ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of
ZBW
Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Copana Paucara, Carlos Felipe

Working Paper

Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua y los recursos hídricos en Bolivia: Pronóstico para el 2030

Documento de Trabajo, No. 05/18

Provided in Cooperation with:
Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC), Universidad Católica Boliviana

Suggested Citation: Copana Paucara, Carlos Felipe (2018) : Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua y los recursos hídricos en Bolivia: Pronóstico para el 2030, Documento de Trabajo, No. 05/18, Universidad Católica Boliviana, Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC), La Paz

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/204290

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Documento de Trabajo IISEC-UCB No. 05/18, Octubre 2018

Efectos del Cambio Climático sobre la Disponibilidad de Agua y los Recursos Hídricos en Bolivia: Pronóstico para el 2030

Carlos Felipe Copana Paucara
Universidad Católica Boliviana "San Pablo"

Octubre de 2018

Este trabajo de investigación fue realizado en el marco del convenio institucional entre el Instituto de Investigaciones Socio Económicas de la Universidad Católica Boliviana San Pablo y Hanns Seidel Stiftung.

Documento online: http://www.iisec.ucb.edu.bo/index.php/publicaciones-documentos-de-trabajo-iisec-bolivia

Documento de Trabajo IISEC-UCB No. 05/18, Octubre 2018

Efectos del Cambio Climático sobre la Disponibilidad de Agua y los Recursos Hídricos en Bolivia: Pronóstico para el 2030

Carlos Felipe Copana Paucara
Universidad Católica Boliviana "San Pablo"

Octubre de 2018

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la variación de la oferta hídrica bajo dos escenarios de cambio climático y consecuentemente la disponibilidad de agua para el año 2030 en 127 subcuencas hidrográficas de Bolivia. La disponibilidad de agua es evaluada mediante la construcción del índice de escasez, en base a 4 escenarios planteados. Todo el análisis fue realizado a través de un enfoque de cuencas hidrográficas aplicado por el método de humedad del suelo. Esta aproximación muestra que la oferta hídrica para el año 2030 tiene un comportamiento heterogéneo por subcuenca y que existe el riesgo de escasez de agua para unidades hidrológicas de la cuenca del Pilcomayo y del Altiplano.

Palabras Clave: *Water Security, Cambio Climático, Índice de Escasez, Cuenca Hidrográfica*

Clasificación JEL: Q54, Q25, O54.

ABSTRACT

The present work evaluates the variation of the water supply under two scenarios of climate change, and the water availability for the year 2030 in 127 hydrographic sub-basins of Bolivia. The water availability is analyzed by building the scarcity index, based on 4 scenarios. All the analysis will be carried out through a watershed approach carried out by the soil moisture method. This approximation shows that the water supply for 2030 will have a heterogeneous behavior by sub-basin and that there is a risk of water scarcity for hydrological units of the Pilcomayo and Altiplano basins.

Key Words: Water Security, Climate Change, Scarcity Index, Hydrographic Basin

AGRADECIMIENTOS

El presente documento fue posible gracias al Instituto de Investigaciones Socioeconómicas de la Universidad Católica Boliviana "San Pablo" (IISEC) y a la Fundación Hanns-Seidel por su apoyo mediante la beca IISEC-Hanns Seidel para la realización de éste documento de investigación. Además, mi persona le debe un especial agradecimiento al Ing. Gustavo Ayala, quien me brindó su profunda colaboración en los conceptos de hidrología y manejo del software WEAP, junto con su excelente guía en la realización de esta investigación. Finalmente, agradezco a la Dra. Fernanda Wanderley, por su orientación en las metodologías de investigación y su paciencia en la presentación de este documento de trabajo.

1. Introducción

En Bolivia la disponibilidad de recursos hídricos está continuamente distorsionada por fenómenos climáticos como son el Niño y la Niña pero también por la inadecuada gestión del recurso. Estos factores contribuyen con sequías, inundaciones, escasez y distribución heterogénea a la sociedad boliviana. La repercusión de estos factores en la economía es significativa debido a que Bolivia es un país agrícola y la economía rural del país depende del recurso hídrico, como también la relación con la salud y el crecimiento económico. Esta es la razón por la que es necesario aplicar estrategias para mitigar los efectos de estos factores en la sociedad boliviana, cuyos conceptos están ligados al de Desarrollo Sostenible, por lo que hace necesario realizar el nexo entre desarrollo sostenible y recursos hídricos.

El concepto de Desarrollo Sostenible está basado en factores sociales, económicos y ambientales. Específicamente este término se define como el proceso de *"satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades"* (Comision del Desarrollo y Medio Ambiente citado en Ramirez *et al*, 2004). En este marco, el año 2015 la ONU planteó 17 objetivos que se deben cumplir hasta 2030. Entre algunos objetivos están:

- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
- Objetivo 2: Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.

Estos objetivos se encuentran en los lineamientos de la *seguridad del agua,* seguridad energética y seguridad alimentaria. Es por eso que el interés de este estudio es evaluar la disponibilidad de agua en el territorio boliviano a través de

los Índices de Escasez, en base a los objetivos de desarrollo sostenible para 2030, en dos escenarios de cambio climático y demanda. Para esto se toma como espacio representativo 127 subcuencas que abarcan todo el territorio Boliviano.

2. Estado del Arte y Estudios Previos

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció el 25 de septiembre de 2015 un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. El desarrollo sostenible es un concepto que engloba un gran número de variables para su definición como ser la salud y el bienestar, el acceso a agua limpia y saneamiento, energía asequible y no contaminante, acción por el clima, entre otros. Este concepto fue articulado en el Informe de Brundtland (1987), que planteó la importancia de introducir las dimensiones de los recursos naturales y el medio ambiente en la perspectiva de desarrollo. Es así que la noción de desarrollo debía ser formada a través de interdependencias de tres pilares conceptuales, el económico, el social y el ambiental (Economic and Social Commision for Western Asia [ESCWA], 2015). El proceso de construcción de esta concepción empezó después de la segunda guerra mundial, cuando ocurrió un largo periodo de crecimiento de las economías capitalistas, pero a la vez se tomaba conciencia de los impactos negativos sobre el medio ambiente. Específicamente, en el trabajo de Meadows *et al.* (1972) *The Limits of Growth,* se introduce la idea de que el agotamiento de los recursos naturales puede afectar a una economía al limitar sus capacidades para crecer. A partir de ahí, el medio ambiente y los recursos naturales ganaban terreno de a poco en los debates sobre desarrollo, hasta llegar a una conceptualización que se formalizó en el Informe de Brundtland.

Posteriormente, varias investigaciones en los objetivos relacionados al desarrollo sostenible fueron realizadas, sin embargo persistió el problema de integración de ciertos elementos de cada objetivo. Esta problemática tomó

relevancia después de la ocurrencia de las crisis globales relacionadas a la energía, alimentos y crisis financiera del 2008. Es por eso que después de estos acontecimientos, durante el proceso de la realización de la conferencia de desarrollo sostenible Rio+20 en el 2012, varios investigadores e instituciones plasmaron sus ideas para lograr los objetivos del desarrollo sostenible, concretamente en las áreas de seguridad del agua, energética y alimentaria.

Si bien a lo largo del siglo pasado el concepto de desarrollo sostenible y el buen manejo de recursos fue avanzando, en la década de 1990, surge un nuevo paradigma sobre uno de los recursos mencionados en los objetivos de desarrollo sostenible. Este es llamado *water security.* Hablar sobre la concepción de la seguridad de los recursos hídricos es controversial en diferentes perspectivas. Cook & Bakker (2012), realizan un debate sobre las diferentes perspectivas del concepto *water security* en la literatura. En la investigación se menciona que hay 4 temas interrelacionados con distintas definiciones sobre seguridad del agua. Estas son: la seguridad del agua en función a su disponibilidad, la vulnerabilidad humana a los riesgos, las necesidades humanas y la sostenibilidad. Este último, fue desarrollado por el *Global Water Partnership (GWP),* en el que se refiere a la seguridad del agua como un concepto integrado, indicando que "*cada persona tiene acceso suficiente al agua limpia y saludable, a costos asequibles, para una vida productiva y asegurarse además de que el ambiente natural esté protegido" (GWP,* citado por Cook & Bakker, p. 97*).* Sin embargo, este término tiene la falencia de ser un concepto hacia el individuo, y no toma en cuenta sectores regionales. Además, es complicado plasmar en una investigación y aplicación empírica dicha definición. Otro grupo de investigadores canadienses la define como *''acceso sostenible, en cuencas hidrográficas, a un nivel adecuado de cantidades de agua, de calidad aceptable, para garantizar salud del ecosistema* '' (Dunn y Bakker, 2009, p.11, Norman et al., 2010, p. 14). El ligado de los dos anteriores conceptos será importante para

definir el concepto de *water security* para cumplir la finalidad del presente estudio.

