

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MÁS ALLÁ DE LOS ESCENARIOS GLOBALES: FORMULACIÓN DE NARRATIVAS
CLIMÁTICAS LOCALES PARA LA GESTIÓN HÍDRICA ADAPTATIVA**

SEBASTIÁN AEDO-QUILILONGO¹
GUSTAVO AYALA²
CAMILO GONZÁLEZ³
YÉSICA RODRÍGUEZ-BLÁSQUEZ⁴
TANIA SANTOS⁵

RESUMEN

Las proyecciones climáticas inciertas junto con los efectos acumulados de las actividades antrópicas locales presentan desafíos sin precedentes para la gestión de los recursos hídricos. Las narrativas globales de emisiones de gases de efecto invernadero y socioeconómicas (escenarios SSP) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) pueden ser limitadas para la gestión de los recursos hídricos, ya que no capturan las condiciones locales. Este trabajo presenta una estrategia para la formulación de narrativas climáticas locales relevantes para la gestión de los recursos hídricos, aplicada al Sistema Hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopó a partir de un modelo hidrológico y las proyecciones climáticas del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6-IPCC). Esta estrategia se basa en la definición de condiciones climáticas “más secas”, “más húmedas” y “tendenciales” que se definen a partir de cambios estadísticamente significativos en una variable de referencia. Se consideraron como variables de referencia la precipitación, el Índice de Aridez, caudales superficiales entrantes al lago Titicaca y los niveles del lago. Al comparar entre escenarios SSP las trayectorias de cada variable analizada no presentaron mayores diferencias, mientras que, usando las condiciones climáticas se observaron trayectorias específicas y útiles para aplicaciones prácticas. La precipitación como variable de referencia resultó en las condiciones “más secas” más críticas y las “más húmedas” menos críticas, mientras que, al utilizar el Índice de Aridez se obtuvieron las condiciones menos y más críticas, respectivamente. Esta estrategia, flexible, transparente y replicable según las necesidades y conocimientos locales, es un avance en la formulación de escenarios para la gestión de los recursos hídricos.

¹ Investigador, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - email: sebastian.aedo@sei.org

² Investigador, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - email: gustavo.ayala@sei.org

³ Investigador, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - email: camilo.gonzalez@sei.org

⁴ Investigadora, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - email: yesica.rodriguez@sei.org

⁵ Investigadora, Centro Latinoamericano, Stockholm Environment Institute - email: tania.santos@sei.org

1. INTRODUCCIÓN

El clima futuro es una incertidumbre relevante para la gestión del recurso hídrico, ya que sus proyecciones muestran una alta variabilidad en el largo plazo y en función de los niveles de aumento de la temperatura global (Kundzewicz et al., 2018; IPCC, 2021). La magnitud y ocurrencia de los impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico están sujetos a incertidumbres que surgen de la complejidad inherente del sistema climático y de las potenciales trayectorias futuras de emisiones. Estas incertidumbres, agravadas por los efectos de las actividades antrópicas locales presentan desafíos sin precedentes para la gestión de los recursos hídricos (AghaKouchak et al., 2020).

Una alternativa para abordar las incertidumbres asociadas a las proyecciones climáticas es la generación de escenarios con distintos supuestos de los cambios en las variables climáticas (Verbist et al., 2020). Sin embargo, las combinaciones a evaluar son infinitas y pueden ser arbitrarias, sin responder a una dinámica atmosférica-oceánica acoplada. Las proyecciones climáticas presentadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) permiten acotar los escenarios que se basan en narrativas globales de emisiones de gases de efecto invernadero y socioeconómicas (O'Neill et al., 2020).

Si bien las proyecciones climáticas del IPCC permiten acotar las incertidumbres, analizar la totalidad de escenarios disponibles puede ser operacionalmente restrictivo, por lo que se suelen evaluar escenarios específicos. Usar uno o pocos escenarios no logra capturar las incertidumbres, resultando en decisiones y planes de adaptación poco robustos (Mujumdar and Ghosh, 2008) debido a que algunas medidas de adaptación pueden funcionar en un futuro alternativo, pero no en otros (Kundzewicz et al., 2018). Aunque Wang et al (2020) recomienda utilizar 10 escenarios climáticos para capturar las incertidumbres en hidrología, sus resultados muestran que el número óptimo depende del área de estudio y la variable a analizar.

Por otro lado, las narrativas globales pueden ser limitadas para la formulación de planes de adaptación, que son dependientes del contexto y condiciones locales, en parte, debido a que los resultados de cada narrativa admiten condiciones contrastantes en precipitación. Esto levanta la necesidad de formular narrativas aplicables a escala regional y narrativas que describan la evolución del clima local (O'Neill et al., 2020). Las narrativas enfocadas en la evolución del clima son una herramienta que se utiliza en la gestión de recursos hídricos, representando condiciones secas o húmedas. Esta definición de seco o húmedo suele estar fundamentada en la disminución o aumento de alguna variable hidroclimática de forma arbitraria, lo cual presenta un desafío en la homologación, entendimiento de los alcances y la replicabilidad de estas narrativas (Roth et al., 2021).

