

LAS CARAS DE LA SEQUÍA

*en el departamento
de Puno, Perú*



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BICENTENARIO
PERÚ 2021

LAS CARAS DE LA SEQUÍA

en el departamento de Puno, Perú



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BICENTENARIO
PERÚ 2021

LAS CARAS DE LA SEQUÍA EN EL DEPARTAMENTO DE PUNO, PERÚ

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ - SENAMHI

PROYECTO INFORMACIÓN, GOBERNANZA Y ACCIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍAS EN PERÚ Y BOLIVIA EN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO – PACHAYATIÑA/PACHAYACHAY

Rubén José Ramírez Mateo
Ministro del Ambiente

Patricio Alonso Valderrama Murillo
Presidente Ejecutivo del Senamhi

Gabriela Teófila Rosas Benancio
Directora de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica del Senamhi

Grinia Jesús Avalos Roldán
Subdirectora de Predicción Climática del Senamhi

Autores:

Guillermo Baigorria, Grinia Avalos, Kris Correa y Karim Quevedo

Diseño y diagramación:

Almendra Tamariz Salazar

Primera edición: noviembre de 2021

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-12837

Impresión:

Luanos servicios generales EIRL
Jr. Orbegoso 261, oficina 582, Breña
Tiraje: 1000 ejemplares

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide 785, Jesús María, Lima- Perú. Teléfono: (01) 614-1414
www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso.

El proyecto binacional "Información, gobernanza y acción para la reducción del riesgo de sequías en Perú y Bolivia en un contexto de cambio climático" – conocido por su nombre corto como Pachayatiña/Pachayachay, que significa saberes de la tierra en aymara y quechua, respectivamente, es ejecutado en Bolivia y Perú por el consorcio integrado por SENAMHI Bolivia, SENAMHI Perú, HELVETAS Swiss Intercooperation programas Bolivia y Perú y el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES), financiado por el programa EUROCLIMA+ de la Unión Europea, y tiene como agencias implementadoras a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y la Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD).

El presente estudio forma parte del componente 1 del proyecto "Capacidades nacionales y subnacionales fortalecidas para la implementación de servicios climáticos para la gestión del riesgo de sequías, en contexto de variabilidad y cambio climático, en Bolivia y Perú".

Citar esta publicación como:

SENAMHI. (2021d). *Las caras de la sequía en el departamento de Puno*. (Baigorria G., G. Avalos, K. Correa y K. Quevedo). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. SENAMHI - HELVETAS - PREDES.

LAS CARAS DE LA SEQUÍA

en el departamento de Puno, Perú



Proyecto “Información, gobernanza y acción para la reducción del riesgo de sequías en Perú y Bolivia en un contexto de cambio climático”

Pachayatiña/Pachayachay

Este proyecto forma parte de EUROCLIMA+



Agencias implementadoras de Gestión de Riesgos



Entidad coordinadora:



Consorcio integrado por:



LAS CARAS DE LA SEQUÍA

en el departamento de Puno, Perú

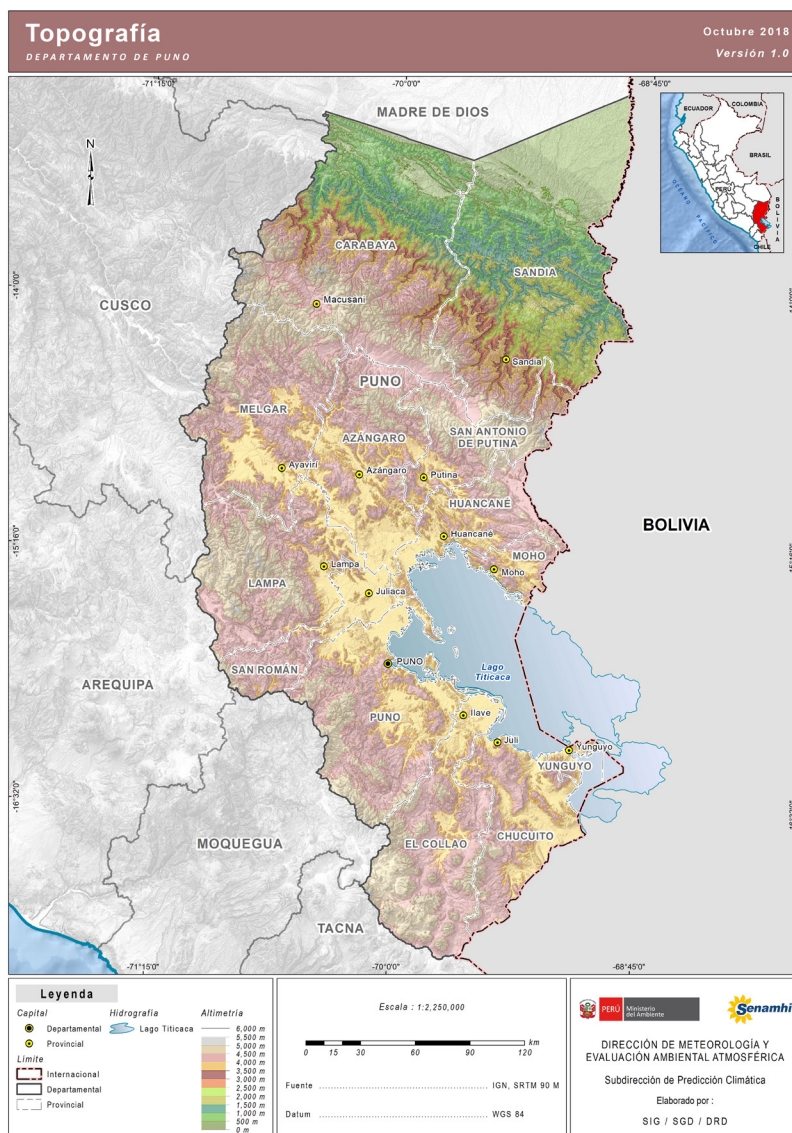
Introducción

Podemos definir la sequía como la ausencia de agua en cantidades suficientes para satisfacer las demandas de una población. Esta definición está íntimamente ligada al uso del agua por los seres humanos y sus actividades, los cuales crean una demanda de este bien. Sin embargo, otras definiciones como sequía meteorológica o sequía agrícola, entre otras, tratan de crear estándares que puedan ser comparables a través del tiempo y del espacio, independientemente del tamaño de la población o el tipo de actividades que esta realiza. Por ejemplo, dependiendo de cierta cantidad de agua y considerando la demanda de agua de una población, se podría o no considerar una sequía, pues estaría supeditado al número de habitantes (por ej. la ciudad de Lima con 10 millones de habitantes en comparación con Ica de 132,000 habitantes) y al tipo de actividades que se realiza (agricultores que siembran hortalizas comparados con agricultores que se dedican a la extracción de cochinilla del cactus de la tuna). El hecho de tener una definición ligada a los seres humanos permite medir y extrapolar los costos humanos y materiales relacionados a este tipo de eventos. Así, se generan términos absolutos de pérdidas, pero que no pueden ser comparados ni temporal ni espacialmente. Desde una perspectiva temporal, pueden plantearse ajustes relacionados a algún parámetro estándar como el porcentaje de una población o algún índice macroeconómico; sin embargo, estas son aproximaciones muy gruesas, ya que no enfocan los cambios de tecnología y el acceso a bienes.

Por el contrario, el uso de definiciones estándares de sequía sí facilitan ese tipo de comparaciones. Incluso, ayuda a comparar sequías en una misma región que ocurrieron en tiempos significativamente diferentes (por ejemplo, una sequía ocurrida en la última década comparada con otra en la misma región cuando el ser humano ni siquiera existía como subespecie). Por lo tanto, este tipo de definiciones permite hacer comparaciones de la frecuencia, intensidad y del tamaño de las áreas afectadas, entre los principales atributos comparativos de la sequía. No obstante, dichas conceptualizaciones de la sequía basadas en la observación y medición de parámetros físicos y/o químicos son completamente subjetivas. En otras palabras, son relativas y puede haber tantas definiciones matemáticas para determinar la sequía como autores puedan existir. Hasta cierto punto, es bueno que exista un consenso para adoptar una u otra definición de sequía paramétrica por un grupo determinado de científicos. Sin embargo, no dejan de ser subjetivas, y su mayor debilidad se manifiesta cuando estas quieren ser correlacionadas con sequías no-paramétricas que dependen de una población y sus actividades.