Uno de los trabajos en Bolivia es Ardene (2016), quien realizó un modelo holístico en las áreas de Energía, Agua y Tierra para Bolivia, donde se menciona que los problemas relacionados con la lluvia no afectarían al potencial hidroeléctrico del país, pero sí tendría efectos en la producción agrícola, especialmente en el departamento de La Paz y sus alrededores debido a la ocurrencia épocas secas y el fenómeno de derretimiento de los glaciares. Este último aspecto es importante para el presente estudio porque relaciona dos variables importantes que se verán más adelante: *Cambio Climático* y *Disponibilidad de Agua.*

El documento realizado por Calvo (2014) estudia cambios en la demanda hídrica a través de los resultados obtenidos de un modelo de equilibrio general realizado por Jemio y Andersen (2014) quienes describen los escenarios bases y calculan la demanda hídrica desde el 2008 a 2100. En el trabajo de Calvo (2014) se calculan índices de escasez para los años del 2008 y 2100, y realizan una comparativa entre los resultados. Se obtiene que la oferta hídrica disminuirá alrededor de 30% y en algunas áreas de tierras bajas se producirían aumentos de oferta. Este hecho de reducción de oferta pone en riesgo la disponibilidad de agua para Bolivia.

Escobar, Purkey & y Yates (2013) realizan un modelo de planificación hidrológica para el suministro de agua potable en la ciudad del El Alto y La Paz bajo la incertidumbre del cambio climático. Usan la herramienta WEAP y el modelo de Glaciares, donde encuentran que en el futuro podría sufrir serios problemas en el abastecimiento de debido al incremento de la demanda y la reducción de la oferta de agua por los cambios esperados en el clima futuro. Asimismo, el sistema Pampahasi también podría presentar problemas pero menos preocupantes que en el caso de El Alto.

3. Contexto Boliviano

Bolivia es uno de los países con más bajo nivel de desarrollo humano entre los países de Sudamérica. Sin embargo, respecto al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sustentable (ODS), Bolivia se encuentra en una buena situación respecto al promedio mundial.

Tabla 1. Comparación de indicadores de ODS entre Bolivia y el Mundo

Indicador	Global	Bolivia
Acceso a Electricidad.	83%	88%
Acceso a combustibles limpios.	59%	76%
Proporción de las energías renovables en el consumo.	18%	28%
Intensidad de la energía en la economía.	5,8 MJ/USD	6 MJ/USD
Acceso seguro a agua potable.	86%	90%
Porcentaje de Aguas residuales tratadas con seguridad.	72%	50%

Fuente. Comparación de indicadores de los ODS, obtenido de la International Energy Agency [IEA] (2015); World Bank [WB], (2016), citado por Ardene (2016).

Como se muestra en la tabla, Bolivia se encuentra por encima del promedio mundial de los indicadores para medir los ODS. Además, se prevé que para el 2030 Bolivia tendrá una mejora en estos indicadores.

En cuanto a Recursos Hídricos Bolivia tiene tres cuencas principales: Amazonas, la Plata y las cuencas endorreicas del Altiplano. Alrededor del 70% del territorio boliviano es cubierto por la cuenca del Amazonas que abarca la parte norte y central del territorio. El promedio de lluvia es de 1146 mm pero debido a la diferencia en las características topográficas en el país existen

precipitaciones que alcanzan los 2200 mm, y otras menores a 150 mm. De acuerdo a la FAO, se estima que el 92% de la extracción de agua es para riego mientras que el restante se divide en consumo residencial e industrial.

4. Metodología

4.1. Modelo de Humedad del Suelo del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua.

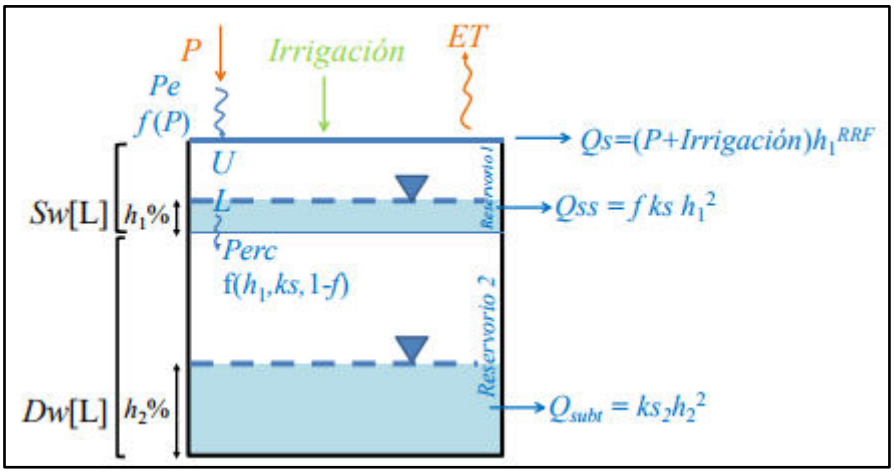
Este es un modelo semidistribuido en cuanto representa un sistema hidrológico a través de sistemas agregados conectados entre sí a un sistema global (VRHR, 2016). La estructura del modelo representa los procesos hidrológicos de evapotranspiración, escorrentía superficial y subsuperficial, infiltración y percolación profunda (Yates S., 1994). Este se basa en la ecuación del balance de masa representado de la siguiente manera (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005):

$$Sw_j \frac{dh_{1,j}}{dt} = Pe(t) - ET(t) - Qs(t) - Qss(t) - Qp(t)$$

Donde Swj es un estimado de la capacidad efectiva de almacenamiento de agua en el suelo para cada tipo de cobertura o uso de suelo (*j. hi,j*) representa, una fracción del total de almacenamiento efectivo en el reservorio 1 (más adelante se detallara este aspecto). Pe(t) es la precipitación en el periodo t, Et(t) representa la evapotranspiración, Qs es la escorrentía superficial, Qss es la escorrentia subsuperficial y Qp es la percolación profunda.

A continuación se muestra el modelo a través de un esquema:

Gráfico 1. Proceso Hidrológico Simulado



Fuente. Guía Metodológica
para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales (VRHR, 2016)

El anterior esquema es la representación más simple e ilustrativa del modelo. En este se puede observar la representación del suelo dividido en dos reservorios. Cada reservorio posee una capacidad de almacenamiento de agua Sw y Dw, efectiva y profunda respectivamente. Cuando el agua cae al suelo por precipitación, una parte se infiltra dentro del suelo, otra se evapora y cierta parte se convierte en escorrentía superficial que escurre hacia aguas superficiales. De la parte que se infiltra en el suelo, una fracción se acumula como humedad, y cuando satura su punto máximo de humedad (h1 y h2 para cada reservorio) el resto sale de los reservorios como escorrentia susbsuperficial y percolación profunda, la cual escurre hacia aguas subterráneas. Cuando la fracción de humedad es saturada, el agua sale con una conductividad ks y ks2, los cuales son parámetros que influyen en la escorrentía subsuperficial y percolación. Los mencionados parámetros y otros que intervienen en el proceso pueden ser determinados por el tipo de cobertura y textura del suelo, los cuales a su vez son el resultado de un trabajo de campo, o tomados como referencia de la literatura.

El proceso hidrológico mencionado en el esquema representa el punto base para calcular la oferta hídrica y otras variables hidrológicas. En el presente documento se usa el modelo para el cálculo de la oferta hídrica superficial y se lo hace a través del Software WEAP (Water Evaluation and Planning System) desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI, por sus siglas en ingles).

4.1.1. Datos.

Para el análisis de las 127 subcuencas de estudio se usa una serie de datos correspondientes a dos partes: Oferta Hídrica y Demanda Hídrica. Ambos son detallados a continuación:

Oferta Hídrica

Como se mencionó anteriormente, la oferta hídrica es estimada a través de la herramienta de modelaje WEAP, el cuál según el propósito y la extensión del trabajo que se quiera realizar puede demandar una gran cantidad de datos[1]. En el estudio realizado por Ardene (2016), se presenta una sugerente tabla de demanda de datos, la cual se muestra a continuación:

Tabla 2. Datos usados en el modelado de sistemas de Agua.

Categoría.	Descripción.
Variables Hidrológicas	Determinar el Tamaño de la Cuenca.
Medida de Corrientes de Agua	Para la Calibración
Variables Climáticas	Lluvia por cuenca.
Uso de la Tierra	Diferentes clases de uso de la tierra.

Fuente. Ardene (2016)

[1] Una completa lista de variables necesarias para el modelaje de sistemas de Agua puede encontrarse en Escobar & Vicuña (2009), donde realizan una guía metodológica sobre el uso del WEAP para modelos simples y complejos.

La delimitación de cuencas implica una demarcación de áreas de drenaje superficial en donde las precipitaciones que caen sobre éstas tienden a ser drenadas hacia un mismo punto de salida. Para este objetivo se usan mapas de elevación digital de un territorio para delimitar las cuencas, las cuales muestran la distribución de la altura del terreno en un plano de coordenadas. A través de estos modelos de elevación digital, se procesó dichos rasters mediante el software ArcGis, por la cual se pudo obtener características físicas de las cuencas y su respectiva delimitación.

Las variables climáticas fueron obtenidos a través del sistema de información SISMET del SENAMHI, para las variables de Precipitación, Temperatura Media, Humedad Relativa, Fracción de Nubosidad, Dirección y Velocidad del Viento, todas mensuales desde 1980 a 2016. Se realizaron pruebas de Homogeneidad y Consistencia, Persistencia y Estacionalidad, y Tendencia y Periodicidad. Estas pruebas se realizan para completar datos faltantes y eliminar el cambio en el error sistemático generado por la medición de estas variables climáticas mediante distintos instrumentos, o del cambio del lugar de las estaciones.

Por otra parte, se necesitó datos de Cobertura y Uso de la Tierra, las cuales fueron obtenidas del Sistema Único de Información de la Tierra SUNIT a escala 1:100000, para los años 2001 y 2010. Además, se necesitó mapas de Textura del Suelo, y esta información es encontró en la FAO, con su información digital de suelos a nivel mundial de 1995 a escala 1:5000000. Estos mapas fueron procesados en ArcGis para obtener cobertura y textura de suelo agregada y para cada subcuenca. Esta información fue contrastada con la literatura y de esa manera encontrar los parámetros hidrológicos del balance de masa. Específicamente, a partir de Soria (2016) y Gonzales (2016) se obtuvieron valores para cada cobertura y textura de suelo (ver anexo, Tabla 6).

Demanda Hídrica

En la parte de la demanda hídrica, se necesitaron datos para modelar las demandas de tres sectores: Residencia, Industrial y Agrícola. Para esta sección se tiene poca información sobre la extracción de agua desagregada y en distintos periodos del tiempo. Por lo tanto, se realizaron proyecciones muy generales desde el año 2010 al año 2030 de manera anual en base a supuestos que se detallan más adelante.

Se debe conocer que la demanda se obtuvo en millones de metros cúbicos, y que para cada sector se necesita calcular el Nivel de Actividad del sector y la Intensidad de Uso del Agua. El producto de ambas variables da como resultado la demanda del sector.

Para el sector residencial, el nivel de actividad representa la población para cada cuenca. Entonces se utilizó la proyección de población realizada por el Instituto Nacional de Estadística INE, y el mapa de localización de poblaciones 2016, elaborado por el INE y consensuado con la sección de cartografía del Instituto Geográfico Militar IGM. La intensidad fue obtenida en base a Calvo (2014) y Falkenmark & Widstrand (1992).

Para el sector industrial se usó la base de la FAO, Aquastat, para obtener la intensidad de uso. En cuanto al nivel de actividad, este se aproximó con el valor agregado del sector industrial proporcionada por el INE, y se proyectó en base a una tasa de crecimiento constante. Cabe notar que la intensidad para el sector industrial se la transformó en millones de metros cúbicos por cada 1000 bolivianos de valor agregado del sector industrial.

Finalmente, el nivel de actividad del sector agrícola es representada como hectáreas regadas por cuenca, para esto se usó el Inventario Nacional de Sistemas de Riego de los años 2000 y 2012, elaborados por el VRHR, y el mapa de municipios de 1993, puesta a disposición por GeoBolivia el 2012, y el Mapa de Localización de Proyectos de Riego elaborado el Viceministerio de Recurso

Hídircos y Riego. Para la intensidad se usó la base de Aquastat y la referencia de Calvo (2014).

4.2. Escenarios de Cambio Climático

Los escenarios de cambio climático utilizados en el presente estudio son el RCP2.6 y el RCP8.5. Estos son escenarios que describen trayectorias alternativas para las emisiones de dióxido de carbono y la concentración atmosférica resultante de 2000 a 2100. Abarcan el rango de posibles resultados de la política climática para el siglo XXI. A continuación, se describen estos dos escenarios en base al documento de Wayne, G.P. (2013)

4.2.1. Escenario RCP 2.6

Este escenario podría definirse como el mejor caso para limitar el cambio climático antropogénico. Requiere un cambio importante en las políticas climáticas y un comienzo para una acción concertada en los próximos años en todos los países, tanto en desarrollo como desarrollados.

La población mundial alcanza su punto máximo a mediados del siglo con poco más de 9 mil millones y el crecimiento económico mundial es alto. El uso de petróleo disminuye, pero el uso de otros combustibles fósiles aumenta y se compensa con la captura y almacenamiento de dióxido de carbono. El uso de biocombustibles es alto. La energía renovable crece, pero se mantiene en bajos niveles de uso. El área de cultivo aumenta más rápido que las tendencias actuales, mientras que el área de pastizales permanece constante. La cría de animales se hace más intensiva. La vegetación forestal sigue disminuyendo en las tendencias actuales.

4.2.2. Escenario RCP 8.5

Este es el escenario más pesimista en el que las emisiones continúan aumentando rápidamente a principios y mediados del siglo. Las concentraciones

de CO2 en la atmósfera se aceleran y alcanzan 950 ppm para 2100 y continúan aumentando durante otros 100 años. El crecimiento poblacional es alto, alcanzando los 12 mil millones al final del siglo. Esto está en el extremo superior de las proyecciones de la ONU. Este escenario es altamente intensivo en energía, con un consumo total que continúa creciendo a lo largo del siglo, llegando a más de 3 veces los niveles actuales. El carbón proporciona la mayor parte del gran aumento del consumo de energía.

Bajo estos dos escenarios se obtienen datos de variables climáticas a nivel regional. Las series proyectadas de distintas variables climáticas se encuentran en la página del *Climate Change, Agriculture and Food Security.* En base a esta fuente de información, se obtuvieron datos proyectados de 2015 a 2030 para la precipitación y temperatura media a nivel mensual para 71 puntos geográficos correspondientes a 71 estaciones meteorológicas a nivel nacional (ver anexo, Tabla 7). Sin embargo, los datos en bruto obtenidos presentan sesgos al ser proyecciones a nivel regional y a nivel local. Es por eso que se utilizó la metodología de reducción del sesgo que desagrega la información obtenida al sitio de las estaciones con registros reconstruidos de precipitación y temperatura media.

Se utiliza la función de distribución gamma para la reducción del sesgo sin remover la tendencia de las series obtenidas.

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{\alpha^p \Gamma(p)} e^{-\frac{x}{\alpha}} x^{p-1}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

Donde α es el parámetro de escala, p es el parámetro de forma y $\Gamma(p)$ es la función gamma[2].

[2] Los detalles del proceso se encuentran en Guía Metodológica para la elaboración de Balanes Hídricos elaborado Viceministerio de Recursos Hídricos.

5. Construcción de Escenarios

Para la demanda hídrica se maneja dos escenarios. El primero corresponde al caso en el que la intensidad de uso de agua para el consumo residencial y agrícola es constante a lo largo del periodo de análisis, y el segundo caso representa una intensidad variante. Para el caso de intensidad variante del consumo residencial, se usó la referencia de Falkenmark & Widstrand (1992) que mencionan que el consumo de agua es de 36 m3/año por persona, este será un escenario en el que el consumo per cápita de agua llegue a esos términos de buena práctica para el año 2030. De esta manera, una vez sumada las demandas sectoriales se obtuvo la demanda total no agrícola.

Por otra parte, para el consumo agrícola, la intensidad en el primer escenario es constante y se calculó entre la división de la demanda de agua para riego de 1777 millones de m^3 anuales, dada por la FAO-Aquastat, y el nivel de hectáreas regada en el año 2000. El otro escenario para el sector agrícola se estableció en base a una proyección de demanda entre los datos obtenidos el año 2000, 2008 y 2100 de 1.777 mil Hm., 5,4 mil Hm., y 66 mil Hm. respectivamente. Los últimos dos valores fueron extraídos de Calvo (2014). Por último, se sumó las demandas sectoriales para tener la demanda nacional total. En base al mapa de municipio, de poblaciones, y de proyectos de riego se logró determinar el porcentaje de población y hectáreas regadas por subcuenca de estudio. Estos cálculos sirvieron para obtener el porcentaje de demanda de agua para cada unidad hidrológica.

Existen 2 escenarios de oferta hídrica, el primero corresponde a la escorrentía superficial que se presentaría bajo el escenario climático RCP2.6 y la segunda representa la escorrentía superficial bajo el escenario RCP8.5. Es así que tenemos 4 escenarios en total como lo muestra la tabla 3.

