto a número de modelos o simulaciones que muestran cambios similares (Arnell y Gosling 2013; Hirabayashi et al., 2013).

Las simulaciones de CMIP3 (Meehl et al., 2007) y CMIP5 (Taylor et al., 2012), se han utilizado en diversos estudios y como paradigmas se tienen, el estudio de los impactos del cambio climático futuro en la hidrología de cuencas, analizadas por Masood et al. (2015), una comparación entre precipitaciones extremas de modelos climáticos del CMIP5 y observados analizada a nivel global por Asadieh y Krakauer (2015) y los cambios en la corriente de flujo global para el futuro 2071-2100 estudiados por Koirala et al. (2014).

Estudios en el Altiplano Peruano fueron realizados por Minvielle y Garreaud (2011) quienes utilizaron salidas de modelos climáticos globales del CMIP3, encontrando un mayor incremento del viento libre troposférico en niveles medios y superiores sobre los Andes centrales, que se traduce en una disminución del transporte de humedad hacia el altiplano desde el interior del continente durante el verano, lo que significa la reducción de la precipitación de verano entre 10% y 30% con respecto a los valores actuales. Lujano et al. (2014) evalúa la disponibilidad hídrica para finales del siglo XXI bajo los escenarios A2 (altas concentraciones de CO₂) y B2 (bajas concentraciones de CO₂), concluyendo una disminución anual del recurso hídrico para la cuenca Ilave y un ligero incremento en la cuenca Ramis. Así mismo Sanabria et al. (2009) en su estudio, concluye incrementos de precipitaciones en la época lluviosa para un escenario extremo A2 y en un escenario moderado B2 similar al patrón promedio 1961-1990. Por otro lado, Moya et al. (2015) evalúa las salidas del modelo climático global MIROC5 del CMIP5 para la zona norte y sur de Perú, en el cual muestra que para finales del siglo XXI, el régimen anual de las precipitaciones tiende a disminuir respecto al periodo 1986 – 2005 para la zona sur de Perú para los escenarios RCP8.5 (altas concentraciones de CO₂) y RCP4.5 (bajas concentraciones de CO₂).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar los cambios en la disponibilidad de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano

Peruano. Los resultados obtenidos darán lugar a la planificación y gestión del recurso hídrico, siendo un componente esencial que deberá adaptarse para hacer frente a las presiones climáticas y socioeconómicas de los próximos periodos, haciendo que en los programas de desarrollo se tenga en cuenta el cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio está ubicada entre las coordenadas UTM (WGS84, zona 19 sur); Este: 595,683 – 284,135, Norte: 7,992633 – 8,447692 con altitudes entre 3,810 a 5,750 msnm. Forma parte de la Región

Hidrográfica del Titicaca y Sistema Hídrico TDPS. Se caracteriza como un sistema de cuenca endorreica, ubicada entre los departamentos de Puno y Tacna. La superficie total es de 49,171.54 Km² aproximadamente, el régimen hidrológico es pluvial, presentándose las mayores precipitaciones y descargas en los meses de diciembre a marzo y las temperaturas más bajas concentradas generalmente en los meses de junio y julio. Los límites hidrográficos según la metodología de delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas de Otto Pfafstetter, por el norte y este limita con la región Hidrográfica del Amazonas, por el oeste y sur con la región Hidrográfica del Pacífico.

