

## MODELACIÓN HIDROLÓGICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA UN EMBALSE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA PAZ, BOLIVIA

### HYDROLOGICAL MODELLING UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS FOR A WATER RESERVOIR IN LA PAZ, BOLIVIA

**Claudia Medina**

*Diplomado en Adaptación al Cambio Climático en Recursos Hídricos, Facultad de Postgrado*

*Universidad Privada Boliviana*

claummontecinos@gmail.com

(Recibido el 24 de mayo 2021, aceptado para publicación el 25 de julio 2021)

#### RESUMEN

El embalse Milluni Grande depende principalmente de la precipitación, siendo vulnerable ante periodos de sequía, de forma que puede afectar a la seguridad hídrica de las ciudades de La Paz y El Alto. Por lo tanto, el presente estudio busca determinar la variación de la cantidad de agua disponible en el embalse bajo el set de escenarios de cambio climático establecidos en el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para el periodo 2022-2090. El área de estudio se limitó a la microcuenca Milluni, tomando el embalse Milluni Grande como punto de desemboque. La modelación hidrológica se realizó mediante la herramienta Water Evaluation and Planning System (WEAP) utilizando el ensamble de datos diarios de precipitación y temperatura generado a través de la herramienta Gridded Meteorological Ensemble Tool (GMET). Se incorporaron los escenarios de cambio climático empleando el Modelo 1 del Sistema Terrestre de Noruega NorESM1-M, reduciendo su escala mediante el método no paramétrico de vecinos más cercanos (knn-bootstrap). Se obtuvieron las siguientes tendencias para el periodo y área de estudio: incremento general de temperatura, incremento de precipitación en época seca y reducción de precipitación en época húmeda, lo cual puede generar situaciones de sequía. Por otra parte, el caudal de entrada al embalse Milluni Grande tiene tendencia a variar de forma directamente proporcional a la precipitación, mientras que su volumen tiene tendencia a reducirse. Asimismo, puede existir un déficit en la cobertura de los requerimientos de los sitios de demanda, llegando a valores mínimos de 45% para el sistema de distribución Achachicala y 27% para el sistema Meseta. Todos los resultados son acentuados en el escenario pesimista RCP 8.5.

**Palabras Clave:** Cambio Climático, Modelación Hidrológica, Seguridad Hídrica, Herramienta WEAP.

#### ABSTRACT

The Milluni Grande reservoir depends mainly on precipitation, being vulnerable to drought periods, which may affect the water security among La Paz and El Alto cities. Therefore, the present study sought to determine the variation of water available in the reservoir under the set of climate change scenarios established on the fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for the period 2022-2090. The study area was limited to the Milluni microbasin, taking the Milluni Grande reservoir as the outlet point. The hydrological modelling was performed through the Water Evaluation and Planning System (WEAP) using the temperature and precipitation daily data ensemble generated with the Gridded Meteorological Ensemble Tool (GMET). Climate change scenarios were incorporated using the Model 1 of Norway Land System NorESM1-M, reducing its scale through the nearest neighbor non-parametric method (knn-bootstrap). The following tendencies were obtained for the study period and area: overall temperature rise, precipitation rise during the dry seasons and precipitation reduction during the wet seasons, which might cause drought situations. On the other hand, the Milluni Grande inlet flow tends to vary proportionally to the precipitation, while its volume tends to decrease. In addition, a deficit in the coverage of the requirements of demand sites might exist, reaching minimum values of 45% for the Achachicala distribution system and 27% for the Meseta system. All results are accentuated in the pessimistic scenario RCP 8.5.

**Keywords:** Climate Change, Hydrologic Modeling, Water Security, WEAP Tool.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático acentúa el retroceso de glaciares, la variación de precipitación y los fenómenos del Niño y Niña, los cuales son factores que incrementan la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de las ciudades de La Paz y El Alto [1]. Ambos centros urbanos obtienen el servicio de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS) a través de cuatro sistemas de distribución de agua. Los sistemas Achachicala y Meseta, los cuales abastecen a aproximadamente un millón de personas de ambas ciudades, obtienen una fracción de agua de la microcuenca Milluni mediante un sistema de aducción en el embalse Milluni Grande y una estación de bombeo en la laguna de Jankho Khota [2].

La vulnerabilidad de la microcuenca Milluni es atribuida principalmente a la contaminación por drenajes ácidos de mina, intervenciones humanas y periodos de sequía [1]. En cuanto a los dos primeros factores, esta microcuenca ha sido espacio de desarrollo de la minería del estaño durante el periodo 1920-1986, desde entonces los pasivos ambientales contaminan la laguna Milluni Chico y el embalse Milluni Grande [3]. Se ha detectado la presencia de al menos 13 metales pesados, de los cuales el Arsénico, Cadmio, Hierro, Manganeso y Zinc sobrepasan los límites permisibles del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica; así también, la conductividad alcanza valores por sobre los  $2\ 300\ \mu S/cm$  y el pH llega a valores menores a 3 [4]. Ante esta situación, se añade cal y sulfato de aluminio para neutralizar el agua y reducir la concentración de los metales, como parte del tratamiento para su distribución a la población [1], sin embargo, hasta la fecha no se ejecutan acciones concretas y sostenibles de remediación de los pasivos.

Por otra parte, la vulnerabilidad de la microcuenca ante periodos de sequía se atribuye a que la precipitación y el coeficiente de escorrentía controlan la mayor parte del agua producida en su área de captación [5], mientras que el glaciar Huayna Potosí le aporta solamente el 8% de su derretimiento [6]. Tanto la precipitación como la temperatura son determinantes del clima y su proyección futura difiere según la región de estudio, el escenario de cambio climático y modelo de sistema climático aplicado [7]. Varios estudios en la zona de los Andes y altiplano presentan ambigüedad sobre las tendencias de precipitación futura en la región, sin embargo, se han modelado cambios en situaciones extremas, como lluvias severas y situaciones de sequía, y existe consistencia en la tendencia al incremento de temperaturas [8].

Por lo tanto, en el marco de la planificación del uso de recursos hídricos, es necesario continuar con la investigación sobre los efectos del cambio climático sobre las cuencas de abastecimiento de agua, siendo el caso de la microcuenca Milluni a través del embalse Milluni grande, ya que este cuenta con el sistema de aducción de agua. Es así que el presente estudio tiene el objetivo de determinar la variación de la cantidad de agua disponible en el embalse Milluni Grande bajo el set de escenarios de cambio climático establecidos en el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para el periodo 2022-2090. Para tal efecto, se considerarán las tendencias futuras de temperatura y precipitación en el área de estudio, su influencia en el caudal de entrada y el volumen del embalse, además de proyecciones de cobertura de la demanda para las ciudades de La Paz y El Alto.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca Milluni está ubicada al norte de la ciudad de La Paz, en cercanías del glaciar Huayna Potosí y es la cabecera de la Cuenca Katari. Está compuesta por un sistema de cuatro lagunas: Patha Khota, Jankho Khota, Milluni Chico y el embalse Milluni Grande. El área total de la microcuenca es de  $138.3\ km^2$  según la delimitación realizada por el Viceministerio de Recursos Hídricos en el marco del Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca [9], la cual incluye el trayecto del Río Seque (ver Figura 1). No obstante, en el presente estudio se optó por limitar el área total en el embalse Milluni Grande. Finalmente, el periodo de modelación histórica para la calibración del modelo fue de 1980 a 2015 y la modelación considerando escenarios climáticos fue realizada para el periodo 2022-2090.