Tabla 3. Escenarios de Análisis

D1O1: Intensidad uso de agua constante y oferta bajo el escenario RCP2.6	D1O2: Intensidad uso de agua constante y oferta bajo el escenario RCP8.5
D2O1: Intensidad uso de agua variante y oferta bajo el escenario RCP2.6	D2O2: Intensidad uso de agua variante y oferta bajo el escenario RCP8.5

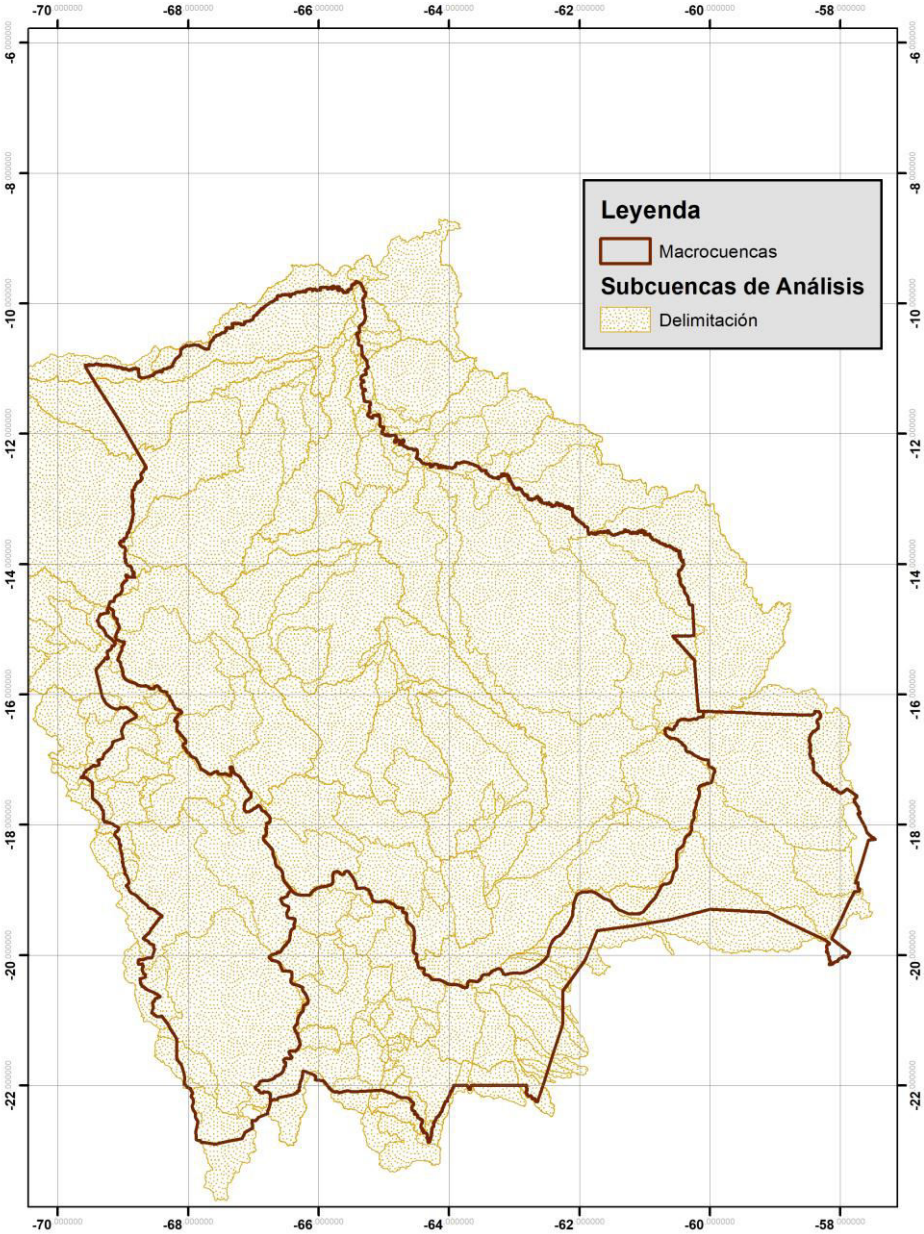
Fuente. Elaboración Propia

6. Resultados

Antes de empezar con la descripción de los resultados es necesario definir que para el presente estudio el concepto de *wáter security* será el siguiente: un individuo, como miembro de una población, *tiene acceso suficiente y sostenible al agua en cuencas hidrográficas, para una vida productiva y saludable, garantizando además la salud del ecosistema.* Esta definición tocas todos los puntos vistos en este documento[3]. Al referirse una vida productiva, se encuentra una demanda para el sector industrial y agrícola; y una vida saludable se aproxima como disponibilidad de agua potable para las municipalidades. Todos estos puntos son evaluados bajo un enfoque de cuenca, como se muestra en el gráfico 2.

[3] Esta definición se basa en la definición *del Global Water Partnership* y *Dunn & Bakker (2009)*

Gráfico 2. Delimitación de Subcuencas de Estudio



Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la oferta hídrica y el índice de escasez por subcuencas.

6.1. Variación de la Oferta Hídrica

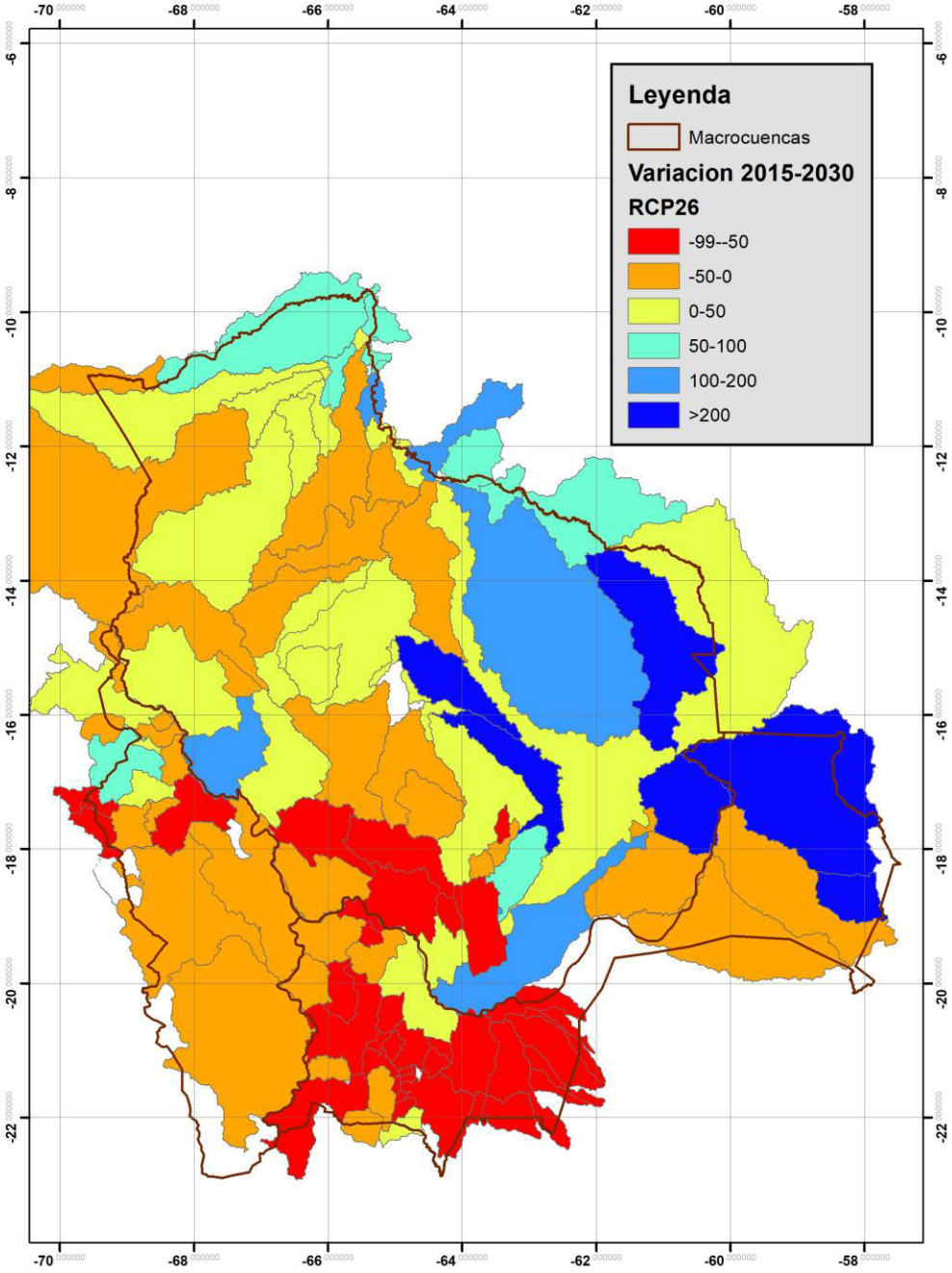
La variación de la oferta hídrica se comporta de manera diferente bajo los dos escenarios de clima analizados. En el escenario RCP26, a nivel nacional, la oferta hídrica aumentará en un promedio de 3.4% y un 25% bajo el escenario RCP8.5. Al ser estos dos escenarios, dos límites entre los 4 escenarios planteados por el IPCC, vemos que el rango de variación de la oferta es positivo. Sin embargo, la situación por unidad hidrológica es muy diferente.

6.1.1. Variación de Oferta bajo el Escenario RCP2.6

En el gráfico 3 se observa que la variación de oferta entre el año 2015 y 2030 es negativa y preocupante, principalmente para las subcuencas del sur de Bolivia. Estas subcuencas presentarán una disminución de alrededor de 50% de su oferta respecto a la situación del 2015. En el mapa del grafico 3, estas se encuentran representadas por el color rojo, y las subcuencas de color naranja presentarán una disminución potencial en su oferta de menos de 50%. En promedio, las unidades hidrológicas en riesgo de sufrir una disminución reducirán su oferta en 53% para el 2030, respecto al año 2015.

Por otro lado, varias unidades hidrológicas presentarán un incremento en su oferta hídrica, y existe entre ellas, algún riesgo de *sobreoferta* que pueden llevar al riesgo de inundación en algunos casos. Este es el caso de la subcuenca del Carmen, ubicada en el departamento de Santa Cruz, cuyo incremento se prevé en más del 100% para el 2030.

Gráfico 3. Variación de Oferta 2015-2030. Escenario RCP2.6



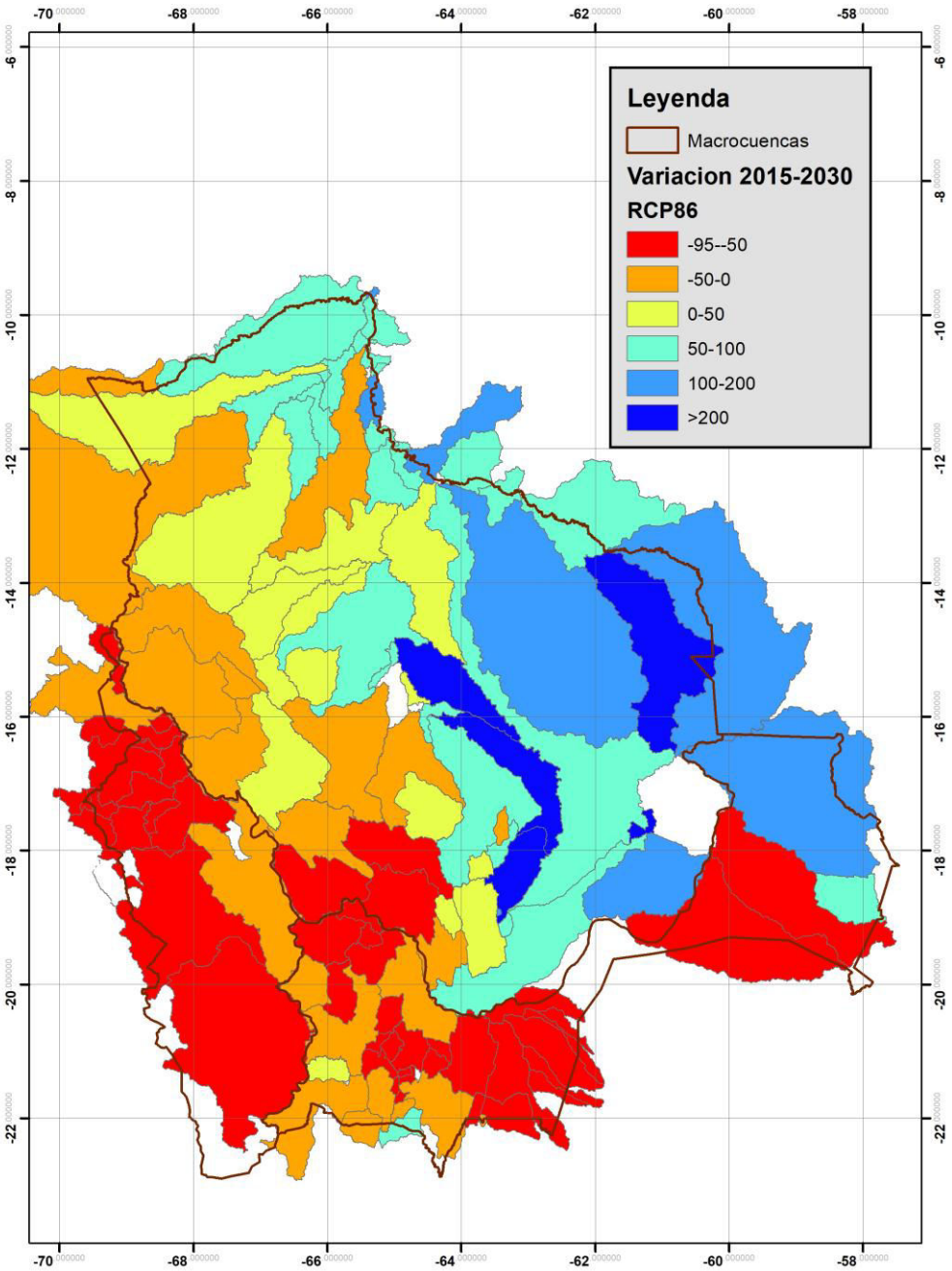
Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

6.1.2. Variación de la Oferta bajo el Escenario RCP8.5

En este escenario (gráfica 4) las unidades hidrológicas del sur del país se verán más afectadas, y se prevé un riesgo de disminución de oferta hídrica para la macrocuenca endorreica del altiplano porque gran parte de sus subcuencas experimentarán una reducción de 50% o más. Por otra parte algunas subcuencas, que bajo escenario RCP2.6 presentaron reducciones de oferta, presentan incrementos en su oferta potencial en el escenario RCP8.5. Este fenómeno sucede especialmente en la cuenca del Amazonas, donde las subcuencas de Puerto Siles, Abuna, Puerto Junin, y otros ubicados cerca del noreste de Bolivia poseen una variación positiva de oferta entre el 2015 y 2030. En promedio, las unidades hidrológicas con variación negativa disminuirán su oferta en 58% y las de variación positiva aumentarán en 94%.

Es necesario mencionar que, si bien la magnitud de la variación en base a los 2 escenarios es importante, lo realmente relevante es el signo de dicha variación. Esto es así porque las variables climáticas presentan una gran incertidumbre respecto a su magnitud.

Gráfico 4. Variación de Oferta 2015-2030. Escenario RCP8.5



Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

6.2. Índices de Escasez de Agua

El índice de escasez de agua es un indicador del estrés hídrico que puede tener una cuenca. Este indicador nos permitirá evaluar seguridad del agua en cuanto su disponibilidad futura para todas las subcuencas analizadas. El índice de escasez se calcula como el porcentaje entre la demanda de agua y la oferta de agua, que para nuestro caso es la escorrentía superficial. Este tiene las siguientes características:

Tabla 4. Categorías del índice de Escasez

Índice de Escasez	**Categoría**
<1%	No significativo
1-10%	Mínimo
11-20%	Medio
21-50%	Medio Alto
51-100%	Alto
>100%	Muy Alto

Fuente. Elaboración Propia

En general, para toda la combinación de escenarios de oferta y demanda se encuentra que la mayoría de las subcuencas correspondientes a la cuenca del Amazonas presentan un índice de escasez no significativo (< a 1%) por lo que se infiere que estas unidades hidrológicas no presentarán problemas de escasez de agua en el año 2030. Por otro lado, para todos los escenarios propuestos, las unidades hidrológicas de la cuenca del Pilcomayo y del Altiplano, presentan índices de escasez altos y muy altos para el 2030. Es decir, las comunidades que habitan en estas subcuencas sufrirían un estrés hídrico importante con riesgo de que su oferta potencial no sea suficiente para satisfacer su demanda de agua.

En el gráfico 5 se muestra el escenario D1O1, donde la mayoría de las sucbcuencas del altiplano presentan un índice de escasez alto y muy alto. Además, algunas unidades hidrológicas del Amazonas como las subcuencas correspondientes al centro del país también presentan un índice de escasez alto.

El índice de escasez promedio para cada subcuenca dentro de las 3 macrocuencas se observa en la tabla 5. En la cuenca cerrada del altiplano se tiene que los escenarios D1O2 y D2O2 son los peores escenarios posibles en cuanto a abastecimiento de agua. Estos indican que, en promedio, estas unidades hidrológicas no son capaces de satisfacer las demandas de agua de sus territorios.

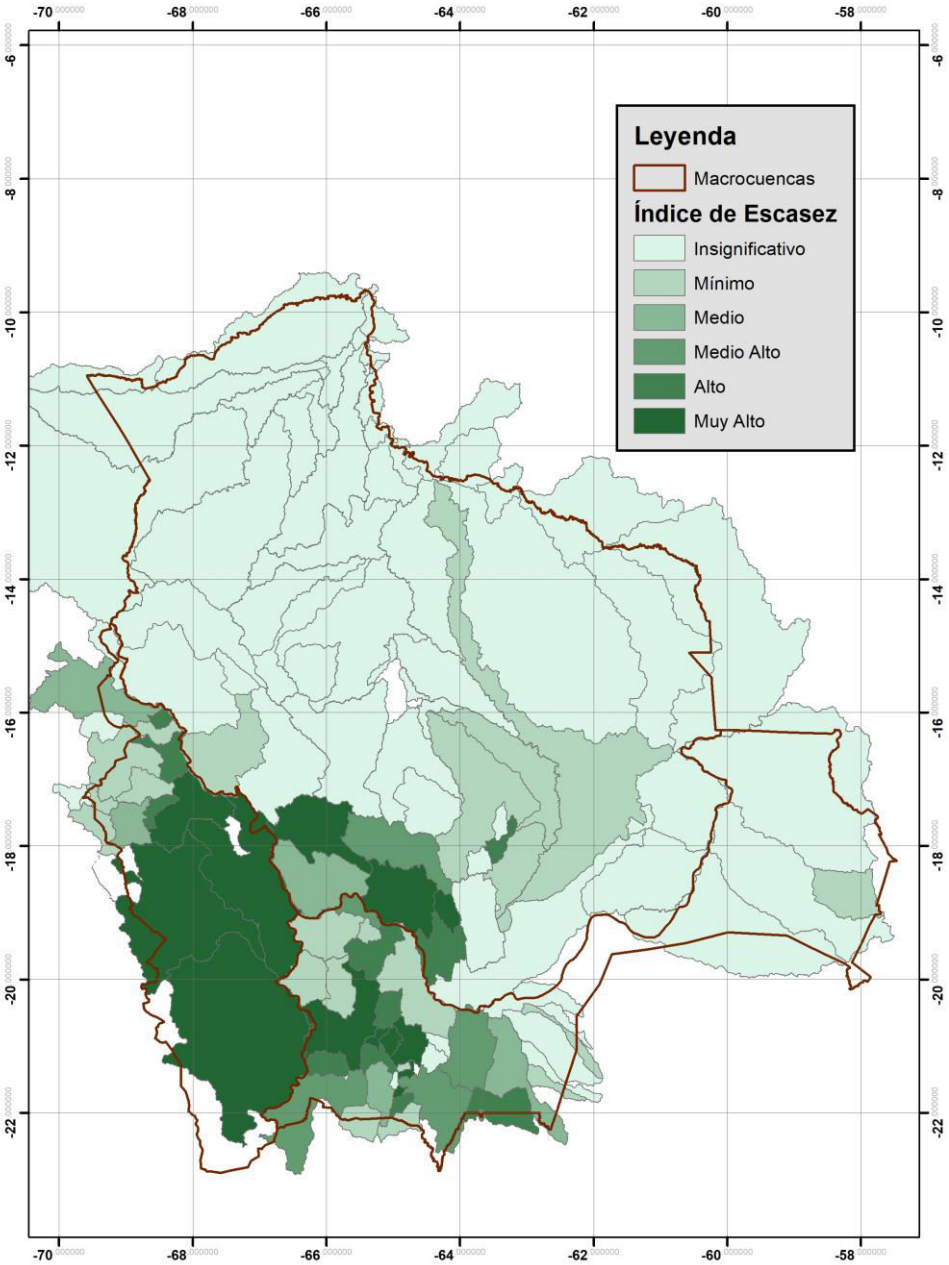
Tabla 5. Promedio del índice de Escasez por subcuenca dentro de una Macrocuenca

Macrocuenca	D1O1	D1O2	D2O1	D202
Altiplano	70.7	163.9	78.2	183.9
Amazonas	14.9	14.8	15.7	15.4
Pilcomayo	154.9	78.4	156.8	79.6

Fuente. Elaboración Propia

Por otro lado, las subcuencas del Amazonas presentan índices de escasez medios, pero con abastecimiento suficiente para todos los escenarios. Respecto a la cuenca del Pilcomayo, los escenarios D1O1 y D2O1 son los que más riesgo contraen en relación a la escasez de agua.

Gráfico 5. Índice de Escasez para. Escenario D1O1-2030



Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

7. Conclusiones.

Los resultados muestran que las regiones del sur y suroeste de Bolivia, representadas por la cuenca de la Plata y la del Altiplano son cuencas con riesgo a sufrir escasez de agua. Este resultado se presenta bajo todos los escenarios de análisis.

Por otro lado, la variación del potencial hídrico es negativa para algunas subcuencas y positiva para otras. Esto muestra que los efectos del cambio climático para el año 2030 en Bolivia son heterogéneos. Si bien en promedio la oferta de agua tiene a incrementarse en base a los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, las subcuencas de la cuenca cerrada del altiplano y la de la Plata presentarán una preocupante disminución en su oferta.

La falta de información del sector de demanda y la complejidad de la obtención de la oferta hídrica son limitantes para estudios de cambio climático y agua. Como consecuencia de esto, sólo es posible generar proyecciones futuras bajo escenarios posibles y no así ***pronósticos*** fiables, causando que no se pueda tener una senda futura de demanda y oferta de agua significativa. Debido a esta dificultad se optó por considerar dos situaciones extremas, y de esa manera, obtener un rango de variación de la oferta, como los índices de escasez.

Finalmente, según el concepto water security, establecido en el presente estudio, se observa que las subcuencas del sur y sureste del país están en riesgo de no satisfacer esta premisa debido a que presentan índices de escasez altos. Este resultado debe motivar a otros estudios a ver otros efectos de una posible escasez de agua y de esa manera debatir sobre los mecanismos de adaptación y acción ante esta problemática.

BIBLIOGRAFÍA

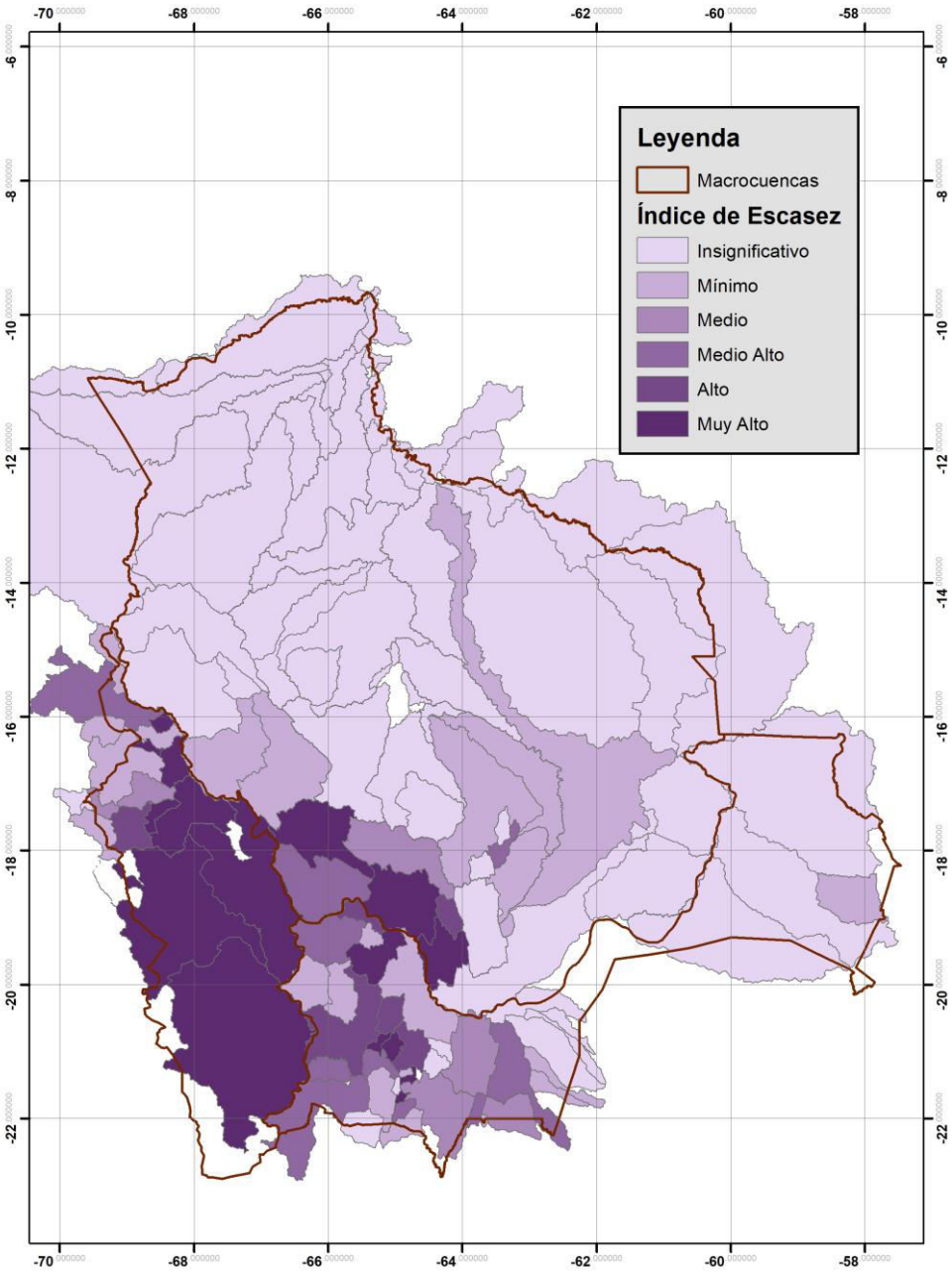
- Andrade, M. F. (2014). *La economía del cambio climático en Bolivia: Validación de Modelos Climáticos.* CE Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo. Monografía, (184).
- Arderne, C. (2016). *A climate, land-use, energy and water nexus assessment of Bolivia.*
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., ... & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, *39*(12), 7896-7906.
- Brundtland, G. H. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.* PNUMA.
- Calvo, N. (2014). La economía del cambio climático en Bolivia: Cambios en la demanda hídrica.
- Cook, C., & Bakker, K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, *22*(1), 94-102.
- Dunn, G., & Bakker, K. (2009). Canadian Approaches to Assessing Water Security: An Inventory of Indicators: Policy Report, November 2009. Program on Water Governance, University of British Columbia.
- Economic and Social Commission for Western Asia, (2015). *Conceptual Frameworks for Understanding the Water, Energy and Food Security Nexus,* Working Paper.
- Gonzáles, A. (2016). *Desarrollo metodológico de balances hídricos para cuencas menores como el río Grande y microcuencas en el marco dela gestión integral de recursos hídricos y manejo integral de cuencas. La Paz: GIZ-PROAGRO,* Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.
- Viceministerio de Recursos Hídricos, (2016). *Guía Metodológica para la elaboración de Balanes Hídricos.*

- Hoff, H. (2011). Understanding the nexus: Background paper for the Bonn2011 Nexus Conference.
- Hunter, P. R., MacDonald, A. M., & Carter, R.C. (2010). Water supply and health. *PLoS Med*, *7*(11), e1000361.
- Jemio, M., Carlos, L., Andersen, L. E., Ludeña, C. E., de Miguel, C., & Pereira, M. (2014). *La economía del cambio climático en Bolivia: Estimación de impactos en equilibrio general.* Monografía del BID (Sector de Infraestructura y Medio Ambiente. División de Cambio Climático y Sostenibilidad); IDB-MG-201.
- Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2004). *Limits to growth: The 30-year update.* Chelsea Green Publishing.
- Soria, F. (2016). *Balance hídrico superficial integral para la cuenca del río Ravelo, en el marco de los planes directores de cuenca. La Paz: Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.*
- Wayne, G.P. (2013) The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways.
- World Economic Forum. Global Risks 2011, Sixth Edition: An Initiative of the Risk Response Network
- World Health Organization. (2014). *Access to modern energy services for health facilities in resource-constrained settings: a review of status, significance, challenges and measurement.* World Health Organization, pp(11-25)
- VRHR. (2012). Inventario Nacional de Sistemas de Riego. La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR).
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., & Galbraith, H. (2005). [*WEAP21 - A model for water planning, governed by demand, priorities and preferences - Part II: supporting the evaluation of services in freshwater ecosystems*]. WaterInternational , 30 (4), 501-512.

- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). [*WEAP21 – A model for water planning, governed by demand, priorities and preferences - Part I: Characteristics of the model*].Water International, 30 (4), 487–500.
- Yates, S. (1994). [*Watbal: A water balance model for assessing climate impacts on river runoff*]. Laxenburg:WP-94-64, International Institute for Applie

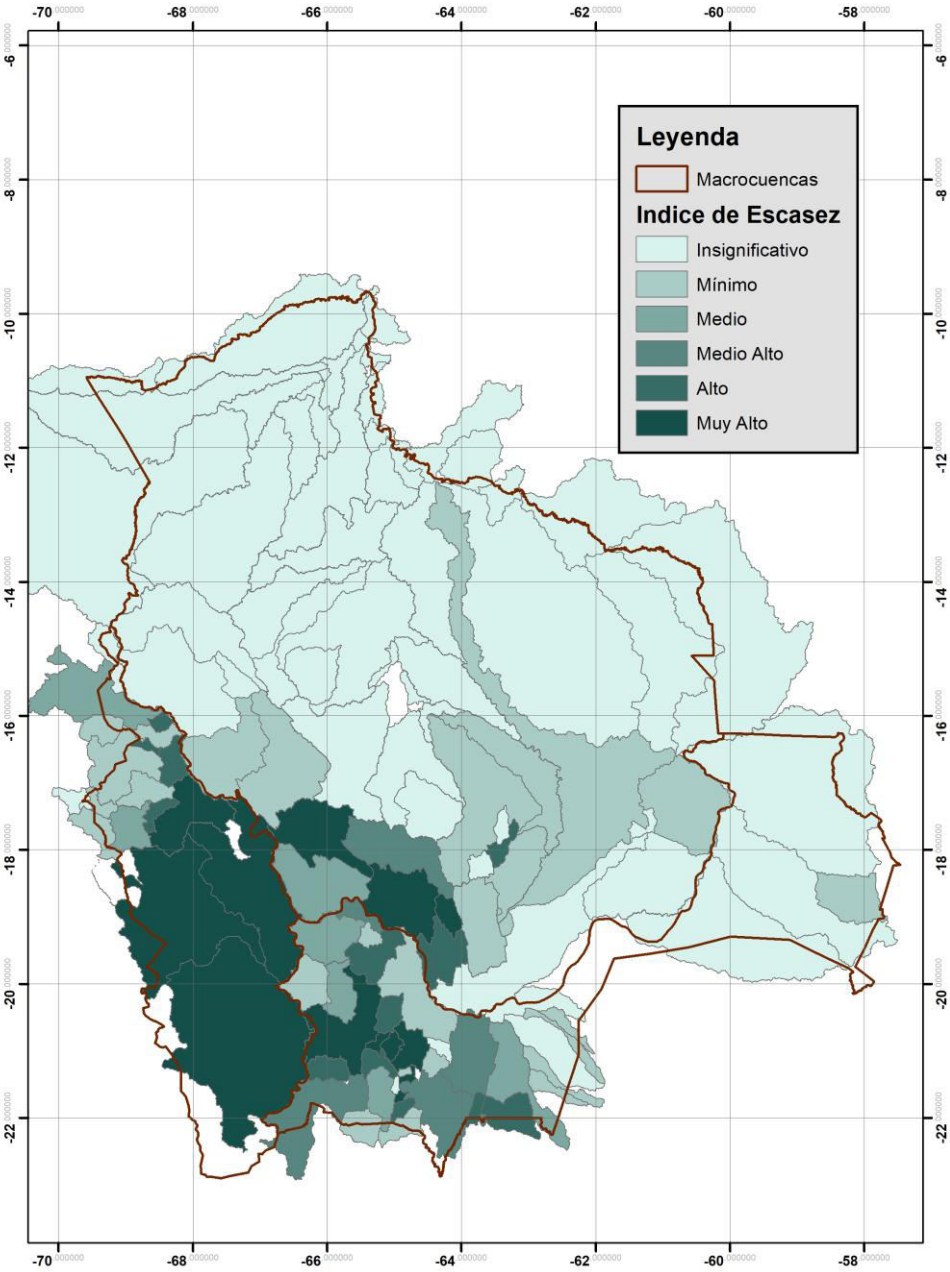
ANEXO

Gráfico 6. Índice de Escasez para. Escenario D1O2-2030



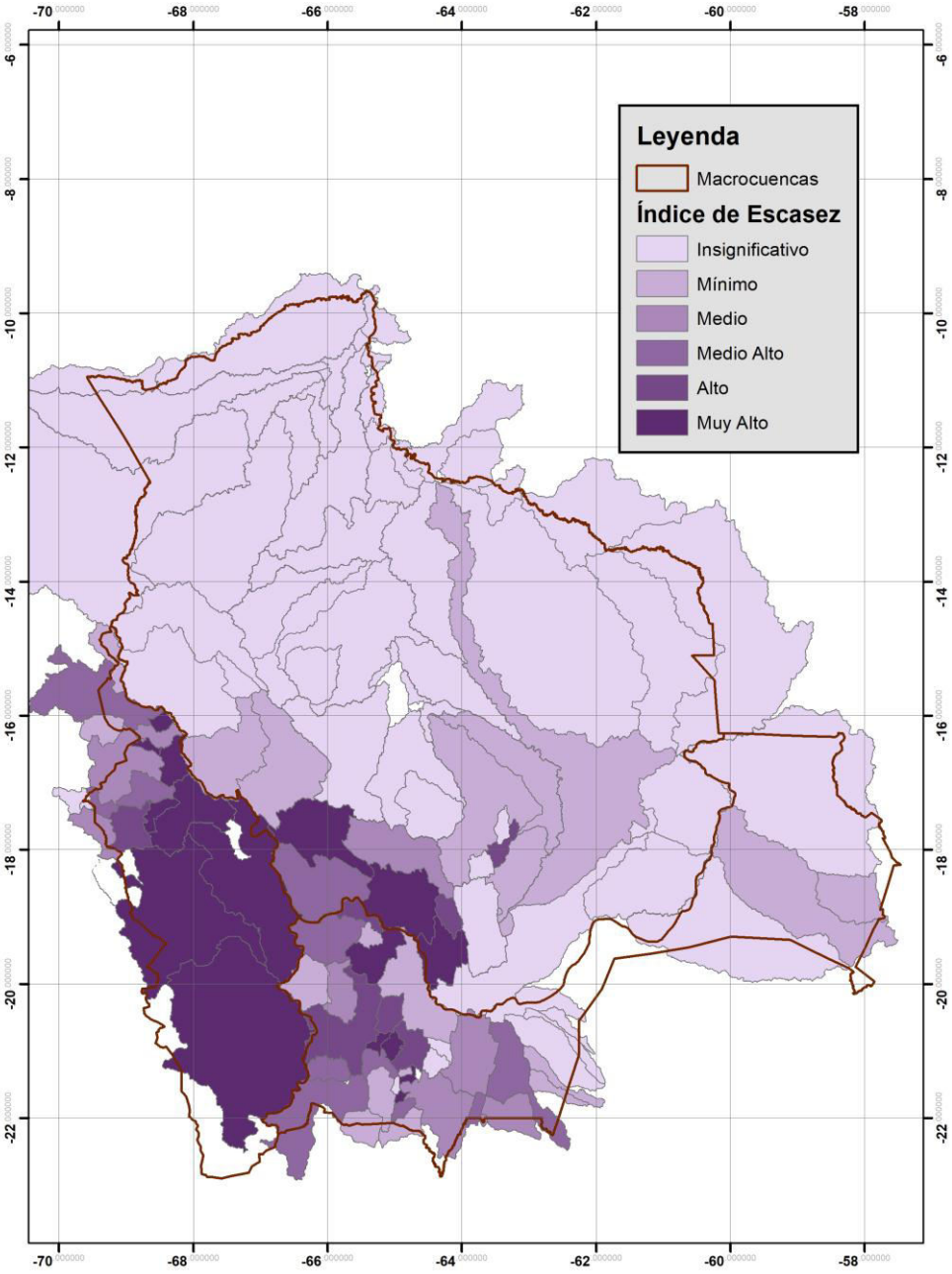
Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

Gráfico 7. Índice de Escasez para. Escenario D1O2-2030



Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

Gráfico 8. Índice de Escasez para. Escenario D2O1-2030



Fuente. Elaboración Propia en base a capas raster de GeoBolivia

Tabla 6. Parámetros Hidrológicos

PARAMETROS DEL METODO DE HUMEDAD DEL SUELO	Parámetros	Capacidad de Agua del Suelo (Sw)	Coeficiente de Cultivo (Kc)	Dirección preferencial de Flujo (f)	Factor de resistencia a la escorrentía (rrf)	Conductividad en la zona radicular KS	H1	Conductividad en la zona profunda (ks2)	H2	Capacidad de Agua Profunda (Dw)
Cobertura de Suelo	Bosque Denso	1800	1.05	0.15	3.3					
	Bosque Ralo	350	0.9	0.9	1.9					
	Urbano	100	0.7	0.9	1					
	Cuerpo de Agua	1000	1.05	0.5	7					
	Cultivo	800	0.7	0.5	4					
	Arbusto	150	0.75	0.65	4.5					
	Herbácea	155	0.75	0.65	4.5					
	Matorral	1800	0.9	0.15	3.3					
Textura	Grueso					50.5	15			
	Medio					151	15			
	Fino					-	-			
General								167	40	1000

Fuente: Elaboración Propia en base a datos de Soria (2016) y Gonzales (2016). Algunos fueron calibrados para ajuste del modelo

Tabla 7. Estaciones Meteorológicas utilizadas en la reducción del sesgo de las series GCM.

Macrocuenca	Latitud	Longitud	Rio	Estación
Amazonas	-8.7483	-63.9169	Rio Porto Velho	Porto Velho
Amazonas	-14.4409	-67.5350	Rio Rurrenabaque	Rurrenabaque
Amazonas	-10.9935	-66.0626	Rio Riberalta	Riberalta
Amazonas	-16.8369	-64.7920	Rio Puerto Villarroel	Puerto Villarroel
Amazonas	-12.8043	-65.0032	Rio Puerto Siles	Puerto Siles
Amazonas	-11.2250	-66.2417	RioPortachuelo Dos Estrellas Palermo	Portachuelo Dos Estrellas Palermo
Amazonas	-11.5483	-66.6738	Rio Peñas Amarillas	Peñas Amarillas
Amazonas	-18.9173	-63.4672	Rio Paraiso	Paraiso
Amazonas	-10.8124	-65.3430	Rio Guayaramerin	Guayaramerin
Amazonas	-11.4702	-67.2368	Rio El Sena	El Sena
Amazonas	-12.0200	-64.8300	Rio Campamento More	Campamento More
Amazonas	-15.3364	-64.8649	Rio Camiaco	Camiaco
Amazonas	-10.5373	-65.5849	Rio Cachuela Esperanza	Cachuela Esperanza
Amazonas	-9.7000	-65.3500	Rio Abuna	Abuna
Amazonas	-18.9089	-63.4026	Rio Abapo	Abapo
Amazonas	-18.1800	-63.5400	Rio Angostura	Angostura
Amazonas	-17.5400	-63.2200	Rio La Belgica	La Belgica
Amazonas	-17.3400	-63.3300	Rio Puente Eisenhower	Puente Eisenhower
Amazonas	-17.6649	-62.7837	Rio Puerto Pailas	Puerto Pailas
Amazonas	-15.9414	-64.7558	Rio Santa Rosa del Chapare	Santa Rosa del Chapare
Amazonas	-14.8822	-65.0325	Rio Los Puentes	Los Puentes
Amazonas	-15.8906	-64.6264	Rio El Carmen	El Carmen
Amazonas	-15.5139	-65.1147	Rio Gundonovia	Gundonovia
Amazonas	-14.8706	-64.9672	Rio Puerto Almacen	Puerto Almacen
Amazonas	-13.7200	-65.4142	Rio Puerto Junin	Puerto Junin
Amazonas	-14.9839	-65.7997	Rio San Borjita	San Borjita
La Plata	-21.5055	-65.7001	Rio La Angostura (Tupiza)	La Angostura (Tupiza)
La Plata	-21.0250	-64.9444	Rio Chilcara	Chilcara

La Plata	-21.3731	-64.9547	Rio El Molino	El Molino
La Plata	-21.2361	-65.2072	Rio El Puente San Juan del Oro	El Puente San Juan del Oro
La Plata	-22.2241	-62.3121	Rio Misión La Paz	Misión La Paz
La Plata	-19.2047	-65.2756	Rio Ñucchu	Ñucchu
La Plata	-20.7385	-65.2386	Rio Palca Grande	Palca Grande
La Plata	-21.0819	-64.5375	Rio Pampa Grande	Pampa Grande
La Plata	-19.3506	-65.1753	Rio Puente Sucre	Puente Sucre
La Plata	-20.1084	-66.0689	Rio Salto Leon	Salto Leon
La Plata	-21.1502	-64.2367	Rio San Josecito	San Josecito
La Plata	-20.7217	-65.2292	Rio San Pedro	San Pedro
La Plata	-19.1290	-65.4457	Rio Talula	Talula
La Plata	-20.4833	-65.6158	Rio Tumusla	Tumusla
La Plata	-21.4552	-65.7230	Rio Tupiza	Tupiza
La Plata	-21.2611	-63.5033	Rio Villamontes	Villamontes
La Plata	-19.4083	-64.8528	Rio Viña Quemada	Viña Quemada
Altiplano	-17.0752	-70.0443	Rio Vilacota	Vilacota
Altiplano	-17.2875	-69.6460	Rio Chuapalca	Chuapalca
Altiplano	-17.3967	-69.4724	Rio Frontera	Frontera
Altiplano	-17.3074	-68.6529	Rio Calacoto	Calacoto
Altiplano	-14.9198	-70.1894	Rio Puente Carretera Azángaro	Puente Carretera Azángaro
Altiplano	-14.8931	-70.5861	Rio Puente Ayaviri	Puente Ayaviri
Altiplano	-15.2554	-69.8738	Rio Puente Ramis	Puente Ramis
Altiplano	-15.2165	-69.7926	Rio Puente Huancané	Puente Huancané
Altiplano	-16.0918	-69.6325	Rio Puente Carretera Ilave	Puente Carretera Ilave
Altiplano	-15.4377	-70.1400	Rio Puente Maravillas	Puente Maravillas
Altiplano	-17.5383	-69.2472	Rio Abaroa Rio Caquena	Abaroa Rio Caquena
Altiplano	-17.5244	-69.2505	Rio Abaroa Rio Mauri	Abaroa Rio Mauri
Altiplano	-16.0396	-68.6808	Rio Achacachi	Achacachi
Altiplano	-16.8197	-68.9011	Rio Aguallamaya	Aguallamaya
Altiplano	-17.2850	-68.6139	Rio Calacoto Desaguadero	Calacoto Desaguadero
Altiplano	-17.6906	-67.4608	Rio Chuquina	Chuquina

Altiplano	-15.6592	-69.1332	Rio Escoma	Escoma
Altiplano	-18.5706	-68.7890	Rio Sacabaya Rio Lauca	Sacabaya Rio Lauca
Altiplano	-18.5175	-68.7428	Rio Sacabaya Rio Sajama	Sacabaya Rio Sajama
Altiplano	-16.5220	-68.4984	Rio Tambillo	Tambillo
Altiplano	-17.4855	-68.4940	Rio Ulloma	Ulloma
Amazonas	-15.9150	-63.1692	-	guarayos
Amazonas	-13.5831	-63.5831	--	Baures Aeropuerto
La Plata	-17.8322	-60.7442	-	San Jose de Chiquitos
La Plata	-18.3297	-59.7633	--	Robore - Aeropuerto
Altiplano	-21.1478	-67.6756	-	San Agustin
Altiplano	-19.2786	-67.6019	-	Andamarca
Altiplano	-21.6831	-66.6139	-	San Palo de Lipez

Fuente: Elaboración Propia en base a datos del SENAMHI

Tabla 8. Promedio de la Oferta y Demanda Hídrica por Subcuenca dentro de su Macrocuenca (Millones de m3)

Macrocuenca	Demanda 1	Demanda 2	Oferta 1	Oferta 2
Altiplano	24.8	26.5	56.0	24.5
Amazonas	31.1	32.8	5074.2	5630.5
De la Plata	19.6	20.1	165.7	146.9

Fuente: Elaboración Propia