Figura 1

Mapa de ubicación del departamento de Puno



Nota. Tomado de Atlas climático del departamento de Puno por SENAMHI, 2021e

Respecto al departamento de Puno, este se ubica en la sierra sur-oriental del Perú, al norte del Altiplano boliviano-peruano entre latitudes 13°0'0" S – 17°17'30" S y longitudes 71°6'57" W – 68°48'46" W. Presenta un rango de altitudes entre los 400 y los 5500 m.s.n.m. El 77 % del departamento, en donde enfocaremos este documento, se encuentra sobre los 3812 m.s.n.m., y es aquí donde se ubica una de las poblaciones rurales más pobres del mundo con un alto riesgo climático,

especialmente asediada por sequías y eventos térmicos extremos. Por generaciones, parte importante de la población de esta región se ha dedicado básicamente a la agricultura y a la ganadería. Los cultivos y ganado se han adaptado a estas condiciones ecológicas. Así, por ejemplo, las papas nativas cultivadas son capaces de tolerar, en algunas de sus fases fenológicas, temperaturas de hasta -4°C y poseen más cantidad de proteínas que aquellas variedades cultivadas en zonas más bajas (Campos y Ortiz, 2020). Igualmente, la quinua y la kiwicha (entre los más conocidos cereales andinos) son granos pequeños adaptados a estas condiciones que contienen grandes concentraciones de proteínas y que actualmente ostentan una gran demanda en los mercados internacionales. Entre los animales de pastoreo más importantes en la región, están las alpacas y ovejas, los cuales constituyen los 'bancos' financieros de los agricultores. Estos animales no solo proveen lana y carne, sino que también actúan como un colchón económico al ser vendidos en los mercados cuando se pierden las cosechas, lo que reduce la migración temporal de miembros de la familia hacia las ciudades en busca de trabajo (Valdivia et al., 1996; Valdivia, 2001). Estos animales no se crían en establos y, durante eventos meteorológicos y/o climáticos extremos, mueren de hambre o de frío, lo que constituye, del mismo modo, una gran pérdida económica para las poblaciones rurales de esta región.

Figura 2

Foto de los principales cultivos en Puno

Cultivo de quinua



Nota. Tomado de Senamhi

Cultivo de papa



Nota. Tomado de Senamhi

El presente documento está basado en la sistematización de dos estudios técnicos sobre sequías meteorológicas (SENAMHI, 2021a) y sequías agrícolas (SENAMHI, 2021b) para el departamento de Puno, elaborados por el SENAMHI-Perú en el marco del proyecto “Información, gobernanza y acción para la reducción del riesgo de sequías en Perú y Bolivia en un contexto de cambio climático”¹ - Pachayatiña/Pachayachay². Este es uno de los proyectos enmarcados en el componente de reducción y gestión del riesgo de desastres ante sequías e inundaciones priorizado por el Programa Euroclima+ de la Unión Europea.

En ese sentido, el proyecto se alinea al Marco de Sendai para la reducción de riesgos de desastres, que propone como primer reto “el comprender la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo de sequías a nivel local (Marco de Sendai, Prioridad 1), que tienen manifestaciones lentas e impactos progresivos”. Asimismo, como segundo reto, busca “el fortalecer la gobernanza en torno a la gestión del riesgo de sequías (Marco de Sendai, Prioridad 2), prioritariamente en el sector agropecuario” (Euroclima, AESCID y AFD, s/f). Esta publicación está dirigida a tomadores de decisiones locales y regionales, como los principales usuarios que quieren responder a preguntas como ¿cuándo sucederá la próxima sequía? ¿cómo afectará la siguiente sequía a mis principales cultivos? ¿cuál será la intensidad de la próxima sequía? ¿cómo puedo hacerme más resiliente para las siguientes sequías? Además, estas preguntas se complementan con una planteada desde la voz autorial: ¿qué sugerencias pueden brindarse para pronosticar, prevenir y/o mitigar los efectos de una sequía en Puno?

¹ Tomado de <https://euroclimaplus.org/proyectos-riesgo/peru-y-bolivia-reduccion-del-riesgo-de-sequias>

² Proyecto ejecutado en Bolivia y Perú, por el consorcio integrado por SENAMHI Bolivia, SENAMHI Perú, HELVETAS Swiss Intercooperation programas Bolivia y Perú y el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES), financiado por el programa EUROCLIMA+ de la Unión Europea, y tiene como agencias implementadoras a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y la Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD).

Por lo tanto, la elaboración de este documento integrado sobre sequías meteorológicas y agrícolas en el departamento de Puno pretende, principalmente, identificar la coincidencia o no de las sequías meteorológicas y agrícolas, así como la relación entre ambos tipos sobre la base de los diferentes índices de sequía que han sido empleados. Esta información es relevante para la generación de servicios climáticos en la región, que contribuyan a mejorar tanto la preparación como respuesta ante la sequía, insertando dicha información en planes de acción interinstitucionales ante este evento, particularmente en los periodos estacionales de lluvia.

¿Cuándo sucederá la próxima sequía?

Aunque cortos periodos secos pueden ser bien pronosticados en el corto plazo, es decir, por el pronóstico operacional del tiempo atmosférico (pronóstico meteorológico), periodos más largos, como, por ejemplo, de uno a tres meses, son mucho más difíciles de detectar, particularmente en el Altiplano, en donde existe la interacción de varios controladores climáticos que, de una u otra forma, regulan la precipitación durante la estación lluviosa en el departamento (SENAMHI, 2021a). Los meteorólogos son entrenados específicamente para pronosticar eventos de lluvia (entre otras cosas), lo que, en este caso, es relativamente más fácil de realizar, ya que solo se trata de pronosticar eventos que duran desde horas hasta un máximo de días. Ellos son especialistas en detectar dinámicamente aquellos disparadores que provocan un evento de lluvia en un lugar determinado, como la aproximación de un sistema nuboso (frente meteorológico). En las sequías, la persistencia de los periodos secos es más difícil de predecir porque dichos factores interactúan a una escala de clima estacional que se va desde 1 hasta los 9 meses y que, en la situación particular de una sequía normalmente está asociada a la "ausencia" de disparadores.

Los métodos para la detección de sequías que se basan en el análisis de datos climáticos pasados son muy fáciles de aplicar para determinar el cuándo comenzó y el cuándo finalizó una sequía o un periodo de lluvia (Liebmann y Marengo, 2001). Por el contrario, la detección del inicio y término de una sequía en tiempo real es muy difícil de predecir con los métodos actuales de pronóstico. Así, después de que se ha iniciado un periodo seco, un solo evento de lluvia no puede indicar si este periodo terminó o no. Esto se debe a que, con los métodos actuales, la cantidad de lluvia observada en un evento tiene que ser comparada con el total de precipitación durante esa estación lluviosa (que aún no ha ocurrido) para determinar si la cantidad acumulada de lluvia durante ese evento individual realmente acabó o no con el periodo seco. Para ilustrar esta idea, se plantea el siguiente escenario (experimento mental): Durante el verano de 1983 aconteció una de las sequías más severas en la historia de Puno. En el caso hipotético de que hubiera ocurrido una lluvia aleatoria de 50mm el 30 de enero, ¿se habría definido que la sequía de 1983 terminó en esa fecha? ¿y si la lluvia hubiese sido de únicamente 25mm o 10mm o 5mm?

a) *Lekecho*: Ave sudamericana que puebla diversos ecosistemas tropicales y subtropicales de puna andina desde Colombia hasta Argentina. Conocida como el “centinela de los Andes” y referenciado por los agricultores andinos del Perú por avizorar el comportamiento estacional de las lluvias.



Nota. Tomado de © Nestor Ccacya Baca www.eBird.org - Macaulay Library

b) *La llama*, una especie adaptada a los andes, importante por su capacidad de soportar la escasez de agua y consumir alimentos no deseados por ovinos y vacunos. Posee gran valor económico, alto porcentaje de proteína y amigable con el medio ambiente.



