

Exposición a cambios en el clima en Bolivia

Exposure to changes in climate in Bolivia

Sazcha Marcelo Olivera-Villarreal¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1864-7374>

Mercedes Andrade-Velázquez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9810-6003>

Ojilve Ramón Medrano-Pérez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>

¹Profesor investigador, Departamento de Teoría y Procesos del Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México, México, satzcha@msn.com

²Cátedra Conacyt-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS), Villahermosa, Tabasco, México, mercedes.andrade@ccgs.mx

³Cátedra Conacyt-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS), Villahermosa, Tabasco, México, ojilve.medreno@ccgs.mx

Autor para correspondencia: Ojilve Ramón Medrano-Pérez, omedrano@conacyt.mx

Resumen

Bolivia, por ubicación y características topográficas tiene una alta exposición a eventos climáticos extremos. De manera recurrente, el país se ve afectado por sequías y tormentas, que traen como consecuencia olas de calor e inundaciones con efectos negativos para la población y la economía en general. Por esta razón, el análisis de datos temporales y espaciales climáticos es más patente que nunca, a fin de afrontar los impactos socioeconómicos y ambientales futuros asociados con el conocimiento y entendimiento de los patrones climáticos en su territorio. La presente investigación se enfoca en determinar los cambios en las variables climáticas de precipitación y temperatura, generando indicadores sobre el comportamiento de estas variables e identificando las zonas de Bolivia con mayor exposición temporal a los cambios del clima en las últimas décadas. Así, este estudio propone una regionalización que permita contrastar y analizar dichos cambios. De tal modo, se espera contribuir a la generación de políticas públicas e investigaciones en torno a los ámbitos del riesgo, vulnerabilidad, adaptación y resiliencia climática de las zonas de mayor exposición identificadas en este estudio.

Palabras clave: cambio climático, variabilidad climática, vulnerabilidad, patrones climáticos, precipitación, temperatura.

Abstract

Bolivia, by location and topographic characteristics, is a country with high exposure to extreme climate events. Often, the country is affected by droughts and storms that result in heat waves and floods with adverse

effects for the population and the economy in general. For this reason, the analysis of temporal and spatial climate data is more evident than ever to face the socio-economic and environmental impacts associated with knowledge and understanding of the climate patterns in the country. The present investigation focuses on determining the changes in climatic variables of precipitation and temperature, generating indicators on these variables' behavior, and identifying Bolivia's areas with the most significant temporal exposure to climate changes in recent decades. Thus, this study proposes a regionalization that allows to contrast and analyzes these changes. As a result, it is expected to contribute to the generation of public policies and research around the areas of risk, vulnerability, adaptation, and climate resilience of the most significant exposure areas identified in this study.

Keywords: Climate change, climate variability, vulnerability, Climate patterns, precipitation, temperature.

Recibido: 25/03/2019

Aceptado: 08/11/2020

Introducción

El cambio climático se considera el mayor desafío de la sociedad en el siglo XXI, pues sus efectos adversos afectan una multiplicidad de sectores a distintas escalas y niveles (Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez, 2020). Las pérdidas de vidas humanas y los costos asociados (p. ej., sociales, económicos, ecológicos, culturales y políticos) con los fenómenos hidrometeorológicos extremos representan un llamado a la acción trascendental para la prevención y adaptación a estos fenómenos.

Globalmente, según Stern (2007) —en Molina, Sarukhán y Carabias *et al.* (2017), las pérdidas por eventos hidrométricos alcanzaron cerca de US\$83 000 millones durante la década de 1970, con 29 eventos de gran intensidad; mientras que durante el decenio de 1990 alcanzaron los US\$440 000 millones con 74 eventos. Desde una perspectiva climática, diferentes estudios recogidos en Herring *et al.* (2018) han encontrado evidencias sobre la influencia del cambio climático como causa de los eventos extremos más allá de los límites de la variabilidad natural.

Esta tendencia repercutirá en una mayor recurrencia de estos eventos en el orbe y las pérdidas relacionadas, como resultado de las conexiones entre el calentamiento global y los eventos climáticos. Se estiman en más de 1 000 millones las personas que viven en zonas expuestas a ciclones tropicales, y cerca de 800 millones en áreas de inundación potencial (Molina *et al.*, 2017). Más aún, se prevé que los eventos climáticos extremos continúen profundizándose según las proyecciones (WWAP, 2018; CEPAL, 2015; PNUD, 2013).

Igualmente, los fenómenos hidrometeorológicos extremos afectan en mayor medida a los países de bajo-medio nivel de ingresos, ya sea por su nivel y/o rezago socioeconómico, por sus capacidades (técnicas-

políticas-económicas), o por su ubicación (regiones tropicales, intertropicales, áridas y semiáridas), viéndose afectada, entre otras cosas, su economía y modo de vida en general. Se estima que, en países de ingresos bajos, los daños superan el 5 % del PIB; mientras que en países de ingresos intermedios sólo el 1 % del PIB, y en los desarrollados menos del 0.1 % del PIB entre 2001 y 2006 (Molina *et al.*, 2017). En el caso de los países latinoamericanos, estas cifras son abrumadoras. En particular, en países como Bolivia los impactos socioeconómicos del cambio climático son considerables (PNUD, 2013; Hoffmann & Requena, 2012).

Bolivia, por su variada topografía, que va de los grandes nevados andinos a las llanuras amazónicas pasando por los valles interandinos es un país caracterizado por una alta exposición a eventos climáticos extremos, sequías y/o tormentas intensas que producen inundaciones, granizadas y olas de calor, entre otros eventos recurrentes. Estos, a su vez, se ven afectados por la exposición de la región andina a fenómenos climáticos episódicos, como El Niño y La Niña, los cuales se han traducido en cuantiosas pérdidas económicas y humanas para Bolivia (Olivera-Villarroel & Fuerte-Celis, 2017).

Además, se considera un país especialmente vulnerable al impacto del cambio climático debido a que se localiza en una región de extremos climáticos; a la deforestación en la zona amazónica; a la vulnerabilidad de sus ecosistemas y glaciares, y a los niveles de pobreza e inequidad, entre otros factores. Así, los principales impactos asociados con ello son los siguientes: afectaciones en la seguridad alimentaria; menor disponibilidad de agua; fenómenos naturales más frecuentes y de mayor

intensidad; incremento en la incidencia de enfermedades (p. ej., transmitidas por mosquitos), y un mayor número de incendios forestales (Oxfam Internacional, 2009; Nordgren, 2011).

Asimismo, otra dimensión clave dentro este contexto es la baja capacidad para enfrentar el creciente riesgo climático que presentan los países en desarrollo. En el caso particular de Bolivia, a pesar de los esfuerzos que se han realizado en materia político-institucional, según PNUD (2011), es necesario profundizar aún más estos instrumentos y articular a investigadores con los tomadores de decisión, a fin de hacer frente al creciente riesgo por este tipo de eventos climáticos.

En tal contexto, estudios globales han analizado y reportado cómo los eventos extremos afectan a crecidas e inundaciones. En particular, Hirabayashi *et al.* (2013) presentan el riesgo global ante inundaciones para finales del siglo XXI sobre la base de los resultados de 11 modelos climáticos. A su vez, Arnell y Gosling (2016) evalúan las implicaciones del cambio climático para el riesgo de inundaciones fluviales en el mundo con base en la estimación de las relaciones de frecuencia de inundaciones a una resolución de cuadrícula de $0.5 \times 0.5^\circ$, utilizando un modelo hidrológico global con escenarios climáticos combinados de 21 modelos, además de las proyecciones de población futura. En cambio, Kundzewicz *et al.* (2014) proporcionan una perspectiva holística sobre los cambios en el riesgo de inundaciones mediante una evaluación de la literatura incluida en el informe IPCC-SREX (*The Special Report on "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation" of the Intergovernmental Panel on Climate Change*) y los estudios realizados

hasta entonces sobre los impactos del cambio climático en las características de las inundaciones.

Igualmente, estudios recientes muestran un creciente interés en la comprensión y análisis de los patrones de precipitación en regiones como Centroamérica y el Caribe (Guevara-Murua, Williams, Hendy, & Imbach, *et al.*, 2018; Muñoz-Jiménez *et al.*, 2019), y en el nivel de cuencas compartidas, como México y Guatemala (Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez, 2020). Por otro lado, Olivera y Heard (2019) proponen el uso de la distribución de Weibull para la evaluación de eventos extremos en precipitación y las tendencias de las precipitaciones extremas en la parte occidental de México. Asimismo, Del-Jesús *et al.* (2020) evalúan los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de los países andinos de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia mediante modelado numérico (modelo VIC) para el periodo histórico 1980-2010 y las proyecciones de los escenarios del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

En el caso de Bolivia, aunque existen numerosos estudios sobre los impactos del cambio climático, pocos son metodológicamente rigurosos e internamente consistentes (Andersen & Jemio, 2015). De ahí que no disponer de información temporal y espacial completa y de calidad se considere como un obstáculo para los estudios del clima en este país (Andrade, 2008). Ante tal panorama, la generación de información histórica fehaciente sobre la exposición a cambios en el clima a nivel regional para Bolivia es relevante. Sin embargo, contar con la información climática completa no deja de ser uno de los retos por afrontar (PNUD, 2013) tanto para dotar de una mayor consistencia y conciencia sobre la

situación del clima como para desarrollar una resiliencia climática a impactos socioeconómicos y ambientales en el futuro. Por otro lado, se reconoce la importancia de fortalecer las capacidades en torno a la comprensión del clima, como lo indica el objetivo 13 “Cambio Climático: Acción por el Clima” de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) (NU, 2018).

En tal sentido, para comenzar a determinar los efectos del cambio climático se deben realizar estudios sobre los cambios temporales y espaciales del clima regional, dado que en lo global se cuenta con información que reporta diferentes impactos por el incremento de temperatura a escala planetaria (IPCC, 2013). Por tanto, como punto de partida para determinar los efectos del cambio climático en Bolivia se necesitan llevar a cabo estudios sobre los cambios temporales y espaciales del clima en el nivel regional. Si bien se han hecho algunos estudios, como el de Andrade (2018), para el conocimiento del comportamiento climático en la zona del Altiplano (Perú-Bolivia), Bolivia presenta enormes desafíos para el análisis de los patrones climáticos.

En este contexto, el presente estudio se concentra en determinar los cambios en las principales variables climáticas de referencia (precipitación y temperatura) con respecto a un periodo base de principios del siglo XX, mediante la generación de indicadores sobre el comportamiento de estas variables (temperatura y precipitación), e identificar las zonas de Bolivia con mayor exposición temporal a los cambios del clima en las últimas décadas. Por ello, identificar las zonas que han sido afectadas por cambios a las exposiciones climáticas de eventos extremos es de vital importancia, pues permite reconocer aquellas zonas que pudieran estar más propensas

a los impactos del cambio climático. Así como su correlación con moduladores climáticos como es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

El estudio contrastará la regionalización propuesta con el desarrollo de un análisis de eventos climáticos extremos, usando para ello el cambio en la distribución de la precipitación y los extremos de temperatura a partir del uso de distribuciones Weibull. Se pretende desarrollar una regionalización de las zonas expuesta a los mayores cambios en precipitación y temperatura en Bolivia que sirva de línea base para la toma de decisión y generación de políticas estatales y regionales sobre la adaptación a los impactos climáticos a los que se encuentran expuestas las diferentes regiones bioclimáticas de Bolivia. Sobre esta base se concluye que este tipo de estudios pueden favorecer y estimular no sólo la investigación en estos temas, sino también la adaptación y toma de decisión de los instrumentos de política pública en torno al riesgo y vulnerabilidad que presentan las zonas identificadas en este manuscrito.

Descripción de la zona de estudio

El Estado Plurinacional de Bolivia tiene una superficie de 1 098 581 km²; limita al norte y al este con Brasil; al sur, con Paraguay y Argentina; al

oeste, con Chile y Perú (véase la Figura 1). Cuenta con aproximadamente 11 307 000 habitantes, según las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística (INE) al 2018 (INE, 2018). Administrativamente, Bolivia se divide en nueve departamentos (Beni, Chuquisaca, Cochabamba, La Paz, Oruro, Pando, Potosí, Santa Cruz y Tarija), en 113 provincias y en más de 300 municipios. En su geografía se distinguen tres regiones diferenciadas, a saber: a) la región andina u occidental, con alturas promedio mayores a los 3 000 metros (28 % del territorio); b) la zona subandina, con altura media de 2 500 metros; c) las llanuras tropicales, con altura entre 200 y 300 metros (60 % del territorio). Su economía se agrupa en los sectores industrial, agropecuario y de servicios.