## 3. METODOLOGÍA

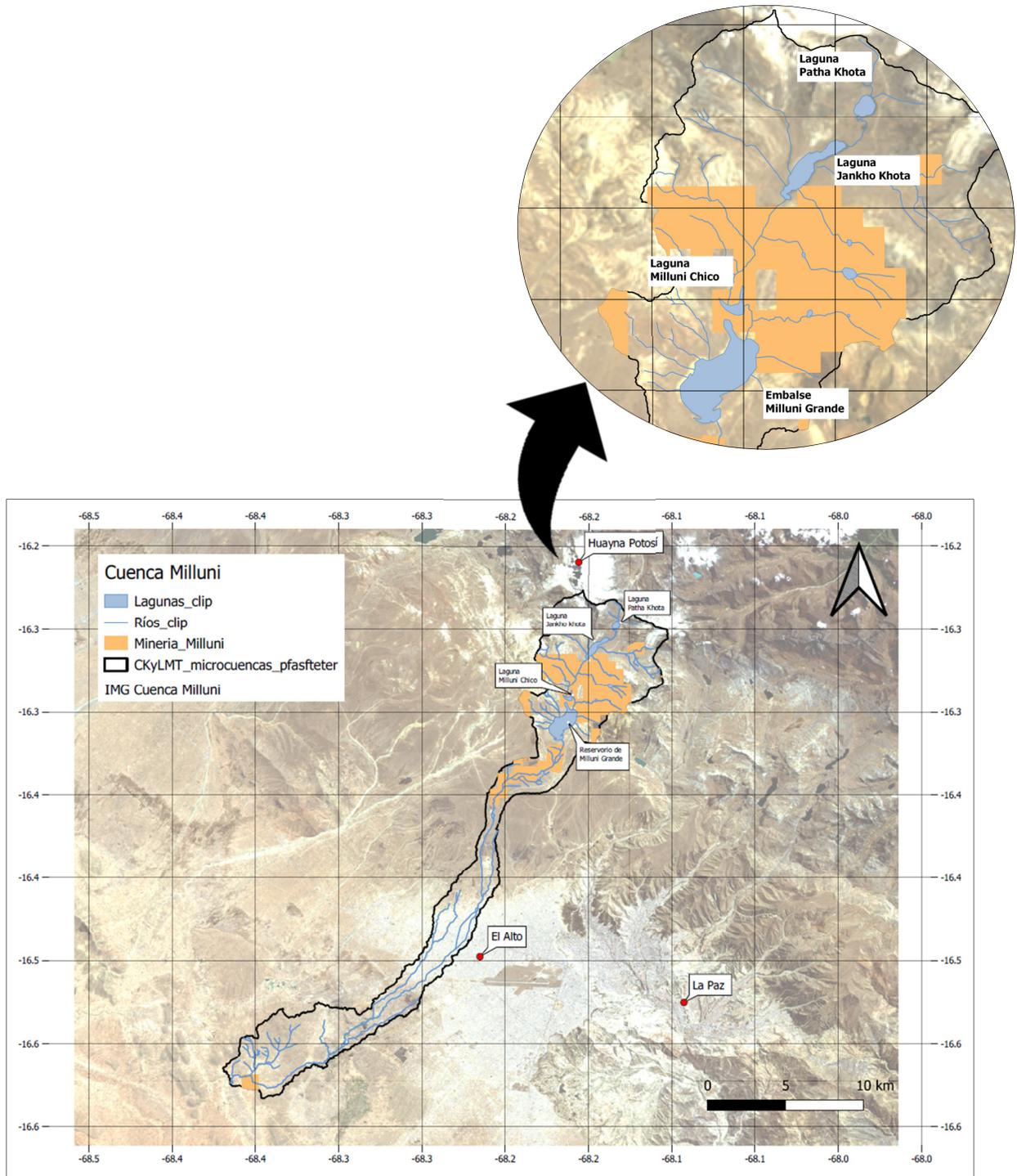
La ejecución del estudio se dividió en tres partes: i) modelación hidrológica de la microcuenca Milluni, ii) inclusión de los escenarios de cambio climático y iii) determinación de la cobertura de la demanda bajo los distintos escenarios futuros. Los pasos clave están descritos en la Figura 2.

### 3.1. Modelación hidrológica de la microcuenca Milluni

La modelación hidrológica de la microcuenca Milluni fue llevada a cabo utilizando la herramienta computacional Water Evaluation and Planning (WEAP) desarrollada por el Stockholm Environment Institute (SEI), la cual permite una modelación de naturaleza física unidimensional que puede utilizarse a distintos pasos de tiempo [6]. En primera instancia, se esquematizó el área de estudio, delimitando la microcuenca Milluni y añadiendo los elementos: embalse de Milluni Grande y sitios de demanda La Paz y El Alto (ver Figura 3). Posteriormente se obtuvieron y procesaron datos de uso de suelo, clima, sitios de demanda y del embalse Milluni Grande, utilizados en la configuración del modelo.

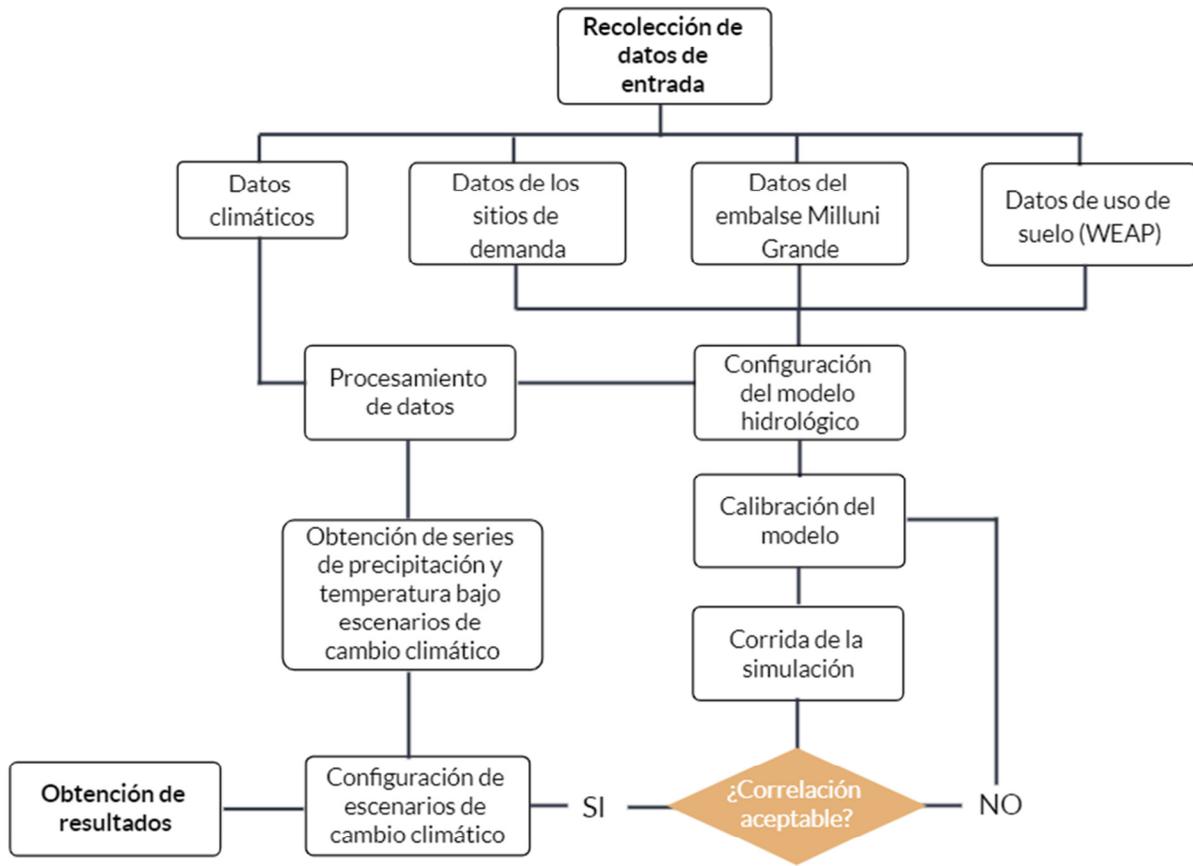
WEAP posee una extensa base de datos de la Iniciativa de Cobertura de Suelo para el Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA-CCI-LC), con la cual las áreas cubiertas por cada tipo de suelo se estiman automáticamente (ver Tabla 1). Tanto para la configuración del modelo como para su calibración se modificaron los parámetros de uso de suelo únicamente para las categorías de pradera, matorral y vegetación dispersa, al ser las que más porcentaje de cobertura tienen en el área de estudio. En la configuración inicial del modelo se utilizaron como parámetros de

referencia, para las categorías mencionadas, aquellos establecidos en Escobar *et al.* [6] para la región paceña de los Andes, mientras que las demás categorías se mantuvieron con los valores que WEAP asigna por defecto (ver Tabla 1).

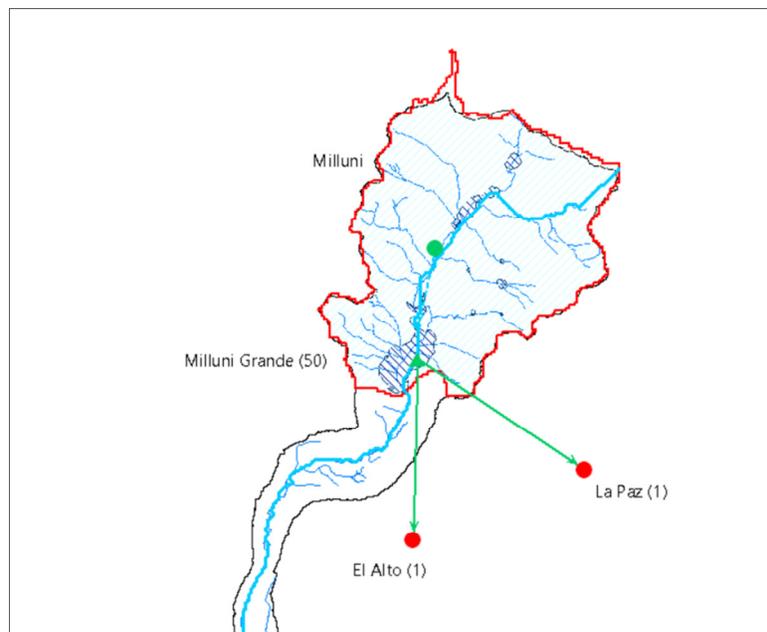


**Figura 1:** Área de estudio, microcuenca Milluni y concesiones mineras.

**Fuente:** Elaboración propia en base a catálogo GEOBOLIVIA e imagen satelital de LANDSAT 8.



**Figura 2:** Flujograma del procedimiento.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3:** Delimitación y esquematización de la microcuenca Milluni en WEAP.  
**Fuente:** Elaboración propia.