Nota. Tomado de Proyecto Pachayatiña/Pachayachay

Por otro lado, se debe recordar que los pronósticos de lluvia proveen la posibilidad porcentual (probabilidad) de que llueva o que no llueva en un determinado lugar, y no establecen la cantidad que va a llover. Los pronósticos meteorológicos (de 3 horas a 7 o 10 días) son extremadamente difíciles de realizar. Estos se llevan a cabo rutinariamente varias veces al día en los servicios nacionales de meteorología alrededor del mundo, y usan información global en tiempo real y tecnologías muy avanzadas en modelamiento computacional y sensoramiento remoto con satélites entre sus principales herramientas. Asimismo, las proyecciones del cambio climático (de 10 a 100 años en adelante) son realizadas también por modelos computacionales. Dichos modelos climáticos asumen ciertas tendencias de variables a largo plazo (por ejemplo, la concentración de gases de efecto invernadero), y que, a pesar de la enorme incertidumbre que estos crean a corta escala de tiempo, a largo plazo proyectan una tendencia generalizada basada en procesos del clima futuro. Sin embargo, el clima estacional (de 1 a 9 meses), en el que se ubican los eventos de sequía, está en una escala de tiempo muy poco explorada y cuyas herramientas usadas tanto para el pronóstico meteorológico como el climático son inadecuadas. Es normal de encontrar en los servicios meteorológicos nacionales, direcciones de meteorología y direcciones de climatología, pero no direcciones de climatología estacional.

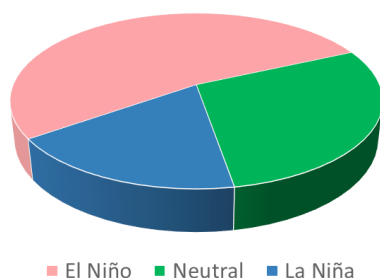
Los modelos computacionales para el pronóstico meteorológico y climático trabajan en función del comportamiento de los controladores climáticos globales más importantes. El más relevante de nuestro planeta es El Niño (Ropelewski y Halpert, 1987), el cual está asociado al calentamiento o enfriamiento relativo de una región del océano Pacífico cercano a la línea ecuatorial. En líneas generales, en aquellos lugares donde existe una fuerte relación entre la variabilidad interanual de El Niño y el clima local o regional, se obtienen pronósticos meteorológicos muy acertados (ej. las lluvias costeras del norte del Perú (Woodman, 1999; Takahashi, 2004)), mientras que, en zonas donde esta relación es baja o inexistente, los pronósticos meteorológicos y climáticos alcanzan bajos niveles de acierto y una gran incertidumbre.

En el caso de Puno, después de la extrema sequía entre los años 1982-1983 que coincidió con la presencia de un fuerte evento El Niño, se produjeron grandes expectativas en la comunidad científica, ya que se pensó que existía una gran relación entre ambos (Lagos et al., 2008; Silva et al., 2008; Lavado et al., 2012) y, por lo tanto, la predicción de sequías en Puno podría realizarse con un alto grado de predictibilidad; sin embargo, en el 2009, un estudio del SENAMHI ya indicaba que los eventos de sequías sobre el territorio peruano, en promedio, no están asociados o causados directamente por todos los eventos cálidos del fenómeno El Niño (SENAMHI, 2009). Estudios más recientes (Andrade et al., 2018; SENAMHI, 2021a) ratifican que no todos los episodios El Niño producen sequías en el departamento de Puno ni que todas las sequías en Puno suceden bajo su presencia. Precisamente, desde 1960, el 47 % de las sequías en Puno se han producido bajo condiciones de años La Niña y años neutrales o normales (ver Figura 3).

Figura 3

Distribución porcentual de sequías en el departamento de Puno en función a las fases de El Niño

Distribución porcentual de sequías en Puno según "Fases de El Niño"



De esta manera, El Niño, bajo ciertos modos o condiciones, puede influenciar directa o indirectamente en alguno de los controladores climáticos que afectan los patrones de lluvia en Puno, y quizá intensificar o disminuir la intensidad de una sequía en la región, pero no existe una correlación directa entre El Niño y las sequías en Puno. Además, los datos indican que este no es el principal controlador climático de las sequías y, potencialmente, es solo un influenciador de su intensidad.

Ahora, si bien es cierto que El Niño es el controlador climático más importante, otros controladores de mucho menor relevancia podrían jugar un rol notable e independiente de El Niño para la ocurrencia de las sequías en Puno. Efectivamente, en el estudio de SENAMHI (2021c), se identificaron potenciales predictores que modulan gran parte de la variabilidad del SPI (Índice de Precipitación Estandarizado) de Puno, aproximadamente el 70 %, tales como los vientos meridionales a 850 hPa sobre el Atlántico, anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Atlántico, entre otras.

Asimismo, se sabe que a una escala interanual las precipitaciones en la región sur del país son moduladas por el Pacífico tropical, con influencia de la TSM (Tapley y Wylen, 1990; Lavado-Casimiro y Espinoza, 2014) y los vientos en niveles altos (Vuille, 1999; Garreaud et al., 2003). Los resultados de Seiler et al. (2013) indican que, en una fase negativa de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), se intensifican las precipitaciones sobre Bolivia, mientras que, una fase positiva de la PDO favorece a las condiciones secas. Asimismo, SENAMHI (2009) refiere que las sequías más intensas observadas durante el periodo 1965-2006 están relacionadas con una oscilación bienal muy intensa que forma parte del espectro de oscilaciones ENOS de alta frecuencia (2-3 años) (Barnett, 1991). También, están moduladas por oscilaciones cuasi decadales con periodos de 12-13 años que aparentemente son el reflejo de la PDO. Finalmente, los periodos de sequías variarían en intensidad de acuerdo con la fase en que ambas oscilaciones se encuentren, al parecer las localidades que se ubican en la sierra sur y central son más sensibles durante el inicio del periodo lluvioso (primavera).

Por otro lado, los resultados de Segura et al. (2016) sugieren que la variabilidad decadal e interdecadal juegan un papel principal en la modulación de los impactos hidrológicos extremos sobre los Andes centrales respecto a la variabilidad de baja frecuencia del Pacífico tropical centro-occidental y los vientos zonales a 200 hPa. El SENAMHI (2021a) realizó un análisis decadal e interdecadal de las sequías meteorológicas sobre la base del comportamiento de la TSM del Pacífico tropical centro-occidental sobre el primer componente del SPI3 (ene-feb-mar) de Puno (1964-2019). Estos resultados fueron acordes a los obtenidos por Segura et al. (2016) y SENAMHI (2009). Sin embargo, la evaluación de las pruebas de análisis de regresión entre la variabilidad del SPI3 (ene-feb-mar) y SPI5 (nov-mar)³ de la estación Chuquibambilla (1931/1932-2018/2019) y la TSM en el Pacífico tropical centro-occidental presentó una baja correlación (-0.22) y nula regresión (-0.063), lo cual apunta a que, eventualmente, algunas zonas del Altiplano, como Chuquibambilla, podrían no ser influenciadas por la variabilidad de la TSM del Pacífico tropical centro-occidental, sino más bien por características del lugar o forzantes locales.

Igualmente, se probaron diferentes fuentes de condiciones atmosféricas históricas (Reanalysis) a distintas escalas con el propósito de determinar patrones de circulación atmosféricas predominantes durante las sequías meteorológicas. Si bien eso es cierto a nivel sinóptico (de 1 a 7 – 10 días) durante el periodo de lluvias en Puno, estas dependen de la posición e intensidad de la Alta de Bolivia⁴ (Lenters y Cook, 1999) a nivel climático estacional, pues el pronóstico de la persistencia en la posición e intensidad de la Alta de Bolivia por un periodo de tres meses no está bien estudiado. Desafortunadamente, solo se pudo hallar que, para el caso de algunas sequías, tanto la posición del Anticiclón del Pacífico Sur⁵ (Vallaux, 1930) como de la Alta de Bolivia se encontraban un poco más al noreste de su posición regular (climatológicamente hablando), lo que permitía el ingreso de aire seco del oeste al departamento de Puno. No obstante, esta variación en la posición de ambos controladores climáticos es poco significativa como para poder ser empleada para pronosticar una sequía en Puno. Adicionalmente, se pudo determinar sobre la base de la metodología de los *k-means* (Coates y Ng, 2012), tres configuraciones representativas de los años secos que manifiestan una probabilidad de ocurrencia entre el 13 % a 33 % (SENAMHI, 2021a).