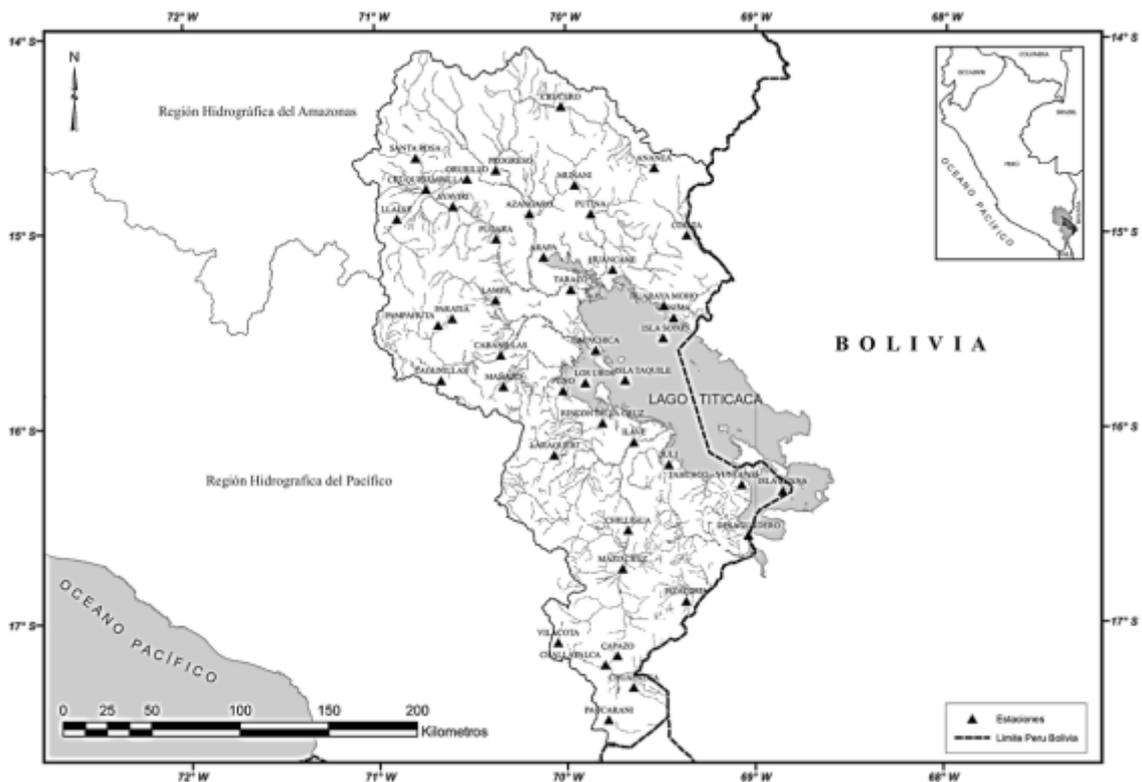


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Base de datos

Fueron usados datos observados de precipitación total mensual y descargas medias mensuales del periodo 1964 - 2013 de 35 estaciones (Tabla 1), los cuales fueron necesarios para evaluar los datos simulados de 09 modelos del CMIP5 (Tabla 2), incluidos los datos de los escenarios futuros de cada modelo. Los escenarios futuros utilizados corresponden a RCP8.5 y RCP4.5, para el escenario

RCP8.5 la radiación forzante es aproximadamente 8,5 W / m² (~1370 ppm CO₂ eq) en el año 2100, que es el escenario más alto de emisiones de gases de efecto invernadero mientras que en el escenario RCP4.5, la radiación forzante es aproximadamente 4,5 W / m² (~650 ppm CO₂ eq) en el año 2100 que es el escenario intermedio de emisiones de gases de efecto invernadero (Van Vuuren et al., 2011).

Tabla 1. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en estudio.

N°	Estación	Este	Norte	Altitud	N°	Estación	Este	Norte	Altitud
		[m]	[m]	[msnm]			[m]	[m]	[msnm]
1	Ananea	442448	8377140	4653	19	Lampa	352861	8301728	3929
2	Arapa	379823	8326267	3892	20	Laraqueri	385938	8213627	3952
3	Ayaviri	328602	8355116	3921	21	Llally	297126	8347800	4211
4	Azangaro	371897	8350772	3840	22	Los Uros	403571	8254794	3825
5	Cabanillas	355675	8270502	3877	23	Mañazo	357163	8252704	3910
6	Capachica	409496	8273379	3827	24	Mazocruz	424708	8149030	3963
7	Capazo	421758	8099499	4470	25	Muñani	397530	8367203	3923
8	Challapalca	414949	8094456	4256	26	Pampahuta	320200	8287459	4292
9	Chuapalca	430940	8081609	4273	27	Paucarani	416849	8063116	4572
10	Chuquibambilla	313519	8364727	3899	28	Pizacoma	460721	8130662	3913
11	Cojata	460875	8338800	4325	29	Progreso	352946	8375575	3952
12	Desaguadero	495691	8168147	3813	30	Pucara	353035	8336523	3869
13	Huancane	419032	8319216	3860	31	Puno	390979	8250334	3831
14	Huaraya Moho	448001	8298638	3818	32	Putina	406640	8350905	3853
15	Ilave	430990	8221164	3837	33	Tahuaco Yunguyo	491988	8196981	3864
16	Isla Soto	447530	8280338	3820	34	Taraco	395292	8307846	3817
17	Isla Suana	515154	8193382	3809	35	Vilacota	388211	8107052	4427
18	Juli	450813	8208437	3814					

Tabla 2. Modelos de circulación general del CMIP5 considerados para el estudio. Los nombres de instituciones y de modelos se tomaron de <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/CMIP5/availability.html>. La resolución espacial se extrajo del encabezado de datos.