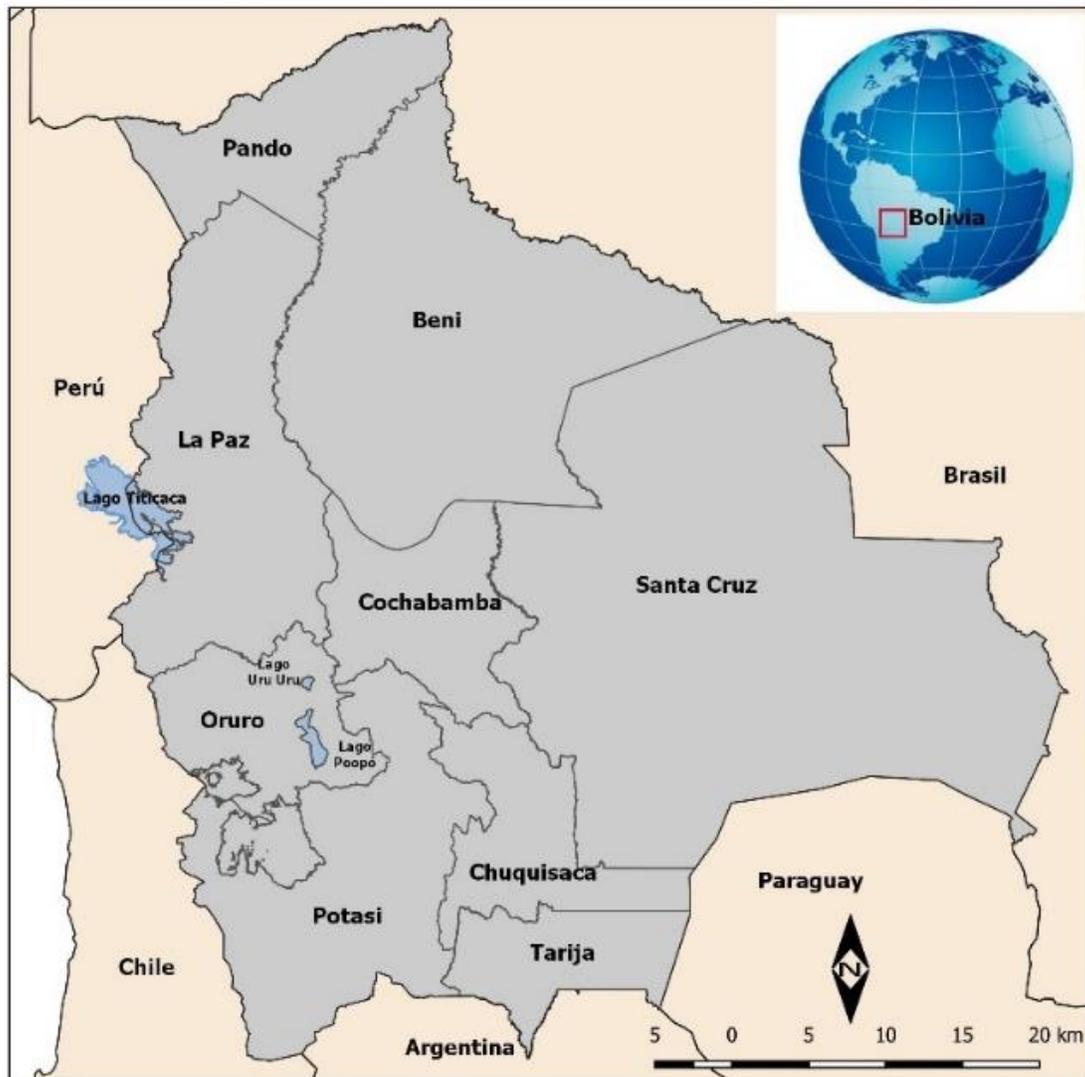


Figura 1. Ubicación y división política-administrativa de departamentos de Bolivia. Fuente: elaboración propia basada en información geográfica de GeoBolivia (<https://geo.gob.bo/>).

En cuanto al clima, sus condiciones dependen fundamentalmente del monzón sudamericano (SAMS, por sus siglas en inglés), la orografía y la presencia de la Amazonia (PNUD, 2011). En igual sentido, se expresan

Del-Jesús *et al.* (2020), al señalar que el clima de los países andinos está influenciado por factores como Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés); El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), y la orografía de la región. No obstante, a pesar de ubicarse dentro de las latitudes tropicales, las condiciones climáticas de Bolivia varían entre regiones tropicales en las partes bajas del país a condiciones polares en las partes más altas de los Andes. Así, en las zonas bajas del norte se tiene un clima tropical húmedo con temperaturas altas, alta humedad y altas precipitaciones; mientras en las zonas bajas del sur, si bien las temperaturas son altas, el clima es seco.

Metodologías

Identificación de zonas con mayores cambios históricos de precipitación y temperatura de 1960 a 2016

La base de datos utilizada para el análisis de trimestres lluviosos y secos fue CRU TS4.01: *Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS)* versión 4.01, datos de rejilla con resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y variación mensual en el periodo de 1960-2016 (Harris, Jones, Osborn, & Lister, *et al.* 2014).

Se empleó el comportamiento climatológico de las variables de precipitación y temperatura en forma estacional a lo largo del periodo de 1960 a 2016, con anomalías respecto a 1960-1990 de manera espacial. La selección de los trimestres más lluviosos y secos se determinó mediante la climatología para cada trimestre DEF, MAM, JJA y SON. Donde sus anomalías indican los eventos húmedos y secos. Esto permite identificar los trimestres más lluviosos y secos a lo largo del periodo de estudio, así como las zonas donde se registran las anomalías más grandes tanto positiva como negativamente a lo largo del tiempo. Contando con la información de los trimestres más lluviosos y secos, se procedió a determinar las zonas con las anomalías de temperatura más grandes, negativa y positivamente.

Este proceso sigue el principio de los indicadores climáticos definidos como (Rivas-Martínez, 2002) los que se indican a continuación.

Precipitación

Precipitación del trimestre más lluvioso (mm/d) = $Prec_1 + Prec_2 + Prec_3$

Precipitación del trimestre más seco (mm/d) = $Prec_1 + Prec_2 + Prec_3$

Temperatura

Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)

Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)

Determinación de tendencias para puntos de las zonas de mayores impactos por cambios del clima

Para el análisis de tendencias, se aplicó el método de regresión lineal a las anomalías de cada variable climática (temperatura y precipitación), el cual sigue la siguiente Ecuación (1):

$$Y = b(0) + b(1) * X \quad (1)$$

Donde Y corresponde a la variable climática (T o Pr) y X al tiempo (T).

También se determinó el valor mínimo y máximo de las anomalías de cada variable a lo largo del periodo de estudio.

Análisis de eventos extremos

La cantidad de eventos climáticos extremos parecen haber aumentado en los últimos años. La prueba de la importancia de estos cambios depende de la distribución de frecuencia de las variables, en especial cuando el foco de análisis está en las tendencias a largo plazo; en este caso, la frecuencia e intensidad de eventos extremos. El efecto principal de estos cambios se puede ver en el aumento de las pérdidas agrícolas y de infraestructura, entre otras, y las tendencias en desastres naturales como inundaciones, tormentas, sequías y temperaturas extremas (Hoeppe, 2016; Holland & Webster, 2007; Smith & Katz, 2013; De-Bruijn, 2005; De-Bruijn, Klijn, McGahey, Mens, & Wolfert, 2018; Francis & Hengeveld, 1998; Meehl *et al.*, 2000).

Un enfoque para analizar tendencias en eventos extremos es estimar tendencias asumiendo distribuciones Gaussianas. Este enfoque es limitado, en el entendido de que la mayoría de los eventos extremos no sigue este tipo de distribución. Por lo tanto, existe evidencia limitada sobre la utilidad de cualquier enfoque que asuma una distribución Gaussiana. Así, la investigación basada en esta suposición no ha permitido llegar a conclusiones sobre cambios en la intensidad o frecuencia de los eventos extremos (Moore, Matthews, Simmons, & Leduc, 2015; Francis & Hengeveld, 1998; Stern, 2007; Meehl *et al.*, 2000).

Un enfoque más útil para analizar eventos extremos usa la teoría del valor extremo (TEV). Esta teoría trata sobre el comportamiento de "desviaciones extremas de la mediana de las distribuciones de probabilidad" de series de tiempo finitas de una colección de observaciones aleatorias, que se supone son independientes e

idénticamente distribuidas (iid), e intenta evaluar el tipo de distribuciones de probabilidad generadas por el proceso (Beker, 2014; Salzano, 2008). El teorema de Fisher-Tippet-Gnedenko es un resultado general en TEV con respecto a la distribución asintótica de estadísticas de orden extrema. El máximo de una muestra de variables aleatorias iid después de la renormalización adecuada converge en la distribución de una de las tres distribuciones paramétrica extremas: la distribución de Gumbel, Fréchet o Weibull (Gnedenko, 1943; Fisher & Tippett, 1928).

La selección del tipo de distribución depende del comportamiento de las variables que se analizan. La distribución de Gumbel se define en el intervalo $(-\infty, +\infty)$. La distribución de Fréchet tiene un límite inferior cercano a cero. Los parámetros de escala y forma de la distribución de Weibull sólo tienen un límite inferior de cero sin límites superiores. En esta investigación de precipitación y temperaturas extremas se usa la distribución de Weibull porque la mayoría de los días no llueve, mientras que los eventos de precipitación extrema son extraordinariamente grandes con una considerable heterogeneidad temporal, y las temperaturas extremas también tienen comportamiento temporales heterogéneos y permite, con la generación de un punto de comparación, una distribución específica de eventos de temperatura extrema en forma independiente de la serie temporal de temperaturas.

Las distribuciones Weibull se usaron previamente para analizar datos climáticos (Kotz, 2000). Holland y Webster (2007) empleó distribuciones de Weibull para evaluar el aumento de la proporción de huracanes muy intensos, Pavia y O'Brien (1986) utilizaron esta distribución para estudiar las velocidades mundiales del viento, y Sharma y Singh (2010) usaron 17

distribuciones para modelar la lluvia máxima diaria, uno de estos fue la distribución de Weibull. Llegaron a la conclusión de que la distribución generalizada del valor extremo (familia de distribución de Weibull) era la mejor opción para la mayoría de los datos semanales (el periodo más corto que consideraban). La primera es una innovación metodológica el uso en la distribución para el análisis de temperaturas extremas.

La distribución de Weibull (Weibull, 1939) se representa por medio de tres parámetros: $\mu(x_0, \alpha, \beta)$. Su densidad de probabilidad es $f(x) = (\alpha/\beta)[(x-x_0)/\beta]^{\alpha-1} \cdot \exp\{-(x-x_0)/\beta\}^\alpha$, $x > x_0$, y la función de distribución es $F(x) = 1 - \exp\{-(x-x_0)/\beta\}^\alpha$, $x > x_0$. La distribución de Weibull se propuso de inicio para representar la distribución de la resistencia a la rotura de materiales, y se usa por lo común en estudios de confiabilidad y control de calidad. Las probabilidades para la distribución de Weibull se calculan fácilmente teniendo en cuenta que la variable aleatoria $Z = [(X - x_0)/\beta]^\alpha$ tiene una distribución exponencial negativa estándar, $\varepsilon(1)$.

La Función de Distribución Acumulativa (FDC) de una variable aleatoria de Weibull es expresada por:

$$F_{(X)} = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2)$$

Esta función puede linealizarse tomando el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación (1):

$$\ln[-\ln(1 - F_{(X)})] = \beta \ln X - \beta \ln \alpha \quad (3)$$

Los valores de $F(X)$ dependen de los parámetros desconocidos α (factor de escala de Weibull, en este caso, mm por día o °C por día) y β (factor de forma de Weibull), y por lo tanto solo pueden estimarse mediante una regresión lineal de la Ecuación (2). Se han propuesto varios estimadores para $F(X)$ dependiendo del tipo de datos, siendo el estimador de Bernard (Ecuación (3)) el más utilizado, particularmente en el análisis de riesgos industriales. Este estimador es una aproximación de rango mediano, junto con los estimadores de Blom (Ecuación (4)), Bergman (Ecuación (5)), Weibull (Ecuación (6)) y Filliben (Ecuación (7)) luego de Cacciari y Montanari . (1991):

$$\text{Estimador de Bernard } F_{(i,n)} = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (4)$$

$$\text{Estimador de Blom } F_{(i,n)} = \frac{i-0.5}{n+0.25} \quad (5)$$

$$\text{Estimador de Bergman } F_{(i,n)} = \left(1 - \frac{i}{n+1}\right) * \ln \left(1 - \frac{i}{n+1}\right)^2 \quad (6)$$

$$\text{Estimador de Weibull } F_{(i,n)} = \frac{i}{n+1} \quad (7)$$

El uso de estimadores para $F(X)$ es propenso a introducir sesgos en las estimaciones de los parámetros α y β . Los investigadores usualmente

eligen un estimador que les da la mayor eficiencia (R -cuadrado), pero la iteración de diferentes estimadores también es común.