³ Periodo utilizado en Segura et al. (2016).

⁴ Sistema de circulación de vientos de varios cientos de kilómetros de diámetro que rotan en dirección antihoraria. Está a una altura entre los 9 y 15 km s.n.m. y se ubica principalmente sobre el Altiplano boliviano durante los meses de enero a marzo.

⁵ Sistema de circulación de vientos ubicado a nivel del mar, de varios miles de kilómetros de diámetro que rotan en dirección antihoraria. Está ubicado durante todo el año en el Pacífico Sur frente a las costas de Sudamérica.

a) Qotaña o reservorio rústico que sirve para almacenar agua temporalmente. Además, útil como abrevadero o para regar pequeñas parcelas principalmente de hortalizas.



Nota. Tomado de Proyecto Pachayatiña/Pachayachay

b) Cultivo de quinua en fase de maduración tolerante al déficit hídrico, por el enraizamiento profundo. Una de las especies que contribuye a la seguridad alimentaria en los andes. Fidel Quispe Quispe_ cultivo de quinua_ Comunidad Chilacollo_Zona media Ilave.



Nota. Tomado de Proyecto Pachayatiña/Pachayachay

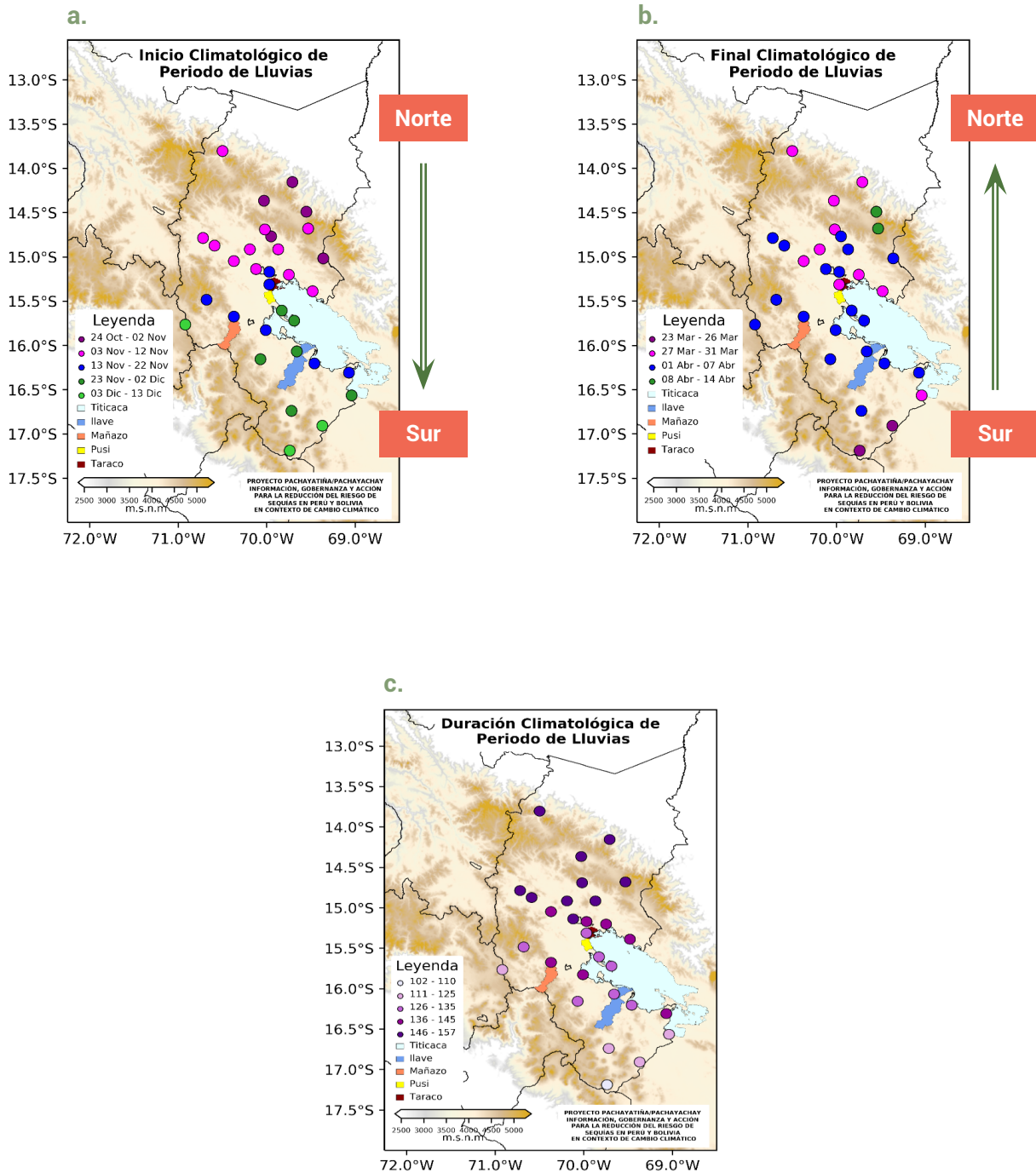
Por lo tanto, El Niño, que es el más grande controlador del clima del mundo y el principal guía de los modelos computacionales de tiempo y clima, tiene una relación baja o no existencial con las sequías en Puno. Entonces, surge el cuestionamiento sobre qué otras alternativas existirían para la labor. En efecto, si bien un pronóstico meteorológico dinámico basado en modelos computacionales y condicionado con la señal de El Niño muestran limitaciones significativas para pronosticar la próxima sequía en Puno, acaecen otros métodos no tan sofisticados que podrían otorgar informaciones no tan directas, pero sí muy útiles al respecto para la toma de decisiones.

La ciencia de la estadística puede ayudar a analizar eventos del pasado de manera que facilite el aprender sobre el comportamiento regular de una sequía en Puno y sus posibles variaciones. Nuevamente, la investigación sobre sequías meteorológicas en la que se fundamenta este documento (SENAMHI, 2021a) ha realizado estudios estadísticos intensivos con información actualizada de estaciones meteorológicas en el departamento de Puno.

Primero, se investigó cuál es el patrón de inicio y término de la temporada de lluvias en la región y si se ha visto alterado en las últimas décadas debido al cambio climático. Un atraso en el inicio de lluvias junto con un adelanto del fin de su época podría potencialmente indicar un aumento en los periodos secos. Después de los análisis respectivos, se encontró que, espacialmente, las lluvias comienzan por el norte de Puno entre fines de octubre y primera quincena de noviembre (en un rango aproximado de 30 días a más), y que este inicio de lluvias se desplaza hasta el sur de la región, entre fines de noviembre y los primeros diez días de diciembre. De modo inverso, las lluvias finalizan primero en el sur con dirección norte, y, en un intervalo de 15 días, todas acaban sobre Puno, generalmente entre fines de marzo y comienzos de abril. Así, la duración del periodo lluvioso en la región presenta un promedio de alrededor de 146-157 días en la zona norte y 102-110 días en la zona sur (ver Figura 4).

Figura 4

Inicio (a), fin (b) y duración climatológica (c) de lluvias en Puno



Nota. Tomado de Caracterización de sequías meteorológicas en el departamento de Puno, por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), 2021a.