Centro de Modelamiento	País	Modelo	Lat. [Km]	Long. [Km]
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/ Bureau of Meteorology (CSIRO-BOM)	Australia	ACCESS1.0	1.87	1.25
		ACCESS1.3	1.87	1.25
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China	BCC-CSM1.1	2.81	2.79
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	CanESM2	2.81	2.79
		CCSM4	1.25	0.94
Community Climate System Model	EE.UU	CESM1-BGC	1.25	1.88
		CSIRO-Mk3.6	1.87	1.87
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/ Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCCE)	Australia			
The First Institute of Oceanography.	China	FIO-ESM	2.81	2.79
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japón	MIROC5	1.40	1.40

Tratamiento de los datos

Se realizó el análisis de consistencia de los datos observados para evaluar los saltos existentes en la serie histórica mediante la prueba de t-student y la prueba de Mann y Kendall para determinar si las series presentan tendencia. Una vez analizada la consistencia de los datos se utilizaron las regiones establecidas como homogéneas por Lujano y Obando (2015) con la finalidad de realizar la completación de datos faltantes mediante el método de vector regional (MVR).

Con los datos completados de las 35 estaciones, se estimó la precipitación areal para las cuencas en estudio (Ramis, Huancané, Coata e Ilave) mediante el método de Kriging. De igual modo se estimó

$P_{sim} = F_c \cdot P_{obs}$ = la precipitación areal de las cuencas en estudio para los 09 modelos y se compararon los datos de precipitación areal entre los observados y simulados determinándose el factor de corrección multiplicativo según la siguiente expresión matemática:

$$F_c = \frac{P_{obs}}{P_{sim}} \quad (1)$$

donde, F_c es el factor de corrección, P_{obs} es la precipitación observada, y P_{sim} es la precipitación simulada de un determinado modelo. Este factor fue usado para corregir las sobreestimaciones de los modelos.

Así también, para la salida de los modelos se estimó el coeficiente de determinación (R^2) que fue clasificado bajo los criterios de muy bueno >0.95 , bueno de $0.85 - 0.95$, satisfactorio de $0.65 - 0.85$ e insatisfactorio <0.65 (Andersen et al., 2001).

Para la estimación de las precipitaciones futuras (2071 - 2100) se usaron las proyecciones climáticas RCP (8.5 y 4.5) de los modelos que presentan un adecuado coeficiente de determinación (R^2) al ser comparados con los datos observados. Una vez obtenida las precipitaciones de los escenarios futuros

de los mejores modelos identificados, se calcularon los promedios multimensuales para el escenario climático 2071 – 2100, cuyos resultados fueron necesarios para estimar las descargas futuras. Para este último procedimiento se utilizó el modelo de Ingeniería Rural de dos parámetros a paso mensual GR2M (Mouelhi et al., 2006), el cual es un modelo conceptual y su evaluación de eficiencia se basa en los criterios de Nash y Sutcliffe (1970).

Variación de los parámetros hidrometeorológicos

Para ver la variación del clima futuro se utilizó la base de datos provenientes de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, aplicando el cambio de delta (Ramírez y Jarvis, 2010). Con este método se puede estimar las variaciones entre las simulaciones de los modelos climáticos actuales y futuros, agregando los cambios a series temporales observadas (Gleick, 1986; Arnell, 1996; Lavado et al., 2011).

$$\Delta\% = \left(\frac{F - P}{P} \right) * 100$$

donde $\Delta\%$ son los cambios de lluvias en porcentaje, F son los valores futuros para el horizontes 2071-2100, y P son los valores de la climatología actual.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis de consistencia

Del análisis de consistencia (Tabla 3) la serie histórica en cada una de las estaciones en estudio no presenta saltos debido a que el resultado de la prueba estadística t-student resultan no significativos (NS). Entretanto en el análisis de tendencia (Tabla 3) según la metodología de Mann-Kendall la mayoría de estaciones presentan tendencias positivas (+), siendo significativos (S) en las estaciones Chuquibambilla, Ayaviri, Cabanillas, Isla Soto, Isla Suana, Lampa, Llally, Los Uros y Chuapalca con niveles de significancia (α) de: $\alpha=0.05$, $\alpha=0.1$, $\alpha=0.05$, $\alpha=0.1$, $\alpha=0.05$, $\alpha=0.1$ y $\alpha=0.1$ respectivamente.