Este trabajo presenta una estrategia para la formulación de escenarios basados en narrativas locales relevantes para la gestión de los recursos hídricos y que capturan las incertidumbres asociadas al clima futuro. Para esto, en el contexto del Sistema Hídrico Titicaca – Desaguadero – Poopó, se analizaron la precipitación e Índice de Aridez a escala del sistema y el caudal entrante al lago Titicaca y sus niveles como métricas para caracterizar narrativas locales y las implicancias de usar una u otra métrica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Este trabajo se enfoca en el contexto del Sistema Hídrico Titicaca – Desaguadero – Poopó (sistema TDP), cuya extensión es de 110,969 km², compartido entre Bolivia (55%), Bolivia (44%) y Chile (1%) (Lima-Quispe et al., 2021). El sistema TDP corresponde a una meseta ubicada en los Andes central, con elevaciones entre 3,600 y 6,100 m.s.n.m., que contiene al lago Titicaca y lago Poopó, conectados a través del río Desaguadero, y desemboca en el Salar de Coipasa (Figura 1), siendo el sistema hídrico más importante del altiplano Peruano-Boliviano. La precipitación anual varía entre 180 y 1,100 mm/año, mientras que la temperatura media varía entre 2 y 10 °C. En este sistema se encuentran ciudades importantes como El Alto y Oruro en Bolivia y Puno y Juliaca en Perú, por lo que el uso doméstico es uno de los usos de agua más importantes, junto al uso agrícola que representa el mayor volumen de agua utilizada en este contexto.

El lago Titicaca cubre una superficie de 8,400 km², y su balance hídrico está impulsado principalmente por la precipitación y la evaporación en el lago (Lima-Quispe et al., 2025). Los niveles del lago controlan el caudal aportante al río Desaguadero mediante compuertas que operan entre los 3,806.5 y 3,812 m.s.n.m (INTECSA et al., 1993). De modo que, cuando los niveles están por debajo de los 3,806.5 m.s.n.m, se considera una sequía extrema y desconexión del lago con el río Desaguadero y, cuando los niveles superan los 3,812 m.s.n.m, ocurre un desborde.

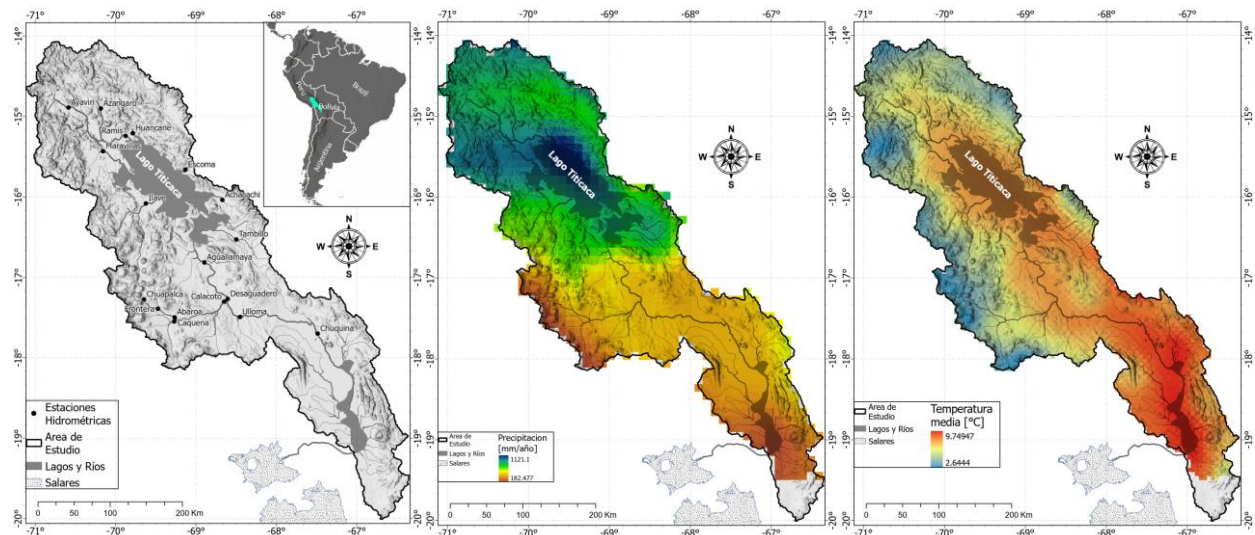


Figura 1. Ubicación y características climáticas del área de estudio en el período 1985 – 2014, a partir del producto GMET-Bolivia (SEI-MMAyA, 2024).

2.2 MODELO HIDROLÓGICO

Para representar las dinámicas en el sistema TDP se utilizó una modificación del modelo hidrológico semi-distribuido WEAP (Water Evaluation and Planning System; Yates et al., 2005), desarrollado en el trabajo de Lima-Quispe et al. (2021). Forzado por clima y demandas de agua, este modelo permite cuantificar los procesos hidrológicos naturales en las cuencas y en los lagos Titicaca y Poopó, junto a las demandas de agua.

La caracterización biofísica y de las demandas de agua escapan al alcance de este trabajo, pero se pueden revisar en el trabajo de Lima-Quispe et al. (2021). La información climática considerada como representativa de observaciones proviene del producto GMET-Bolivia, desarrollado en el Balance Hídrico de Bolivia (SEI-MMAyA, 2024) a partir de información de estaciones meteorológicas en Argentina, Brasil, Bolivia, Chile, Paraguay y Perú. El producto GMET-Bolivia cuenta con información mensual para la precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y fracción nubosa a una resolución de 0.1° en el período 1980 – 2020.

Existen 7 estaciones de caudales en los cauces aportantes al lago (Figura 1), las cuales se utilizaron para validar los resultados del modelo en el período 1980 - 2020. En estas estaciones la eficiencia de la calibración del modelo usando Nash-Sutcliffe (NSE) resultó en valores entre 0.22 y 0.73, con un promedio de 0.51, y un sesgo porcentual entre -40% y 27%, con un promedio de -11%. Los dos ríos con más aporte al total analizado (70%) resultaron en NSE de 0.68 y 0.72 y sesgo porcentual de 11% y -2.8%. Por otro lado, los niveles del lago Titicaca resultaron en un sesgo porcentual medio de -0.015%. La Figura 2 muestra una comparación de las observaciones y simulaciones.

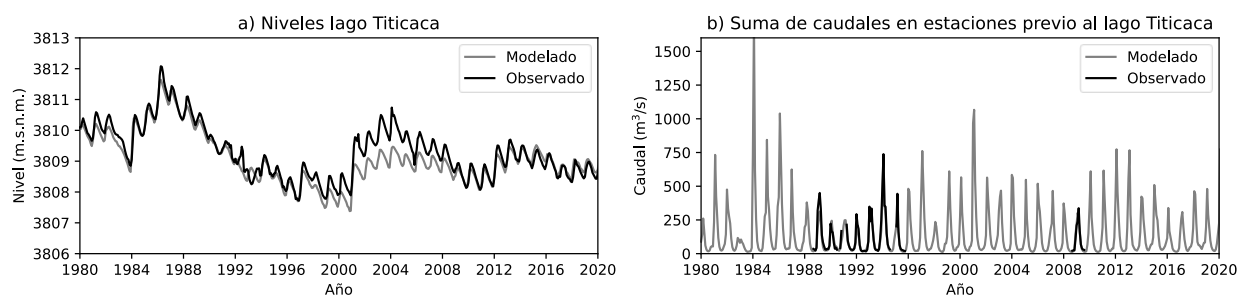


Figura 2. Comparación de los niveles (a) y caudales entrantes (b) al lago Titicaca observados y simulados en el período 1980 – 2020. Los caudales entrantes se presentan como la suma de los caudales en las 7 estaciones de caudales que se encuentran más cerca del lago, considerando en las observaciones únicamente los meses con información en todas las estaciones.

Este trabajo se enfoca en el caudal superficial entrante al lago Titicaca y sus niveles, además de la precipitación y el Índice de Aridez, calculado a partir de la precipitación y evapotranspiración potencial, del sistema completo. La evapotranspiración potencial es calculada internamente en WEAP mediante la ecuación de Penman-Monteith del método de humedad del suelo.

2.3 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las proyecciones de cambio climático consideradas en este trabajo corresponden a los resultados de precipitación y temperatura mensual de 29 Modelos de Circulación General (GCM), considerando la realización r1ilp1f1, del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR6-IPCC) y los escenarios SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 3-7.0 y SSP 5-8.5. La selección de estos 29 GCM se basó en que tienen información disponible para ambas variables en los cuatro escenarios SSP. Estos resultados se interpolan bilinealmente a la grilla de las observaciones y se corrigió el sesgo mediante el método Unbiased Quantile Mapping (Chadwick et al., 2023). La corrección de sesgo se realizó para cada mes de forma independiente y considerando el período 1985 – 2014 como referencia con la librería climQMBC, disponible en <https://github.com/saedoquililongo/climQMBC>.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

Para los actores involucrados en la gestión de los recursos hídricos, la caracterización de condiciones secas y húmedas suelen ser las más relevantes ya que pueden representar de forma directa las implicaciones en cuanto a disponibilidad hídrica, entre otros. En esta línea, en este trabajo se presentan narrativas o condiciones climáticas locales que se basan en aumentos o disminuciones estadísticamente significativos en una variable de referencia, como la precipitación, dando lugar a narrativas o condiciones climáticas locales “más secas”, “más húmedas” y “tendenciales” (o sin cambio significativo). Para definir estos aumentos o disminuciones, se utilizó la prueba t-Student (Decremer et al., 2014) de dos colas, considerando el período 1985 – 2014 como referencia y el período 2035 – 2064 como futuro, ambos períodos de 30 años.

Las proyecciones de cambio climático se suelen presentar en términos de cambios en los promedios anuales, dejando de lado los cambios en la desviación estándar u otros estadísticos. Para poder generalizar umbrales para las condiciones estadísticamente significativas utilizando únicamente cambios en los promedios, se consideró una desviación estándar constante y el mismo tamaño de muestra entre la información futura y la de referencia. De esta forma, el umbral crítico para los cambios porcentuales en el promedio de la variable de referencia se expresa como:

$$\Delta_{crítico} = \pm 100 \times t_{crítico} \times \frac{\sigma}{\mu} \sqrt{\frac{2}{n}} \quad (1)$$

donde $\Delta_{crítico}$ es el aumento (o disminución) porcentual de la variable de referencia a partir del cual se considera un aumento (o disminución) significativa, con base en el tamaño de muestra (número de años, n), el promedio anual y desviación estándar del período de referencia, μ y σ , respectivamente. $t_{crítico}$ es el parámetro de la prueba t-Student para rechazar o no la hipótesis de que las condiciones futuras son iguales a las de referencia, el cual depende del nivel de significancia buscado y del tamaño de la muestra. En este estudio se consideró un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, correspondiendo a un $t_{crítico} = 2.042$.

En este trabajo se exploraron las implicaciones en el caudal superficial entrante al lago Titicaca y los niveles del lago en las condiciones “más seca”, “más húmeda” y “tendencial” construyendo las narrativas climáticas con cuatro variables de referencia distintas: la precipitación en el sistema TDP, el Índice de Aridez en el sistema TDP, el caudal superficial entrante al lago Titicaca y los niveles del lago. De este modo, si la magnitud del cambio en la variable es menor a $\Delta_{crítico}$, se considera una condición climática “tendencial” y si es mayor, se considera una “más seca” para cambios negativos y “más húmeda” para cambios positivos. Adicionalmente, se compararon estas narrativas locales con las narrativas socioeconómicas globales o escenarios SSP del AR6-IPCC.