**TABLA 1 – USO DE SUELO EN EL ÁREA DE ESTUDIO**

Categoría	Área (ha)	%
<b>Agricultura</b>	92	1.5
<b>Forestal</b>	21	0.3
<b>Pradera</b>	1412	23.2
<b>Urbano</b>	31	0.5
<b>Matorral</b>	2363	38.8
<b>Vegetación dispersa</b>	1361	22.3
<b>Agua</b>	310	5.1
<b>Nieve y hielo</b>	502	8.2

Fuente: Base de datos de Water Evaluation and Planning (WEAP).

En cuanto a los parámetros climáticos, las series de precipitación y temperatura utilizadas pertenecen a la grilla desarrollada con la herramienta Gridded Meteorological Ensemble Tool (GMET) en la elaboración del Balance Hídrico Superficial de Bolivia [10], la cual provee un ensamble de datos a paso de tiempo diario, basado en datos observados del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), que WEAP puede incorporar para el área de estudio. Por otro lado, la humedad relativa, velocidad del viento y duración solar relativa fueron obtenidos en base a datos de las estaciones meteorológicas El Alto-Aeropuerto, Viacha y Chacaltaya. Haciendo uso del software ArcMap, se obtuvieron Polígonos de Thiessen determinando el área de influencia de cada estación, con lo cual se pudieron obtener los promedios mensuales multianuales para la humedad relativa, velocidad del viento e insolación. La duración solar relativa se calculó en base a los datos de insolación y la metodología FAO56 [11]. Finalmente, se utilizaron los valores que WEAP tiene por defecto para punto de congelamiento, punto de derretimiento y albedo.

En relación a los elementos del esquema en WEAP, los datos sobre los sitios de demanda incluyen niveles de actividad anual, tasa anual de uso de agua y pérdidas del sistema, los cuales fueron obtenidos de EPSAS [2] y del Instituto Nacional de Estadística (INE) [12]. En cuanto al embalse Milluni Grande, se cargaron sus datos físicos y de operación generados en Escobar *et al.* [6], de los cuales la evaporación neta fue recalculada usando los datos de precipitación de GMET. Finalmente, respecto a los enlaces de transmisión, los datos de pérdidas en canales de aducción, volumen y demanda máximos de flujo, fueron obtenidos de EPSAS [2].

El método seleccionado para la modelación hidrológica fue el de humedad del suelo, mediante el cual se configura un modelo unidimensional de 2 compartimentos basado en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial y sub-superficial y la percolación profunda para una unidad de cuenca [6]. Una vez configurado, el modelo hidrológico corrió a paso de tiempo mensual y fue establecido como escenario de referencia. Su calibración se realizó ajustando los parámetros de uso de suelo (ver Tabla 3), comparando la correlación de los datos observados vs simulados del caudal de entrada y el volumen del embalse Milluni Grande para los periodos 1994-2010 y 2000-2011 respectivamente.

### 3.2. Escenarios de cambio climático

La modelación hidrológica con incorporación de escenarios de cambio climático se realizó en tres etapas: i) reducción de escala del Modelo de Circulación Global (GCM) NorESM1-M, ii) generación de escenarios de cambio climático en WEAP y iii) corrida de la simulación.

El Modelo 1 del Sistema Terrestre de Noruega NorESM1-M del Norwegian Climate Centre fue el GCM empleado en el estudio, ya que reporta datos a escala global tanto para experimentos históricos en el periodo 1850-2005 como para experimentos futuros en el periodo 2006-2099, produciendo resultados para el proyecto Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), el cual incluye una combinación de las rutas representativas de concentración (RCPs) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 [13]. Los RCPs son escenarios que consideran las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes del aire y el cambio de uso de suelo, junto con un rango de diferentes situaciones tecnológicas, socioeconómicas y políticas que pueden conducir en el futuro a rutas de concentración particulares y, por ende, a ciertas magnitudes de cambio climático [14]. Sus principales características se señalan en la Tabla 2.

La reducción de escala del GCM fue realizada mediante el método de vecinos más cercanos (k-nn bootstrap), el cual desarrolla relaciones entre variables de circulación atmosférica de gran escala e información climática local, asociando las propiedades del cambio climático obtenidas a partir de las salidas de los GCMs a las condiciones meteorológicas locales [15]. Al ser k-nn bootstrap un método no paramétrico, permite construir series sintéticas a partir de observaciones históricas [16], simulando variables climáticas diarias, además de dependencias estacionales, temporales y espaciales, para una región dada, lo cual permite obtener conjuntos de datos climáticos condicionados a escenarios climáticos hipotéticos [17].

**TABLA 2 – PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS RCPs**

Característica	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
<b>Descripción</b>	Pico en el forzamiento radiativo a 3 W/m2 antes del 2100 y luego declina hasta llegar a 2.6 W/m2 el año 2100	Escenario de estabilización. El forzamiento se estabiliza en 4.5 W/m2 (~850 ppm CO2 eq) luego del año 2100	Escenario de estabilización. El forzamiento se estabiliza en 6 W/m2 (~850 ppm CO2 eq) luego del año 2100	Ruta incremental de forzamiento radiativo que conduce a 8.5 W/m2 (~1370 ppm CO2 eq) para el año 2100
<b>Emisión de gases de efecto invernadero</b>	Muy baja	Línea base muy baja, mitigación media-baja	Línea base media, mitigación alta	Línea base alta
<b>Contaminación del aire</b>	Media-baja	Media	Media	Media-alta

Fuente: van Vuuren *et al.* [14]

Es así que el downscaling para el área de estudio fue realizado empleando el método knn-bootstrap mediante un programa ejecutado en el Integrated Development Environment (IDE) RStudio, utilizando el ensamble de datos diarios de temperatura y precipitación obtenidos con GMET, como datos históricos, y la información de los escenarios de cambio climático del NorESM1-M. De esta forma se obtuvieron series de precipitación y temperatura para el periodo futuro 2022-2090, los cuales fueron incluidos en el modelo hidrológico de la microcuenca Milluni en WEAP a través de la creación de nuevos escenarios, uno para cada RCP respectivamente. Finalmente se corrió la simulación a paso de tiempo mensual y se obtuvieron los datos futuros correspondientes al caudal de entrada y volumen del embalse Milluni Grande y a la cobertura de la demanda bajo los escenarios de cambio climático.

### 3.3. Cobertura de la demanda

WEAP posee a la cobertura de la demanda dentro de su colección de resultados, la cual se describe como el porcentaje de cobertura de los requerimientos de cada sitio de demanda, en un rango del 0% al 100%, considerando un ajuste por pérdidas del sitio de demanda, reutilización y ahorros. En el presente estudio, este porcentaje estaría referido a la satisfacción de la demanda de La Paz y El Alto, cuyos datos requeridos por WEAP se observan en la Tabla 3.

**TABLA 3 – DATOS DE ENTRADA SOBRE LOS SITIOS DE DEMANDA**

Sitio de demanda	Datos de demanda	
	Nivel de actividad anual demanda (personas)*	Tasa anual de uso de agua (m <sup>3</sup> /persona)
<b>La Paz</b>	GrowthFrom(0.98%, 2012, 211649)	43.39
<b>El Alto</b>	GrowthFrom(0.98%, 2012, 212950)	35.46

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE [12] y EPSAS [2].

(\*) El nivel de actividad anual es calculado automáticamente mediante un algoritmo de WEAP, en el cual los datos de entrada son: tasa de crecimiento, año del censo y valor inicial de la población abastecida por el sistema Achachicala/Meseta, respectivamente.

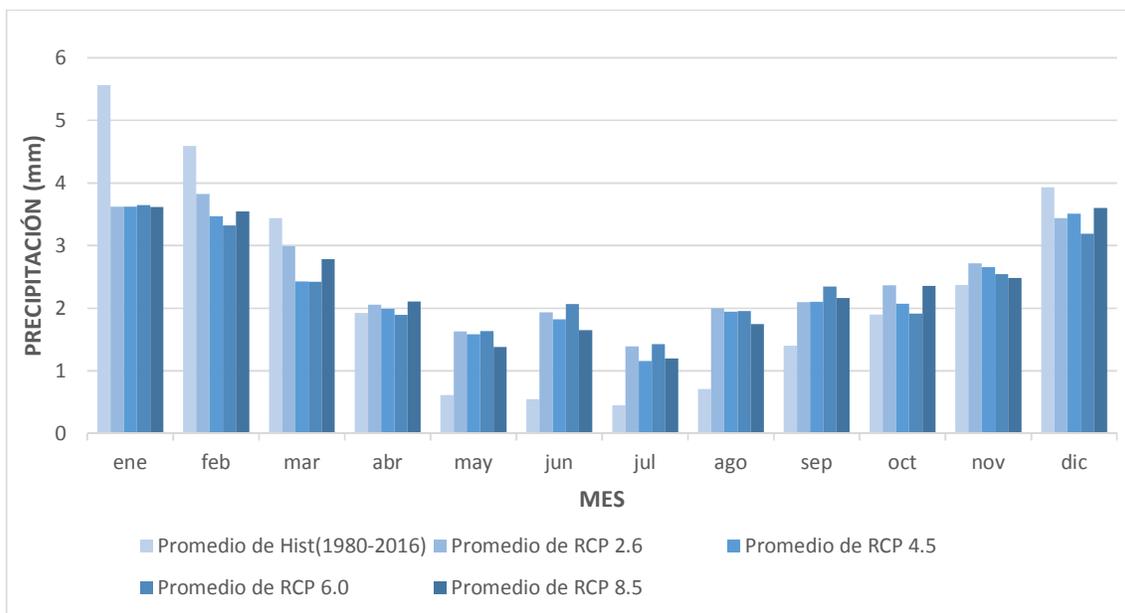
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Temperatura y precipitación bajo escenarios de cambio climático

La variación futura de la temperatura y precipitación en el área de estudio bajo los escenarios de cambio climático RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 del GCM NorESM1-M se ve reflejada en los promedios mensuales multianuales de precipitación (ver Figura 4) y los promedios mensuales multianuales de temperatura (ver Figura 5).