Tabla 3. Resultados de las pruebas estadísticas realizadas

Estación	Mann-Kendall				Result.	T-student				Result.	
	z estadístico	Valores críticos (tablas estadísticas)				t estadístico	Valores críticos (tablas estadísticas)				
		$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$				$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$		
Norte	Ananea	0.761	1.645	1.960	2.576	+NS	0.039	1.680	2.011	2.682	NS
	Arapa	-0.117	1.645	1.960	2.576	-NS	1.602	1.680	2.011	2.682	NS
	Azángaro	1.054	1.645	1.960	2.576	+NS	-0.386	1.680	2.011	2.682	NS
	Chuquibambilla	2.074	1.645	1.960	2.576	+S (0.05)	-1.128	1.680	2.011	2.682	NS
	Cojata	0.217	1.645	1.960	2.576	+NS	0.558	1.680	2.011	2.682	NS
	Huancané	0.468	1.645	1.960	2.576	+NS	-0.900	1.680	2.011	2.682	NS
	Huaraya Moho	-0.719	1.645	1.960	2.576	-NS	-0.567	1.680	2.011	2.682	NS
	Muñani	0.870	1.645	1.960	2.576	+NS	-0.176	1.680	2.011	2.682	NS
	Progreso	0.686	1.645	1.960	2.576	+NS	-0.866	1.680	2.011	2.682	NS
	Pucara	-0.703	1.645	1.960	2.576	-NS	-0.780	1.680	2.011	2.682	NS
Centro	Putina	-0.903	1.645	1.960	2.576	-NS	-0.130	1.680	2.011	2.682	NS
	Taraco	0.753	1.645	1.960	2.576	+NS	0.915	1.680	2.011	2.682	NS
	Ayaviri	1.840	1.645	1.960	2.576	+S (0.1)	-1.595	1.680	2.011	2.682	NS
	Cabanillas	2.568	1.645	1.960	2.576	+S (0.05)	-1.486	1.680	2.011	2.682	NS
	Capachica	0.151	1.645	1.960	2.576	+NS	1.367	1.680	2.011	2.682	NS
	Desaguadero	0.619	1.645	1.960	2.576	+NS	1.033	1.680	2.011	2.682	NS
	Ilave	0.803	1.645	1.960	2.576	+NS	-0.327	1.680	2.011	2.682	NS
	IslaSoto	1.907	1.645	1.960	2.576	+S (0.1)	-0.249	1.680	2.011	2.682	NS
	IslaSuana	2.560	1.645	1.960	2.576	+S (0.05)	-0.762	1.680	2.011	2.682	NS
	Juli	1.422	1.645	1.960	2.576	+NS	-0.730	1.680	2.011	2.682	NS
Sur	Lampa	1.924	1.645	1.960	2.576	+S (0.1)	0.522	1.680	2.011	2.682	NS
	Laraqueri	0.803	1.645	1.960	2.576	+NS	-1.564	1.680	2.011	2.682	NS
	Llally	2.501	1.645	1.960	2.576	+S (0.05)	-1.206	1.680	2.011	2.682	NS
	Los Uros	1.899	1.645	1.960	2.576	+S (0.1)	-1.276	1.680	2.011	2.682	NS
	Mañazo	0.987	1.645	1.960	2.576	+NS	0.085	1.680	2.011	2.682	NS
	Pamapahuta	1.455	1.645	1.960	2.576	+NS	-1.395	1.680	2.011	2.682	NS
	Puno	1.589	1.645	1.960	2.576	+NS	-1.210	1.680	2.011	2.682	NS
	Tahuaco	0.652	1.645	1.960	2.576	+NS	0.627	1.680	2.011	2.682	NS
	Capazo	-0.318	1.645	1.960	2.576	-NS	1.505	1.680	2.011	2.682	NS
	Challapalca	1.372	1.645	1.960	2.576	+NS	0.181	1.680	2.011	2.682	NS
Sur	Chuapalca	1.673	1.645	1.960	2.576	+S (0.1)	-0.487	1.680	2.011	2.682	NS
	Mazocruz	0.502	1.645	1.960	2.576	+NS	0.082	1.680	2.011	2.682	NS
	Paucarani	-0.201	1.645	1.960	2.576	-NS	1.151	1.680	2.011	2.682	NS
	Pizacoma	0.803	1.645	1.960	2.576	+NS	1.306	1.680	2.011	2.682	NS
	Vilacota	0.736	1.645	1.960	2.576	+NS	1.341	1.680	2.011	2.682	NS

Validación de los modelos CMIP5

Al comparar las precipitaciones areales observadas y simuladas de los modelos para las cuencas Ramis e Ilave se observa una sobrestimación en relación a la data observada (Figura 2). Las sobreestimaciones de precipitaciones simuladas por modelos globales son también corroborados en trabajos de Solman et al.