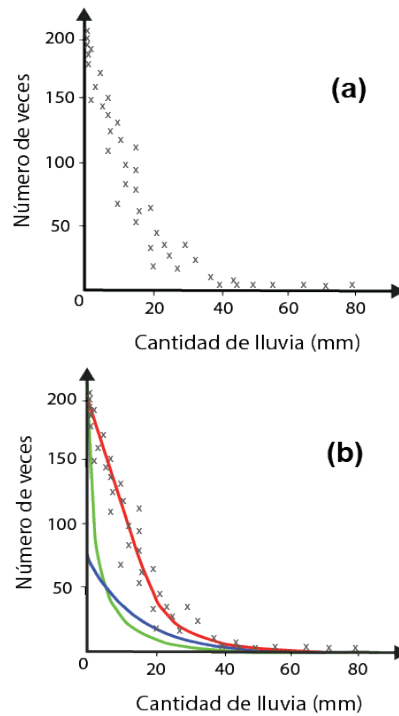
Según los análisis sobre la variabilidad y tendencia interanual elaborados con los datos del comienzo y término de lluvias (desde 1964 hasta 2019), no existe evidencia estadística significativa de algún cambio temporal sobre el inicio, el final, ni la duración de la temporada de lluvias en Puno. Esto señala que los efectos del cambio climático no habrían alterado la distribución espacial y temporal del régimen de lluvias en la región durante este periodo, y se genera la confianza suficiente para poder utilizar sequías pasadas como marco de referencia para el estudio de futuros eventos en el departamento. De la misma forma, esto es crucial porque fortalece el hecho de usar el calendario de intenciones de siembra como las fechas de inicio de campaña agrícola durante el mismo periodo, lo que, a su vez, afianza las asunciones en los valores empleados de fecha de siembra en el modelamiento de los requerimientos de agua de los cultivos de papa y quinua en la zona, elaborado por SENAMHI (2021b). Sin embargo, debe tomarse en cuenta que esto no condiciona la variabilidad que existe en el inicio de las lluvias en Puno, que en algunas ocasiones ha originado retrasos en el comienzo de la campaña agrícola.

Centrémonos ahora en la identificación de sequías meteorológicas en Puno. Para eso el SENAMHI (2021a) utilizó el índice de sequía paramétrico SPI (McKee et al., 1993; Guttman, 1999), recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM No. 1204, 2017) para permitir comparaciones espaciales y temporales, como se explicó al inicio del documento. El cálculo del SPI es bastante complejo: está basado en acumular la cantidad de lluvia en un periodo determinado (en el caso de SENAMHI (2021a) de 3 meses enero-febrero-marzo) y plotear estos acumulados de precipitación de menor a mayor en el eje "X", mientras que en el eje "Y" colocar las veces que este valor se repite (ver Figura 5a). Luego, esta curva es comparada matemáticamente con curvas teóricas dibujadas de ecuaciones estadísticas previas. La curva estadística más cercana a la curva real de datos es seleccionada y aplicada como la que representará las precipitaciones observadas en cada una de las 33 estaciones meteorológicas ubicadas en Puno.

Este proceso se llama ajuste estadístico de los datos de una curva (ver Figura 5b) y, en el presente caso, la función utilizada por el índice SPI es una distribución Gamma. Se realiza esta transformación porque matemáticamente es mucho más fácil de manejar una ecuación que representa la distribución de los datos que manipular miles o millones de datos simultáneamente. Mediante abstracciones matemáticas, la distribución Gamma es usada para generar a una función acumulada Gamma y, posteriormente, transformada a una función normal o campana de Gauss para facilitar aún más el manejo matemático y el cálculo de los valores del SPI.

Figura 5

Método de ajuste de curva estadística



El SPI genera como resultados valores positivos que indican periodos húmedos y también valores negativos que indican periodos secos. En el medio, valores entre -0.99 y $+0.99$ indican un periodo normal de lluvias. Dentro de los valores negativos (periodos secos), se encuentran tres rangos que son importantes para nuestro estudio: de -1.00 a -1.49 se consideran periodos moderadamente secos, de -1.50 a -1.99 se clasifican como severamente secos y valores menores o iguales a -2.00 son extremadamente secos (ej. la sequía de 1983).

Pudiendo ahora si identificar y clasificar el orden de magnitud de las sequías ocurridas en Puno, SENAMHI (2021a) procedió a analizar los resultados obtenidos. Cabe señalar que el mayor número de estaciones meteorológicas que administra el SENAMHI a nivel nacional fueron instaladas en el año 1964 (SENAMHI, 2019), no obstante en el caso de Puno se identificó las estaciones "Chuqibambilla" y "Granja Salcedo" con récords históricos desde 1931 permitiendo analizar las sequías en una mayor escala de tiempo (1931-2019).

Si bien no es posible contestar cuándo sucederá la siguiente sequía mediante el uso de modelos computacionales, sí se es capaz de analizar estadísticamente los SPI y predecir probabilísticamente la frecuencia en la que sequías de diferentes intensidades (moderada, severa o extrema) pueden manifestarse. Para esto SENAMHI (2021 a), utilizó la metodología propuesta por Alamgir et al (2015) para determinar el periodo de retorno de sequías de cada una de estas intensidades, es decir, cada cuántos años una sequía de tipo moderada, severa o extrema retornará a una localidad determinada.

¿Cuál será la intensidad de la próxima sequía?

El método mencionado anteriormente podría predecir probabilísticamente tanto el momento de ocurrencia como la intensidad de una sequía. Si juntamos los tres niveles de intensidad meteorológica, analizando solo dos posibilidades, sequía o no sequía, solo el evento 1983 (y, por récords históricos, potencialmente el de 1940 en función de los efectos migratorios de la población (Caviedes, 2001)) fueron sequías que se extendieron en todo el departamento de Puno. En el caso de la sequía de 1983, del que se disponen los datos confirmados, dos tercios de las estaciones meteorológicas mostraron sequías extremas. Después, en conjunto, cuatro eventos de sequía (1983, 1966, 1992, y 1990 en orden de magnitud) afectaron 50% o más de las estaciones meteorológicas de Puno, mientras que, sumadas a estas cuatro, los eventos de 1969, 1964, 2016, 2008, 1967 y 2009 afectaron a más de un tercio de la región.

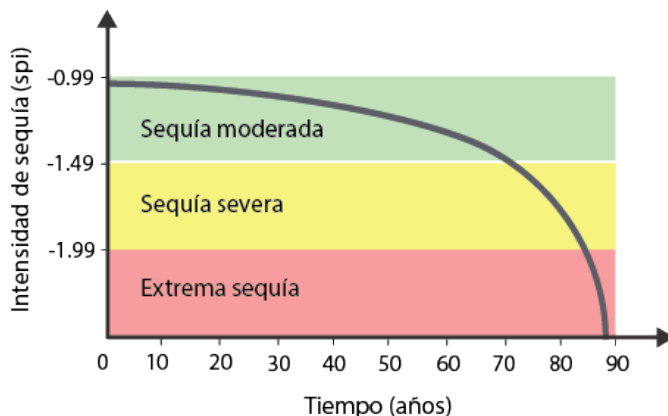
Sin embargo, según los resultados obtenidos (aparte de la de 1983), no existe un patrón regional de sequías meteorológicas en Puno, es decir, estas se distribuyen *cuasi* aleatoriamente sin un patrón espacial específico (ej. que se concentren cerca o lejos del lago Titicaca, o en el norte, o en el sur, etc.). Bajo la premisa de que los datos y los análisis son correctos, únicamente dos posibilidades podrían generar esta variabilidad espacial: (1) efectos topográficos en la precipitación y (2) condiciones especiales en el uso de la tierra que afectan la ocurrencia e intensidad de precipitación tipo convectiva local en la zona debido al calentamiento de la superficie. Ello causa un movimiento hacia arriba del aire. Sería interesante revisar estas hipótesis para, así, alcanzar un mayor detalle en los niveles predictivos.

El trabajo de SENAMHI (2021a) expone la intensidad y la recurrencia de sequías para cada una de las estaciones meteorológicas en Puno. Los lugares de más riesgo a sequías extremas frecuentes son Crucero Alto, Muñani, Huancané, Taraco, Limbani y Ollachea (12, 14, 17, 18, 19, y 20 años respectivamente). Por otro lado, las severas desarrollan un rango de recurrencia entre 7 y 38 años (Crucero Alto e Isla Taquile respectivamente); y las moderadas, un rango de retorno entre 4 (Limbani y Taraco) y los 13 años (Mazo Cruz). Los resultados, si bien no poseen una estructura espacial como se esperaba, otorgan información de cada cuántos años el riesgo de una sequía de una magnitud dada se presente nuevamente.