En todos los casos, la información climática futura corresponde a los 29 GCM y 4 escenarios SSP presentados en la sección 2.3. Estos escenarios se combinaron a escala local para priorizar la evaluación de distintas condiciones climáticas bajo el supuesto de que los escenarios globales son independientes de las acciones locales y que se desconoce la probabilidad de que ocurra una u otra. Ejercicios con distintos supuestos podrían enfocarse en un escenario SSP específico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

La Figura 3 presenta las proyecciones futuras de precipitación y temperatura anual para el período 2035 – 2064, junto a un ejemplo de cómo se categorizan las condiciones climáticas en función de la precipitación como variable de referencia y cómo se relaciona esta categorización al usar el Índice de Aridez como variable de referencia.

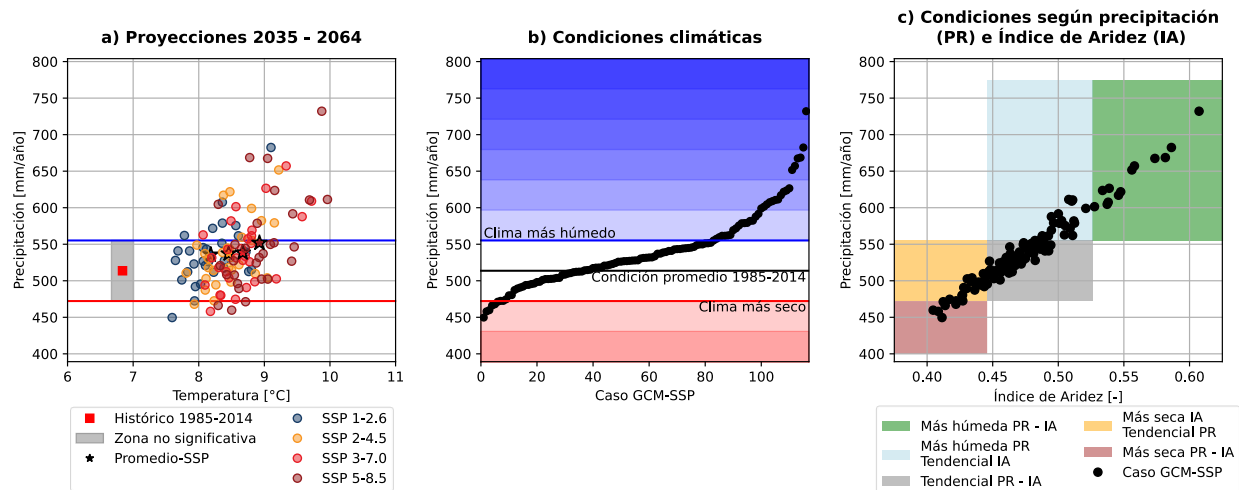


Figura 3. (a) Precipitación y temperatura anual proyectada al período 2035 – 2064, (b) condiciones climáticas definidas a partir de la precipitación como variable de referencia y (c) relación de las condiciones climáticas definidas a partir de la precipitación y el Índice de Aridez como variable de referencia. En (b) se incorporan rangos para distintos grados de “más seco” y “más húmedo”, según excedencia del umbral crítico. Tanto en (b) como en (c) se consideran todos los SSP y GCM.

Las proyecciones en la Figura 3a) muestran un consenso en el aumento en temperaturas entre escenarios SSP, con promedios de +1.4, +1.6, +1.8 y +2.1 °C para los escenarios SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 3-7.0 y SSP 5-8.5 respectivamente, lo cual no ocurre para la precipitación. Los cambios promedios en precipitación son de +22 mm/año (4%), +23 mm/año (5%), +25 mm/año (5%) y +38 mm/año (7%) para los escenarios SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 3-7.0 y SSP 5-8.5 respectivamente. Adicionalmente, existen condiciones críticas de disminución en precipitación del orden de 10% y aumentos del orden de 30% en los escenarios SSP optimistas (SSP 1-2.6) y pesimistas (SSP 5-8.5), implicando condiciones con menos disponibilidad de agua en narrativas socioeconómicas optimistas y condiciones con más disponibilidad de agua en narrativas pesimistas, lo cual es contraintuitivo para la gestión de los recursos hídricos.

La Figura 3b) muestra cada par GCM-SSP reordenado de menor a mayor en función de la precipitación futura, junto a los rangos que serían considerados condiciones “más seca”, “tendencial” y “más húmeda”. Para el caso del sistema TDP, considerando la precipitación como variable de referencia, hay una mayor inclinación a condiciones “más húmedas” y de mayor magnitud de cambio que a condiciones “más secas” y un gran porcentaje se mantiene en condición “tendencial”. Al considerar el Índice de Aridez como variable de referencia, el aumento en

temperatura influye en la oferta hídrica, incorporando la influencia de las narrativas socioeconómicas. Esto resulta en una redistribución de los casos GCM-SSP (Figura 3c).

La Figura 4 muestra más detalles de esta redistribución de las condiciones climáticas, considerando las cuatro variables de referencias evaluadas en este trabajo. Esta figura muestra que, en términos de la precipitación, todos los escenarios SSP muestran cambios significativos de aumento y disminución, además de casos sin cambio significativo, lo cual ocurre para las cuatro variables de referencia analizadas (resultados no se muestran). Para la precipitación, la mayor proporción de condiciones va a “tendencial” (77), seguido de condición “más húmeda” (33) y luego “más seca” (6). Al considerar el Índice de Aridez, la influencia de la temperatura en la oferta hídrica resulta en un traspaso desde la condición “más húmeda” a la “tendencial” (77) y de la “tendencial” a la “más seca” (26), resultando en más condiciones “más secas” que “más húmeda” (13), a diferencia del caso basado en la precipitación. Por otro lado, al considerar el caudal de entrada al lado Titicaca, se observa un traspaso en la otra dirección, desde “más seca” a “tendencial” (77) y de “tendencial” a “más húmeda” (29), siendo un punto medio entre las condiciones anteriores, mientras que, al considerar los niveles del lago, la condición “tendencial” se redistribuye en las condiciones “más seca” (37) y “más húmeda” (49).

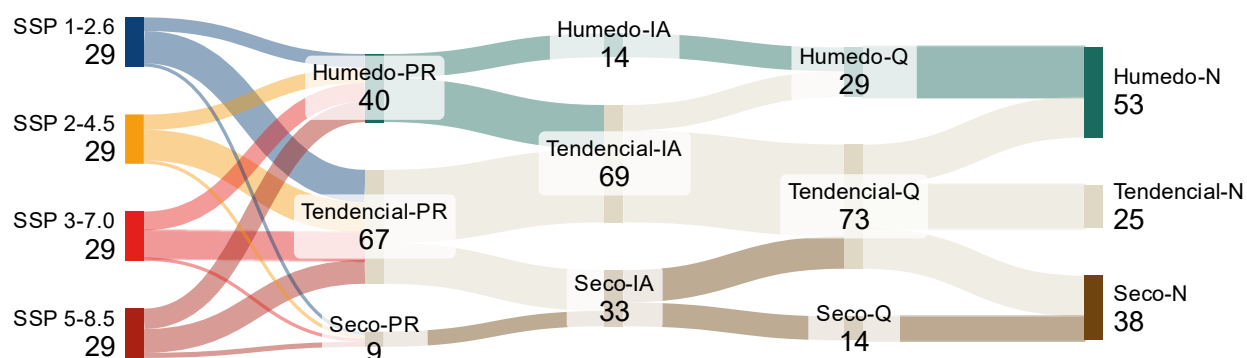


Figura 4. Distribución de las condiciones climática, según la variable de referencia considerada. Las siglas PR, IA, Q y N corresponden a precipitación, Índice de Aridez, caudal entrante al lago Titicaca y niveles del lago, respectivamente. El número bajo cada condición corresponde a la cantidad de par GCM-SSP que caen en esta condición. Creado en SankeyMATIC.com.

3.2 CAUDAL SUPERFICIAL ENTRANTE Y NIVELES DEL LAGO TITICACA

La Figura 5 presenta la evolución de los niveles (a y c) y los caudales superficiales entrantes al lago Titicaca (b y d) a escala anual. En general, los promedios asociados a los escenarios SSP (Figura 5 a y b) no muestran mayores diferencias entre sí en todo el período de modelación, e incluso, son similares al percentil 50% del total de simulaciones. Para los niveles del lago Titicaca se observa una separación de los escenarios SSP respecto al percentil 50% a partir del año 2040.

Al analizar las trayectorias basadas en condiciones climáticas (Figura 5 c y d), se observa que, al usar la variable de precipitación como referencia, los promedios tienden a ser más bajos (menores caudales y niveles) en todas las condiciones respecto a usar otras variables como referencia, mientras que, al utilizar el Índice de Aridez como referencia, los promedios tienden a ser más altos (mayores caudales y niveles). Por otro lado, al considerar los niveles del lago como referencia, los

promedios tienden a tomar valores más bajos en las condiciones húmedas, y altos en las condiciones secas, siendo un equilibrio menos extremo de usar como referencia la precipitación o el Índice Aridez como referencia en la definición de las condiciones climáticas. El caso de los caudales superficiales entrantes al lago presenta una situación promedio entre usar la precipitación o el Índice de Aridez como referencia.