(2007); Sanabria et al. (2009). Así mismo se puede afirmar que las salidas de los Modelos Climáticos Globales (MCG) si reproducen el ciclo estacional de la precipitación (Figura 2) mas no cuantifican con exactitud los valores observados, estos resultados también son confirmados por Vera et al. (2006).

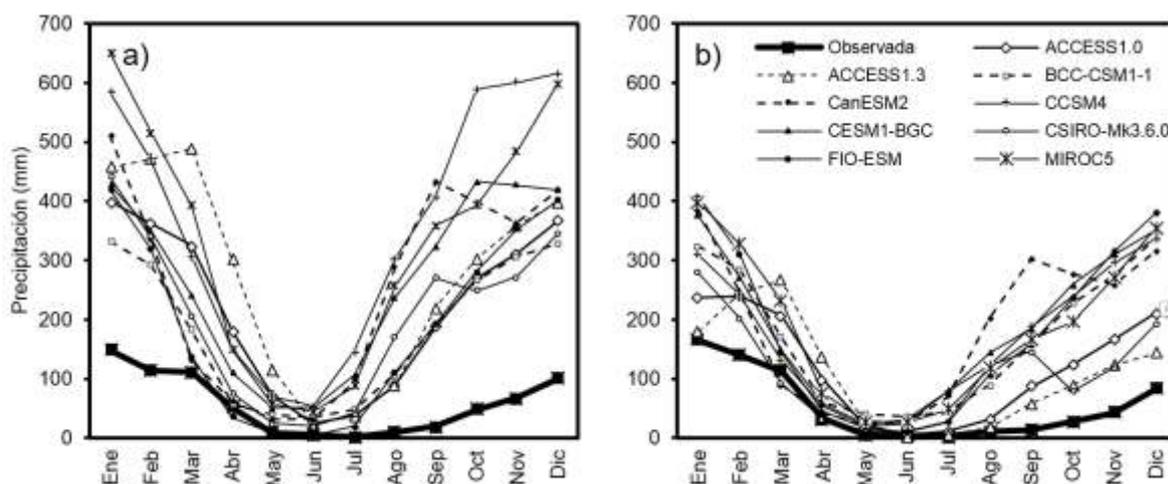


Figura 2. Precipitación total promedio multimensual (1971-2000) observada y simulada, a) cuenca Ramis y b) cuenca Ilave

Los promedios multimensuales de precipitaciones simuladas por los modelos, al ser comparados con las precipitaciones areales observadas de las cuencas en estudio, muestran coeficientes de determinación “bueno”, “satisfactorio” e “insatisfactorio, es así que los modelos con coeficientes de determinación “bueno” y “satisfactorio” representan mejor el ciclo estacional de la variable en estudio. Así, tenemos para las cuencas Ramis e Ilave como modelos representativos a ACCESS1.0, ACCESS 1.3 y MIROC5 (Tabla 4). La selección de modelos a utilizar fue seleccionada bajo los criterios de Andersen et al. (2001).

Finalmente los valores de precipitación total promedio multimensual de los modelos seleccionados fueron reducidos con el factor multiplicativo estimado entre la precipitación observada y la simulada (Ec. 1) y los mismos factores se utilizaron para los valores proyectados de cada escenario climático.

Tabla 4. Coeficiente de determinación (R^2), estimado a partir de valores observados y simulados

MCG	Cuenca	
	Ramis	Ilave
ACCESS 1.0	0.876	0.831
ACCESS 1.3	0.883	0.768
BCC-CSM1-1	0.613	0.558
CanESM2	0.284	0.260
CCSM4	0.429	0.373
CESM1-BGC	0.421	0.451
CSIRO-Mk3.6.0	0.649	0.623
FIO-ESM	0.582	0.548
MIROC5	0.724	0.729