Esto permite planificar con tiempo en cada localidad y preparar el terreno para cuando se acerque el evento esperado. Es necesario que estas tablas de periodos de retorno sean actualizadas anualmente y repartidas a los Gobiernos regionales para su utilización en el planeamiento de riesgos por sequías y toma de decisiones actuales partiendo de cuándo ocurrió la última sequía considerando su intensidad, duración y cobertura. Asimismo, la población debe tener acceso a esta información y exigir a las autoridades que la consideren en el desarrollo de los planes de emergencia a corto y mediano plazo (Baigorria y Romero, 2019).

Figura 6

Ejemplo de curvas de retorno



Ahora bien, bajo el contexto de cambio climático, es primordial saber si existe o no una tendencia en la intensidad de las sequías en Puno. Después de un arduo trabajo de análisis con datos más actualizados y mayor cobertura de información en Puno (Altiplano), el reciente estudio de SENAMHI (2021a) concluye, que, con excepción de seis localidades, todo el resto de las estaciones no muestra tendencias de incremento o disminución en el tiempo en la intensidad de las sequías. Cuatro de las estaciones manifiestan una tendencia significativa positiva (Ananea, Azángaro, Chuquibambilla y Limbani) mientras que dos de las estaciones meteorológicas apuntan a tendencias negativas (Capazo y Crucero).

Esto es bueno para las cuatro localidades con tendencia positiva, especialmente Limbani, ya que significa que las sequías tienden a ser menos severas con el tiempo. El 82 % de las estaciones en Puno no subraya ningún tipo de tendencia en el SPI (1964-2019), lo que señala que la climatología de los regímenes de sequía en la región es estacionaria y que se puede seguir empleando observaciones de eventos pasados para extrapolar aquellos que vendrán en un futuro cercano. Esto último, en correlato con el estudio de SENAMHI (2009) con información entre 1964-2006, que enfatiza que durante el periodo de estudio no se han observado tendencias, sea de incremento o disminución, de eventos de sequías, sino fluctuaciones en sus valores medios con poca persistencia.

¿Cómo afectará la próxima sequía a mis principales cultivos?

Los análisis de SPI para el estudio de sequías meteorológicas se basaron en un periodo de tres meses entre enero a marzo. Este proceso de acumulación origina que, debido a la persistencia, sea mucho más fácil la identificación de algún probable sistema de circulación que pueda explicar el proceso físico de la atmósfera que concluye en una sequía. A pesar de que las siembras de papa comienzan a fines de agosto y las de quinua a inicios de noviembre, el estudio de las sequías meteorológicas fue ejecutado para los meses de enero a marzo. Esto se debe a que, si bien la señal de El Niño empieza a manifestarse entre setiembre y octubre, recién se define con una alta probabilidad a inicios del siguiente año. Por ello, un estudio relacional entre las sequías meteorológicas y sequías agrícolas solo puede realizarse comparativamente para la segunda parte de la estación de cultivo, desde su estado vegetativo medio o tardío hasta la cosecha. Por otro lado, el crecimiento y desarrollo de un cultivo es también un proceso acumulativo en que la energía solar se transforma en azúcares y almidón (fotosíntesis). No obstante, un corto periodo de ausencia de agua durante una fase de desarrollo crítica puede significar un efecto catastrófico en los niveles de cosecha finales. Todas estas son consideraciones a tomar en cuenta durante la comparación entre ambos tipos de sequías. En ese sentido, no es extraño que, potencialmente, se detecten discrepancias entre la distribución interanual de estas.

En la investigación efectuada por SENAMHI (2021b), se seleccionó el índice de Satisfacción de Requerimientos Hídrico del Cultivo (WRSI) (Doorenbos y Pruitt, 1977). El cálculo del WRSI consiste en la división matemática entre la evapotranspiración real del cultivo, durante una estación de cultivo, y la evapotranspiración que este presentaría si no hubiera ninguna limitación hídrica. Ambas cantidades de agua evapotranspirada son acumuladas durante toda la campaña agrícola considerando los valores obtenidos a la cosecha como los que representan el estado hídrico de toda la campaña. Es importante señalar que la capacidad de retención de agua de suelo juega un papel elemental en este balance hídrico indirecto. Dependiendo de la textura, contenido de materia orgánica y de la profundidad de su perfil, especialmente de la capa arable, el suelo puede almacenar mayor o menor cantidad de agua. Así, por ejemplo, un suelo de origen volcánico profundo y con una gran dosis de materia orgánica retendrá mucha mayor agua dentro de su perfil, en comparación con uno de ladera erosionado y poco profundo.

Otro factor relevante en la evaluación de sequías agrícolas son las diferencias entre cultivos, así como las diferencias varietales dentro de un mismo tipo. Por ejemplo, existen diversas posibilidades de los cultivos de extraer mayor o menor contenido del agua del suelo, debido a sus distintas

capacidades de exploración sobre esta agua (ej. profundidad y densidad de raíces). Además, también varía el tiempo de duración del cultivo en el campo, pues, si se repara en variedades precoces o tardías, se establecerán cantidades desiguales de uso requerido hasta la cosecha.

En el estudio de SENAMHI (2021b), se seleccionó una variedad de papa (INIA 307 "Puneñita") y una variedad de quinua (Blanca de Juli), ambas variedades comúnmente cultivadas en Puno. Las principales características de requerimientos hídricos para estos cultivos fueron obtenidas de Garay (2009). En este caso, el WRSI varía de 0 a 100, y, al igual que el SPI, es categorizado en seis niveles, en los que valores de 0 a 49 significan una extrema deficiencia de agua para el cultivo; entre 50 a 59, una satisfacción severa; y, entre 60 y 79, una satisfacción moderada. Valores más altos a 80 no son relevantes en el presente trabajo, puesto que expresan que el cultivo satisfizo sus requerimientos de agua, lo que afectó muy poco o nada su productividad. Un WRSI menor de 50 equivale a la pérdida total de la cosecha; un WRSI entre 50 y 59, a una pérdida de hasta el 80% de la cosecha; y un WRSI entre 60 y 80, a una pérdida de hasta el 50% de la productividad.

Después de operar los cálculos respectivos del WRSI, se procedió a analizar su intensidad en el tiempo, su frecuencia y su distribución espacial (severidad). Según los resultados de SENAMHI (2021b), en las campañas de papa de los años 1982-83, 1989-90, 2015-16, 1991-92, y 2004-05 se ocasionaron pérdidas totales del cultivo entre el 2 y 19 % del área analizada. Similarmente, para las campañas de quinua de los mismos años, ocurrieron pérdidas totales del cultivo entre el 0.2 % y el 5 % del área analizada y pérdidas de hasta el 80% de la cosecha entre el 7 % y el 16 % de esta área. Es interesante que únicamente la sequía agrícola para ambos cultivos en la campaña 2004-2005 no coincida con las meteorológicas más intensas identificadas por SENAMHI (2021a). Quizá, la sequía agrícola 2004-2005 acaeció durante los tres a cuatro primeros meses a partir de la siembra, periodo que estaría fuera de los meses utilizados para los análisis de las sequías meteorológicas.

Por otra parte, la frecuencia de las sequías agrícolas para ambos cultivos tiene una distribución espacial muy semejante, al ser las extremas y severas de muy baja frecuencia en la región. Asimismo, las sequías agrícolas moderadas frecuentan dos zonas muy específicas. No obstante, solo las sequías alrededor de Pizacoma podrían estar relacionadas a los periodos de retorno de las meteorológicas. En otros lugares de Puno, no existe ninguna relación aparente.

Es interesante notar que existen distritos en los que se producen sequías agrícolas para ambos cultivos en todas o en la mayoría de las campañas agrícolas analizadas en el estudio (SENAMHI, 2021b), lo que, a primera instancia, es ilógico desde la perspectiva del agricultor. Como se mencionó al principio, esto es debido a que el WRSI es un índice paramétrico subjetivo y que no toma en cuenta los detalles *in situ* de cada zona en la que se aplica el índice. A modo de ejemplo, en el caso de aquellas

zonas mencionadas que muestran sequías agrícolas todos los años, este comportamiento se origina porque son espacios de baja irrigación, lo que no se toma en cuenta en el cálculo del WRSI. Como consecuencia, se puede afirmar que el WRSI sobreestima las áreas de sequía en comparación con la realidad. Similares resultados se presentan en los análisis de severidad de las sequías agrícolas para ambos cultivos, en los que algunos distritos alcanzan severidades mayores del 80 % en más del 70 % de los años estudiados.