Las principales metodologías que se han utilizado para las estimaciones de parámetros son las siguientes: estimación gráfica, método de momentos, estimación de mínimos cuadrados (LSE) y estimación de máxima verosimilitud (MLE) en sus dos versiones con el uso de estimadores como pesos (WMLE) o sin ellos. Los diferentes métodos de estimación de parámetros pueden dar lugar a estimaciones muy diferentes. Por lo tanto, es importante tener criterios objetivos para instruir la selección de un método de estimación sobre las alternativas. Los criterios comunes incluyen varianza mínima, consistencia, suficiencia y simplicidad (Zhang, Xie, & Tang, *et al.*, 2008). En este caso, la eficiencia (R cuadrado y *Root Mean Square Error* (RMSE) se consideraron los mejores criterios (Serrano, 2013). El método ponderado propuesto (1.5) asigna los pesos más altos a los eventos extremos, que ha dado lugar a las mejores estimaciones en el presente caso, medidas en términos de R cuadrado y RMSE (Olivera & Heard, 2019).

Siguiendo a Zhang *et al.* (2008), el cálculo de MLE para estimar los dos parámetros basados en el Weibull FCD linealizado en la Ecuación (3) es el siguiente:

Donde $X = \ln(x)$ y $Y = \ln [-\ln(1 - F(X))]$, resultando la ecuación a estimar:

$$Y = \beta X - \beta \ln \alpha \quad (8)$$

Siendo la función objetivo de la WMLE:

$$\min SS = \sum_{i=1}^r w_i [y_i - (\beta x_i - \beta \ln \alpha)] \quad (9)$$

En esta investigación, los métodos WMLE se usaron para estimar los parámetros de distribución de Weibull. Donde w_i se obtiene siguiendo (1.5). La introducción de w_i mejora la eficiencia del cálculo del parámetro β , pero no corrige el error introducido al utilizar una estimación aproximada de $F(X)$. El error también es evidente en el parámetro α . Por esta razón, se usa un segundo paso y el cálculo del último parámetro (α) basado en la estimación del primer parámetro β , es decir, β se usa:

$$\min SS = \sum_{i=1}^r w_i [(y_i - (\beta x_i - \beta \ln \alpha) | \beta)]^2 \quad (10)$$

La aplicación del procedimiento propuesto para calcular los parámetros de Weibull, α y β , se resume de la siguiente manera:

Paso 1: clasifique los tiempos de eventos extremos y calcule las posiciones de trazado del eje Y usando el estimador $F(X)$.

Paso 2: calcule w_i de acuerdo con el estimador de Bergman (Ecuación (6)).

Paso 3: obtenga las estimaciones para α y β usando WMLE.

La base de datos usada para el análisis de eventos extremos de precipitación y temperatura emplea información diaria de estaciones hidrometeorológicas comprendida entre los años 1977-1997 a 1998-

2014, base desarrollada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y del Sistema Integrado de Gestión de Estaciones (SIGE) de Bolivia (SIGE, 2020). La base de datos al usar información real ve restringida la información a estaciones y a una temporalidad que cumplen los criterios de calidad de datos según procesamiento desarrollado bajo el paquete informático *RCLIMDEX*.

Resultados

Identificación de zonas con mayores cambios históricos de precipitación y temperatura de 1960 a 2016

Precipitación

En la Figura 2 se muestra la evolución temporal de las anomalías de la variable precipitación en toda la región del país de Bolivia. En ella se pueden identificar que los trimestres más lluviosos corresponden a enero-febrero-marzo (EFM) y a octubre-noviembre-diciembre (OND). En

particular, para los años 1978-1979, 1981-1982, 1984, y 2014. La Figura 3 muestran algunos de estos trimestres. Esto corresponde con las oscilaciones climáticas que se discuten más adelante.

Anomalía Pre 1960-2016 Estacional (mm/d)

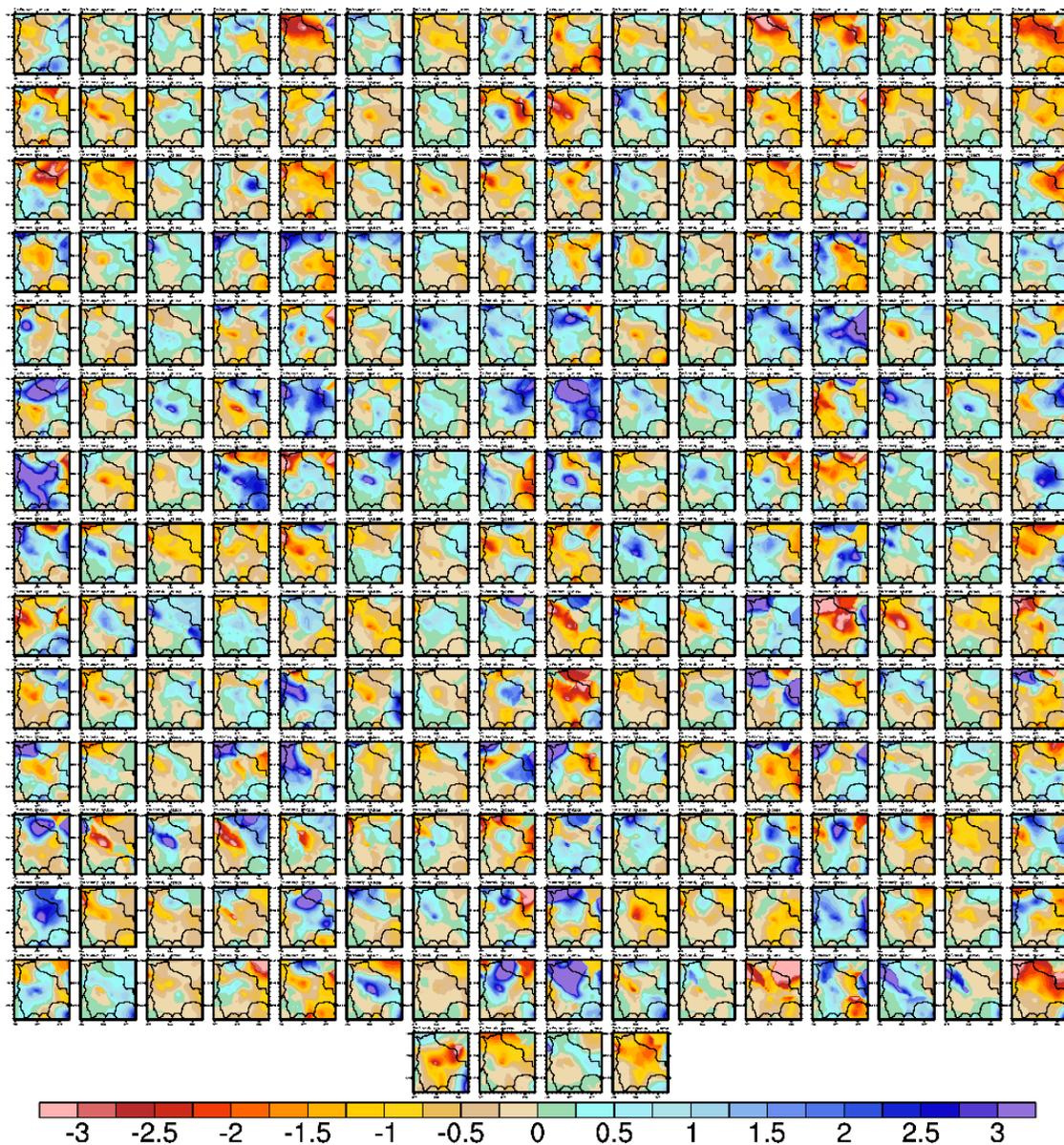


Figura 2. Evolución temporal de las anomalías de precipitación en Bolivia (1960-2016). Las anomalías positivas, es decir, aquellos eventos húmedos, se encuentran en la escala de color azul a morado; mientras que los eventos secos, anomalías negativas, se marcan dentro de la escala de café-amarillo a rojo. Fuente: elaboración propia.

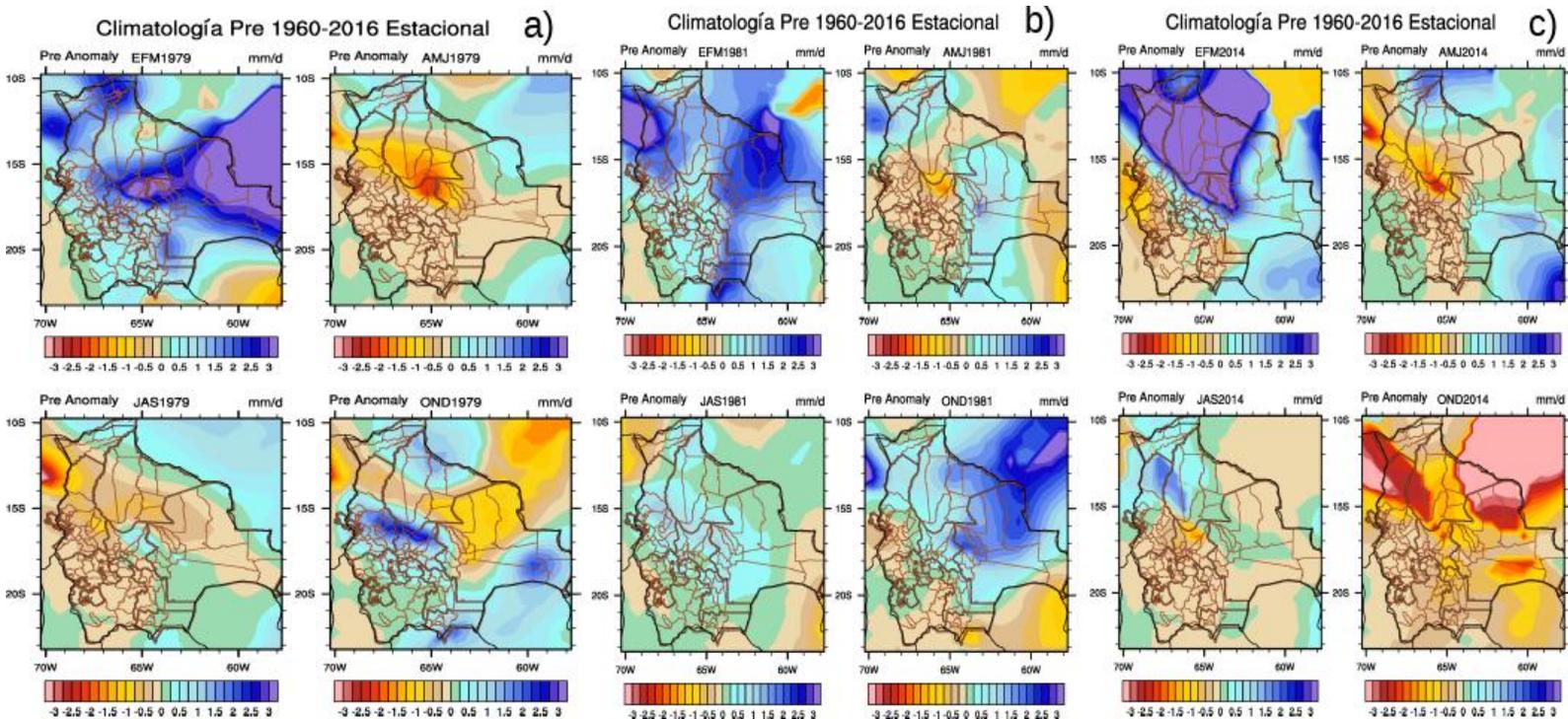


Figura 3. Trimestres más lluviosos a lo largo de 1960-2016 en Bolivia: a) 1979, b) 1981 y c) 2014. Las anomalías positivas, es decir, aquellos eventos húmedos, se encuentran en la escala de color azul a morado; mientras que los eventos secos, anomalías negativas, se marcan en la escala de café-amarillo a rojo. Fuente: elaboración propia.