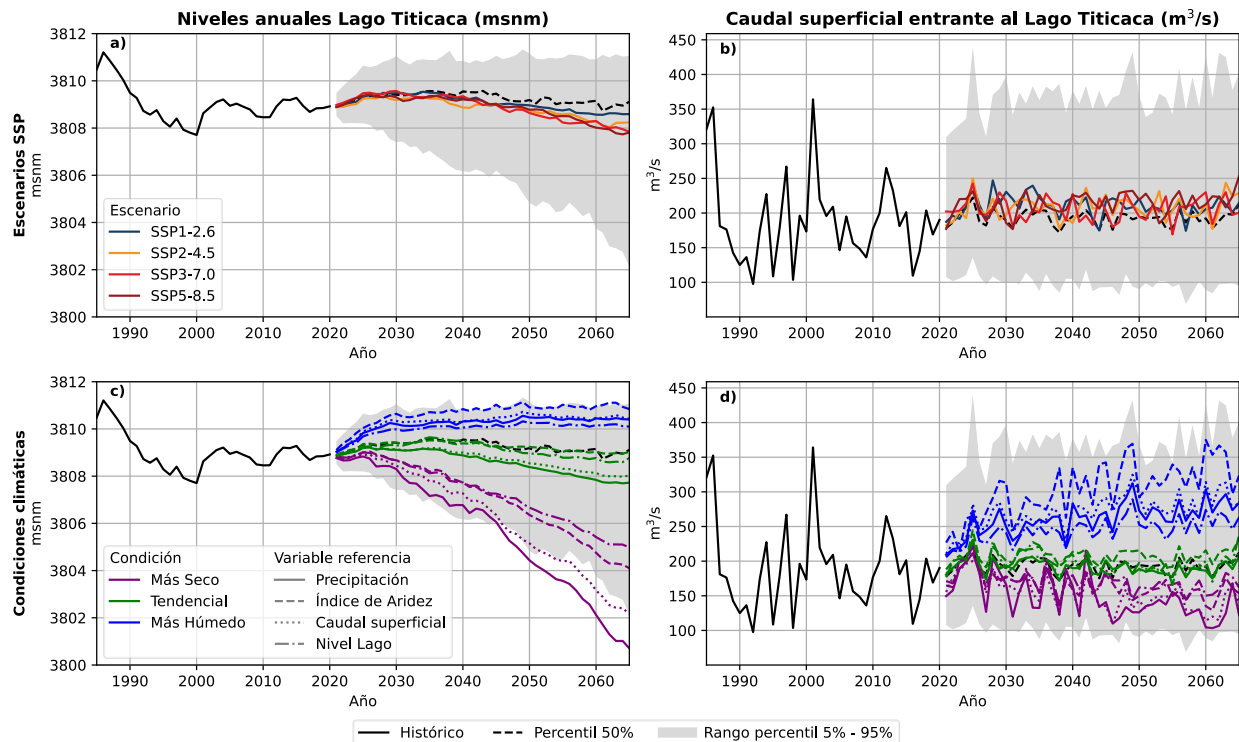


Figura 5. Comparación de la evolución de los niveles y caudales entrantes al lago Titicaca bajo los escenarios SSP y condiciones climáticas analizadas. El rango percentil 5%-95% y el percentil 50% considera el total de las 116 simulaciones que combinan los 29 GCM y 4 escenarios SSP.

La Figura 6 presenta la variabilidad mensual e incertidumbre de los caudales superficiales entrantes y niveles en el lago Titicaca, para cada uno de los escenarios SSP y para las condiciones climáticas basadas en el Índice de Aridez como referencia. Los resultados mensuales son consistentes con lo que ocurre a escala anual, donde los promedios y banda de incertidumbre de los escenarios SSP no muestran grandes diferencias entre ellos. Caso contrario ocurre con las condiciones climáticas, las cuales resultan en valores promedio e incertidumbre contrastante entre condición, además de relaciones similares a las de las tendencias anuales al usar las distintas variables de referencia.

Otro aspecto relevante en cuanto a la incertidumbre e implicaciones de los escenarios climáticos a considerar son los eventos extremos o la falla del sistema. La Figura 7 presenta diagramas de caja que resumen la ocurrencia de eventos de los escenarios SSP y condiciones climáticas consideradas. Se presentan tres tipos de eventos: i) caudales entrantes al lago que superan el percentil 95% del periodo de referencia; ii) niveles del lago asociados a sequía extrema (por debajo de 3,806.5 m.s.n.m. y iii) niveles sobrepaso (por encima de 3,812 m.s.n.m.). Esto considerando que la ocurrencia se refiere al número de meses en que cada evento se presenta en cada simulación.

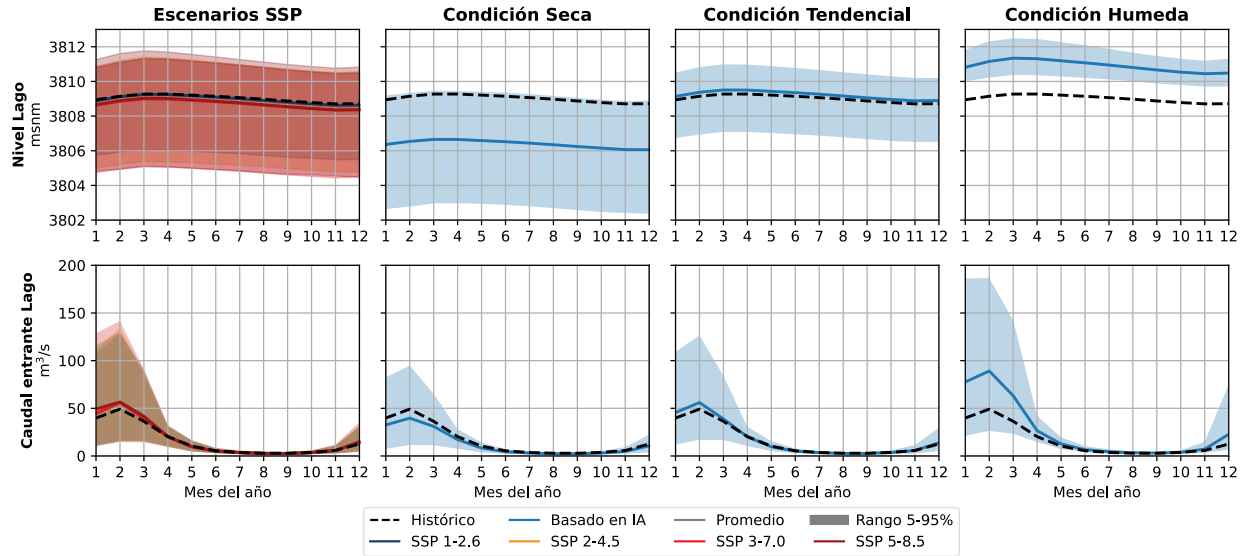


Figura 6. Comparación de la variación mensual de los niveles y caudales entrantes al lago Titicaca bajo los escenarios SSP y condiciones climáticas basadas en el Índice de Aridez (IA) como referencia. La incertidumbre está representada como el rango percentil 5%-95% del total totalidad de simulaciones que considera el escenario SSP o condición climática (si hay 10 simulaciones de 30 años, el promedio y percentiles de enero se calculan a partir de los 300 valores de enero). La columna de la izquierda muestra los cuatro escenarios SSP, pero estos se superponen.

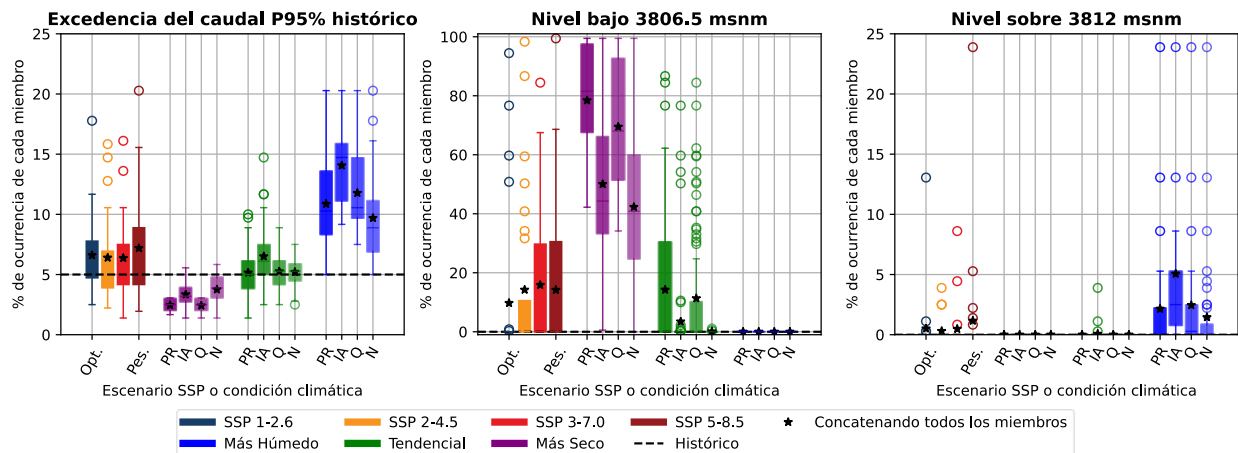


Figura 7. Ocurrencia de eventos extremos o fallas del sistema en el lago Titicaca bajo los escenarios SSP y condiciones climáticas analizadas. La estrella muestra el resultado al calcular la ocurrencia de la totalidad de simulaciones como un conjunto (distinto a promediar todos los casos).

A modo general en la Figura 7, los diagramas de cajas de las condiciones climáticas muestran un patrón similar al de las trayectorias anuales y la variación estacional. Respecto a los escenarios SSP, estos muestran condiciones similares para los caudales extremos, lo cual no ocurre en los niveles secos del lago, donde se observan diferencias marcadas entre escenarios. Estas diferencias están asociadas a la relación entre las narrativas socioeconómicas y los aumentos en temperatura, considerando que las dinámicas dentro del lago están altamente influenciadas tanto por la precipitación como por la evapotranspiración. Un aspecto importante que muestran estos

diagramas de caja es la diversidad de resultados que tiene cada uno de los miembros del conjunto o simulaciones. Por ejemplo, los escenarios SSP muestran que para los niveles bajos del lago en todos los escenarios hay al menos un miembro con ocurrencias mayores al 80% o de 0%.

Respecto a los caudales extremos, los miembros de la condición climática “más seca” son coincidentes en mostrar una menor ocurrencia de caudales sobre el extremo histórico, independientemente de la variable de referencia utilizada para definir la condición, mientras que las condiciones tendenciales se centran en valores similares al histórico y las “más húmedas” presentan valores mayores.

En cuanto a los niveles bajos del lago, umbral que nunca se ha sobrepasado en el período histórico, las condiciones “más seca” capturan los casos más críticos, con rangos entre 0 y 99% de ocurrencia (con una mediana cercana a 40%) al utilizar el Índice de Aridez o los niveles del lago como referencia y rangos entre 40 y 99% (con una mediana cercana a 68%) al utilizar la precipitación y caudal superficial entrante al lago como referencia. Las condiciones “tendencial” también muestran algunos casos con niveles bajos, destacando la condición definida por la precipitación o Índice de Aridez como referencia, con una mediana de 0%, pero promedio de 14% y con ocurrencia de hasta 90%. Los casos agrupados en condición “más húmeda” no resultaron en niveles bajos.

En cuanto a los niveles altos en el lago, las condiciones “más seca” y “tendencial” no presentan casos sobre el umbral, a excepción de la condición “tendencial” definida por el Índice de Aridez, que presenta 2 casos. En general, todos los casos de condición húmeda muestran excedencias mayores a 0 y casos puntuales entre 13 y 24%, destacando la condición definida por el Índice de Aridez. La condición definida por el nivel del lago es la que presenta menos excedencia del umbral, indicando que las condiciones que, en promedio, son significativamente “más húmedas” no necesariamente son los que capturan los valores extremos húmedos de la variable.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una propuesta metodológica para definir escenarios de cambio climático relevantes para la gestión de recursos hídricos, aplicado al Sistema Hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopó. Esta propuesta se formula a partir del análisis de cambios estadísticamente significativos en variables como la precipitación, Índice de Aridez, caudal superficial entrante al lago Titicaca y niveles del lago Titicaca para agrupar proyecciones climáticas en condiciones climáticas “más seca”, “tendencial” y “más húmeda”.

En el sistema TDP, las proyecciones climáticas de cada uno de los escenarios SSP se pueden distribuir en condiciones climáticas “más seca”, “más húmeda” y “tendencial” para todas las variables de referencia analizadas. En cuanto a los caudales superficiales entrantes al lago Titicaca y niveles, los resultados muestran promedios y rangos similares en las cuatro trayectorias socioeconómicas globales. Por otro lado, al analizar las condiciones climáticas, estas muestran resultados contrastantes y coherentes con la descripción de estas narrativas climáticas locales, capturando la incertidumbre de los diferentes escenarios climáticos que componen estas narrativas.

Los resultados de este trabajo muestran que, en el sistema TDP, las condiciones climáticas basadas en la precipitación como referencia resultan en condiciones “más secas” más críticas y “más

húmedas” menos críticas. Por otro lado, las condiciones climáticas basadas en el Índice de Aridez resultan en condiciones “más secas” menos críticas y “más húmedas” más críticas”. En cuanto a las condiciones definidas por el caudal entrante y los niveles del lago Titicaca, los primeros muestran un caso promedio entre definir la condición climática con la precipitación o Índice de Aridez como referencia, mientras que utilizar los niveles del lago Titicaca como referencia es un balance entre los casos menos críticos.

La estrategia presentada en este trabajo permite acotar las incertidumbres relacionadas con la gestión de los recursos hídricos mediante la definición de narrativas climáticas locales que, a diferencia de las narrativas socioeconómicas globales, representan condiciones coherentes con las métricas a analizar en la gestión de los recursos hídricos como, por ejemplo, evaluar indicadores de sequía bajo supuestos de condiciones secas, considerando la amplia incertidumbre que hay respecto a las condiciones futuras globales. Es importante destacar que esta estrategia no se basa en una caracterización específica, sino que es flexible y se debe definir acorde a las condiciones locales, las experiencias de los actores involucrados, los indicadores a analizar y los objetivos y alcances de la gestión de los recursos hídricos.

Un ejemplo de aplicación a la agricultura podría basarse en las proyecciones climáticas del escenario global pesimista (SSP 5-8.5 para el AR6-IPCC) y considerar el Índice de Aridez como variable de referencia para definir condiciones climáticas locales “más secas” en las cuales evaluar los impactos por sequías en los cultivos. En paralelo se podría utilizar el caudal máximo anual en un cauce de interés como variable de referencia para definir condiciones climáticas locales “más extrema” en las cuales evaluar impactos por inundación en los cultivos. Las sequías e inundaciones se evalúan en condiciones contrastantes y es poco común que un GCM o set de GCM logre capturar ambos procesos, por lo que evaluar las proyecciones climáticas que se clasifican como “más secas” y “más extrema” permitiría generar medidas de adaptación más robustas, incorporando también la incertidumbre asociada a las distintas proyecciones climáticas.

Este trabajo resalta la necesidad de avanzar en utilizar diversos escenarios climáticos para capturar de forma más robusta la información que un único escenario no puede representar, como lo son los extremos o fallas del sistema. En casos donde no se disponga de información suficiente o que la cantidad de simulaciones entre condiciones climáticas desequilibrada se recomienda complementar con generadores de clima, teniendo cuidado de evitar duplicar o repetir escenarios.

Finalmente, este trabajo avanza en la construcción de narrativas climáticas locales relevantes para la gestión de los recursos hídricos, que sean transparentes respecto a su definición y que faciliten la interpretación de las implicancias del cambio climático. Adicionalmente, este trabajo muestra cómo la incertidumbre de las proyecciones climáticas puede ser incorporada para la toma de decisiones, permitiendo a los actores entender que las proyecciones climáticas generan un rango de resultados sobre el cual deberían tomarse las decisiones y definirse alternativas de adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo del Proyecto Adaptación Transformacional y Robusta a la Escasez de Agua y al Cambio Climático en un Contexto de Profunda Incertidumbre del programa Horizonte Europa de la UE.

REFERENCIAS

- AghaKouchak, A., Chang, F., Huning, L., Love, A., Mallakpour, I., Mazdiyasni, O., Moftakhari, M., Papalexiou, S., Ragno, E., and Sadegh, M. (2020). Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48, 519-548. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055228>
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, 68(8), 1184-1201. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- Decremer, D., Chung, C., Ekman, A., and Brandefelt, J. (2014). Which significance test performs the best in climate simulations? *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66(1), 23139. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.23139>
- INTECSA, AIC, and CNR. (1993). Plan Director Global Binacional de Protección - Prevención de Inundaciones y Aprovechamiento de los Recursos del Lago Titicaca, Rio Desaguadero, Lago Poopó y Lago Salar de Coipasa (Sistema T.D.P.S.): Diagnostico Socioeconómico
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896
- Kundzewicz, Z, Krysanova, V., Benestad, R., Hov, Ø., Piniewski, M., Otto, I. (2018). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 79, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>
- Lima-Quispe, N., Escobar, M., Wickel, A., von Kaenel, M., and Purkey, D. (2021). Untangling the effects of climate variability and irrigation management on water levels in Lakes Titicaca and Poopó. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100927>
- Lima-Quispe, N., Ruelland, D., Rabatel, A., Lavado-Casimiro, W., and Condom, T. (2025). Modeling Lake Titicaca's water balance: the dominant roles of precipitation and evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences* 29, 655 - 682. <https://doi.org/10.5194/hess-29-655-2025>
- Mujumdar, P. and Ghosh, S. (2008). Modeling GCM and scenario uncertainty using a possibilistic approach: Application to the Mahanadi River, India. *Water Resources Research*, 44(6). <https://doi.org/10.1029/2007WR006137>
- O'Neill, B., Carter, T., Ebi, K., Harrison, P., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B., Riahi, K., Sillmann, J., van Ruijven, B., Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestedt, J., Green, C., Hasegawa, T., Leininger, J., Monteith, S., Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, 10, 1074-1084. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>
- Roth, N., Jaramillo, F., Wang-Erlandsson, L., Zamora, D., Palomino-Ángel S., and Cousins, A. (2021). A call for consistency with the terms 'wetter' and 'drier' in climate change studies. *Environmental Evidence*, 10, 8. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00224-0>
- SEI - MMAyA. (2024). Balance Hídrico de Bolivia: 1980 – 2020. <https://zenodo.org/records/10850934>
- Verbist, K., Maureira-Cortés, H., Rojas, P., Vicuña, S. (2020). A stress test for climate change impacts on water security: A CRIDA case study. *Climate Risk Management*, 28, 100222. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100222>
- Wang, H.-M., Chen, J., Xu, C.-Y., Zhang, J., and Chen, H. (2020). A framework to quantify the uncertainty contribution of GCMs over multiple sources in hydrological impacts of climate change. *Earth's Future*, 8, e2020EF001602. <https://doi.org/10.1029/2020EF001602>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A. (2005). WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500.