Variaciones futuras en la precipitación

Distribución espacial de las variaciones de precipitación

Para el análisis espacial de precipitaciones en el Altiplano Peruano, se utilizó el promedio de los modelos ACCESS1.0, ACCESS1.3 y MIROC5, puesto que son los más representativos en comparación a la base climática 1971-2000. Según ese análisis, las variaciones de precipitación futura, muestran para el escenario RCP4.5 y horizonte 2071-2100 disminuciones de precipitación en la mayor parte del Altiplano (Figura 3a), no en tanto las mayores disminuciones de la precipitación anual se presentarían en el extremo sur. Para el escenario RCP8.5 en el horizonte 2071 - 2100 (Figura 3b) para el escenario RCP8.5 se espera también ligeros

incrementos (+8.5%) para la zona norte y disminuciones de precipitación (-30%) para la zona sur. Los resultados para el escenario 2071-2100, son coincidos con el trabajo de Lujano et al. (2014).

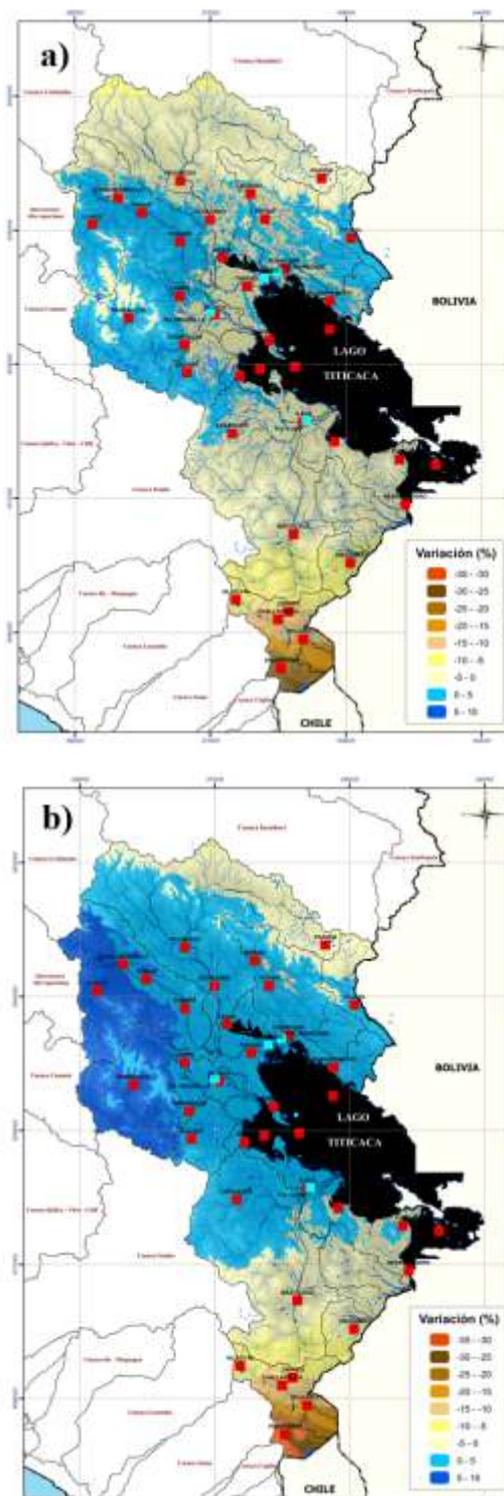


Figura 3. Variación de la precipitación en el altiplano Peruano horizonte 2071-2100 para el escenario climático a) RCP4.5 y b) RCP8.5.

Cambios futuros en las descargas

Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M

La fase de calibración del modelo GR2M, se realizó con el periodo (1971-2000). Los resultados mostraron una eficiencia de NSE de 82.2%, 83.3% para las cuencas Ramis e Ilave respectivamente, indicando que el ajuste del modelo son buenos. Por otro lado la fase de validación se realizó con el

periodo 2001-2013, mostrando eficiencias “bueno” y “muy bueno”, así tenemos un NSE de 84.8% y 91.1% para las cuencas Ramis e Ilave respectivamente. Los resultados de calibración y validación, consideran un patrón adecuado para simular las descargas de los ríos en estudio, según los criterios establecidos por Ritter y Muñoz (2013). La comparación entre caudales observados y simulados para la fase de validación, se muestran en la Figura 4.