Estos resultados muestran que las zonas donde los cambios en la precipitación son mayores con respecto a 1960-1990 a lo largo del periodo de tiempo de estudio corresponden a los límites al norte y este del país. No obstante, este estudio muestra el comportamiento climatológico de la zona respecto al análisis de eventos extremos que se abordará en la siguiente subsección.

Por otro lado, los trimestres más secos corresponden igual a EFM y OND, en los años 1961-1963, 1966-1968, 1994-1995, 1998-1999, 2015-2016. Si bien las épocas de lluvias y secas en la zona difieren en estos trimestres, se puede observar que existe la influencia de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), más adelante se describe al respecto.

Temperatura

La Figura 4 muestra la evolución temporal de las anomalías de la temperatura para toda Bolivia. Se puede observar que los trimestres más lluviosos no necesariamente coinciden con los trimestres más calientes o fríos. Los más calientes corresponden a los años 1961, 1963, 2015 y trimestre (julio-agosto-septiembre: JAS), 1986 y 1998 trimestre AMJ y EFM, respectivamente. Y los más fríos a 1960, 1971, 2008 (AMJ); 1973, 1981, 1989, 1990, 1992, 1993, 2003, 2013 (JAS). Por otro lado, la Figura

5 muestran los trimestres con las anomalías de la temperatura de los trimestres más lluviosos y secos.

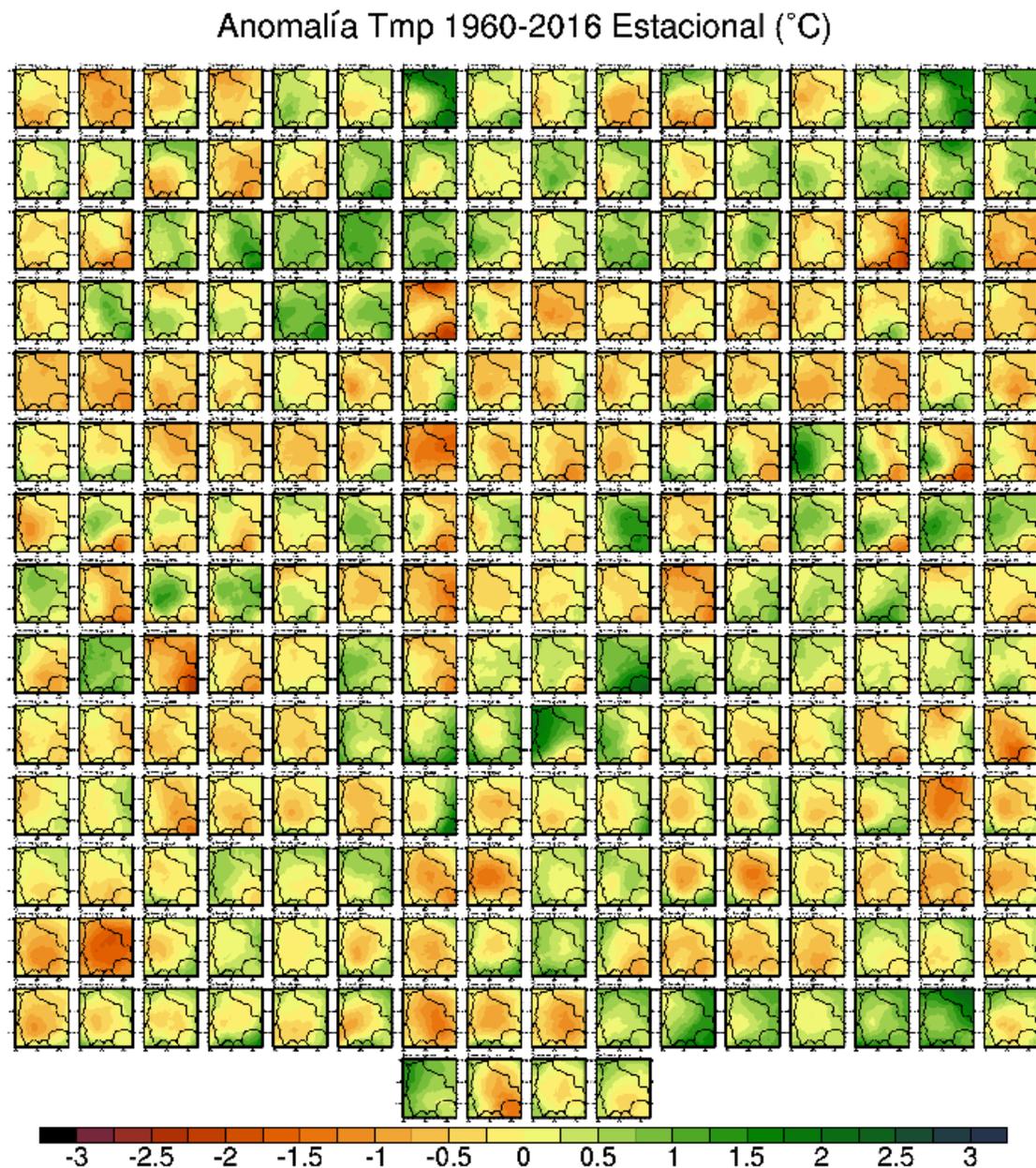


Figura 4. Evolución temporal de las anomalías de temperatura en Bolivia (1960-2016). Las anomalías positivas, es decir, aquellos eventos cálidos, se encuentran en la escala de color verde; mientras que los eventos fríos, anomalías negativas, se encuentran marcados en la escala de amarillo a café. Fuente: elaboración propia.

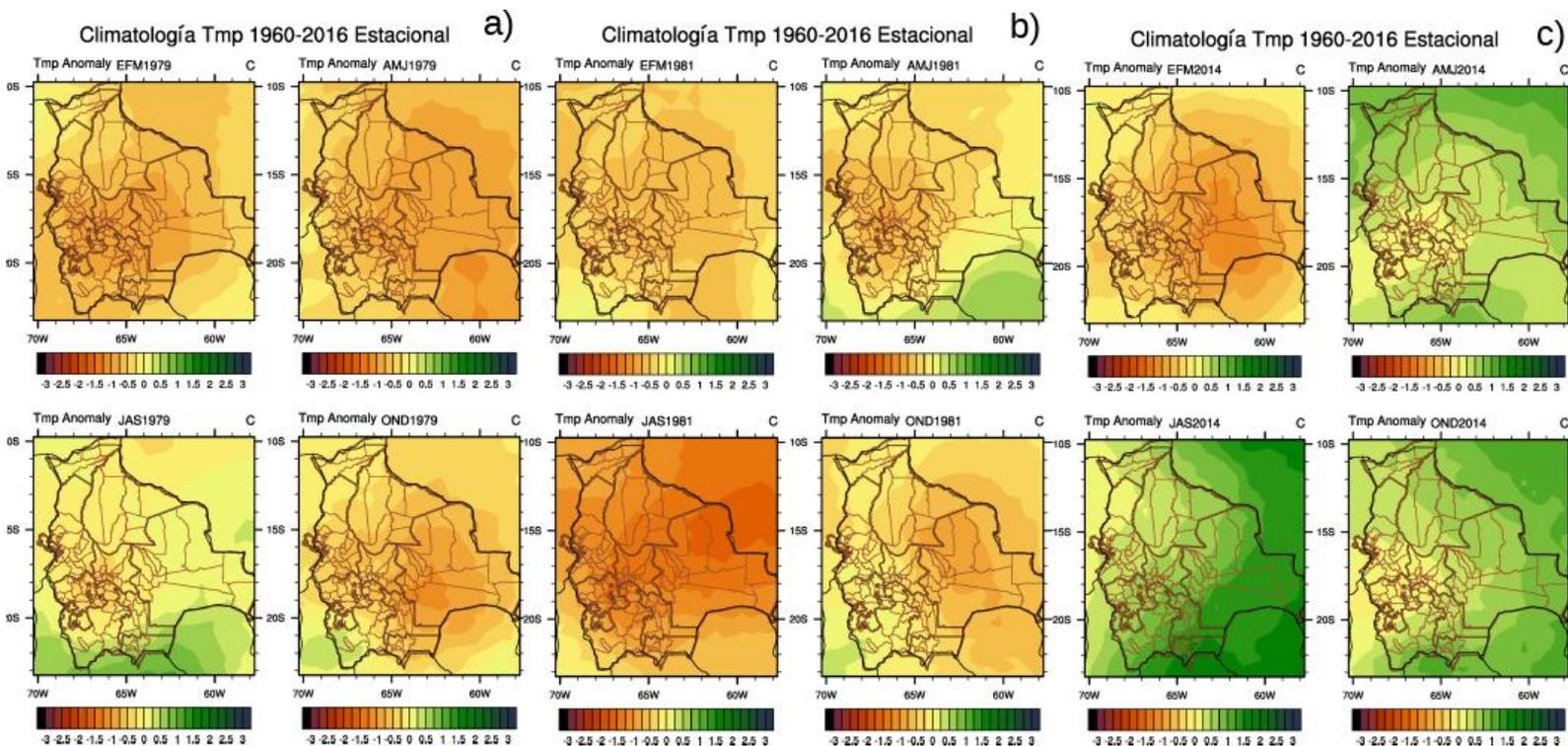


Figura 5. Anomalías de temperatura de los trimestres más lluviosos y secos en 1960-2016. Las anomalías positivas, es decir, eventos cálidos, se encuentran en la escala de color verde; mientras que los eventos fríos, anomalías negativas, se encuentran marcados en la escala de amarillo a café. Nota: a) 1979, b) 1981 y c) 2014. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 5, se nota que las zonas que muestran anomalías mayores tanto negativas como positivas son las zonas centro, oeste y suroeste del país. Estas zonas no necesariamente corresponden a las mismas determinadas por las anomalías de precipitación. Ello muestra claramente que diferentes factores manejan el comportamiento de cada variable.

Determinación de tendencias para puntos de las zonas de mayores impactos por cambios del clima

A partir del análisis de trimestres lluviosos y secos se seleccionaron los puntos con base en sus anomalías y cercanos las comunidades de importancia económica en el sector agrícola. De acuerdo con la Tabla 1, las zonas detectadas como más lluviosas a lo largo de 1960-2016 se representan por el punto 2, mientras que la más seca en el mismo periodo se representa por el punto 6. Es decir, en estos puntos se encuentra un mayor número de trimestres lluviosos y secos, respectivamente. La Figura 6 muestra las tendencias y los comportamientos de la precipitación en ambos puntos. Se puede observar que mientras para el punto 2 (Figura 6a) la tendencia es nula, así como para el punto 6 (Figura 6b), la temperatura en esos puntos muestra tendencias negativas (ver Tabla 2, tendencias).

Tabla 1. Puntos de interés con sus coordenadas geográficas. Se tomaron a partir de los cambios en temperatura y precipitación.

Fuente: elaboración propia.