En la Figura 4, correspondiente a la variación de precipitación, se observa que, a comparación de los datos históricos del periodo 1980-2016, bajo todos los escenarios de cambio climático existe una disminución de la precipitación durante los principales meses de la época húmeda (diciembre-marzo), y un incremento durante los meses restantes (abril-noviembre). Por otro lado, en general los valores proyectados más altos se manifiestan en la época de lluvias (diciembre, enero y febrero) y los más bajos en la época seca (junio, julio, agosto). Este patrón se ve acentuado en el escenario más pesimista RCP 8.5, en el cual, en comparación con los otros escenarios, se alcanzan valores elevados de

precipitación en la época de lluvias y los valores más bajos en la época seca, llegando a un promedio mensual de 1.20 mm aproximadamente en julio.



**Figura 4:** Promedios mensuales multianuales de precipitación bajo escenarios de cambio climático y comparación con datos históricos (1980-2016).

**Fuente:** Elaboración propia.

La Cooperación Suiza en Bolivia [18] proyecta en la región norte del departamento de La Paz una reducción de precipitación del 1.1% para el mes de enero y 4.1% para Julio hasta el 2050. Asimismo, un estudio de cambio climático bajo los escenarios CMIP3 en la región altiplánica para el periodo 2020-2099 muestra una reducción porcentual de la precipitación en época seca, de hasta 39.96% en julio, y un incremento en la época húmeda, llegando hasta 10.42% en marzo, bajo los escenarios B1, A1B y A2 [19]. Por lo tanto, se ratifica que en la zona de los Andes y altiplano los resultados sobre proyecciones futuras de precipitación presentan ambigüedad, lo cual puede atribuirse a los diferentes escenarios de cambio climático, GCMs y métodos empleados. Aun así, la disminución de la precipitación proyectada durante la época húmeda puede generar situaciones de sequía en la microcuenca Milluni.

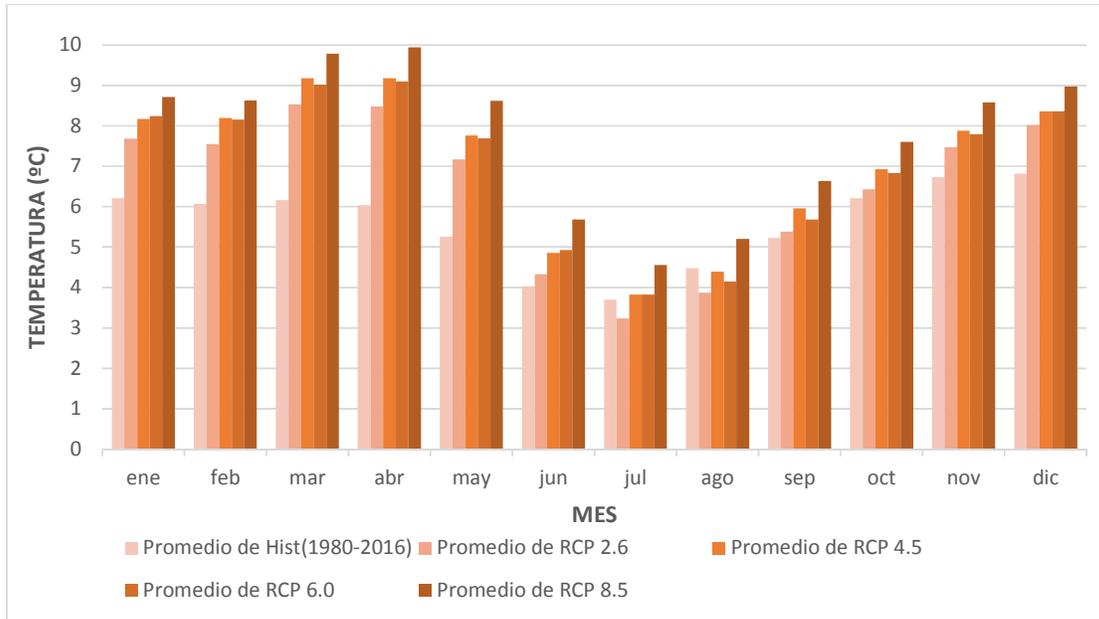
Por otro lado, en la Figura 5 que corresponde a la variación de temperatura, se observa un incremento de temperatura en todos los escenarios de cambio climático respecto a los datos históricos, especialmente en los promedios mensuales para el periodo enero-mayo, donde la diferencia entre los promedios históricos y el escenario optimista RCP 2.5 es de 1.5°C aprox., mientras que en relación al escenario pesimista RCP 8.5 es de 2.5°C aprox. Por lo tanto, es evidente un incremento de temperatura proporcional a la gravedad del escenario de cambio climático, es decir, los valores más elevados en cada mes corresponden al escenario pesimista RCP 8.5, llegando a un promedio máximo de 9.94°C en abril. Por el contrario, en el escenario optimista RCP 2.6 se registran las temperaturas promedio más bajas en comparación con los demás escenarios, llegando a un promedio mínimo de 3.82°C en julio.

La Cooperación Suiza en Bolivia [18] proyecta incrementos sobre la temperatura mínima de 2.1°C en enero y de 2.7°C en julio, así como incrementos sobre la temperatura máxima de 2.2°C en enero y 2.7°C en julio para la región norte del departamento de la Paz hasta el 2050. Por otra parte, según un estudio sobre los rangos probables de cambio climático en Bolivia [20], los cambios en las temperaturas medias mensuales considerando los escenarios B1, RCP 4.5, A1B, A2 y RCP 8.5 para el periodo 2070-2099 se encuentran en el rango de 2°C – 6°C y se acentúan durante la época seca, además, su incremento coincide con los cambios en las concentraciones de CO<sub>2</sub> que consideran los diferentes escenarios. Por lo tanto, se considera que la temperatura tiende a incrementarse para la microcuenca Milluni en valores dependientes del escenario de cambio climático considerado.

#### 4.2. Calibración del modelo hidrológico en WEAP

Los valores de parámetros de uso de suelo ajustados para la calibración del modelo hidrológico se encuentran en la Tabla 4.

MEDINA



**Figura 5:** Promedios mensuales multianuales de temperatura bajo escenarios de cambio climático y comparación con datos históricos (1980-2016).

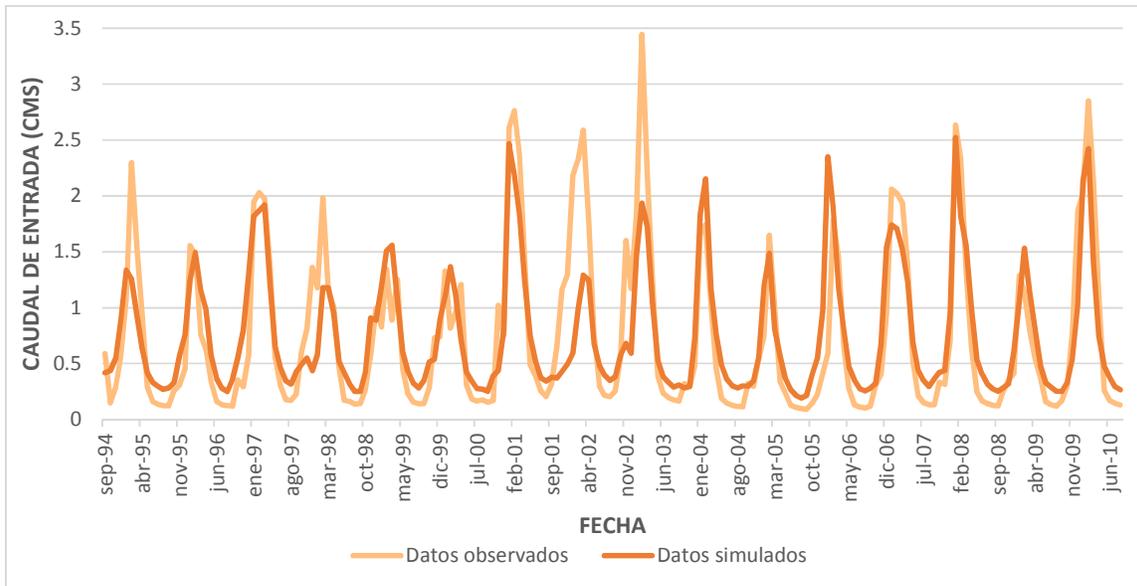
Fuente: Elaboración propia.