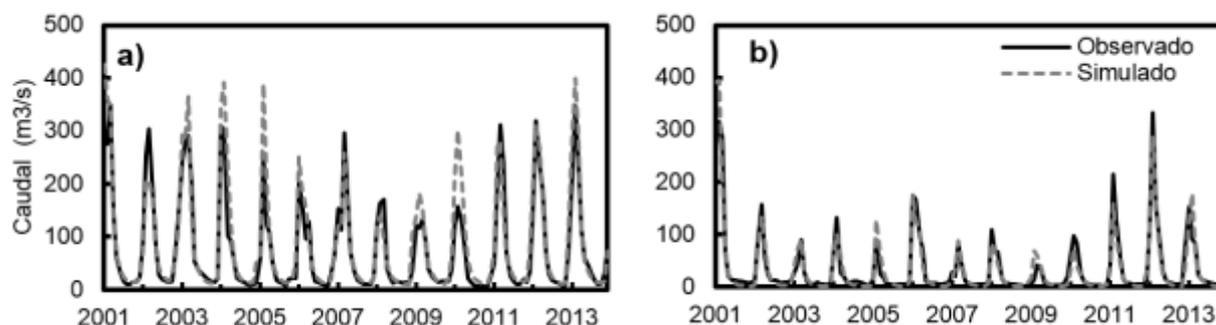


Figura 4. Caudales medios mensuales observados y simulados – Fase de validación, a) Ramis y b) Ilave.

Variación de la disponibilidad hídrica futura

Para la cuenca Ramis se observa tanto para los escenarios RCP4.5 y 8.5, ligeros incrementos en promedio anual que varían entre el +20% y +33%, con mayores incrementos (+40% al +80%) que se registrarían en los meses de estiaje (mayo a septiembre) para el horizonte 2071-2100 (Figura 5). Se debe tener en cuenta que los incrementos de los meses mayo a septiembre, no son significativos por ser meses de estiaje. Así también se observa (Figura 5a) que la disminución de caudales en la cuenca Ramis, ocurrirían en noviembre, diciembre, enero y febrero para el escenario RCP4.5, con ligeros incrementos en los meses lluviosos enero, febrero y marzo en el escenario climático RCP8.5. Por otro lado, para la cuenca Ilave se observa una disminución del recurso hídrico anual entre -48% y -24% para los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5 respectivamente, registrándose los mayores incrementos de las descargas entre abril y mayo para el escenario RCP8.5 (+39%), con una mayor disminución del recurso hídrico en mayor parte del año. Esta

investigación corrobora hallazgos anteriormente expuestos en otras investigaciones como las realizadas por Lujano et al. (2014) que indica una disminución de caudales medios anuales en la cuenca Ilave y ligeros incrementos para la cuenca Ramis a finales del siglo XXI. Así mismo Minvielle y Garreaud (2011) también concluyen con una reducción de la precipitación en verano, los cuales tendrían un efecto directo en los caudales que afectaría la zona sur del Altiplano Peruano. Los resultados también tienen una coincidencia general con Moya et al. (2015), que afirma la disminución de precipitaciones en la zona sur de Perú para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. De este estudio, se desprende con cierta claridad que las precipitaciones y su respuesta hidrológica en ríos, tiendan a disminuir significativamente, sobre todo al sur del Altiplano Peruano, siendo una zona con menores precipitaciones y que según el IPCC (2013), refiere que en muchas latitudes medias y regiones subtropicales secas, las precipitaciones probablemente disminuirán.

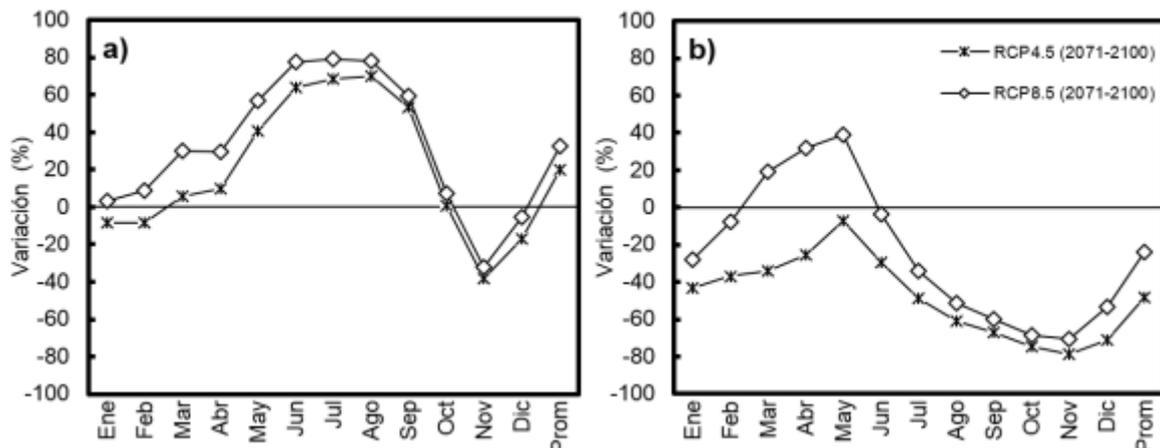


Figura 5. Variación de caudales a) río Ramis y b) río Ilave, para los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5, horizonte 2071-2100.

CONCLUSIONES

El promedio de Modelos Climáticos Globales representativos para las cuencas Ramis e Ilave ACCESS1.0, ACCESS1.3 y MIROC5 del CMIP5, indican que la cuenca Ilave ubicado en la zona sur del ámbito de estudio, tendría mayores disminuciones de caudales, por lo que se presume será la más afectada en cuanto a la disponibilidad hídrica a finales del siglo XXI, mientras que en la cuenca Ramis tendería a registrar ligeros incrementos del caudal promedio anual. Los resultados de la presente investigación podrán ser tomados en cuenta, en la elaboración de planes de gestión de los recursos hídricos en las cuencas en estudio y la vinculación del cambio climático en programas de desarrollo, garantizando de esta manera el aprovechamiento sostenible del agua.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) por facilitar la información hidrometeorológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Andersen, J., Refsgaard, J., y Jensen, K. H. (2001). Distributed hydrological modelling of the Senegal River basin-model construction and validation. *Journal Hydrological*, 247, 200–214.

Arnell, N. W., y Gosling, S. N. (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351–364.

Arnell, N. W. (1996). *Global Warming, River Flows and Water Resources*. Chichester, United Kingdom, Wiley.

Asadieh, B., y Krakauer, N. Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 877–891.

Baker, N. C., y Huang, H. P. (2014). A Comparative Study of Precipitation and Evaporation between CMIP3 and CMIP5 Climate Model Ensembles in Semiarid Regions. *Journal of Climate*, 37, 3731–3749.

Gleick, P. H. (1986). Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, 88, 97–116.

Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H. y Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3, 816–821.

IPCC Climate Change (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press)

IPCC Climate Change (2007). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press)

Koirala, S., Hirabayashi, Y., Mahendran, R. y Kanae, S. (2014). Global assessment of agreement among stream flow projections using CMIP5 model outputs. *Environmental Research Letters*, 9, 1–11.

- Lavado, W. S., Labat, D., Guyot, J. L., y Ardoin-Bardin, S. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon–Andes basin. *Hydrological Processes*, 35(24), 3721-3734.
- Lujano, E., y Felipe, O. G. (2015). Análisis de frecuencia regional de las precipitaciones máximas diaria en la región hidrográfica del Titicaca, *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 17(1), 53-64.
- Lujano, E., Diaz, R. D., Lujano, A., y Quispe, J. P. (2014). Evaluación de la disponibilidad hídrica actual y futura en el contexto del cambio climático en las cuencas Ilave y Ramis. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 16(2), 65-72
- Masood, M., Yeh, P. J. F., Hanasaki, N., y Takeuchi, K. (2015). Model study of the impacts of future climate change on the hydrology of Ganges–Brahmaputra–Meghna basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 747–770.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B.,... Taylor, K. E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383–1394.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. y Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: whither water management?. *Science*, 319, 573–574.
- Minvielle, M., y Garreaud, R. D. (2011) Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano. *American Meteorological Society*, 24, 4577-4583.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., y Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318, 200-214.
- Moya, A. S., Ortega, J. M., y Jurado, X. (2015). Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú. *Apuntes de ciencia y sociedad*, 5(2), 188-195.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Ramírez, J., y Jarvis, A. (2010). Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis. *International Center for Tropical Agriculture*, 1, 1-18.
- Ritter, A., y Muñoz, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.
- Sanabria, J., Marengo, J., y Valverde, M. (2009). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). *Revista Peruana Geotmosférica*, 1, 134-149.
- Solman, S. A., Nuñez, M. N., y Cabré, M. F. (2007). Regional climate change experiments over southern South America. I: present climate. *Climate Dynamics*, 30, 533–552.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshause, M., Nakicenovic, N., Smith S.J., y Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebman, B., y Gonzalez, P. (2006). Climate Change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC AR4 models. *Geophysical Research Letters*, 33, L13707.