Determinado por la variable	Punto	Latitud	Longitud
Precipitación	1	-13.25	-63.25
Precipitación	2	-13.25	-62.25
Precipitación	3	-12.25	-65.75
Precipitación	4	-12.25	-64.75
Precipitación	5	-11.75	-68.25
Precipitación	6	-11.75	-65.75
Precipitación	7	-11.25	-69.25
Precipitación	8	-10.75	-67.75
Precipitación	9	-10.75	-66.25
Temperatura	10	-19.75	-63.25
Temperatura	11	-17.25	-63.25
Temperatura	12	-17.25	-65.25
Temperatura	13	-17.75	-67.25
Temperatura	14	-18.25	-68.25
Temperatura	15	-14.25	-67.75

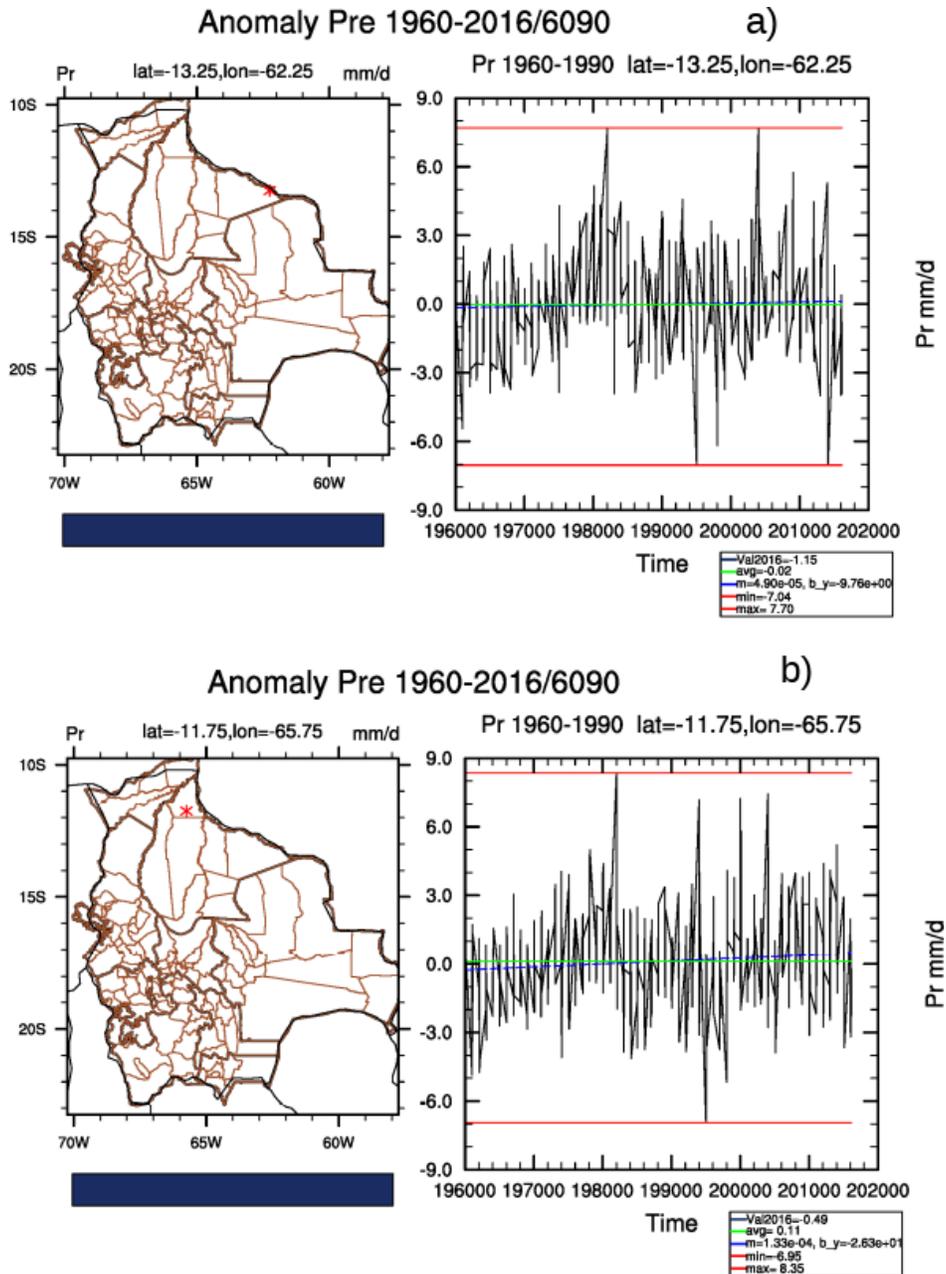


Figura 6. Tendencias de la precipitación en las zonas identificadas como más lluviosa (6a-arriba) y más seca (6b-abajo) de 1960-2016 en Bolivia. Fuente. elaboración propia.

Tabla 2. Datos estadísticos de los ajustes de tendencias a las variables temperatura (TMP) y precipitación (PRE) en los 15 puntos de estudio.

Punto	Coef.	R ²	pval	Coef.	R ²	pval
	TMP			PRE		
1	-0.000046	0.01068	0.006828	0.000116	0.012741	0.003115
2	-0.000037	0.006568	0.03407	0.000049	0.002417	0.19911
3	-0.000019	0.002322	0.208137	0.00016	0.022777	0.000074
4	-0.000034	0.006619	0.033384	0.000187	0.026212	0.000021
5	0.000029	0.005696	0.04848	0.00008	0.00428	0.087305
6	-0.000013	0.000959	0.418684	0.000133	0.015652	0.001042
7	0.000042	0.012641	0.003235	0.000054	0.001821	0.26501
8	0.000027	0.004676	0.073891	0.000132	0.008017	0.01917
9	0.000018	0.002063	0.235472	0.000092	0.005329	0.056362
10	-0.000066	0.015916	0.000944	-0.000026	0.002405	0.200153
11	-0.000078	0.024126	0.000045	0.000047	0.002541	0.187915
12	-0.000078	0.029249	0.000007	0.000012	0.000337	0.631626
13	-0.000045	0.009946	0.009054	0.000012	0.000822	0.454033
14	-0.000019	0.002448	0.196174	-0.000009	0.000753	0.473629
15	-0.000006	0.000248	0.680686	0.000058	0.001762	0.273007

Fuente: elaboración propia.

En los trimestres más lluviosos, las anomalías de temperatura son negativas, donde la Figura 7a (arriba) muestra la tendencia de temperatura para el punto 10, con mayor cambio con respecto a 1960-1990. Para los trimestres más secos, las anomalías de temperatura son positivas, las cuales son mayores en el punto 14. La Figura 7b (abajo), muestra la tendencia de esta variable.

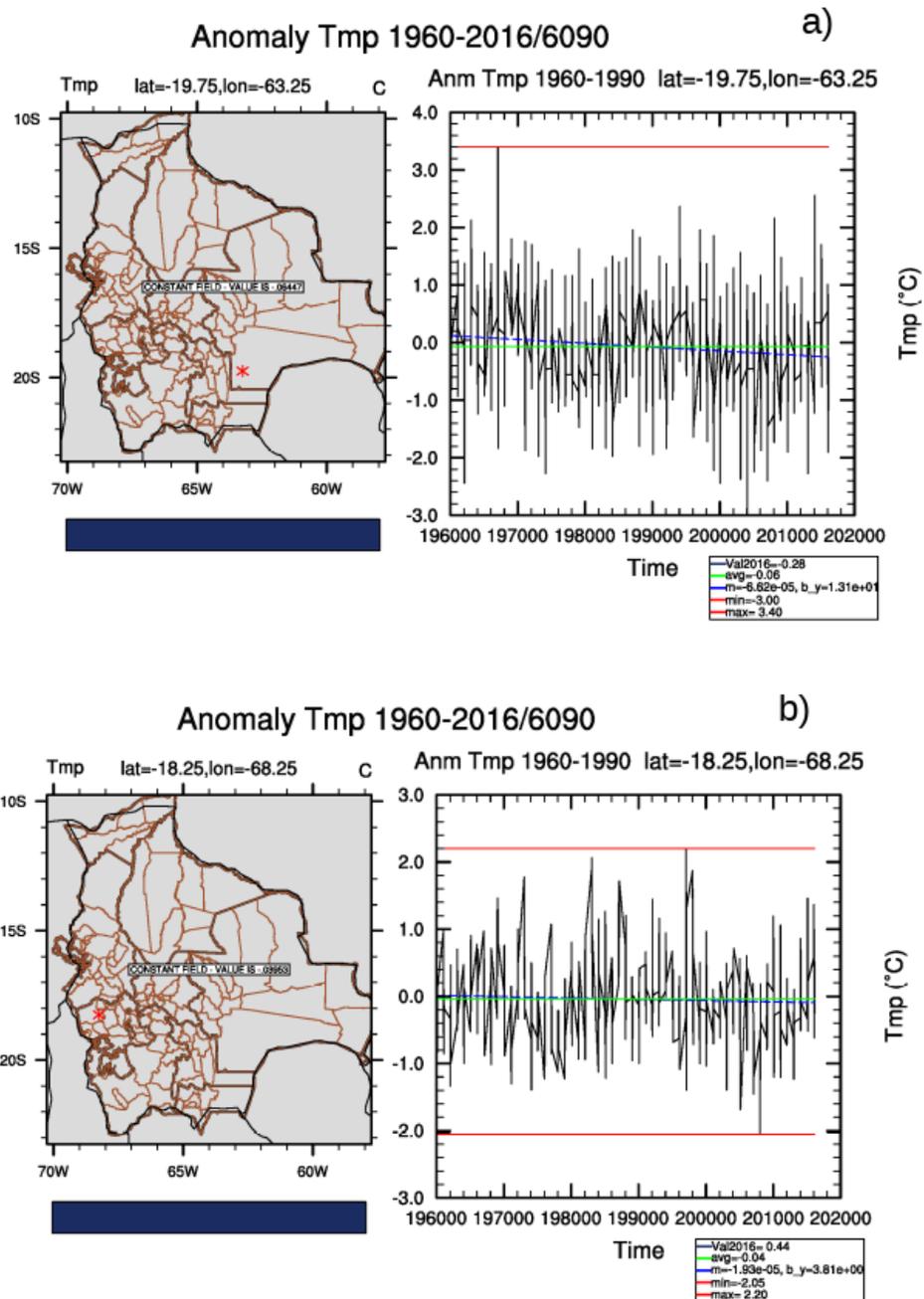


Figura 7. Tendencias de la temperatura en las zonas identificadas como más lluviosa (7a-arriba) y más seca (7b-abajo) de 1960-2016 en Bolivia. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 2 muestra la estadística para los ajustes de tendencias en los puntos del estudio. Se hace notar que la tendencia se ajustó mediante la Ecuación (1) para ambas variables: temperatura y precipitación. La selección de estos puntos permite delimitar el comportamiento climatológico en aquellos puntos donde se llevan a cabo importantes actividades económicas, como el caso de la agrícola, que a su vez es importante para el bienestar social. Por lo que el análisis provee información para posibles medidas ante efectos climáticos, como lo es el fenómeno de cambio climático.

Análisis de eventos extremos

El estudio usa como base de datos para el análisis de eventos extremos estaciones meteorológicas representativas de las 19 regiones productivas de Bolivia, las cuales fueron categorizadas por la representatividad de pisos ecológicos, homogeneidad climática y de tipo de suelos, según el Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (Tabla 3, Figura 8, Figura 9).

Tabla 3. Regiones agropecuarias de Bolivia.

Región		Zona Agropecuaria	Longitud	Latitud	Elevación
1	Altiplano	Altiplano central y norte	-67.18	-17.64	3 978
			-65.93	-17.64	2 722
			-68.43	-16.39	3 933
2	Altiplano	Altiplano sur	-67.18	-20.76	3 649
3	Amazonia	Amazonia	-67.18	-11.70	200
			-65.93	-11.08	173
			-67.81	-13.89	234
4	Llanos Tropicales	Norte Integrado de Santa Cruz	-63.75	-16.70	210
5	Llanos Tropicales	Pampa de Mojos	-66.25	-15.14	422
			-66.25	-12.64	200
6	Llanos Tropicales	Pampa Inundable de Mojos	-65.31	-13.58	156
			-65	-14.83	155
7	Valles	Valles Centrales	-65.31	-19.20	2 668
8	Valles	Yungas del Norte	-67.81	-15.45	584
9	Llanos Tropicales	Guarayo Chiquitano	-60.93	-16.39	583
10	Llanos Tropicales	Chapare	-65	-16.70	204
11	Valles	Valles del Sur	-65.31	-20.76	2 694

12	Llanos Tropicales	Llanos de Santa Cruz	-62.5	-17.32	262
13	Valles	Valles del norte	-66.25	-17.32	2 827
14	Gran Chaco	Chaco Llanos, Serrano y Kaa Ika	-62.5	-20.45	436
15	Valles	Yungas del Sur	-65.62	-17.01	752

Fuente: elaboración propia con información del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE: <http://geo.ine.gob.bo/cartografia/> visto en 2018).