¿Cómo puedo hacerme más resiliente ante la siguiente sequía?

Cuanta mayor agua pueda almacenar un perfil de suelo, menor será la exposición de un cultivo a su falta. Un buen suelo con buena capacidad de retención podrá brindar agua por un mayor número de días para suplir los requerimientos hídricos, por lo que sería independiente del régimen de lluvias. Precisamente, la acumulación de materia orgánica en el suelo es una forma de manejo que mejorará la retención de agua de este. De esta manera, deben realizarse campañas de concientización hacia los agricultores para que protejan y mejoren la calidad de sus suelos como una alternativa de protección contra las sequías agrícolas.

La determinación de la fecha de siembra de un cultivo está normalmente basada en un calendario (fijo todos los años), fecha que probablemente haya pasado de generación en generación en la región de Puno. Sin embargo, ya existen técnicas que aprovechan los pronósticos climáticos estacionales no solo para determinar la mejor fecha de siembra, sino, también, la mejor variedad a sembrar (ej. si se pronostica una temporada corta de lluvia, se cultivan variedades de periodo corto o, si se adelantan las lluvias, se puede sembrar antes de la temporada normal, etc.) (Baigorria y Romero, 2019). Si bien el cambio de variedades no es una alternativa posible para que los agricultores produzcan su propia semilla, la alteración de fechas de siembras basada en el pronóstico del clima estacional sí es una opción real y eficaz.

En efecto, la incentivación de la cosecha y almacenamiento de agua de lluvia (ver Figura 7), así como la instalación de sistemas de irrigación de alta precisión para optimizar el uso del agua almacenada, sobre todo la del lago Titicaca, ya muestran indicios en el uso de agua del lago.

Figura 7

*Cosecha de agua de lluvia.
Distrito de Mañazo, provincia
de Puno – Puno, Perú*



Nota. Tomado de Proyecto Pachayatiña/Pachayachay



¿Qué sugerencias pueden brindarse para pronosticar, prevenir y/o mitigar los efectos de una sequía en Puno?

- * De acuerdo con el patrón espacial de distribución de inicio de lluvia de norte a sur, el monitoreo operacional de lluvias al norte de Puno proporcionará un indicio del comienzo o no de las lluvias en el resto del departamento. Esto nos da aproximadamente de tres a cuatro semanas para saber con anticipación la llegada de las lluvias al sur de Puno. De igual manera, el monitoreo operacional del fin de las lluvias al sur de la región sirve para proyectarla en el resto del departamento hasta con 23 días de anticipación. De modo general, con ambos monitoreos, se tiene por lo menos, 25 días (en promedio) de información para la toma de decisiones, sobre todo agrícolas.
- * Se recomienda contar con (1) un sistema operativo del cálculo del SPI a diferentes escalas temporales para detectar una sequía en progreso, (2) un monitoreo sistemático de las anomalías de lluvias para cuantificar los déficits y (3) un seguimiento de la precipitación diaria para detectar el punto de quiebre en el que se declararía una sequía en proceso. Por ejemplo, el número de días secos consecutivos activarían de inmediato el sistema de prevención de desastres y/o el sistema de emergencia ante sequías.
- * Se sugiere priorizar próximos estudios e investigaciones para validar, ajustar y encontrar equivalencias entre los umbrales teóricos del SPI y los índices de sequía agrícola como el WRSI, e incluir también en el análisis las condiciones locales de nuestro país, para contar con un mejor monitoreo y pronóstico de sequías.
- * Se puede recomendar aplicar otro análisis estadístico aún más complejo que los usados en SENAMHI (2021a) llamado Correlaciones Canónicas, que se basa en validación cruzada (Barnston y van den Dool, 1993; Efron y Tibshirani, 1993; Shao, 1993; Baigorria et al., 2008), validación retroactiva (Landman et al., 2001; Wilks, 2006; Baigorria et al., 2008) y, de manera operacional, validación CR (Baigorria et al., 2010). Ciertamente existe un reciente estudio que emplea una metodología con estos componentes principales (SENAMHI, 2021c), aunque fue elaborado utilizando métodos multivariados de optimización de modelos (*stepwise*) (Wilks, 2006; Baigorria, 2007). Esto posibilita determinar las potenciales variables a usar en métodos más completos mirando hacia el pronóstico de sequías basados en validación. El análisis permitirá determinar

los patrones espaciales y temporales de las sequías a nivel regional en Puno y correlacionarlos con patrones espaciales y temporales atmosféricos más complejos. Esto junto con procesos de validación cruzada examinarán con mayor precisión y robustez estadística la posibilidad de pronosticar sequías en la región. A partir de que el estudio de SENAMHI (2009) llegó a delimitar patrones espacio/temporales basados en el Análisis de Componentes Principales a nivel nacional, se halló que las sequías moderadas y severas poseen un patrón regional a escala mensual y trimestral, particularmente en Arequipa, Puno, Huancavelica, Lima y Junín, mientras que las sequías severas a una escala anual presentan un patrón regional en Arequipa, Puno y la selva norte. Por ello, es muy probable que estos patrones, considerando los datos actualizados del estudio reciente del SENAMHI (2021a), no hayan variado sustancialmente.

- * Es pertinente fortalecer los equipos de trabajo de predicción S2S (Subseasonal-to-Seasonal) para impulsar la investigación y la especialización en el pronóstico a esta escala de tiempo.
- * Se puede mejorar la eficiencia del manejo agrícola en la región de Puno mediante el uso de equipos de sensoramiento proximal y sistemas de inteligencia artificial. Con esta tecnología, es posible aumentar la producción agrícola durante los años climáticamente buenos. Cada zona de producción mantiene una relación entre el número de años buenos y malos. En varias oportunidades, muchos años que potencialmente podrían ser buenos, se tornan malos por alguna desafortunada decisión agronómica. El uso de herramientas digitales disminuiría el número posible de malas decisiones, lo que incrementaría la cantidad de años buenos versus malos. Así, se reduce el riesgo para los productores de la zona, los agricultores acceden a condiciones económicas más estables y, en mediano plazo, serán más resilientes a los eventos extremos como las sequías.
- * Finalmente, se propone realizar estudios más detallados sobre el manejo agrícola durante sequías y años secos empleando modelos dinámicos de cultivos basados en procesos, tal como el *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Cropping System Model* (DSSAT-CSM) (Jones et al., 2003) para incluir condiciones más reales sobre la caracterización del efecto de sequía en los cultivos de Puno (Baigorria, 2007). Esto también facilitaría explorar alternativas de manejo agronómico en la zona para mitigar los efectos de sequías y años secos en el área de estudio.

Conclusiones:

- * No existe evidencia de una relación directa entre El Niño y las sequías en la región de Puno. No obstante, sí se detecta una relevante influencia de la variabilidad decadal e interdecadal de la TSM del Pacífico tropical centro-occidental sobre el primer componente del SPI3 de Puno (Segura et al., 2016; SENAMHI, 2021a). En otras palabras, la variabilidad decadal e interdecadal juegan un rol relevante en la modulación de los impactos hidrológicos extremos sobre los Andes centrales, por ende, en Puno.
- * Con las metodologías usadas, no se determinó ningún patrón de circulación atmosférica significativo que pueda utilizarse para el pronóstico de sequías meteorológicas sobre el departamento de Puno. Sin embargo, se determinaron tres configuraciones representativas durante el periodo de sequías, que tienen una probabilidad de presentarse entre 13 % a 33 %.
- * No existen tendencias de cambios en el inicio y/o fin de temporadas de lluvias ni en la duración del periodo de lluvias en la región de Puno.
- * La mayoría de las variables relacionadas a la precipitación (sequía) en Puno demuestran que el clima sigue siendo estacionario en la región, lo que permite confiar en las curvas de periodos de retorno de sequías con propósitos de planificación y toma de decisiones.
- * Sí existe una correspondencia entre las sequías meteorológicas más severas y las agrícolas más severas. Se requiere ampliar el estudio de sequías meteorológicas a los meses de octubre, noviembre y diciembre para poder conocer con exactitud si estas perjudicaron los cultivos desde el momento de siembra y germinación hasta su periodo vegetativo avanzado.
- * Por último, es necesario probar rangos de valores fisiológicos y morfológicos empleados para los cálculos de requerimientos de agua de otras variedades. Esto llevará a estudiar un mayor rango de posibilidades de manejo de los cultivos en la región. Además, incorporar información de la variabilidad espacial de la profundidad de suelo ayudaría significativamente para la realización de un estudio más detallado y real de las sequías agrícolas.