**TABLA 4 – DATOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO**

Parámetro (Uso de Suelo)	Valores por defecto (WEAP)	Valores en Escobar <i>et al.</i> [6]			Valores ajustados		
		Pradera	Matorral	Vegetación dispersa	Pradera	Matorral	Vegetación dispersa
Coefficiente de cultivo, Kc	1	0.90	0.90	0.95	0.90	0.90	0.95
Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces, Sw [mm]	1000	1000	800	500	300	300	200
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw [mm]	500	500	500	500	500	500	500
Factor de resistencia a la escorrentía, RRF	2	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10
Conductividad de zona de raíces, Ks [mm/mes]	20	400.50	400.50	400.50	300	400	300
Conductividad de zona profunda, Kd [mm/mes]	20	50	50	50	20	20	20
Dirección preferencial de flujo, f	0.15	0.30	0.70	0.90	0.30	0.70	0.90
Z1 [%]	30	10	10	10	45	48	46
Z2 [%]	30	30	30	30	57	57	57

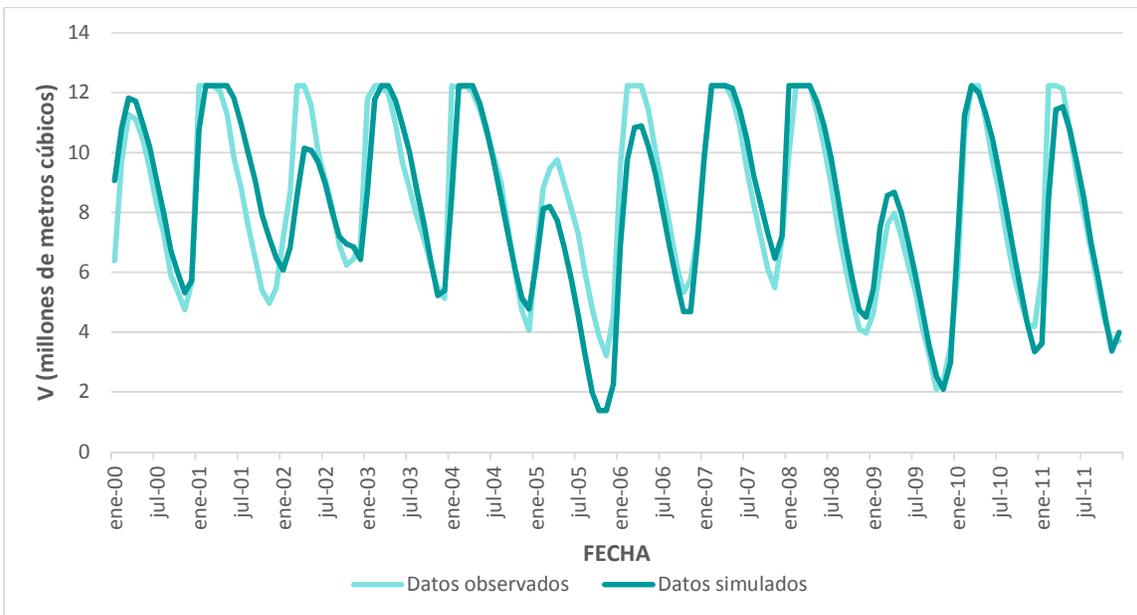
Fuente: Elaboración Propia en base a datos de WEAP y Escobar *et al.* [6].

Tanto la capacidad de almacenamiento en la zona de raíces ( $S_w$ ), como la conductividad de zona de raíces ( $K_s$ ), la conductividad en zona profunda ( $K_d$ ) y los parámetros  $Z_1$  y  $Z_2$  se modificaron respecto a los valores de referencia presentados en el estudio de Escobar *et al.* [6] para lograr un mejor ajuste de datos observados y simulados. Los coeficientes de correlación entre los datos simulados por el modelo y los datos observados son: 0.85 para el caudal de entrada y 0.91 para el volumen del embalse. La variación entre ambas series de datos se muestra en las Figuras 6 y 7.



**Figura 6:** Comparación de series de datos sintética y observada para el caudal de entrada al embalse Milluni durante el periodo 1994-2010.

Fuente: Elaboración Propia.



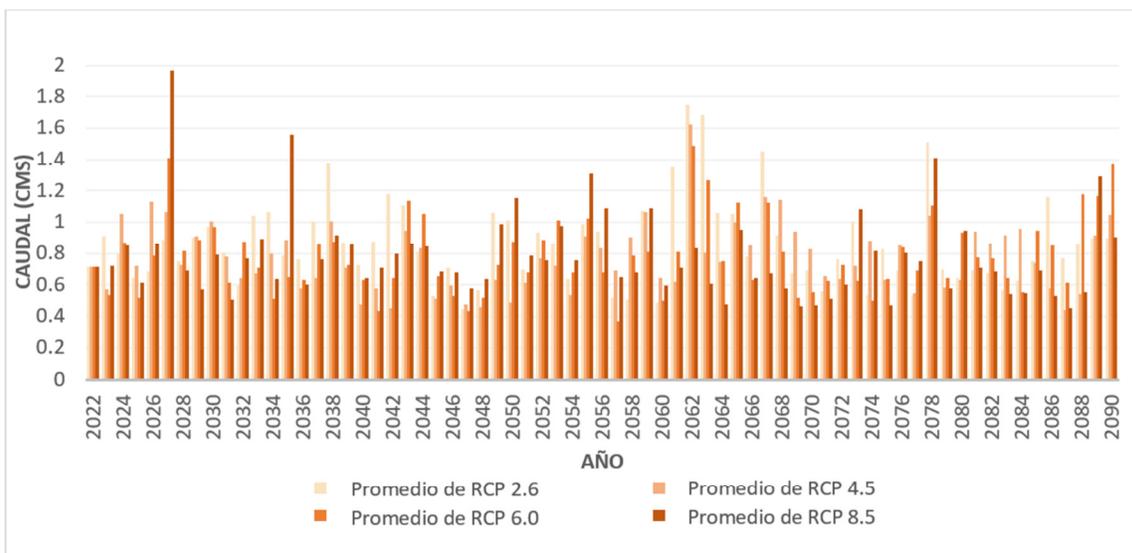
**Figura 7:** Comparación de series de datos sintética y observada para el volumen del embalse Milluni durante el periodo 2000-2011.

Fuente: Elaboración Propia.

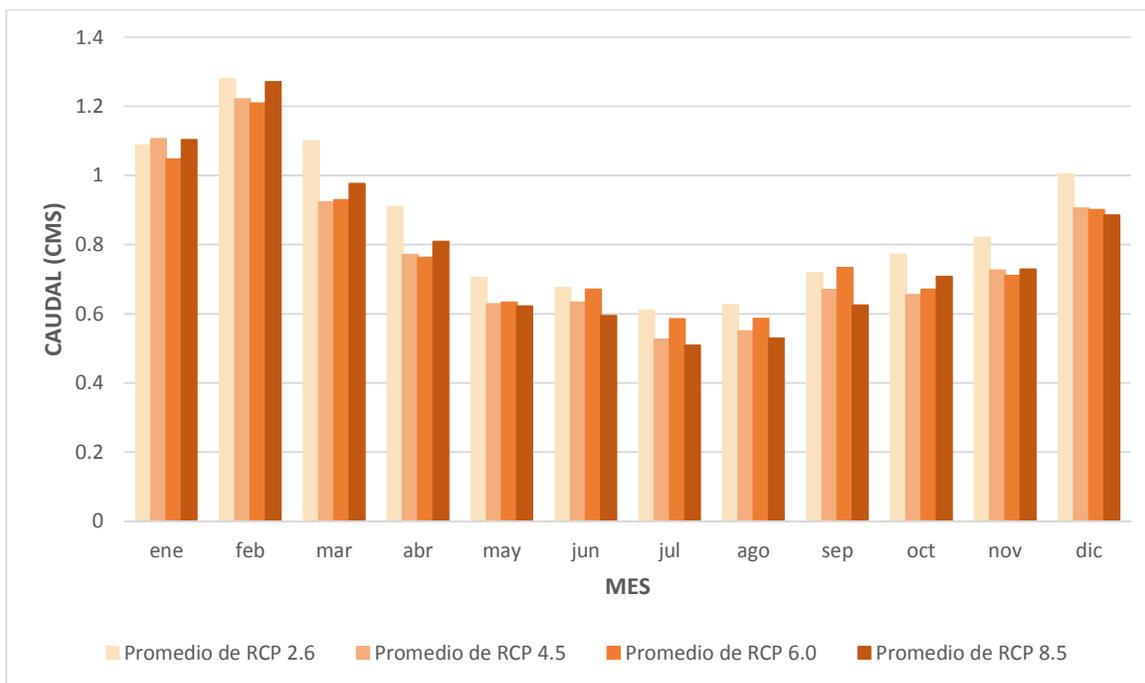
#### 4.3. Modelación hidrológica incorporando escenarios de cambio climático

La modelación hidrológica incorporando las series de temperatura y precipitación afectadas por los escenarios de cambio climático RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, muestra diferencias en el caudal de entrada y el volumen del embalse Milluni Grande. En cuanto a los caudales de entrada al embalse, en la Figura 8 se observa que presentan

periodos de valores bajos y altos independientemente del escenario de cambio climático y los extremos corresponden tanto al escenario optimista RCP 2.6 como al pesimista RCP 8.5. Por otra parte, en la Figura 9 se observa que los caudales más elevados corresponden al escenario optimista RCP 2.6 para todos los meses; mientras que el escenario pesimista RCP 8.5 muestra valores altos en los meses de enero y febrero, sin embargo, comienzan a descender en marzo y registra los caudales más bajos a partir de mayo.



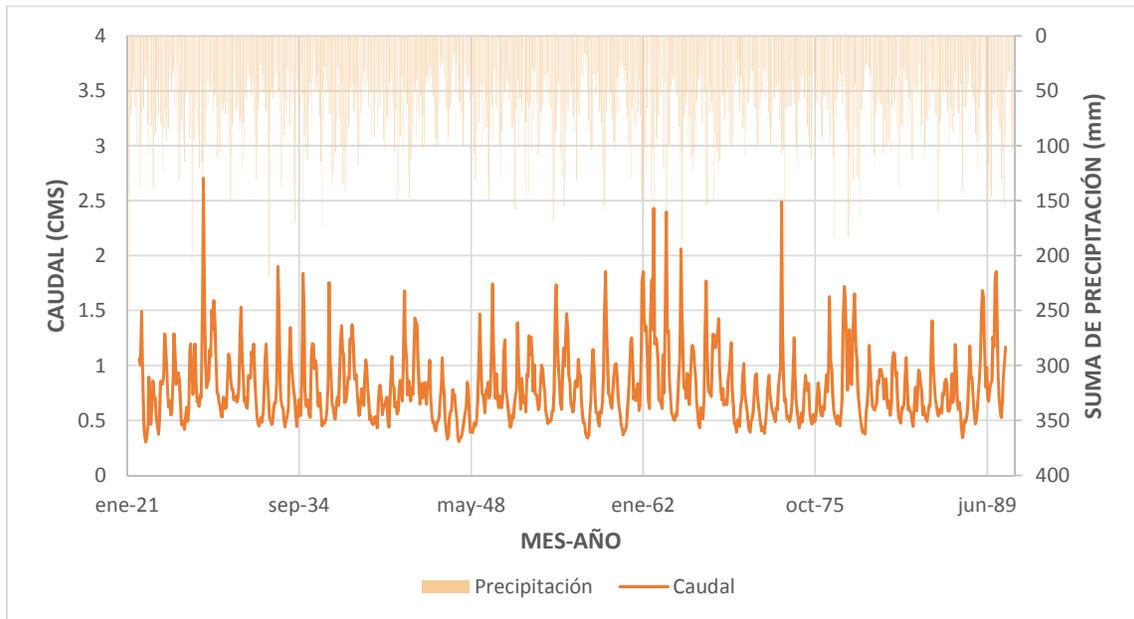
**Figura 8:** Caudales de entrada al embalse Milluni bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 9:** Promedios mensuales multianuales de caudales de entrada al embalse Milluni bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 10 puede observarse la relación entre el comportamiento de los valores promedio de caudal de entrada al embalse Milluni Grande y la precipitación en la microcuenca bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090. A partir del gráfico se puede establecer una relación de dependencia en la que, a mayor precipitación, el

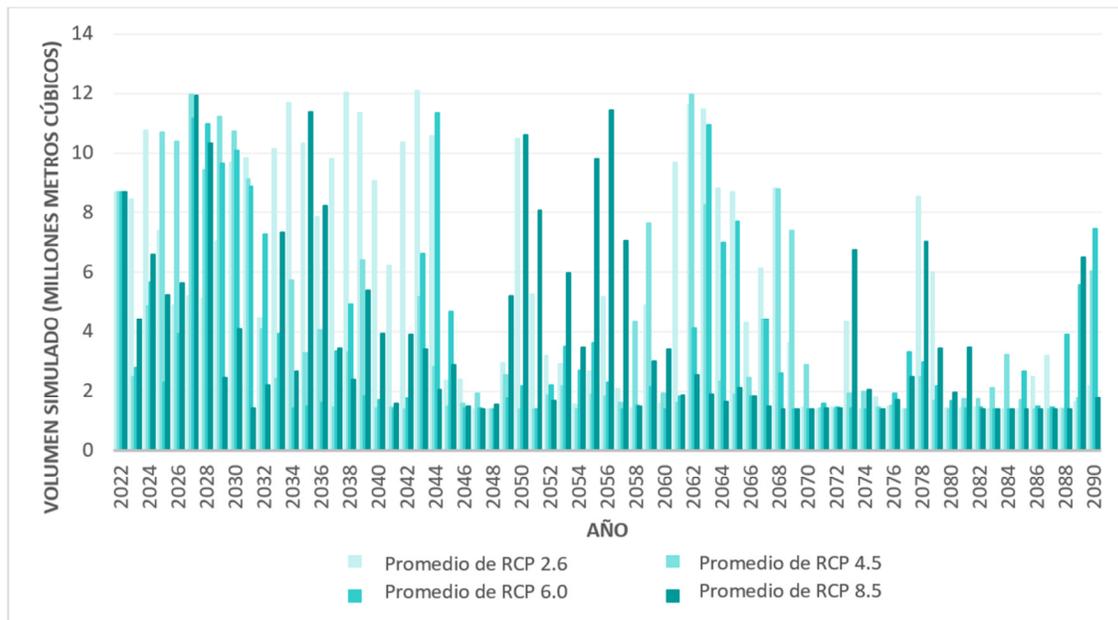
caudal se incrementa, y viceversa. Esto puede atribuirse al hecho de que la precipitación y el coeficiente de escorrentía controlan la mayor parte del agua producida en el área de captación [5].



**Figura 10:** Comportamiento promedio del caudal y precipitación bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Respecto al volumen del embalse Milluni, en la Figura 11 se observa que a partir del año 2045 se va consolidando un volumen inferior a los 2 millones m<sup>3</sup> de agua, así como que después del año 2063 el embalse no logra llenar su capacidad de 10 millones m<sup>3</sup>, e incluso, bajo el escenario pesimista RCP 8.5, el último año que el embalse logra superar los 10 millones m<sup>3</sup> es el 2056. Por otra parte, también es evidente una fluctuación de los valores según el periodo temporal y el escenario en consideración.

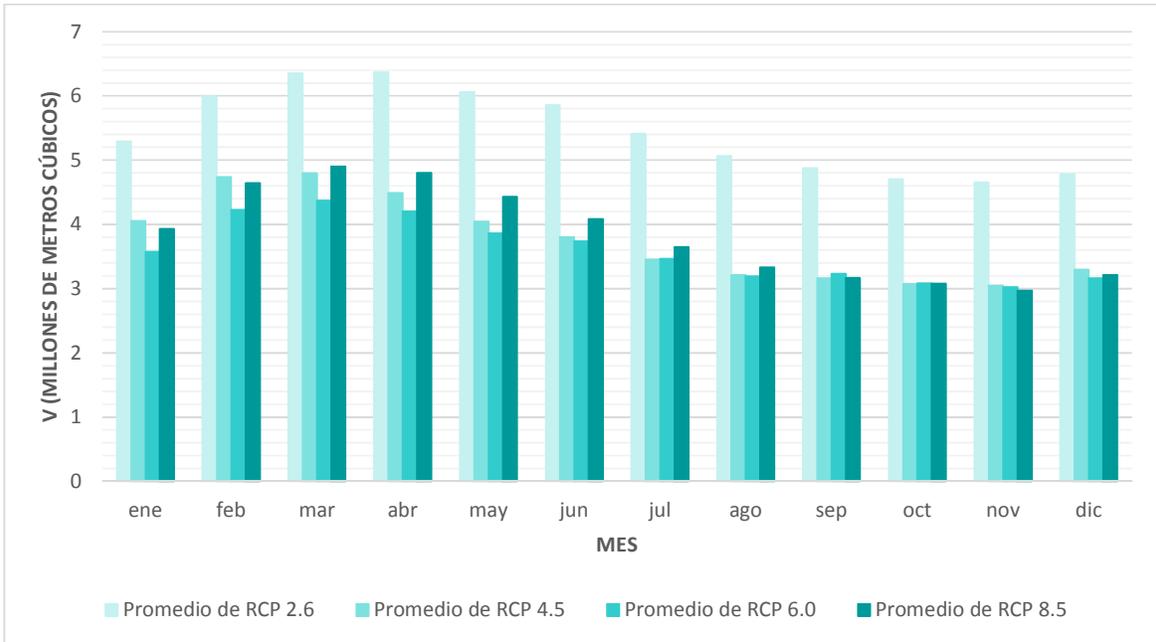


**Figura 11:** Volúmenes del embalse Milluni bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Finalmente, en la Figura 12 se observa que los valores promedio más elevados en todos los meses corresponden al escenario optimista RCP 2.6, cuyo rango es de 4.65 millones m<sup>3</sup> en noviembre a 6.37 millones m<sup>3</sup> en abril; mientras que

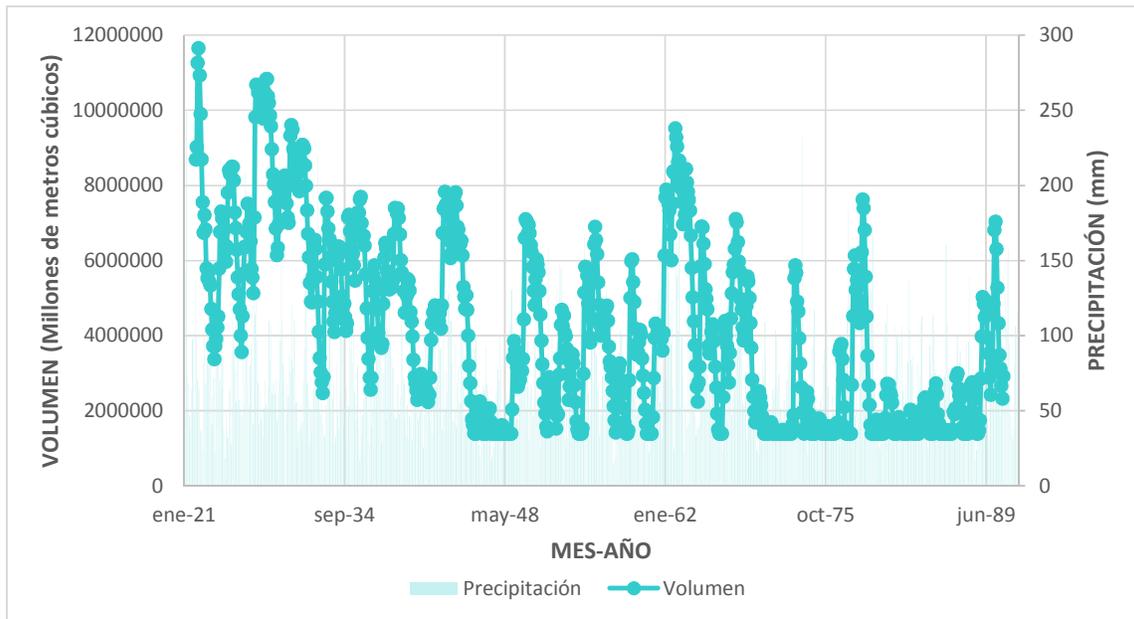
en los demás escenarios el volumen del embalse se mantiene por debajo de los 5 millones m<sup>3</sup> y llega a un mínimo de 2.97 millones m<sup>3</sup> en noviembre para el escenario RCP 8.5.



**Figura 12:** Promedios mensuales multianuales de volúmenes del embalse Milluni bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090.

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 13 muestra el comportamiento entre los valores promedio del volumen del embalse Milluni Grande y la precipitación en la microcuenca bajo los distintos escenarios de cambio climático. No se observa una relación de dependencia inmediata entre el volumen y la precipitación, de manera que probablemente más factores tengan influencia en el volumen de agua retenido en el embalse.

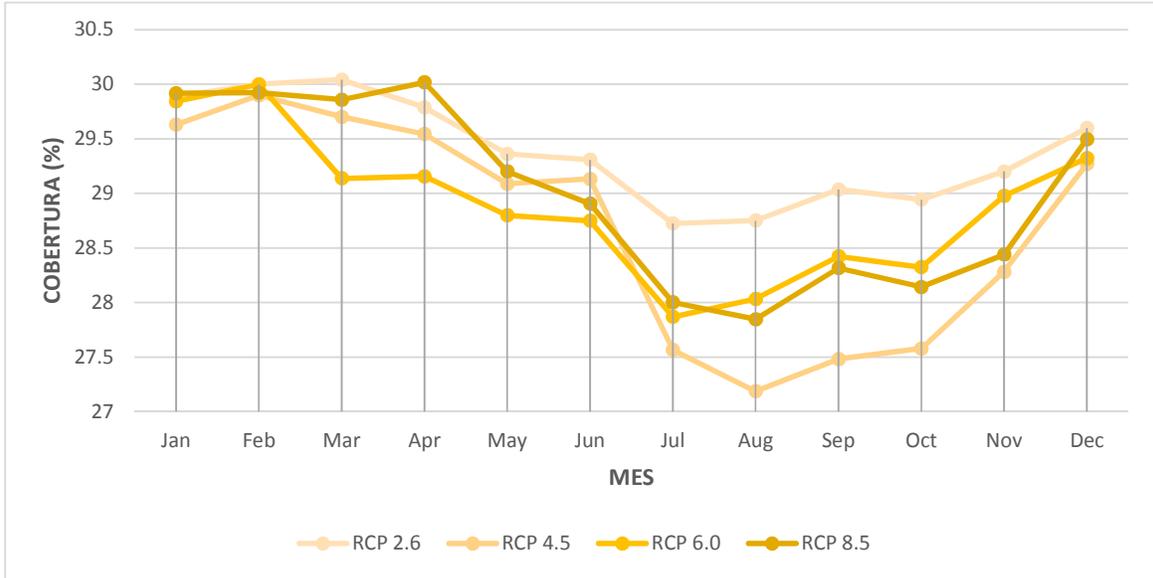


**Figura 13:** Comportamiento promedio del volumen y precipitación bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2022-2090.

Fuente: Elaboración Propia.

**4.4. Cobertura de la demanda**

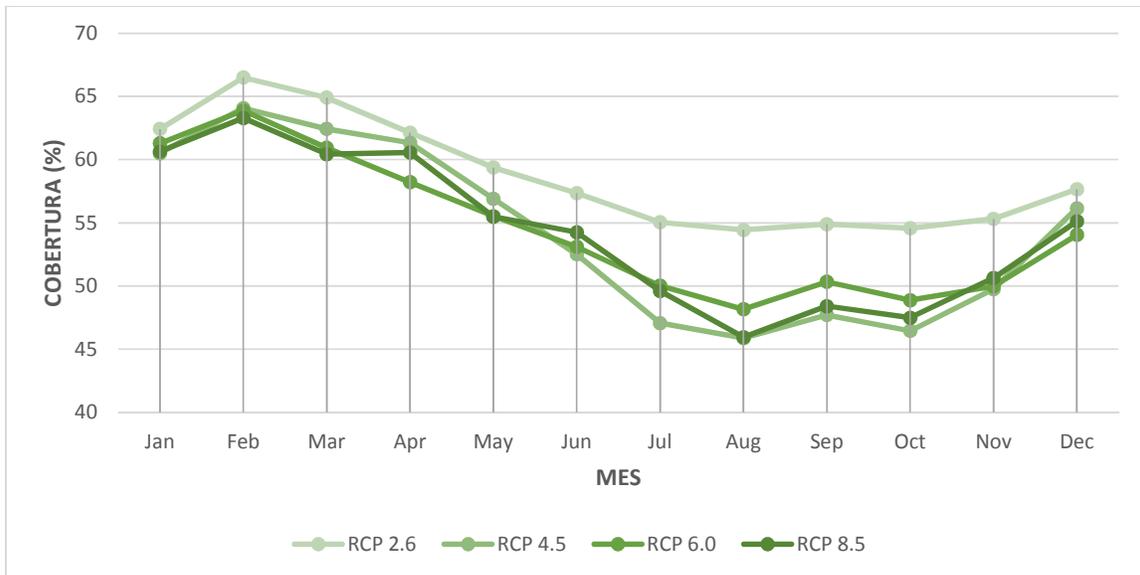
Los porcentajes de cobertura de los requerimientos futuros de los sitios de demanda se muestran a continuación, tomando en cuenta solamente el aporte del embalse Milluni y no así de la laguna Jankho Khota. En la Figura 14 se observa que la cobertura promedio de los requerimientos de demanda de El Alto por parte del embalse Milluni a través del sistema Meseta está por debajo del 35% de la demanda total. Su aporte al sistema Meseta es mayor durante la época húmeda que en la época seca. Así mismo, se observa que bajo el escenario optimista RCP 2.6 la cobertura se mantiene por encima del 28.72%, mientras que en el escenario RCP 4.5 se registra la cobertura más baja con un 27.19%.



**Figura 14:** Promedios mensuales multianuales de cobertura de los requerimientos de demanda para El Alto.

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, en la Figura 15 se observa que la cobertura promedio de los requerimientos de demanda de La Paz por parte del embalse Milluni a través del sistema Achachicala alcanza el 66%. De igual manera, su aporte al sistema Achachicala es mayor durante la época húmeda que en la época seca. Así también, se observa que bajo el escenario optimista RCP 2.6 la cobertura se mantiene por encima del 54.43%, mientras que en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 se registra la cobertura más baja con un 45.94%.



**Figura 15:** Promedios mensuales multianuales de cobertura de los requerimientos de demanda para La Paz.

Fuente: Elaboración Propia.

Considerando los datos expuestos en la Tabla 5, la oferta de la microcuenca Milluni ha satisfecho más del 70% de la demanda de agua en el periodo 2013-2017. Evidentemente, esta situación tiende a cambiar en el futuro, especialmente en el sistema Meseta. Sin embargo, es importante considerar que el sistema Meseta se abastece principalmente de la cuenca Tuni y que los resultados obtenidos hacen referencia solamente al embalse de Milluni Grande, y no así al aporte de la laguna Jankho Khota, por lo que el desabastecimiento por parte de Milluni podría ser compensado. Finalmente, cabe recalcar que, tanto para el Sistema Achachicala como para Meseta, la cobertura de la demanda reduce durante la época seca.

**TABLA 5 – OFERTA Y DEMANDA EN FUENTE HISTÓRICAS, MICROCUENCA MILLUNI**

Nº	Año	Oferta (hm <sup>3</sup> /año)	Demanda (hm <sup>3</sup> /año)	% satisfacción de demanda
1	2013	16.82	18.61	90.38
2	2014	16.80	17.86	94.06
3	2015	14.34	19.48	73.61
4	2016	14.32	17.28	82.87
5	2017	12.91	12.10	100

Fuente: EPSAS [2]

Según Driesen [21], la cobertura de la demanda por parte de la microcuenca Milluni es deficiente en escenarios de clima seco y crecimiento poblacional. Así también, según Escobar et al. [6], los cambios probables en la oferta de agua de la cuenca Milluni para el periodo 2035-2050 respecto al periodo de referencia 1995-2010 varían en un rango de -15% a 24% según el escenario de cambio climático considerado. Por otra parte, la microcuenca Milluni, considerando el embalse Milluni y la aducción Jankho Khota, produce agua aportando a la red de distribución según los valores mostrados en la Tabla 6. Por lo tanto, la microcuenca Milluni tiende a no abastecer agua suficiente para cubrir en su totalidad la demanda futura de agua potable de los sistemas Achachicala y Meseta, dependiendo del escenario de cambio climático considerado, siendo más vulnerable en situaciones de sequía.

**TABLA 6 – OFERTA DISPONIBILIDAD Y DEMANDA EN FUENTE HISTÓRICAS: MICROCUENCA MILLUNI**

Año	Año seco (hm <sup>3</sup> /año)	Año húmedo (hm <sup>3</sup> /año)	Promedio (hm <sup>3</sup> /año)
2011	8.51	37.17	22.84
2040	7.75	36.35	22.05

Fuente: EPSAS [2].

## 5. CONCLUSIONES

Se ha determinado la variación de la cantidad de agua disponible en el embalse Milluni Grande bajo el set de escenarios de cambio climático establecidos en el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para el periodo 2022-2090. Para tal efecto, se configuró un modelo hidrológico en la herramienta computacional Water Evaluation and Planning System (WEAP) utilizando el ensamble de datos diarios de precipitación y temperatura generado a través de la herramienta Gridded Meteorological Ensemble Tool (GMET). Se incorporaron los escenarios de cambio climático empleando el Modelo 1 del Sistema Terrestre de Noruega NorESM1-M, reduciendo su escala mediante el método no paramétrico de vecinos más cercanos (knn-bootstrap).

En cuanto a las proyecciones obtenidas para las variables climáticas, la tendencia de variación de precipitación para el periodo 2022-2090 en el área de estudio refleja una reducción de valores durante la época húmeda, lo cual puede conducir a situaciones de sequía, y un incremento durante la época seca. Por otra parte, la tendencia de variación de temperatura refleja un incremento de la temperatura para todos los meses del año, siendo mayor en el escenario pesimista RCP 8.5, y menor en el escenario optimista RCP 2.6.

Respecto a la variación de la cantidad de agua disponible en el embalse Milluni Grande, se obtuvo que los caudales de entrada al embalse Milluni Grande serán afectados principalmente por la variabilidad de la precipitación según el escenario de cambio climático, de manera que en el escenario pesimista RCP 8.5 existe una diferencia más acentuada entre los valores altos de la época húmeda y los caudales bajos de la época seca. El volumen del embalse Milluni Grande será afectado de forma secundaria por la variabilidad de la precipitación, debiendo considerarse otros factores adicionales, según el escenario de cambio climático. Los valores promedio más elevados para todos los meses del año corresponden al escenario optimista RCP 2.6, mientras que se verán valores mínimos en el escenario RCP 8.5.

Independientemente del escenario de cambio climático, el embalse Milluni Grande no llenará su capacidad de 10 millones m<sup>3</sup> de agua a partir del 2063.

En relación a la cobertura de la demanda futura, se obtuvo que el embalse Milluni, a través de los sistemas Meseta para la ciudad de El Alto y Achachicala para la ciudad de La Paz, no llegará a cubrir la demanda futura. Esto sin tomar en cuenta el aporte de la laguna Jankho Khota a la red, ni los futuros proyectos de EPSAS en la microcuenca. Por otra parte, se obtuvo que el aporte del embalse será el más alto durante la época húmeda y no así durante la época seca, siendo vulnerable a situaciones de sequía. El escenario “pesimista” de cambio climático RCP 8.5 denota periodos de mayor estrés hídrico respecto al escenario “optimista” RCP 2.6.

Es importante continuar con la generación de información sobre el impacto del cambio climático sobre las fuentes de abastecimiento de agua en las áreas metropolitanas, a través de la colaboración entre centros de investigación, organismos de cooperación internacional, autoridades gubernamentales y empresas prestadoras de servicios de agua potable; realizando además la socialización de la información a través de plataformas interinstitucionales. De esta manera, se aportará a la planificación y gestión integral de recursos hídricos en el país.

## RECONOCIMIENTOS

Se reconoce y agradece al Ing. Nilo Lima por el apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto, en relación a la metodología de uso de la herramienta WEAP y datos de entrada para la modelación.

## REFERENCIAS

- [1] Institut de recherche pour le développement , «Horizon documentation,» [En línea]. Available: [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers16-12/010055130.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-12/010055130.pdf). [Último acceso: 04 05 2021].
- [2] Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento, «EPSAS,» 2018. [En línea]. Available: [http://www.epsas.com.bo/web/wp-content/uploads/2019/05/PDQ\\_2018.pdf](http://www.epsas.com.bo/web/wp-content/uploads/2019/05/PDQ_2018.pdf). [Último acceso: 04 05 2021].
- [3] O. Campanini, «Centro de Documentación e Información Bolivia,» 2017. [En línea]. Available: <https://cedib.org/wp-content/uploads/2017/08/agua-y-mineria-en-Bolivia.pdf>. [Último acceso: 04 05 2021].
- [4] Viceministerio de Recursos Hídricos, «Informe de monitoreo Cuenca Katari,» La Paz, 2017.
- [5] Á. Soruco, C. Vincent, A. Rabatel, B. Francou, E. Thibert, J. E. Sicart y T. Condom, «Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city,» *Annals of Glaciology*, vol. 56, n° 70, pp. 147-154, 2015.
- [6] M. Escobar, N. Lima, D. Purkey, D. Yates y L. Forni, «Modelación hidrológica y escenarios de Cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia,» *Aqua-LAC*, vol. 5, n° 2, pp. 23-34, 2013.
- [7] L. Andersen y L. C. Jemio, La dinámica del cambio climático en Bolivia, Fundación INESAD, 2015.
- [8] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Tras las huellas del cambio climático en Bolivia,» 2011.
- [9] Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, «Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca - Microcuencas Bolivia,» La Paz, 2018.
- [10] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, «Balance Hídrico Superficial de Bolivia,» La Paz, 2018.
- [11] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos».
- [12] Instituto Nacional de Estadística, «Estimaciones y proyecciones de población,» 2020.
- [13] M. Bentsen, I. Bethke, J. B. Debernard, T. Iversen, A. Kirkevåg, O. Seland, H. Drange, C. Roelandt, I. A. Seierstad, C. Hoese y J. E. Kristjánsson, «The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate,» *Geoscientific Model Development*, vol. 6, pp. 687-720, 2013.
- [14] D. van Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. Smith y S. Rose, «The representative concentration pathways: an overview,» *Climatic Change*, vol. 109, pp. 5-31, 2011.
- [15] S. Gangopadhyay y M. Clark, «Statistical downscaling using K-nearest neighbors,» *Water Resources Research*, vol. 41, 2005.
- [16] Stockholm Environment Institute, «Modelación estratégica de la cuenca del Río Rocha,» Cochabamba, 2018.
- [17] D. Yates, «A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm,» *Water Resources Research*, vol. 39, n° 7, 2003.

- [18] Cooperación Suiza en Bolivia, «Eventos extremos a partir de escenarios climáticos: Análisis en municipios rurales de Bolivia - zonas andinas y valles,» 2014.
- [19] J. M. Thibeault, A. Seth y M. García, «Changing climate in the Bolivian Altiplano: CMIP3 projections for temperature and precipitation,» *Journal Of Geophysical Research*, vol. 115, 2010.
- [20] C. Seiler, R. W. Hutjes y P. Kabat, «Likely Ranges of Climate Change in Bolivia,» *American Meteorological Society*, vol. 52, pp. 1303-1317, 2013.
- [21] K. Driesen, «Contamination of surface waters by the former mining industry in the Milluni Valley (Cordillera Real, Bolivia) and the application of the water planning model WEAP,» 2012.