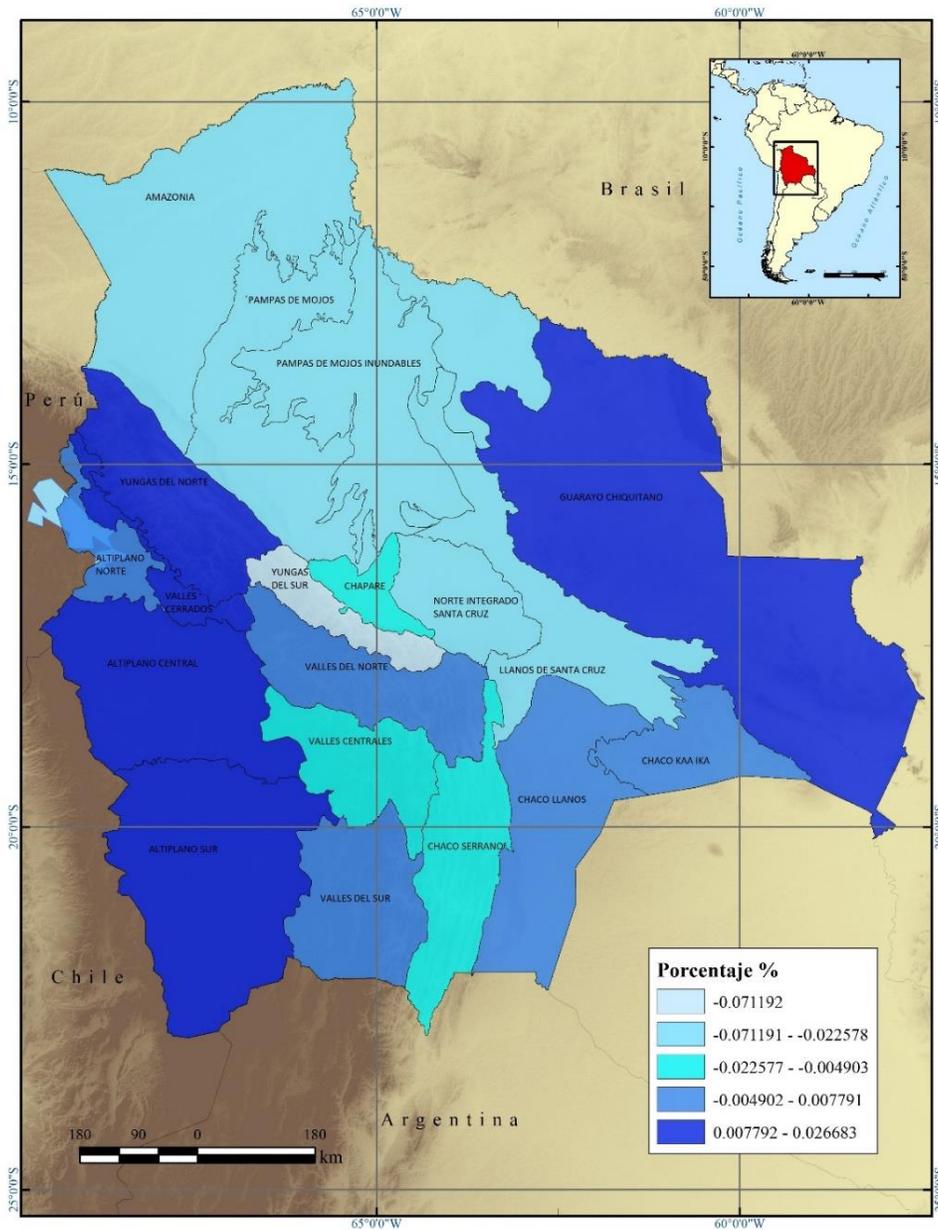


Figura 8. Cambio en los eventos extremos de precipitación. El color azul intenso muestra incrementos en la probabilidad de la ocurrencia de eventos extremos, mientras que los colores pálidos muestran disminuciones de éstos. Fuente: elaboración propia.

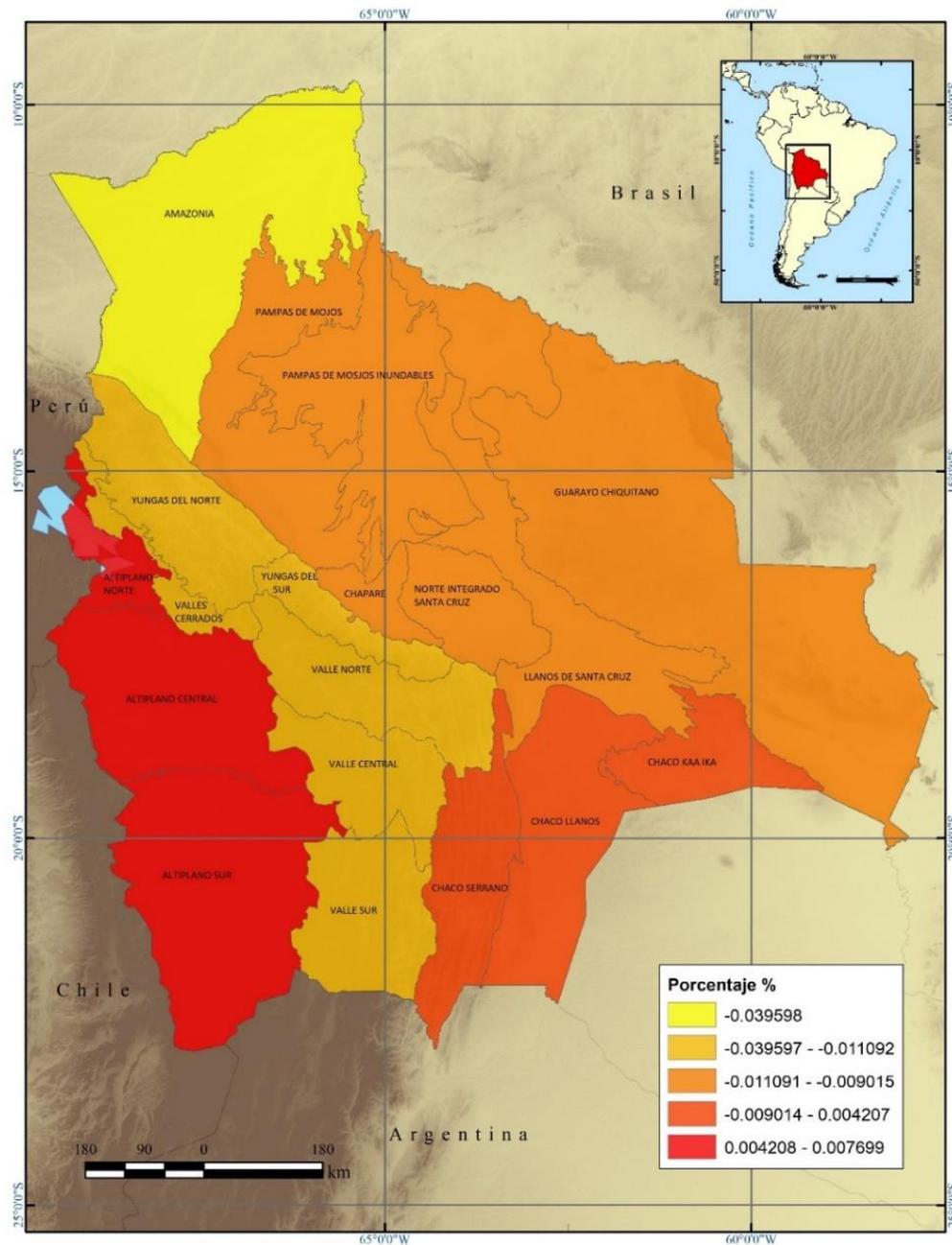


Figura 9. Cambios en la probabilidad de eventos extremos en temperatura. En color rojo intenso se observan las regiones con

mayores probabilidades de incrementar sus rachas de calor. Fuente:
elaboración propia.

El análisis de eventos extremos de lluvias y temperaturas máximas extremas se desarrolla mediante la metodología de análisis de distribuciones de Weibull, comparando el cambio en la probabilidad de eventos extremos con datos climáticos diarios, entre 1977-1997 y 1998-2014. Esta comparación se visualiza mediante mapas que muestran los cambios de los eventos extremos en las 15 regiones agroecológicas de Bolivia. En ambos casos evidencia cambios en la distribución de eventos extremos.

En el análisis de teoría de valores extremos (EVT, por sus siglas en inglés) de lluvia se observan dos grandes grupos de comportamiento según regiones. En el primer grupo, comprendido en la región central del país, se ve una disminución de los eventos extremos de lluvia superiores a 10 mm por evento. Esto se puede observar en la Figura 8, en las regiones visualizadas de color azul pálido.

El otro grupo de análisis está conformado por las regiones visualizadas en azul oscuro, donde la intensidad de las tormentas de más de 10 mm se incrementa; tales regiones están conformadas por dos áreas en particular: el altiplano (departamentos de La Paz, Oruro y Potosí y parte del departamento de Santa Cruz en la región del pantanal) y la cuenca del río Iténez (Figura 8 y Figura 9).

Respecto al comportamiento de las probabilidades de EVT de temperatura máxima, las mismas se construyeron a partir de la diferencia en las observaciones mínimas de las máximas históricas y

diferenciándolas de las observaciones diarias entre los datos de las estaciones meteorológicas de la muestra. Luego se aplicó el análisis de Weibull propuesto en la metodología.

El comportamiento de las temperaturas se circunscribe a tres grandes áreas delimitadas por colores en la Figura 9. La primera, donde las anomalías de temperatura se incrementan, sobre todo en la región del altiplano occidental (departamentos de La Paz y Oruro, color rojo); un área de comportamientos moderados, en la región del Chaco (departamentos de Chuquisaca y Tarija, naranja intenso), y un área donde las rachas de calor permanecen con cambios de leves a baja en las demás regiones visualizadas de colores amarillas y naranjas claros, tal como se muestra en la Figura 9.

Discusión de resultados

Históricamente, los cambios en la variable precipitación en Bolivia muestran que las zonas norte, oeste y suroeste son las que han resentido los mayores cambios tanto de incremento como de decremento con respecto al comportamiento normal de las variables entre 1960 y 1990. Cabe resaltar que las anomalías negativas eran recurrentes en la década de 1960 y principios del decenio de 1970. De manera posterior, las anomalías positivas se presentan con mayor frecuencia hasta mediados

447

de los años de 1980. En la década de 1990, las anomalías negativas se presentan de nuevo. Al terminar ese decenio y hasta la fecha, las anomalías han sido moderadas; se intensificaron en 2013 y 2015 (2016), tanto de forma positiva como negativa, respectivamente. Esto sugiere una variabilidad decadal de la precipitación, que pudiera relacionarse con la conocida Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés). Es por eso que resulta conveniente realizar un estudio para comprobar su correlación. Para ello se calculó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) en una ventana de 12 meses, SPI-12, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012).

Los trimestres más lluviosos han sido determinados en la temporada de invierno, con anomalías de $\sim +270$ mm y años con PDO en fase negativa. Se presentan con los efectos de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés); sin embargo, los trimestres más secos se identifican en la misma temporada, lo cual indica que los efectos de la ITCZ fueron menores o nulos. La relación de la ITCZ y el clima en Bolivia muestra que en los meses de otoño-invierno la influencia de la ITCZ está presente; mientras que cuando es verano, la ITCZ tiende a desplazarse a latitudes positivas, por lo que esos meses son secos. Los trimestres secos muestran anomalías de ~ -220 mm. Cabe resaltar que en la mayoría de los años de estos últimos trimestres ocurrieron en fase de PDO positiva (ver Figura 10). Por otro lado, la temperatura muestra un comportamiento similar, donde los periodos calientes ocurren entre los años de 1960 y 1970; después se observan periodos fríos hasta principios del decenio de 1980, y en la década de 1990 vuelven a presentarse periodos calientes, siguiendo el patrón de la PDO. Luego de esos años, el posible efecto de la PDO se presenta en menor grado.

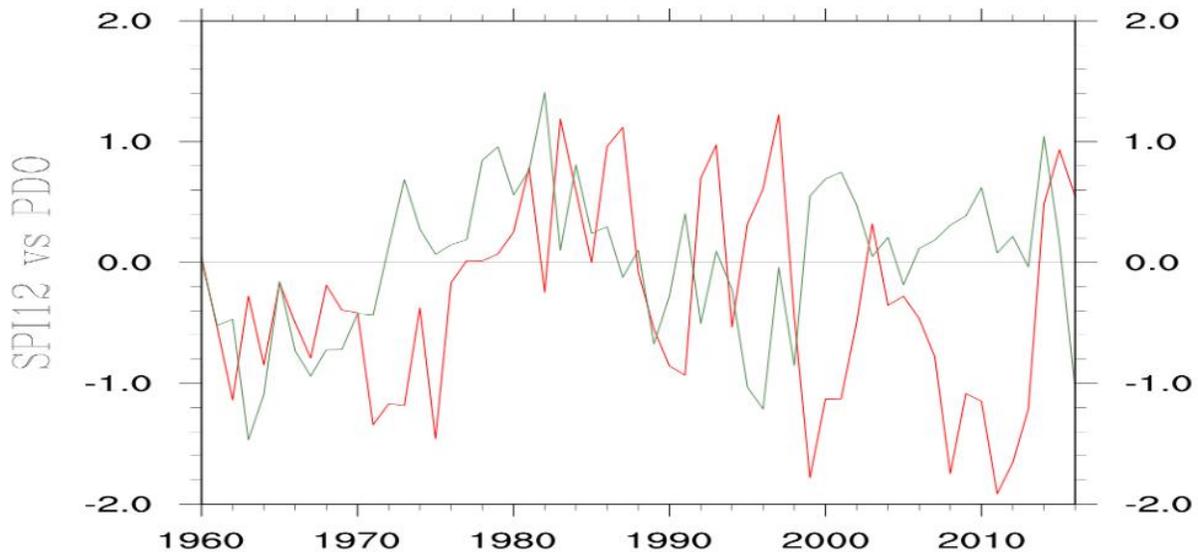


Figura 10. Series temporales entre SPI-12 y PDO. La curva roja corresponde a PDO y la curva verde a SPI-12. Se puede notar que los eventos húmedos corresponden a fases negativas de PDO, mientras que los eventos secos, a fases positivas de PDO. Fuente: elaboración propia.

La Figura 11 muestra la correlación de PDO con los eventos de precipitación. Para estos últimos se ha calculado el SPI-12 a partir de lo que recomienda la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012). Se puede observar que en la mayor parte de los puntos la correlación es inversa entre la fase positiva de la PDO y los eventos secos, mientras que en presencia de la fase negativa de PDO se presentan eventos húmedos. Esta correlación confirma los resultados obtenidos mediante el análisis climatológico de anomalías en los trimestres lluviosos y secos.

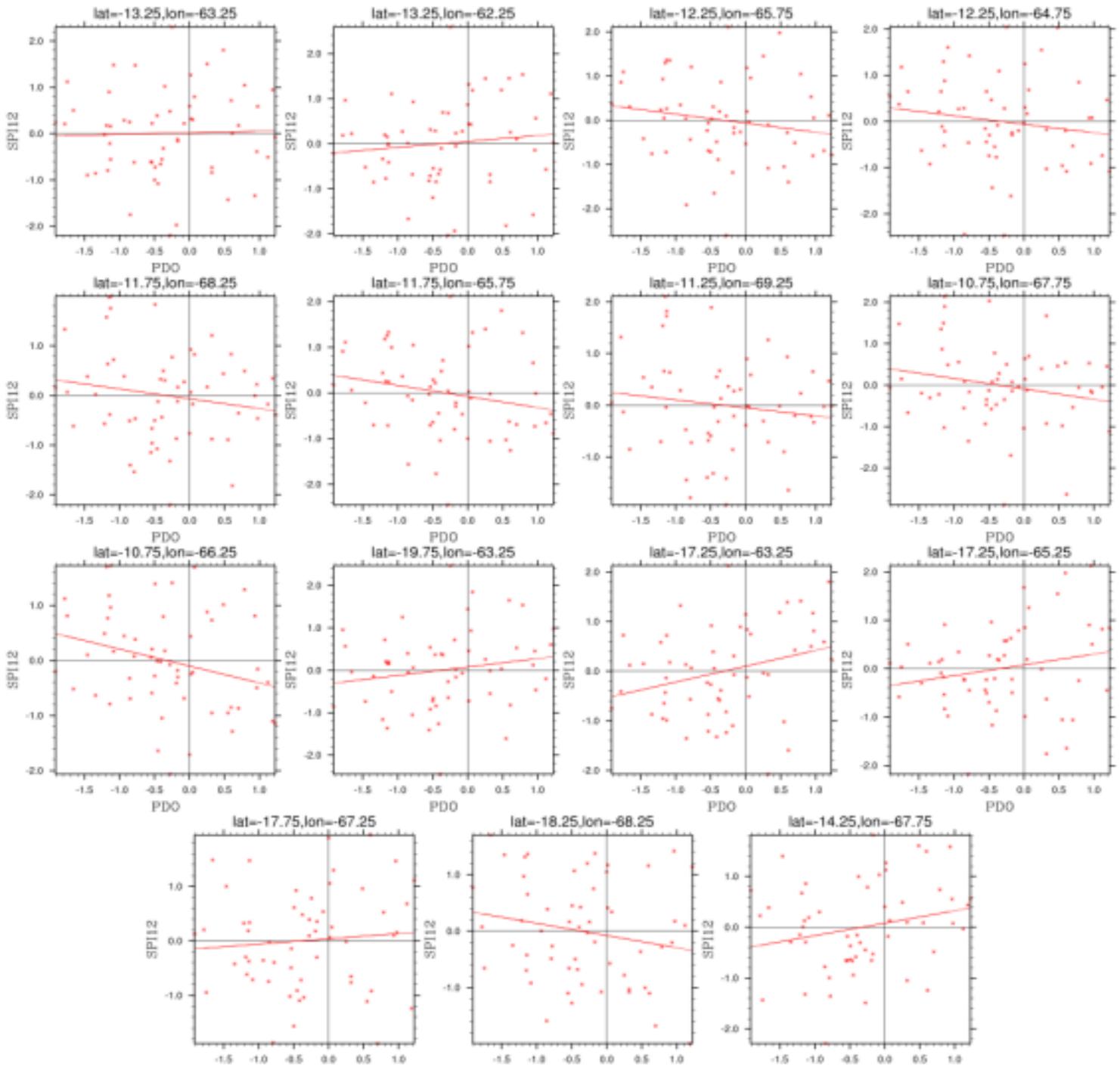


Figura 11. Correlación PDO y SPI-12 para los puntos climatológicamente seleccionados. Fuente: elaboración propia.

Así, se observa una influencia importante de la PDO en el clima natural de Bolivia; su señal se combina con el ENSO (ver Figura 12), donde además es mayor históricamente. La correlación entre ENSO y SPI-12 para la precipitación indica de nuevo una relación inversa (ver la Tabla 4); es decir, en fase fría del ENSO se obtienen eventos húmedos y en fase caliente eventos secos. Cabe mencionar que el análisis histórico señala las regiones que naturalmente están expuestas a cambios importantes en las variables climáticas de precipitación y temperatura. No obstante, en los últimos años, la posible influencia de los efectos de calentamiento global se puede determinar con un análisis de los eventos extremos, lo cual permite caracterizar los posibles impactos en la región.

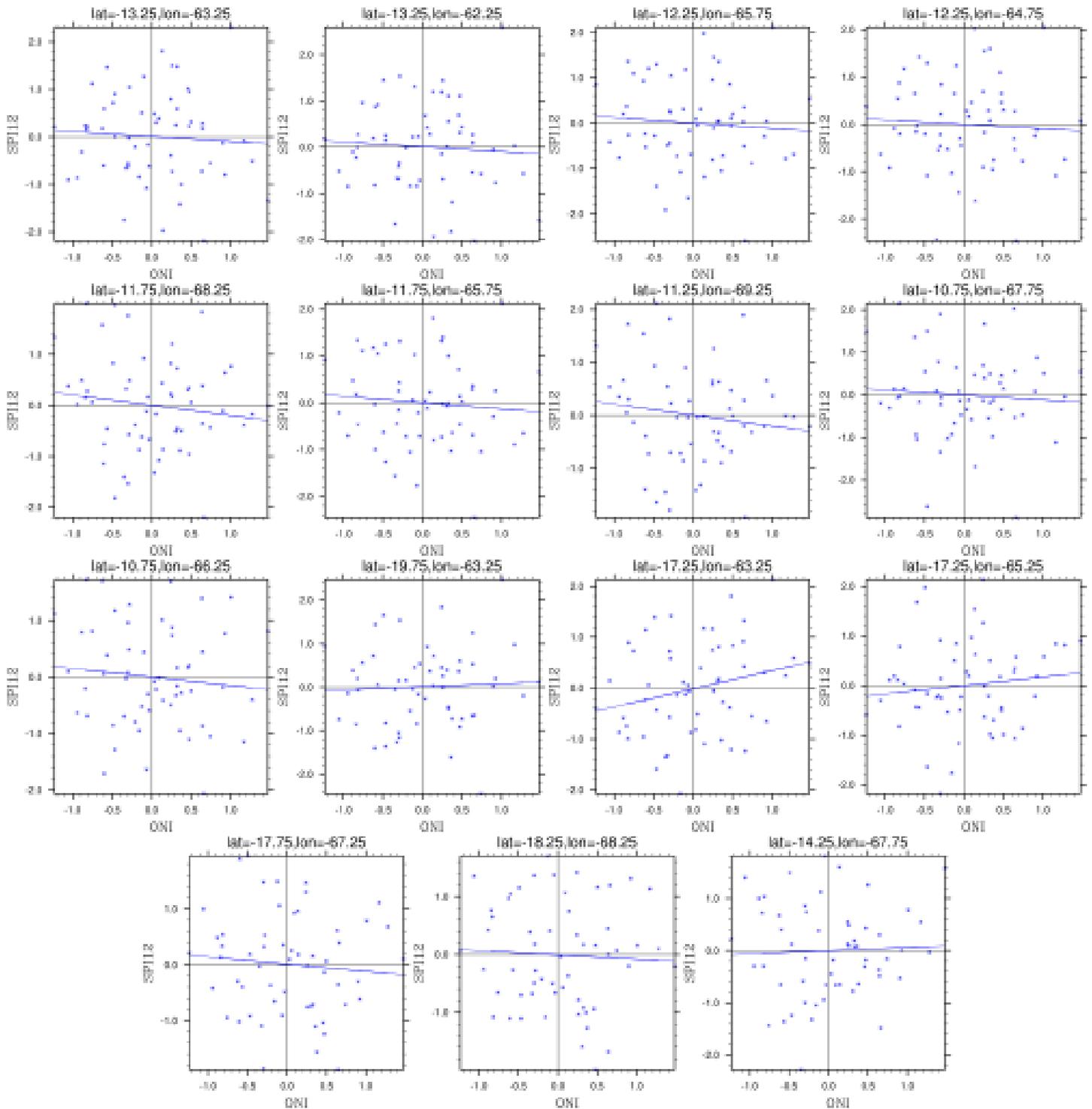


Figura 12. Comportamiento del Índice Niño Oceánico (ONI) y del SPI-

12 para los puntos seleccionados climatológicamente. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Datos estadísticos de las correlaciones entre la precipitación, mediante SPI-12, y PDO y ENSO (ONI).

Punto	Coef.	R^2	pval	Coef.	R^2	pval
	PDO			ONI		
1	0.0333	0.0008	0.8317	-0.1024	0.0045	0.6172
2	0.1325	0.0129	0.3985	-0.1056	0.0048	0.6076
3	-0.2045	0.0307	0.1915	-0.1220	0.0064	0.5538
4	-0.1840	0.0239	0.2503	-0.0949	0.0037	0.6519
5	-0.1980	0.0297	0.1995	-0.2028	0.0182	0.3166
6	-0.2425	0.0448	0.1136	-0.1365	0.0083	0.5000
7	-0.1542	0.0182	0.3168	-0.2079	0.0193	0.3020
8	-0.2519	0.0433	0.1199	-0.1141	0.0052	0.5939
9	-0.3080	0.0765	0.0371	-0.1511	0.0107	0.4425
10	0.1987	0.0308	0.1912	0.0741	0.0025	0.7116
11	0.3197	0.0813	0.0314	0.3581	0.0596	0.0669
12	0.2229	0.0425	0.1237	0.1725	0.0148	0.3658
13	0.0974	0.0076	0.5179	-0.1305	0.0080	0.5078
14	-0.2165	0.0369	0.1517	-0.0726	0.0024	0.7155
15	0.2448	0.0504	0.0929	0.0638	0.0020	0.7409

Fuente: elaboración propia.

Los eventos extremos en la región muestran comportamientos diferenciados, según las regiones y la influencia de la altura sobre el nivel de mar, por lo que los efectos de estos extremos serán diferentes según el punto de análisis; si bien hay menos lluvias extremas en la cuenca

amazónica del río Madera, las lluvias en la zona altiplánica y cordillerana, donde los eventos extremos se incrementan, generan inundaciones cuencas abajo y confirman lo observado en los años El Niño. La región seguirá sufriendo inundaciones a pesar de recibir menos lluvia.

En la región del altiplano, el incremento de las rachas de calor propicia deshielos de los glaciares andinos y provoca cambios en la provisión de agua en la región altiplánica. Esta es una de las principales preocupaciones de diversos estudios centrados en el área; el estudio de eventos extremos confirma tal preocupación, la cual repercute en la cantidad de agua de la región en dos momentos: en el primero existirá una mayor provisión de agua potable proveniente de los deshielos de glaciares, luego de lo cual a mediano plazo se espera una escasez por la falta de hielos a finales de los veranos.

El modelo desarrollado muestra que las rachas de calor se centran en las regiones centrales del país donde se esperan disminuciones en las actividades ganaderas y de producción agrícola de exportación; las previsiones del manejo del riesgo por choques de calor en esta región deberían ser unas de las prioridades a futuro en la zona y considerar el desarrollo de políticas públicas para el manejo de los golpes de calor en áreas sin experiencia previa a este tipo de fenómenos. No todo lo evidenciado por las proyecciones es malo, la disminución de las tormentas extremas en la región central de Chuquisaca y Santa Cruz, y los incrementos moderados de temperatura en la misma región vislumbran afectaciones menores en la productividad agrícola y pecuaria en esta región.

Conclusiones

Del estudio realizado se plantean los siguientes puntos como hallazgos principales y recomendaciones para futuras investigaciones:

El estudio histórico climático muestra que los trimestres lluviosos corresponden a inviernos y secos al verano, y que los mayores cambios en precipitación respecto al periodo 1960-1990 ocurren también en estos trimestres, por lo que los posibles mayores impactos estacionales por cambios de precipitación ocurren en estas temporadas.

Los resultados del comportamiento de la precipitación y temperatura a lo largo de 1960-2016 sugiere una relación con la PDO, indicando sus efectos en el clima en Bolivia. Esta relación se demostró en este estudio, además de la influencia del fenómeno ENSO.

Las PDO siempre han mostrado su influencia en la climatología global. Adelantar y pronosticar posibles rangos de la variación permitiría generar mejores políticas sobre manejo de riesgo en los años con declaratorias de los fenómenos El Niño y La Niña.

El modelo de eventos extremos desarrollado contrasta con los hallazgos del análisis de variabilidad climática por trimestres mostrado en la primera etapa del modelo. Por lo cual, desarrollar una interfaz que permita englobar ambos análisis en un solo proceso se ve como una nueva

metodología muy promisoría a partir de los resultados encontrados en esta investigación.

En tal sentido, el conocimiento y la comprensión de las variaciones de los patrones climáticos y, por ende, del cambio climático global pueden ser valioso para distintas actividades, como: agricultura, abastecimiento de agua urbana e industrial, generación de energía, mantenimiento de los ecosistemas, y adaptación y resiliencia de las ciudades y sus poblaciones. Es por ello que se presenta como indispensable incorporar en las agendas político-institucionales y de desarrollo los temas asociados con la variabilidad climática y por tanto del cambio climático. De ahí que esta investigación sea un llamado a la acción inaplazable para los tomadores de decisión y la sociedad boliviana en su conjunto frente a los efectos adversos de los eventos climatológicos extremos.

Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios de los revisores anónimos para mejorar el documento final. Los autores también agradecen al programa Cátedras-Conacyt y al proyecto Cátedra-CCGS núm. 945 "Vulnerabilidad, medidas socioambientales y adaptativas al cambio climático en el sureste de México" y núm. 963 "Hacia una gestión sustentable del agua en el sureste de México y las áreas adyacentes de América Central", y núm. 963 "Hacia una gestión sustentable del agua en el sureste de México y las áreas adyacentes de América Central". Así como a LANRESC, REDESClim, RICOMAR, UNAM, IMTA, y al Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad.

Referencias

- Andersen, L. E., & Jemio, L. C. (2015). Capítulo 1: Introducción. En: Lykke, E. A., & Jemio, L. C. (eds.). *La dinámica del cambio climático en Bolivia*. La Paz, Bolivia: Fundación INESAD (Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo).
- Andrade, M. (2018). Atlas-Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-boliviano/Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia 1981-2010. *Geographica Bernensia*, DOI: 10.4480/GB2018.N01
- Andrade, M. (2008). Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 14(14), 42-49.
- Andrade-Velázquez, M., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate. *Revista Bio Ciencias*, 7, e905. DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e905>
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134, 387-401. DOI: Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Beker, V. A. (2014). Why should economics give chaos theory another chance? In: Faggini, M., & Parziale, A. (eds.). *Complexity in economics: Cutting edge research. New economic windows*. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-3-319-05185-7_11
- Cacciari, M., & Montanari, G. C. (1991). Discussion, with reply, on "Estimating the cumulative probability of failure data points to be plotted on Weibull and other probability paper". *IEEE Transactions on*

Electrical Insulation, 26(6), 1224-1229. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/14.108163>

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2015). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*. Santiago de Chile, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

De-Bruijn, K. M. (2005). *Resilience and flood risk management: A systems approach applied to lowland rivers* (PhD Thesis). Delft University Press. Recuperado de: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:e4c67684-e4d1-4796-b37c-0b451ebec3d4>

De-Bruijn, K., Klijn, F., McGahey, C., Mens, M., & Wolfert, H. (2018). Long-term strategies for flood risk management: Scenario definition and strategic alternative design (Report Number T14 08 01). Recuperado de http://www.floodsite.net/html/partner_area/project_docs/T14_08_01_FRM_Strategies_D14_1_V3_5_P46.pdf

Del-Jesús, M., Paz, J., Navas, S., Turienzo, E., Díez-Sierra, J., & Peña, N. (2020). Climate change impacts on the water resources of Andean countries. *Ingeniería del Agua*, 24(4), 219-233. Recuperado de <https://doi.org/10.4995/Ia.2020.12135>

Fisher, R., & Tippett, L. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24(2), 180-190. DOI: 10.1017/S0305004100015681

Francis, D., & Hengeveld, H. (1998). *Extreme weather and climate change* (No. En57-27/1998-01E). Canada: Environment Canada.

GeoBolivia: Infraestructura de Datos Espaciales. En línea, <https://geo.gob.bo/>

Gnedenko, B. (July, 1943). Sur la distribution limite du terme maximum d'une serie aleatoire. *Annals of Mathematics*, 44(3), 423-453.

Guevara-Murua, A., Williams, C. A., Hendy, E. J., & Imbach, P. (2018). 300 years of hydrological records and societal responses to droughts and floods on the Pacific coast of Central America. *Climate of the Past*, 14, 175-191. DOI: <https://doi.org/10.5194/cp-14-175-2018>

Harris, I., Jones, P., Osborn, T., & Lister, D. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations the cruts3.10 dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623642. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/joc.3711>

Herring, S. C., Christidis, N., Hoell, A., Kossin, J. P., Schreck III, C. J., & Stott, P. A. (eds.). (2018). Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99 (1), S1-S157.

Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3, 816-821. Recuperado de <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>

Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters – Consequences for insurers and society. *Weather and Climate Extremes*, 11, 70-79. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2015.10.002>

- Hoffmann, D., & Requena, C. (2012). *Bolivia en un mundo 4 grados más caliente: escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el Altiplano norte*. La Paz, Bolivia: Fundación PIEB, Programa de Investigación Estratégica en Bolivia.
- Holland, G. J., & Webster, P. J. (2007). Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: Natural variability or climate trend? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365.1860(2007), 2695-2716.
- INE, Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Bolivia cuenta con más de 11 millones de habitantes a 2018*. Nota de prensa y monitoreo de fecha 10 de julio de 2018. Recuperado de <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/tag/Poblaci%C3%B3n>
- INE, Instituto Nacional de Estadística. (2021). Principales Indicadores Censo 2012. <http://geo.ine.gob.bo/cartografia/>
- IPCC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2013). Summary for Policymakers. In: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, and New York, USA: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press,

- Kotz, S., & Nadarajah, S. (2000). *Extreme value distributions: Theory and applications*. London, UK: Imperial College Press.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Robert Brakenridge, G., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28, DOI: 10.1080/02626667.2013.857411
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., & Whetton, P. (2000). Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 427-436, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0427:TIEWAC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0427:TIEWAC>2.3.CO;2)
- Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El cambio climático. causas, efectos y soluciones*. Colección La Ciencia Para Todos. Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México: Fondo de Cultura Económica (FCE).
- Moore, T. R., Matthews, H. D., Simmons, C., & Leduc, M. (2015). Quantifying changes in extreme weather events in response to warmer global temperature. *Atmosphere-Ocean*, 53(4), 412-425.
- Muñoz-Jiménez, R., Giraldo-Osorio, J. D., Brenes-Torres, A., Avendaño-Flores, I., Nauditt, A., Hidalgo-León, H. G.,... & Birkel, C. (2019). Spatial and temporal patterns, trends and teleconnection of cumulative rainfall deficits across Central America. *International Journal of*

Climatology, 39(4), 1940-1953. Recuperado de
https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_7

Nordgren, M. (2011). *Cambios climáticos percepciones, efectos y respuestas en cuatro regiones de Bolivia* (No. CD-IICA-: P40-N6c). La Paz, Bolivia: Centro de Investigación y Promoción del Campesinado.

NU, Naciones Unidas. (2018). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Washington, EUA: Organización de las Naciones Unidas (ONU). Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Olivera, S., & Heard, C. (2019). Increases in the extreme rainfall events: Using the Weibull distribution. *Environmetrics*, 30(4), e2532. DOI: <https://doi.org/10.1002/env.2532>

Olivera-Villaruel, S. M., & Fuerte-Celis, M. P. (2017). Fuego e inundaciones, paisajes culturales en las llanuras amazónicas. Cap. 11. En: Calderón-Contreras, R. (coord.) *Los sistemas socioecológicos y su resiliencia: casos de estudio*. Ciudad de México, México: Gedisa.

OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. OMM-N 1090*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

Oxfam Internacional. (2009). *Bolivia. Cambio climático, pobreza y adaptación*. Recuperado de <https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/bolivia-cambio-climatico-adaptacion-sp-0911.pdf>

Pavia, E. G., & O'Brien, J. J. (October, 1986). Weibull statistics of wind speed over the ocean. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(10), 1324-1332.

- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2013). *El impacto del cambio climático en la biodiversidad (Bolivia)*. Serie "Tras las huellas del cambio climático en Bolivia". Recuperado de <http://www.bo.undp.org/content/dam/bolivia/docs/MedioAmbiente/undp-bo-biodiversidad-2014.pdf>
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2011). *Tras las huellas del cambio climático en Bolivia. Estado del arte del conocimiento sobre adaptación al cambio climático Agua y seguridad alimentaria*. Recuperado de <http://www.bo.undp.org/content/dam/bolivia/docs/Tras-las-huellas-del-Cambio-Climatico-en-Bolivia.pdf>
- Rivas-Martínez, S. (2002). *Clasificación bioclimática de la Tierra. Worldwide Bioclimatic Classification System*. Recuperado de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm
- Salzano M. (2008). The Analysis of Extreme Events — Some Forecasting Approaches. In: Perna C., Sibillo M. (eds). *Mathematical and Statistical Methods in Insurance and Finance*. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-88-470-0704-8_25
- Serrano, J. C. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et Technica*, 18(2), 315-320.
- Sharma, M. A., & Singh, J. B. (2010). Use of probability distribution in rainfall analysis. *New York Science Journal*, 3(9), 40-49.

- SIGE, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y del Sistema Integrado de Gestión de Estaciones. (2020). *Base de datos*. Recuperado de <http://senamhi.gob.bo/index.php/sige>
- Smith, A. B., & Katz, R. W. (2013). US billion-dollar weather and climate disasters: Data sources, trends, accuracy and biases. *Natural Hazards*, 67, 387-410. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0566-5>
- Stern, N. (2007). The economics of climate change. *American Economic Review: Papers & Proceedings 2008*, 98(2), 1-37.
- Weibull, W. (1939). *A statistical theory of the strength of materials*. Stockholm, Sweden: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag.
- WWAP, Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos/ONU-Agua. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, UNESCO. Recuperado de <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/>
- Zhang, L., Xie, M., & Tang, L. (2008). On weighted least squares estimation for the parameters of weibull distribution. In: Pham, H. (ed.) *Recent advances in reliability and quality in design* (pp. 57-84). London, UK: Springer Series in Reliability Engineering.