Referencias:

- Andrade, M. (Ed.) 2018. *Atlas - Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-Bolivia 1981-2010*. Geographica Bernensia. http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/atlas_clima_y_eventos_extremos_del_altiplano_central_peru_boliviano.pdf
- Alamgir, M., Shahid, S., Hazarika, M. K. y Nashrullah, S. (2015). Analysis of Meteorological Drought Pattern during Different Climatic and Cropping Seasons in Bangladesh. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 51(3): 794- 806. <https://doi.org/10.1111/jawr.12276>
- Baigorria, G. (2007). Assessing the Use of Seasonal Climate Forecasts to Support Farmers in the Andean Highlands en M.V.K, Sivakumar y J. Hansen (Ed.), *Climate Prediction and Agriculture*. (pp. 99-110). Springer Verlag.
- Baigorria, G. y Romero, C. (2010). Applications of Climatic Resources in Mountainous Areas en OMM (Ed) *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (N°134). Commission for Agricultural Meteorology (CAgM) of the World Meteorological Organization (WMO).
- Baigorria, G. y Romero, C. (2019). *Guía Práctica de Bolsillo: Uso de Información Meteorológica en Agricultura*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Ministerio del Ambiente.
- Baigorria, G., Hansen, J., Ward, N., Jones, J. y O'Brien, J. (2008). Assessing predictability of cotton yields in the Southeastern USA based on regional atmospheric circulations and surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 76-91. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1523.1>
- Baigorria, G., Chelliah, M., Mo, K., Romero, C., Jones, J., O'Brien, J. y Higgins, R. (2010). Forecasting cotton yield in the southeastern USA using coupled global circulation models. *Agronomy Journal*, 102(1), 187-196. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0201>
- Barnston, A. y van den Dool, H. (1993). A degeneracy in cross-validated skill in regression-based forecast. *Journal of Climate*, 6(5), 963-977. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0963:ADICVS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0963:ADICVS>2.0.CO;2)
- Campos, H. y Ortiz, O. (Eds). (2020). *The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*. Springer. doi:10.1007/978-3-030-28683-5.
- Caviedes, C. (2001). *El Niño in history: Storming through the ages*. (1a ed) University Press of Florida.
- Coates A. y Ng, A. (2012). Learning Feature Representations with K-Means en G. Montavon, G. Orr y K. Muller (Ed.), *Neural Networks: Tricks of the Trade. Lecture Notes in Computer Science*, (vol 7700). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_30
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. (1977). *Crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. <http://www.fao.org/3/a-f2430e.pdf>
- Efron, B. y Tibshirani, R. (1993). *An introduction to the bootstrap*. (N° 57). Chapman and Hall.
- EUROCLIMA, AESCI, AEFD. (s/f). Ficha de modelo para la formulación de intervenciones Euroclima+. [Archivo PDF].
- Garay, O. (2009). *Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos*. IGP.

- Guttman, N. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *Journal of the American Weather Resources Association* 35, 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P., Singh, U., Gijssman, A. y Ritchie, J. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235-265.
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., y Mosquera, K. (2008). El Niño-related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, 14, 231-237. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00297103/document>
- Landman, W., Mason, S., Tyson, P. y Tennant, W. (2001). Retro-active skill of multi-tiered forecasts of summer rainfall over southern Africa. *International Journal of Climatology*, 21, 1-19. <https://doi.org/10.1002/joc.592>
- Lavado, C. y Espinoza, J. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*. 29(2). <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003>
- Lavado, W., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. y Guyot, J. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004) Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 1-18. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Lenters, J. y Cook, K. (1999). Summertime precipitation variability over South America: role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review*, 127, 409-431. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2)
- Liebmann, B. y Marengo, J. (2001). Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian amazon basin. *Journal of Climate*, 14, 4308-4318. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2)
- McKee, T., Doesken, N. y Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. 179-183.
- Organización Meteorológica Mundial. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre la generación de un conjunto definido de productos nacionales de vigilancia del clima*. OMM. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4215
- Ropelewski, C. y Halpert, M. (1987). Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115(8): 1606-1626. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2)
- Segura, H., Espinoza, J., Junquas, C. y Takahashi, K. (2016). Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094016. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/094016>
- SENAMHI. (2009). *Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030*. (Obregón G., A. Díaz, G. Avalos, G. Rosas, D. Acuña, C. Oria, A. Llacza, R. Miguel). Estudio desarrollado en el marco de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. SENAMHI y PNUMA.
- SENAMHI. (2019). *Orientaciones para el análisis del clima y determinación de los peligros asociados al cambio climático* (Nota Técnica N° 001-2019). <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-12.pdf>
- SENAMHI. (2021a). *Caracterización de sequías meteorológicas en el departamento de Puno*. (Correa, K., V. Castro, A. Rodríguez, F. Cubas, G. Avalos, N. Quispe, K. Quispe y C. Barreto). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. SENAMHI – HELVETAS – PREDES.

- SENAMHI. (2021b). *Caracterización de la sequía agrícola para los cultivos de papa y quinua en el departamento de Puno*. (Tello, C. y K. Quevedo). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. SENAMHI – HELVETAS – PREDES.
- SENAMHI. (2021c). *Pronóstico de sequías meteorológicas*. (Rivera, P., Y. Escajadillo y J. Llamocca). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. 2021. SENAMHI – HELVETAS – PREDES.
- SENAMHI. (2021e). *Atlas climático del departamento de Puno*. (Castro A., G. Avalos, F. Cubas, K. Correa, C. Davila, D. Marín, J. Urbiola, L. Menis, I. Trebejo, G. de la Cruz, V. Castro, P. Porras, C. Febre, C. Barreto, Y. Escajadillo, S. Sulca, L. Suca y D. Rodríguez). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. SENAMHI - HELVETAS - PREDES.
- Shao, J. (1993). Linear model selection by cross-validation. *Journal of the American Statistical Association* 88(422), 486-494. <https://doi.org/10.2307/2290328>
- Silva, Y., Takahashi, K. y Chávez, R. (2008). Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*, 14, 261-264. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00297108>
- Takahashi, K. (2004). The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997-1998 and 2002 El Niño. *Annales Geophysicae*, 22, 3917–3926. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00317738/document>
- Valdivia, C. (2001). Gender, livestock assets, resource management, and food security: Lessons from the SR-CRSP. *Agriculture and Human Values*, 18(1), 27-39. <https://doi.org/10.1023/A:1007613031102>
- Valdivia, C., Dunn, E. y Jetté, C. (1996). Diversification as a Risk Management Strategy in an Andean Agropastoral Community. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), 1329-1334. <https://doi.org/10.2307/1243516>
- Vallaux, C. (1930). The question of the Humboldt Current. *The International Hydrographic Review*, 7(1):66 – 74.
- Wilks, D. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. (2a edición). Elsevier.
- Woodman, R. (1999). *Modelo estadístico de pronóstico de las precipitaciones en la costa norte del Perú. El Fenómeno El Niño. Investigación para una prognosis*. 1er encuentro de Universidades del Pacífico Sur.



Proyecto “Información, gobernanza y acción para la reducción del riesgo de sequías en Perú y Bolivia en un contexto de cambio climático”

Pachayatiña/Pachayachay

Este proyecto forma parte de EUROCLIMA+



Financiado por
la Unión Europea

www.euroclimaplus.org

Agencias implementadoras de Gestión de Riesgos



aecid
Agencia Española
de Cooperación
Internacional
para el Desarrollo



AFD
AGENCE FRANÇAISE
DE DÉVELOPPEMENT

Entidad coordinadora:



Consortio integrado por:

